

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к лабораторным работам по электротехническим дисциплинам для
студентов технологических специальностей**

ВИТЕБСК
2017

УДК 621.3(07)

Электрические цепи постоянного тока: методические указания к лабораторным работам по электротехническим дисциплинам для студентов технологических специальностей

Витебск, Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2016.

Составители: доц. Ильющенко А.В.,
ст. преп. Куксевич В.Ф.

Методические указания к лабораторным работам по электротехническим дисциплинам содержат правила техники безопасности и организации лабораторных работ, теоретический материал, необходимый для исследования схем электрических цепей постоянного тока, снятия экспериментальных характеристик и их расчёта и перечень используемой литературы.

Одобрено кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» УО «ВГТУ» 22.09.2016 г., протокол № 2.

Рецензент: доц. Новиков Ю.В.

Редактор: ст. преп. Клименкова С.А.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ» 26 октября протокол № 8.

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Подписано к печати 17.03.17. Формат 60x90 1/16. Уч.-изд. лист. 1.5.

Печать ризографическая. Тираж 40 экз. Заказ № 108

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя-изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/172 от 12.02.2014 г.

210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

Содержание

Правила техники безопасности и организации лабораторных работ	4
Краткое описание стенда УИЛС-1	5
Лабораторная работа № 1 <i>Ознакомление с приборами и аппаратами лабораторного курса и порядком измерения основных электрических величин</i>	7
Лабораторная работа № 2 <i>Исследование основных режимов работы простейшей электрической цепи постоянного тока</i>	10
Лабораторная работа № 3 <i>Исследование соединений элементов в простейших цепях постоянного тока</i>	15
Лабораторная работа № 4 <i>Анализ разветвленной цепи постоянного тока с одним источником э.д.с.</i>	22
Лабораторная работа № 5 <i>Экспериментальная проверка метода непосредственного применения законов Кирхгофа для расчета сложной электрической цепи постоянного тока</i>	27
Лабораторная работа № 6 <i>Экспериментальная проверка метода наложения для расчета сложной электрической цепи постоянного тока</i>	32
Лабораторная работа № 7 <i>Экспериментальная проверка метода контурных токов для расчета сложной электрической цепи постоянного тока</i>	36
Лабораторная работа № 8 <i>Экспериментальная проверка метода напряжения между двумя узлами для расчета сложной электрической цепи постоянного тока</i>	40
Литература	44

Правила техники безопасности и организации лабораторных работ

При нарушении правил техники безопасности стенды лаборатории могут оказаться источником опасности поражения электрическим током. Поражение электрическим током тела человека может привести к тяжелым поражениям нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем. Опасность возрастает с увеличением напряжения, так как при больших напряжениях протекают большие токи. В связи с этим во время лабораторных занятий необходимо строго соблюдать правила техники безопасности:

а) доступ к стендам и аппаратуре во время занятий производится только с разрешения преподавателя;

б) перед началом сборки электрической цепи на стенде убедиться, что все источники питания отключены, проверить исправность изоляции, состояние наконечников и штырей соединительных проводов;

в) включение стенда под напряжение выполнять только после проверки преподавателем или лаборантом правильности сборки схемы;

г) в случае возникновения неисправностей приборов или других элементов исследуемой цепи должны быть отключены все источники питания стенда;

д) при выполнении работы строго запрещается касаться руками, авторучкой, карандашом и другими предметами неизолированных точек или участков цепи, находящихся под напряжением;

е) всем студентам до начала лабораторных занятий необходимо ознакомиться с инструкцией по технике безопасности, имеющейся в лаборатории и строго соблюдать ее положения во время лабораторных занятий.

При проведении занятий в лаборатории учебная группа делится на бригады. Каждый студент должен иметь свою рабочую тетрадь для записей результатов измерений и графических построений во время лабораторных занятий.

При оформлении отчета по очередной лабораторной работе в рабочей тетради необходимо записать название и цель работы, начертить электрические схемы исследуемых цепей, таблицы для занесения экспериментальных и расчетных результатов и записать формулы, необходимые для выполнения вычислений.

После того, как необходимые вычисления выполнены и экспериментальные данные проверены преподавателем, стенд отключается, исследуемая цепь разбирается и далее следует обработка результатов измерений, выполнение необходимых расчетов, заполнение таблиц и окончательное оформление отчета (схемы, таблицы, графики, векторные диаграммы рекомендуется вычерчивать карандашом и обязательно с помощью чертежных инструментов строго по действующему ГОСТу).

Преподаватель проверяет оформленный отчет, графики и при отсутствии

замечаний разрешает студенту защищать работу. При этом каждому студенту задаются контрольные вопросы по теоретическим, опытным, расчетным и графическим материалам лабораторной работы. Условием защиты работы являются удовлетворительные ответы на поставленные вопросы и правильно оформленный отчет. Отчеты по работе остаются для хранения на кафедре.

Краткое описание стенда УИЛС-1

Универсальный учебно-исследовательский лабораторный стенд УИЛС-1 предназначенный для выполнения лабораторных работ по изучению электрических цепей, включает в себя пульт, набор элементов, соединительных проводов и специальный лабораторный стол. Пульт состоит из источников энергии, электронного ключа, наборного поля и регулируемых пассивных элементов.

В источники энергии входят:

- блок постоянных напряжений, содержащий источник регулируемого стабилизированного напряжения ($U = 0...25\text{ В}$, $I = 0...1\text{ А}$) и источник нерегулируемого напряжения ($U = 20\text{ В}$, $I = 0...1\text{ А}$);
- блок переменного напряжения, представляющий собой регулируемый стабилизированный источник, обеспечивающий параметры $U = 5...25\text{ В}$ и $I = 0...1\text{ А}$ при $f = 0,1...8,0\text{ кГц}$;
- блок трехфазного напряжения – трехфазный источник с независимыми фазами, напряжение которых регулируется ступенчато от 0 до 40 В через 1 В при $f = 50\text{ Гц}$. Допустимый ток – до 1 А .

При превышении током значения 1 А имеющаяся в каждом источнике защита отключает их от цепи.

Электронный ключ применяется при анализе переходных процессов и представляет собой замыкающий и размыкающий полупроводниковые ключи с внутренней либо внешней синхронизацией.

Наборное поле, расположенное в центре пульта, представляет собой панель с 67 парами гнезд, предназначенными для подключения элементов исследуемой цепи (сплошные линии на наборном поле между гнездами обозначают их электрическое соединение между собой).

Регулируемые пассивные элементы расположены справа от наборного поля и включают в себя:

- блок переменного сопротивления с возможностью получения на выходе R_4 сопротивления в диапазоне $0...999\text{ Ом}$ при допустимой мощности рассеивания – 5 Вт ;
- блок переменной емкости, обеспечивающий на выходе C_4 изменение емкости от $0,01$ до $9,99\text{ мкФ}$;
- блок переменной индуктивности, позволяющий получить на выходе L_4 индуктивность в диапазоне $0,1...99,9\text{ мГн}$ при допустимом токе до $0,2\text{ А}$.

К выходам $R_1 - R_3$, $C_1 - C_3$, $L_1 - L_3$, блоков подключены пассивные

элементы с нерегулируемыми параметрами.

В комплекс стенда входят также элементы наборного поля (стандартные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности), соединительные провода и переключки. Имеющиеся в стенде измерительные приборы предназначены только для контроля работы источников.

При помощи стенда УИЛС-1 возможно проведение исследования линейных и нелинейных электрических цепей постоянного и переменного токов, трехфазных электрических цепей, переходных процессов в электрических цепях.

Витебский государственный технологический университет

Лабораторная работа № 1

Ознакомление с приборами и аппаратами лабораторного курса и порядком измерения основных электрических величин

Цель работы: изучение правил техники безопасности и внутреннего распорядка в лаборатории, ознакомление со стендом УИЛС-1 и получение первоначальных навыков сборки электрических цепей, измерение токов, напряжений и сопротивлений.

Теоретические сведения

К основным средствам электрических измерений, представленным на универсальных стендах, относятся амперметры, миллиамперметры, вольтметры, ваттметры и омметры. Эти приборы позволяют производить непосредственные измерения тока, напряжения, мощности и сопротивления, а также косвенным методом определить сопротивления, мощности, емкости, индуктивности, коэффициент мощности и другие величины. При измерениях строго запрещается допускать превышение номинальных значений измеряемых приборами величин. Для непосредственного измерения силы тока используют амперметры (миллиамперметры). Их включают в электрическую цепь последовательно в той ветви цепи, где необходимо измерить величину тока (рисунок 1.1.). Как правило, сопротивление амперметра считается практически равным нулю.

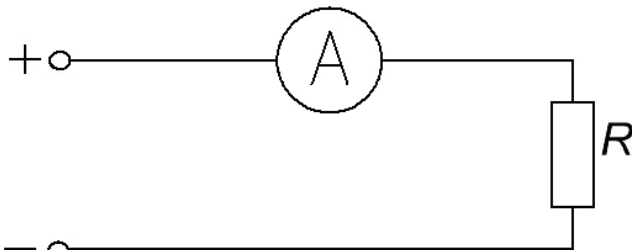


Рисунок 1.1 – Схема подключения амперметра

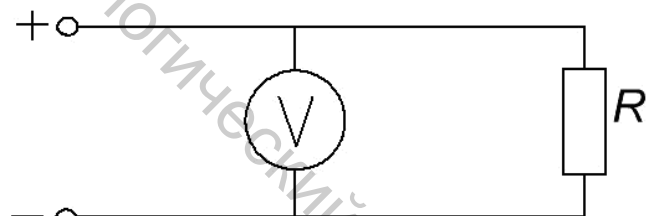


Рисунок 1.2 – Схема подключения вольтметра

Для непосредственного измерения напряжения на каком-либо участке цепи измеряющий прибор – вольтметр – включают параллельно этому участку (рисунок 1.2). Как правило, сопротивление вольтметра считается равным бесконечности.

Экспериментальные определения мощности и сопротивления пассивного участка цепи могут быть произведены непосредственно с помощью специальных приборов – ваттметров и омметров, а также рядом косвенных методов:

А. Метод амперметра-вольтметра.

Измерив ток, протекающий по данному участку цепи, напряжение на этом же участке, можно рассчитать сопротивление участка по закону Ома

$$R_x = \frac{U}{I} \quad (1.1)$$

и мощность, которая равна произведению напряжения и тока

$$P_x = U \cdot I. \quad (1.2)$$

При этом используют две схемы подключения измерительных приборов. Для измерения больших сопротивлений используют схему, представленную на рисунке 1.3 (а), а для измерения малых сопротивлений – схему, представленную на рисунке 1.3 (б).

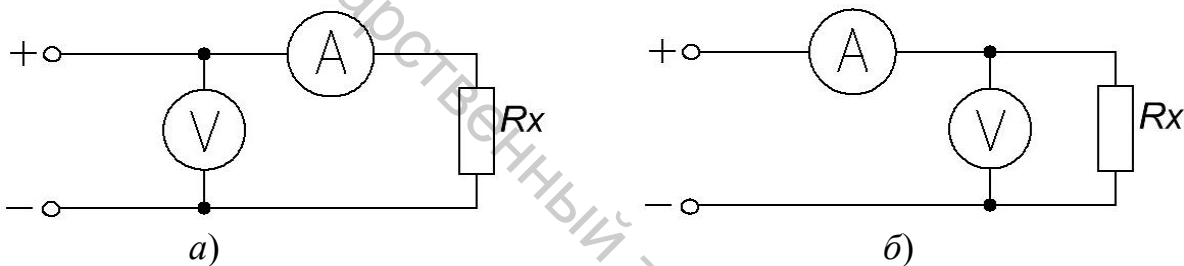


Рисунок 1.3 – Схемы измерения методом амперметра-вольтметра

Б. Метод вольтметра.

Используется для измерения малых и средних сопротивлений, путем сравнения падения напряжений на R_x с падением напряжения на последовательно включенном с R_x образцовом сопротивлении R_o (рисунок 1.4).

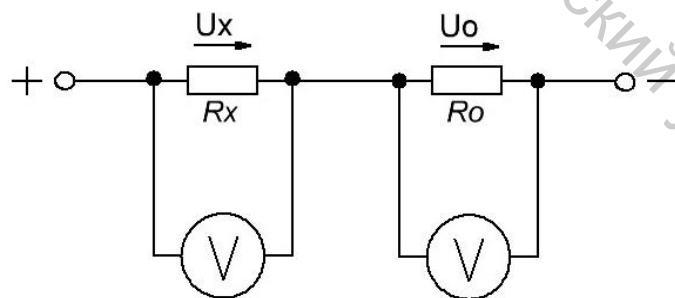


Рисунок 1.4 – Схема измерения методом вольтметра

Измерив U_x и U_o , определяем сопротивление R_x :

$$R_x = \frac{R_o \cdot U_x}{U_o}. \quad (1.3)$$

В. Измерение сопротивления с помощью мостовой схемы.

Для определения неизвестного сопротивления R_x уравнивают мостовую схему (рисунок 1.5), изменяя сопротивление плеч моста.

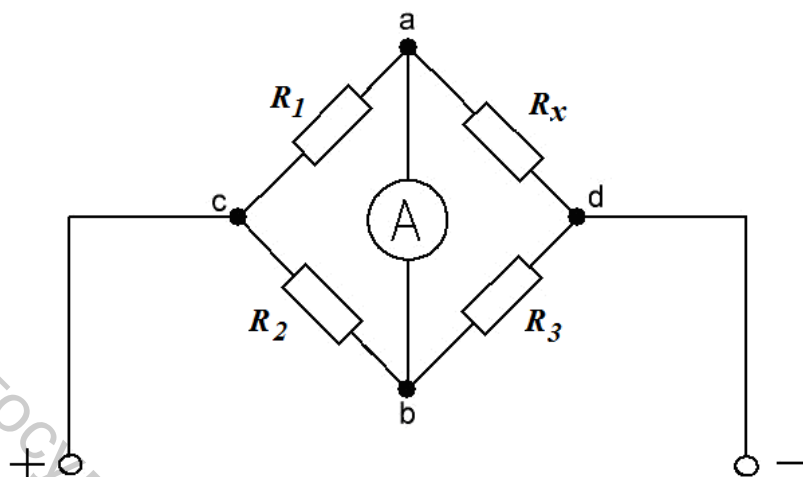


Рисунок 1.5 – Измерение сопротивления с помощью мостовой схемы

Признаком электрического равновесия моста является отсутствие тока в его диагонали ab . Если мост уравновешен, то R_x рассчитывается по формуле

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}. \quad (1.4)$$

Порядок выполнения работы

1. Произвольно выбрать из имеющихся элементов наборного поля резистор и при помощи омметра измерить его сопротивление R_x . Результат измерения занести в таблицу 1.1.

2. Измерить сопротивление выбранного резистора методом амперметра-вольтметра. Для этого вначале собрать цепь согласно рисунку 1.3(а) и, установив на входе схемы напряжение порядка 10 В , измерить ток и напряжение и рассчитать по закону Ома сопротивление R_x . Результат измерения занести в таблицу 1.1. Затем собрать цепь согласно рисунку 1.3(б) и, установив на входе схемы напряжение порядка 10 В , измерить ток и напряжение и рассчитать по закону Ома сопротивление R_x . Результаты измерений занести в таблицу 1.1

3. Измерить сопротивление выбранного резистора методом вольтметра, для чего собрать цепь согласно рисунку 1.4 и, установив на входе схемы напряжение порядка 10 В , измерить напряжения U_x и U_o . Рассчитать по формуле (1.3) сопротивление R_x . Результат измерения занести в таблицу 1.1.

4. Измерить сопротивление выбранного резистора с помощью мостовой схемы, для чего собрать цепь согласно рисунку 1.5. Резисторы R_1 и R_3 выбрать

из элементов наборного поля, при этом сопротивление каждого не должно превышать 300 Ом . В качестве резистора R_2 установить переменный резистор из блока переменного сопротивления. Подать на вход схемы напряжение порядка 10 В и, изменяя сопротивление резистора R_2 , получить в диагонали ab минимальный ток. Рассчитать по формуле (1.3) сопротивление R_x . Результат измерения занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Экспериментальные и расчетные данные

	Метод омметра	Метод амперметра-вольтметра		Метод вольтметра	Метод мостовой схемы
		по схеме рисунка 1.3(а)	по схеме рисунка 1.3(б)		
$R_x, \text{ Ом}$					

5. Сделать вывод о точности измерения сопротивления различными методами, сравнив результаты измерений со значением сопротивления, измеренным с помощью омметра, и рассчитав для каждого случая величину относительной погрешности.

Контрольные вопросы

1. Какие основные средства измерений используются на универсальных стендах, их назначение?
2. Что такое прямые и косвенные способы определения параметров элементов электрических цепей?
3. Охарактеризовать способы непосредственного измерения U, I, R .
4. В чем заключается метод амперметра-вольтметра и метод вольтметра?
5. В чем разница между двумя схемами измерения сопротивления в методе амперметра-вольтметра?
6. Охарактеризовать метод измерения сопротивления с помощью мостовой схемы.
7. Дать сравнительную оценку всем методам измерения сопротивления.

Лабораторная работа № 2

Исследование основных режимов работы простейшей электрической цепи постоянного тока

Цель работы: исследование распределения энергии на элементах простейшей электрической цепи постоянного тока при переходе от одного режима работы цепи к другому.

Теоретические сведения

Электрической цепью называется совокупность устройств, предназначенных для генерирования (получения), передачи, преобразования и использования энергии электрического тока.

Составными частями электрической цепи – элементами цепи – являются:

- источники – устройства, преобразующие различные виды энергии (механическую, тепловую, ядерную, световую и др.) в электрическую энергию;
- приемники – устройства, преобразующие электрическую энергию в другие виды энергии (механическую – в электродвигателях, тепловую – в электронагревательных элементах, электрохимическую – в электролизных ваннах);
- передающие элементы – оборудование, связывающее источники и приемники (соединительные провода).

Электрические цепи бывают разветвленными и неразветвленными, линейными и нелинейными.

Рассмотрим простейшую неразветвленную линейную электрическую цепь постоянного тока (рисунок 2.1). Эта цепь содержит источник электрической энергии с параметрами E (э.д.с.) и r_0 (внутреннее сопротивление), приемник электрической энергии (активную нагрузку) с параметром R_H (сопротивление нагрузки) и линию электропередачи с сопротивлением R_L , соединяющую источник и приемник.

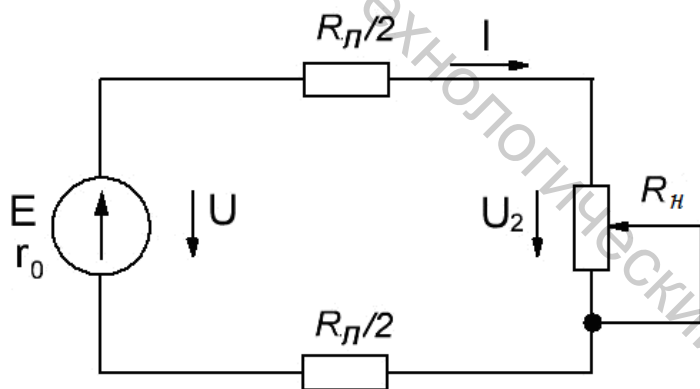


Рисунок 2.1 – Неразветвленная линейная электрическая цепь постоянного тока

Величины U и U_H на схеме (рисунок 2.1) обозначают напряжения в начале линии и на нагрузке, I – ток в электрической цепи. Так как для данной электрической цепи сопротивление внешнего участка

$$R = R_L + R_H, \quad (2.1)$$

то сила тока, протекающего в цепи, определяется согласно закону Ома для полной цепи

$$I = \frac{E}{r_0 + R}. \quad (2.2)$$

Поскольку внутреннее сопротивление источника э.д.с. зачастую во много раз меньше сопротивления внешнего участка цепи, то его в расчетах, не требующих большой точности, принимают равным нулю, что позволяет считать напряжение U на зажимах источника не зависящим от тока нагрузки и равным э.д.с. E источника.

Тогда ток цепи можно определить по формуле

$$I = \frac{U}{R_{\text{Л}} + R_{\text{Н}}}. \quad (2.3)$$

Отсюда можно выразить соотношение между напряжениями в цепи

$$U = I \cdot (R_{\text{Л}} + R_{\text{Н}}) = I \cdot R_{\text{Л}} + I \cdot R_{\text{Н}} = U_{\text{Л}} + U_{\text{Н}}, \quad (2.4)$$

где $U_{\text{Л}} = I \cdot R_{\text{Л}}$ – падение напряжения на сопротивлении линии.

Умножив выражение (2.4) на ток I , получим уравнение баланса мощности в цепи

$$U \cdot I = I^2 \cdot R_{\text{Л}} + I^2 \cdot R_{\text{Н}} = U_{\text{Л}} \cdot I + U_{\text{Н}} \cdot I \quad (2.5)$$

или

$$P = P_{\text{Л}} + P_{\text{Н}}, \quad (2.6)$$

где $P = U \cdot I$ – мощность, отдаваемая источником в цепь; $P_{\text{Н}} = U_{\text{Н}} \cdot I$ – мощность, потребляемая приемником; $P_{\text{Л}} = U_{\text{Л}} \cdot I$ – потери мощности в линии.

Так как сопротивление нагрузки в цепи может быть как равным нулю, так и бесконечно большим, то такие параметры как I , $U_{\text{Н}}$ с изменением сопротивления $R_{\text{Н}}$ будут изменяться от минимальных до максимальных значений. Каждому режиму работы электрической цепи соответствуют определенные значения этих параметров. Из множества режимов работы характерными для любой электрической цепи являются следующие 4 режима:

1. Режим холостого хода – режим работы, при котором электрическая цепь разомкнута ($R_{\text{Н}} = \infty$). При этом $I = 0$, $U_{\text{Н}} = U$.

2. Режим короткого замыкания – режим работы, при котором электрическая цепь в точках 2 - 2' замкнута накоротко ($R_{\text{Н}} = 0$). Тогда $U_{\text{Н}} = 0$, а ток имеет наибольшее значение

$$I = \frac{U}{R_{\text{Л}}} = I_{\text{MAX}}.$$

3. Номинальный режим – режим работы при определенных заводом-изготовителем значениях I , U , P для длительной работы данного устройства (цепи).

4. Согласованный режим – режим работы, при котором к нагрузке подводится наибольшая, в сравнении с другими режимами, мощность. Данный режим достигается, когда сопротивление нагрузки равно сопротивлению остальной части цепи, т. е. $R_{\text{H}} = R_{\text{Л}}$.

Величина мощности, потребляемой при этом нагрузкой, определяется выражением

$$P_{\text{H}} = I^2 \cdot R_{\text{H}} = \left(\frac{U}{R_{\text{Л}} + R_{\text{H}}} \right)^2 \cdot R_{\text{H}} = \frac{U^2}{4 \cdot R_{\text{H}}} \cdot R_{\text{H}} = \frac{U^2}{4 \cdot R_{\text{H}}} = P_{\text{H MAX}}. \quad (2.7)$$

Все вышеперечисленные режимы могут быть достигнуты путем изменения сопротивления нагрузки R_{H} .

Важной характеристикой любой электрической цепи является её коэффициент полезного действия, определяемый по формуле

$$\eta = \frac{P_{\text{H}}}{P} = \frac{U_{\text{H}} \cdot I}{U \cdot I} = \frac{U_{\text{H}}}{U}. \quad (2.8)$$

Из (2.8) следует, что к.п.д. электрической цепи изменяется от 1 в режиме холостого хода до 0 в режиме короткого замыкания. В согласованном режиме $\eta = 0,5$.

Порядок выполнения работы

1. Используя омметр, выбрать из комплекта элементов наборного поля два резистора R_1 и R_2 так, чтобы их суммарное сопротивление было примерно равно 500 Ом . Сопротивление данных резисторов, имитирующее сопротивление проводов линии электропередачи ($R_1 + R_2 = R_{\text{Л}}$), указать в отчете.

2. Собрать схему (рисунок 2.2), состоящую из регулируемого источника постоянного напряжения, резисторов R_1 и R_2 , переменного резистора R_{H} (резистора R_4 блока переменного сопротивления), являющегося нагрузкой, и измерительных приборов.

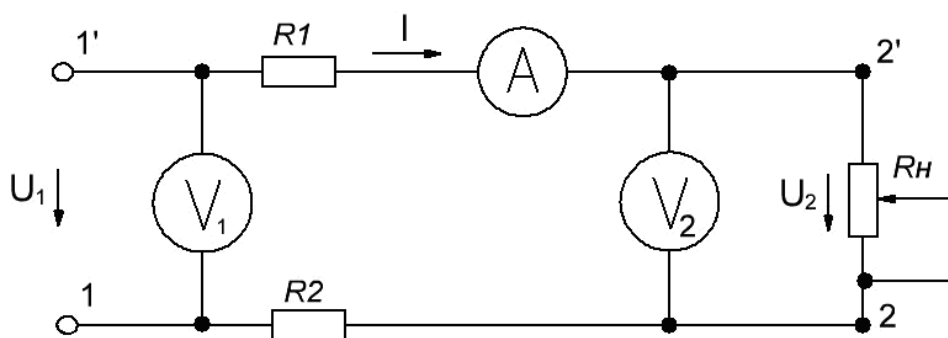


Рисунок 2.2 – Схема для исследования неразветвленной линейной электрической цепи постоянного тока

3. Исследовать схему в режиме холостого хода, для чего при отключенной нагрузке R_H в точках 2 – 2' установить заданное преподавателем значение напряжения источника U_1 . Показания приборов для режима занести в таблицу 2.1.

4. Подключить нагрузку к линии. Установить значение сопротивления переменного резистора $R_H = 900 \text{ Ом}$ и, дискретно через 100 Ом уменьшая его до нуля, снять полученные данные и занести их в таблицу 2.1.

5. Рассчитать величины, содержащиеся в таблице 2.1 в графе «Вычислено» и указать названия режимов работы электрической цепи в графе «Режим работы».

6. По полученным значениям построить графики:

- а) $U(I)$; $U_H(I)$; $U_L(I)$,
- б) $P_H(I)$; $P_H(I)$; $P_L(I)$,
- в) $\eta(I)$.

Таблица 2.1 – Экспериментальные и расчетные данные

	Режим работы	Измерено			Вычислено					
		$U, \text{В}$	$U_H, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$U_L, \text{В}$	$P_{\text{И}}, \text{мВт}$	$P_H, \text{мВт}$	$P_L, \text{мВт}$	$R, \text{Ом}$	$\eta, \%$
1.										
2.										
3.										
...										
11.										

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая цепь и из каких элементов она состоит?
2. Назовите основные элементы и параметры простейшей электрической цепи постоянного тока.
3. Составьте и объясните уравнение баланса мощности для простейшей

электрической цепи постоянного тока.

4. В чем заключается режим холостого хода? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?

5. В чем заключается режим короткого замыкания? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?

6. В чем заключается номинальный режим? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?

7. В чем заключается согласованный режим? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?

8. Опишите изменение указанного преподавателем параметра электрической цепи с увеличением тока в данной цепи.

Лабораторная работа № 3

Исследование соединений элементов в простейших цепях постоянного тока

Цель работы: экспериментальная проверка основных теоретических соотношений и зависимостей между токами, напряжениями, сопротивлениями и мощностями при различных способах соединений элементов в простейших электрических цепях постоянного тока.

Теоретические сведения

Многие электрические цепи состоят из одного источника энергии и некоторого числа пассивных элементов. К основным способам соединения элементов электрических цепей относят следующие:

1. Последовательное соединение – соединение, при котором конец предыдущего элемента цепи связан с началом последующего (рисунок 3.1). При этом через все элементы такого соединения протекает один и тот же ток:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I. \quad (3.1)$$

Общее напряжение (напряжение источника) равно сумме напряжений на всех последовательно включенных элементах цепи:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = U_1 + U_2 + U_3. \quad (3.2)$$

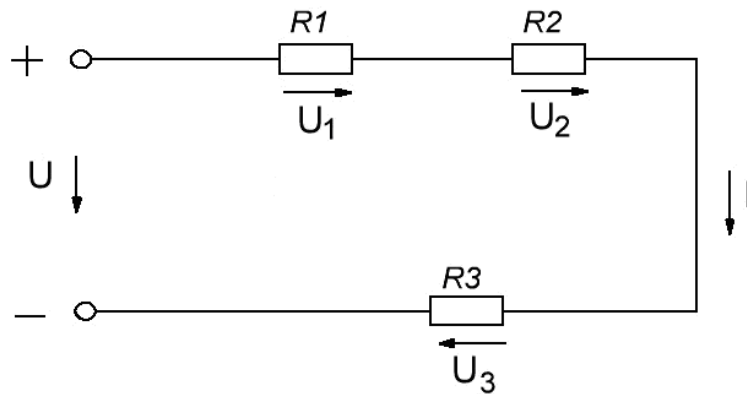


Рисунок 3.1 – Схема последовательного соединения элементов

Согласно закону Ома для участка цепи

$$U_1 = I \cdot R_1; \quad U_2 = I \cdot R_2; \quad U_3 = I \cdot R_3; \quad (3.3)$$

Из (3.3) следует, что напряжения на последовательно включенных элементах прямо пропорциональны их сопротивлениям.

Общее (эквивалентное) сопротивление последовательной цепи равно сумме сопротивлений всех входящих в нее элементов:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + R_3. \quad (3.4)$$

Мощность последовательной цепи равна сумме мощностей отдельных элементов цепи:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 I + U_2 I + U_3 I = I^2 R_1 + I^2 R_2 + I^2 R_3. \quad (3.5)$$

Последовательное соединение проводников применяется, как правило, в тех случаях, когда общее напряжение ветви оказывается выше номинальных (указанных в паспортных данных) напряжений отдельных элементов цепи с целью регулирования напряжения, тока или мощности, подводимых к этим элементам.

Характерная особенность последовательного соединения – взаимозависимость режимов работы составляющих последовательную цепь элементов. Так, при изменении сопротивления одного из элементов цепи изменяются ток, напряжение и мощность других элементов. При выходе из строя одного из последовательно соединенных элементов работа других прекращается.

2. Параллельное соединение – соединение, при котором концы элементов цепи соединяются между собой в одном узле, а начала элементов цепи

соединяются между собой в другом узле. К образовавшимся двум узлам подключается источник электрической энергии (рисунок 3.2.).

Все элементы цепи с параллельным соединением элементов находятся под одним и тем же напряжением

$$U_1 = U_2 = U_3 = U. \quad (3.6)$$

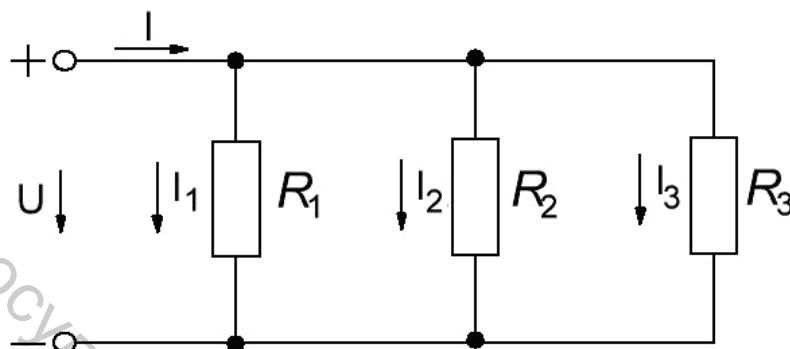


Рисунок 3.2 – Схема параллельного соединения элементов

Общий ток в цепи равен сумме токов, протекающих через параллельно соединенные элементы:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = I_1 + I_2 + I_3. \quad (3.7)$$

Общее (эквивалентное) сопротивление цепи определяется выражением

$$\frac{I}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{I}{R_i} = \frac{I}{R_1} + \frac{I}{R_2} + \frac{I}{R_3}. \quad (3.8)$$

Эквивалентное сопротивление двух параллельно соединенных проводников определяется выражением

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.9)$$

Выражение (3.8) можно переписать для проводимостей

$$g = \sum_{i=1}^n g_i = g_1 + g_2 + g_3, \quad (3.10)$$

Откуда следует, что общая (эквивалентная) проводимость параллельной

цепи равна сумме проводимостей составляющих ее элементов. Поэтому с увеличением числа параллельно подключенных элементов эквивалентная проводимость цепи возрастает, а ее эквивалентное сопротивление уменьшается. Эквивалентное сопротивление параллельной цепи будет всегда меньше самого малого сопротивления, включенного в цепь.

Мощность всей цепи равна сумме мощностей отдельных, параллельно включенных элементов:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 = UI_1 + UI_2 + UI_3 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3. \quad (3.11)$$

При параллельном соединении включение, отключение или изменение сопротивления одного из элементов цепи на режим работы остальных элементов не влияет.

3. Смешанное соединение – соединение, представляющее собой комбинацию участков с последовательно и параллельно соединенными элементами (рисунок 3.3). К отдельным участкам такой цепи применимы соотношения между напряжениями, токами и сопротивлениями, действующими в параллельной и последовательной цепях.

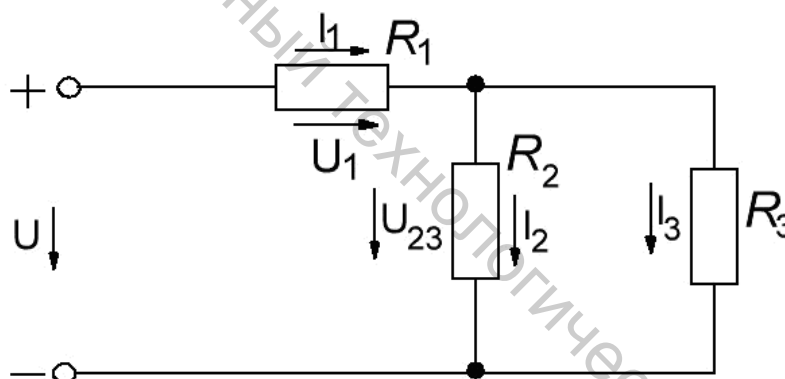


Рисунок 3.3 – Схема смешанного соединения элементов

Расчет электрической цепи со смешанным соединением элементов проводят путем преобразования ее в более простую – последовательную цепь – заменой параллельно соединенных элементов одним эквивалентным элементом и дальнейшей заменой всех последовательно включенных элементов одним эквивалентным сопротивлением. Так, для электрической цепи (рисунок 3.3) вначале определяют эквивалентное сопротивление параллельных элементов:

$$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.12)$$

Затем определяют эквивалентное сопротивление всей цепи, состоящей

теперь из последовательно включенных R_1 и $R_{2,3}$:

$$R = R_1 + R_{2,3}. \quad (3.13)$$

При необходимости, используя закон Ома для участка цепи и основные соотношения параметров последовательных и параллельных цепей, можно определить значения токов и напряжений на участках данной цепи.

Мощность электрической цепи со смешанным соединением элементов равна сумме мощностей элементов, входящих в нее:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3. \quad (3.14)$$

Последовательное, параллельное и смешанное соединения являются базовыми соединениями цепей постоянного тока.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 3.4. В качестве резистора R_2 выбрать резистор из элементов наборного поля с сопротивлением 510 Ом . Переменный резистор R_1 установить, используя блок переменного сопротивления.

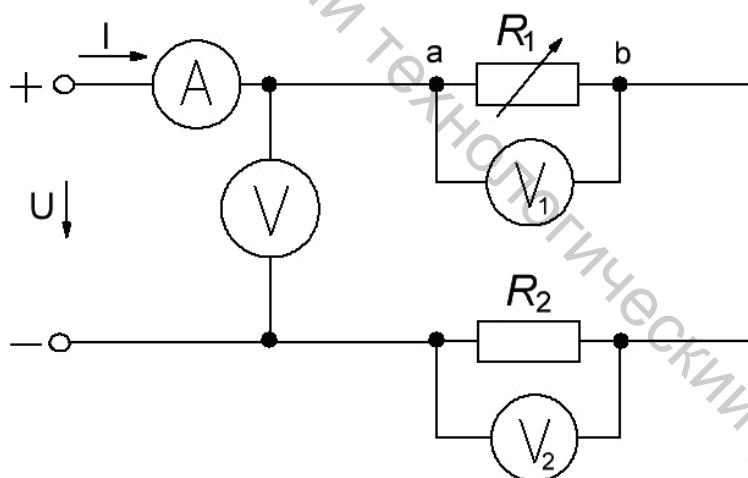


Рисунок 3.4 – Схема исследования последовательного соединения элементов

На вход электрической цепи подать постоянное напряжение 10 В . Изменяя сопротивления резистора R_1 от 0 до 900 Ом с интервалом 100 Ом , а затем разомкнув цепь в точках $a, в$ ($R_1 = \infty$), исследовать зависимости тока в цепи и напряжений на элементах цепи от величины сопротивления R_1 . Результаты измерений внести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Экспериментальные и расчетные данные

№ опыта	Экспериментальные данные				Расчетные данные					
	I, mA	U_1, B	U_2, B	U, B	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R, Ом$	$P_1, мВт$	$P_2, мВт$	$P, мВт$
1.										
...										
11.										

Используя экспериментальные и расчетные данные, построить графики зависимостей

$$I = f(R_1); \quad U = f(R_1); \quad U_1 = f(R_1); \quad U_2 = f(R_1); \quad P = f(R_1).$$

2. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 3.5. В качестве резистора R_2 выбрать резистор из элементов наборного поля с сопротивлением 510 Ом . Переменный резистор R_1 установить, используя блок переменного сопротивления. На вход электрической цепи подать постоянное напряжение 10 В . Изменяя сопротивление резистора R_1 от 100 до 900 Ом с интервалом в 100 Ом , а затем, отключив резистор R_1 от цепи ($R_1 = \infty$), исследовать зависимости общего тока и токов в параллельных ветвях цепи от величины сопротивления R_1 . Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

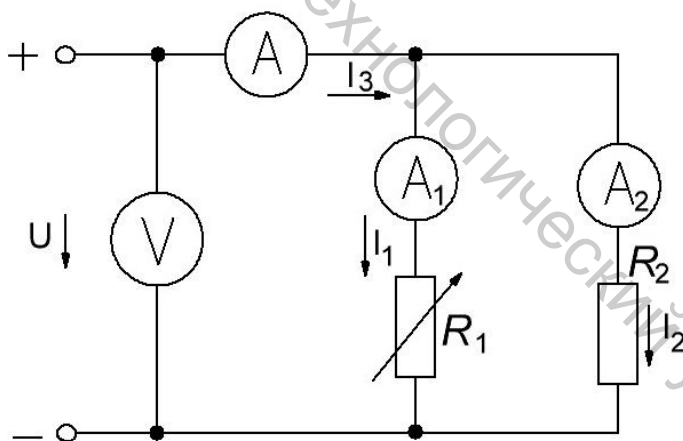


Рисунок 3.5 – Схема исследования параллельного соединения элементов

Используя экспериментальные и расчетные данные, построить графики зависимостей

$$I_1 = f(R_1); \quad I_2 = f(R_1); \quad I_3 = f(R_1); \quad P_1 = f(R_1); \quad P_2 = f(R_1); \quad P = f(R_1).$$

Таблица 3.2 – Экспериментальные и расчетные данные

№ опыта	Экспериментальные данные			Расчетные данные						
	$U, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R, Ом$	$P_1, мВт$	$P_2, мВт$	$P, мВт$
1.										
...										
11.										

3. Собрать электрическую цепь по схеме, представленную на рисунке 3.6. Резисторы R_1 и R_2 выбрать произвольно из числа элементов наборного поля. Переменный резистор R_3 установить, используя блок переменного сопротивления. На вход электрической цепи подать постоянное напряжение $10 В$. Изменяя сопротивление резистора R_3 от 0 до $900 Ом$ с интервалом в $100 Ом$, а затем, отключив резистор R_3 от цепи ($R_3 = \infty$), исследовать зависимость общего тока, токов в параллельных ветвях и напряжений на участках цепи от величины сопротивления R_3 . Результаты измерений занести в таблицу 3.3.

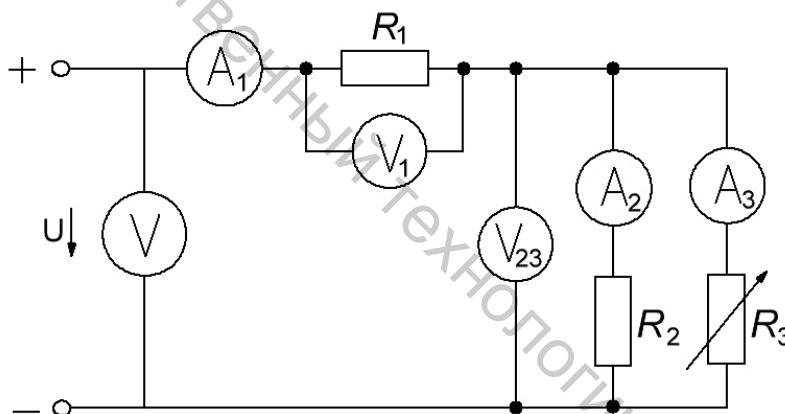


Рисунок 3.6 – Схема исследования смешанного соединения элементов

Используя экспериментальные и расчетные данные, построить графики зависимостей

$$I_1 = f(R_3); I_2 = f(R_3); I_3 = f(R_3); U_1 = f(R_3); U_{2,3} = f(R_3); U = f(R_3);$$

$$P_1 = f(R_3); P_2 = f(R_3); P_3 = f(R_3); P = f(R_3).$$

Таблица 3.3 – Экспериментальные и расчетные данные

№ опыта	Экспериментальные данные						Расчетные данные							
	U	U_1	$U_{2,3}$	I_1	I_2	I_3	R_1	R_2	R_3	R	P_1	P_2	P_3	P
	$В$			$мА$			$Ом$				$мВт$			
1.														
...														
11.														

Контрольные вопросы

1. Какие основные типы соединений элементов используются в электрических цепях постоянного тока и как они образуются?
2. Охарактеризовать основные параметры электрических цепей постоянного тока при последовательном соединении элементов в них.
3. Охарактеризовать основные параметры электрических цепей постоянного тока при параллельном соединении элементов в них.
4. Охарактеризовать основные параметры электрических цепей постоянного тока при смешанном соединении элементов в них.
5. Как влияет изменение сопротивления одного из элементов электрической цепи на режим работы цепи при различных типах соединений элементов в ней?

Лабораторная работа № 4

Анализ разветвленной цепи постоянного тока с одним источником э.д.с.

Цель работы: экспериментальное подтверждение аналитических расчетов основных электрических параметров разветвленной цепи постоянного тока с одним источником э.д.с.

Теоретические сведения

В практике наиболее часто приходится встречаться с задачами расчета разветвленных цепей постоянного тока с одним источником питания. Рассматривая схемы таких цепей, можно выделить в них характерные участки:

- ветвь – участок электрической цепи, по которому протекает один и тот же ток;
- узел – место (точка) соединения трех и более ветвей электрической цепи;
- контур – замкнутый путь протекания электрического тока по нескольким ветвям электрической цепи.

Ветвь, в которой находится источник э.д.с., называется активной, остальные ветви – пассивными.

Независимо от числа пассивных элементов схемы и способа их соединения расчет таких цепей, как правило, проводят методом преобразования схемы к простейшему виду (метод сворачивания схемы). Рассмотрим разветвленную цепь постоянного тока с одним источником э.д.с. (рисунок 4.1) и проведем расчет ее основных электрических параметров. Предположим, что для данной электрической цепи считаются известными сопротивления пассивных элементов цепи и э.д.с. источника. Необходимо определить токи в ветвях схемы, напряжение и мощность каждого элемента и всей цепи.

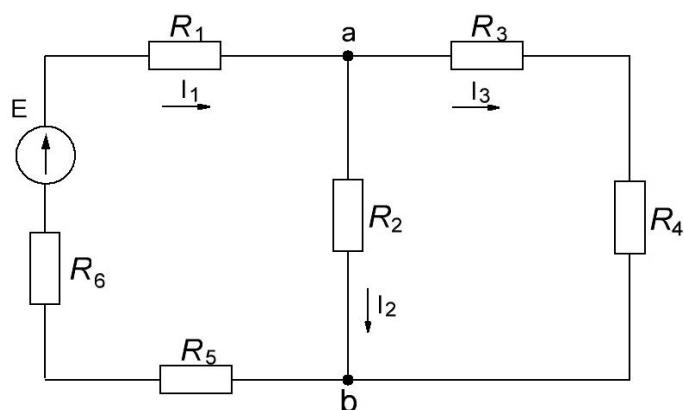


Рисунок 4.1 – Разветвленная цепь постоянного тока

В данном случае сворачивание схемы начинаем с третьей ветви, где находятся последовательно соединенные элементы R_3 и R_4 . Заменяв их одним пассивным элементом с сопротивлением

$$R_{3,4} = R_3 + R_4, \quad (4.1)$$

получим более простую схему (рисунок 4.2).

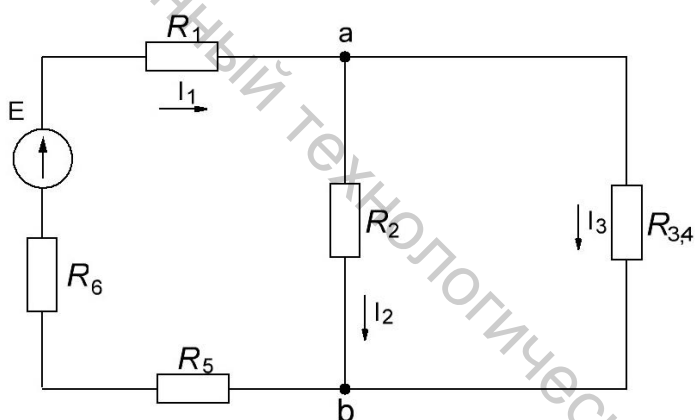


Рисунок 4.2 – Упрощенная схема разветвленной цепи постоянного тока

В данной схеме элементы R_2 и $R_{3,4}$ соединены параллельно. Их также заменим одним элементом с сопротивлением

$$R_{2,3,4} = \frac{R_2 R_{3,4}}{R_2 + R_{3,4}}. \quad (4.2)$$

Получим еще более простую схему (рисунок 4.3), в которой все элементы соединены последовательно.

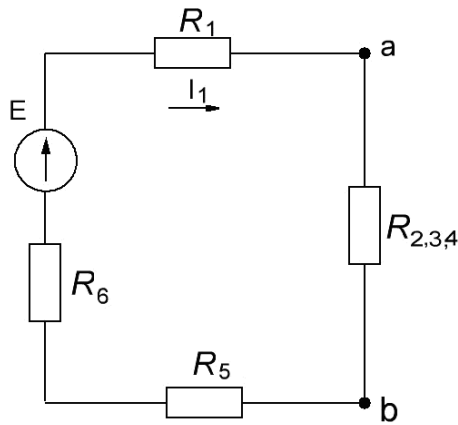


Рисунок 4.3 – Преобразованная схема разветвленной цепи постоянного тока

Заменяя теперь данное соединение одним элементом с сопротивлением

$$R = R_1 + R_{2,3,4} + R_5 + R_6, \quad (4.3)$$

которое является общим (эквивалентным) сопротивлением всей цепи, приходим к простейшей цепи постоянного тока с одним источником Э.Д.С. (рисунок 4.4).

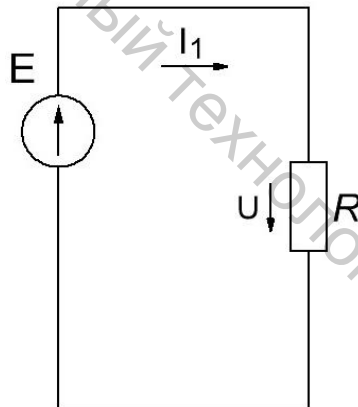


Рисунок 4.4 – Простейшая цепь постоянного тока

Поскольку в такой цепи $E = U$, определяем общий ток цепи

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{E}{R}. \quad (4.4)$$

Из схемы, представленной на рисунке 4.3, следует, что ток I_1 одинаков для элементов $R_1, R_{2,3,4}, R_5, R_6$.

Для определения токов в ветвях с сопротивлениями $R_2, R_{3,4}$ вначале находим напряжение между узлами a и b (рисунок 4.3):

$$U_{a,b} = I_1 \cdot R_{2,3,4}. \quad (4.5)$$

В этом случае токи I_2 и I_3 определяются по закону Ома (рисунок 4.2):

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2}; \quad (4.6)$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{R_{3,4}}. \quad (4.7)$$

Так как элементы R_3 и R_4 соединены последовательно, то сила тока, протекающего через них, будет иметь одно и то же значение:

$$I_3 = I_4. \quad (4.8)$$

Напряжения и мощности пассивных элементов находятся по выражениям

$$U_i = I_i \cdot R_i; \quad (4.9)$$

$$P_i = I_i^2 \cdot R_i. \quad (4.10)$$

Мощность всей цепи равна сумме мощностей всех пассивных элементов, входящих в данную цепь:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6. \quad (4.11)$$

Порядок выполнения работы

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля пять резисторов $R_1 \dots R_5$.
2. Используя омметр, определить сопротивления резисторов и записать их в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные

$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$

3. Из выбранных резисторов и блока постоянных напряжений собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 4.5.

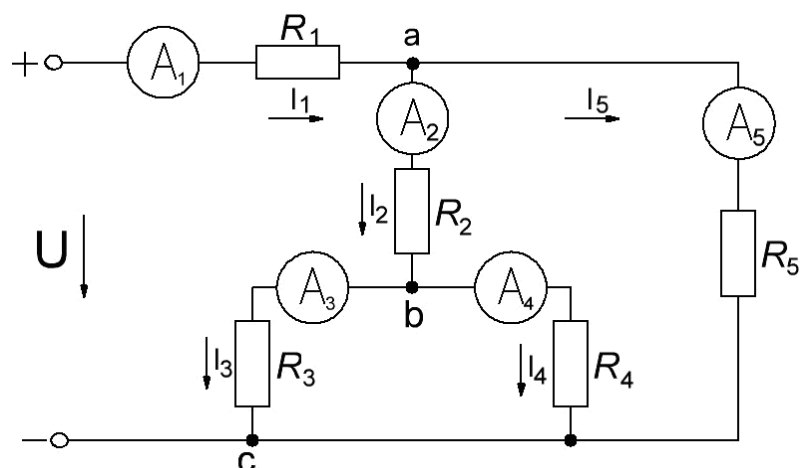


Рисунок 4.5 – Схема для исследования разветвленной цепи постоянного тока с одним источником Э.Д.С.

4. Установив напряжение источника питания равным 10 В , измерить токи в ветвях и записать их значения в таблицу 4.2.

5. Считая известными значения напряжения источника питания и сопротивлений резисторов схемы, определить методом сворачивания значения токов в ветвях и занести их в таблицу 4.2. Сравнить экспериментальные и расчетные данные.

Таблица 4.2 – Экспериментальные и расчетные данные

	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$	$I_4, \text{мА}$	$I_5, \text{мА}$
Экспериментальные данные					
Расчетные данные					

Контрольные вопросы

1. Дать определение ветви, узла, контура электрической цепи. Пояснить ответ с помощью примера.
2. В чем заключается метод сворачивания схемы?
3. Пояснить расчет параметров элементов разветвленной электрической цепи методом сворачивания схемы.
4. Каким образом, используя величину активной мощности, провести проверку правильности расчета токов?
5. Проанализировать изменения электрических величин при внесенном преподавателем каком-либо изменении в схему лабораторной работы.

Лабораторная работа № 5

Экспериментальная проверка метода непосредственного применения законов Кирхгофа для расчета сложной электрической цепи постоянного тока

Цель работы: изучение правил расчета сложной электрической цепи постоянного тока методом непосредственного применения законов Кирхгофа и ее экспериментальное исследование.

Теоретические сведения

Любая ветвь электрической цепи постоянного тока, из каких бы элементов она не состояла, может быть приведена путем преобразования к ветви, содержащей только два элемента: активный с параметром E (э.д.с.) и пассивный с сопротивлением R .

Сложной электрической цепью называется цепь, содержащая две и более ветви с активными элементами (источниками электрической энергии).

Анализ сложной электрической цепи, при известной конфигурации цепи и параметрах составляющих ее элементов (R и E), сводится к нахождению токов и напряжений во всех ветвях, а также мощностей, подводимых к отдельным участкам цепи. Он может быть проведен экспериментально или решением уравнений электрического состояния цепи, составленных на основании 1-го и 2-го законов Кирхгофа.

Уравнение электрического состояния токов для узла – 1-ый закон Кирхгофа – является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в узле заряд одного знака в любой момент времени не может ни накапливаться, ни убывать. Данный закон формулируется следующим образом – сумма токов, входящих в узел электрической цепи, равна сумме токов, выходящих из этого узла, или – алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (5.1)$$

В этом уравнении токи, входящие в узел, берутся с одним знаком, выходящие из узла – с противоположным.

Уравнение электрического состояния контура – 2-й закон Кирхгофа – является следствием закона сохранения энергии, согласно которому изменение потенциала в замкнутом контуре равно нулю. Определяется оно путем суммирования напряжений на отдельных участках контура с учетом их знаков. Формулируется 2-й закон Кирхгофа следующим образом – алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях контура равна алгебраической сумме э.д.с. источников, входящих в данный контур.

$$\sum_{k=1}^n U_k = \sum_{i=1}^m E_i . \quad (5.2)$$

В этом уравнении напряжения и э.д.с. берут со знаком “+”, если их направления совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура и со знаком “-”, если их направления противоположны направлению обхода. Если падение напряжения на каждом участке выразить произведением $U = IR$, то (5.2) можно записать в виде

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m E_i . \quad (5.3)$$

Используем схему (рисунок 5.1) контура сложной электрической цепи постоянного тока для составления уравнений по законам Кирхгофа.

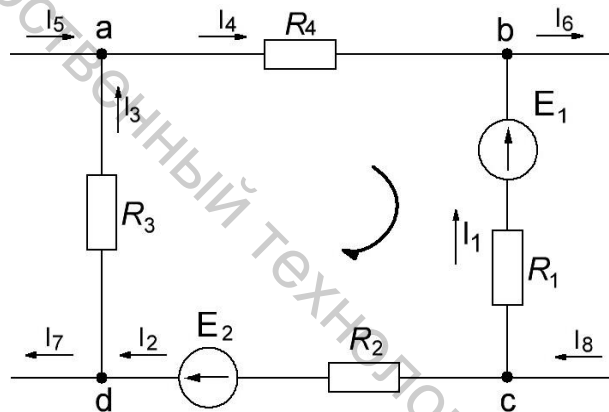


Рисунок 5.1 – Схема контура сложной электрической цепи постоянного тока

Запишем уравнение по 1-му закону Кирхгофа для узла *a*:

$$I_5 + I_3 - I_4 = 0$$

и уравнение по 2-му закону Кирхгофа для контура *abcd*, приняв направление обхода контура совпадающим с направлением вращения часовой стрелки

$$-E_1 + E_2 = -I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_4.$$

Для сложной цепи постоянного тока используется несколько методов, каждый из которых основан на применении законов Кирхгофа. Рассмотрим один из методов – метод непосредственного применения законов Кирхгофа.

При использовании данного метода применяют следующий порядок расчета:

1. По возможности упрощают рассчитываемую схему, заменяя имеющиеся последовательно или параллельно соединенные резисторы одним эквивалентным.

2. Указывают на схеме известные направления э.д.с. источников.

3. Так как токи неизвестны, предварительно произвольно выбирают их положительные направления и указывают их на схеме.

4. Составляют уравнения по 1-му и 2-му законам Кирхгофа. Общее число уравнений должно быть равно количеству неизвестных, т. е. количеству токов в ветвях схемы. Если цепь содержит m ветвей, то для решения задачи необходимо составить систему из m уравнений. Эти уравнения должны быть независимыми, т. е. ни одно из них не должно быть следствием других.

По 1-му закону Кирхгофа составляют $(n-1)$ уравнение, где n – количество узлов в схеме (в случае составления n уравнений одно из них будет являться следствием суммирования остальных). По 2-му закону Кирхгофа составляют $m-(n-1)$ уравнений для независимых контуров схемы. Независимым считается контур, включающий в себя хотя бы одну ветвь, не принадлежащую другим контурам.

5. Решая полученную систему уравнений известными математическими методами, находят неизвестные токи ветвей. Если в результате какие-то токи получились со знаком “-“, то это значит, что их действительные направления противоположны выбранным. Проверкой правильности расчета является составление уравнения баланса мощностей, развиваемых источниками э.д.с. и потребляемых приемниками

$$\sum_{i=1}^k E_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^p I_i^2 \cdot R_i \quad (5.4)$$

В данном уравнении, если направления э.д.с. и тока, действующих в ветви, совпадают, их произведение берут со знаком “+“ (источник работает в режиме генератора), а если не совпадают, то источник э.д.с. потребляет энергию (работает в режиме приемника) и в этом уравнении будет знак “-“. Например, для электрической цепи, представленной на рисунке 5.2, при указанных положительных направлениях э.д.с., токов и направлениях обходов контуров независимые уравнения получаем следующим образом. Так как схема содержит $m = 3$ ветви и $n = 2$ узла, то составляем систему из 3-х уравнений, состоящую из одного уравнения по 1-му закону Кирхгофа и двух уравнений по 2-му закону Кирхгофа:

1) узел a $I_1 + I_2 = I_3$;

2) контур abc $E_1 = I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3$;

3) контур adb $E_2 = I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3$.

Решая совместно эти уравнения, можно определить величину и направления токов в ветвях схемы.

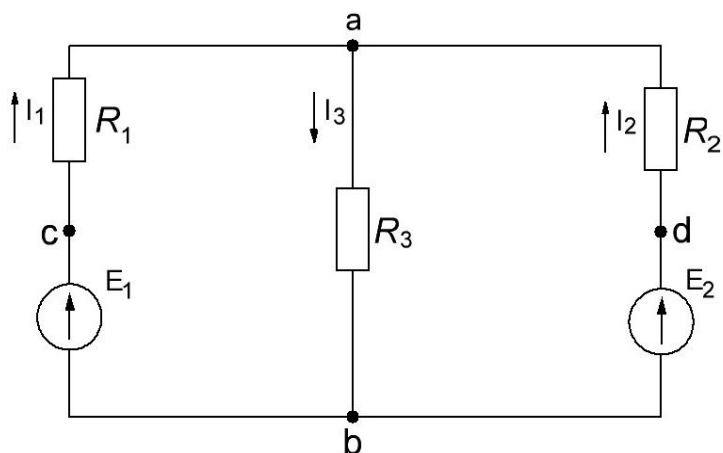


Рисунок 5.2 – Сложная электрическая цепь постоянного тока

Порядок выполнения работы

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля резисторы $R_1 \dots R_5$.
2. Собрать схему, представленную на рисунке 5.3, состоящую из источников нерегулируемого постоянного напряжения U_1 и регулируемого U_2 , резисторов $R_1 \dots R_5$, вольтметров V_1 и V_2 и амперметров $A_1 \dots A_5$.

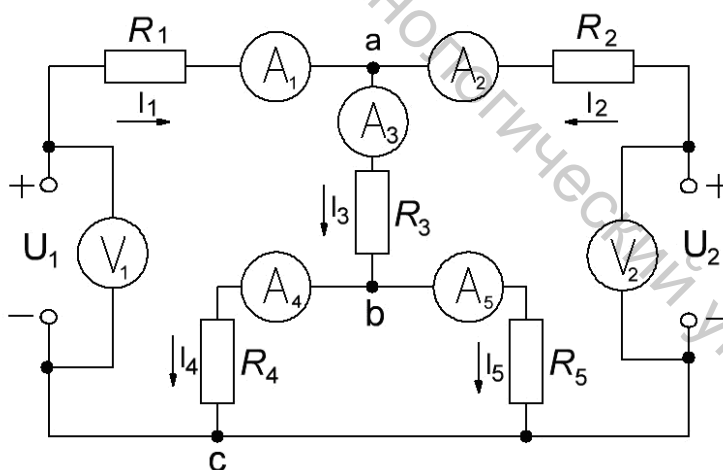


Рисунок 5.3 – Схема для исследования сложной электрической цепи постоянного тока

3. Установив значение напряжения регулируемого источника U_2 в пределах $15 \dots 20 \text{ В}$ и измерив напряжение U_1 , записать данные в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Экспериментальные и расчетные данные

	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$I_4, мА$	$I_5, мА$
Экспериментальные данные							
Расчетные данные							

4. Измерить значения токов и занести в таблицу 5.1. При занесении данных в таблицу 5.1 учесть направления токов (рисунок 5.3).

5. При помощи омметра измерить сопротивления резисторов $R_1...R_5$. Данные занести в таблицу 5.2

Таблица 5.2 – Экспериментальные данные

$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$

6. Считая э.д.с. источников равными их напряжениям U_1 и U_2 и используя данные таблицы 5.2, рассчитать значения токов в ветвях цепи (рисунок 5.3) методом непосредственного применения законов Кирхгофа. Результаты расчета занести в таблицу 5.1.

7. Сравнить расчетные и экспериментальные данные. Составить уравнение баланса мощностей для электрической цепи, представленной на рисунке 5.3.

Контрольные вопросы

1. Какая электрическая цепь называется сложной? Из каких элементов и частей она состоит?

2. В чем заключается и как проводится расчет сложной электрической цепи?

3. Сформулируйте 1-й и 2-й законы Кирхгофа. Приведите пример их использования в расчетах электрических цепей.

4. Опишите порядок расчета сложной электрической цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

5. В чем заключается независимость уравнений, составляемых для расчета сложной электрической цепи? Что такое независимый контур схемы?

6. Что такое баланс мощностей электрической цепи? Как составляется уравнение баланса мощностей?

7. Составьте уравнения по законам Кирхгофа для предложенной преподавателем схемы электрической цепи.

Лабораторная работа № 6

Экспериментальная проверка метода наложения для расчета сложной электрической цепи постоянного тока

Цель работы: изучение правил расчета сложной электрической цепи постоянного тока методом наложения и её экспериментальное исследование.

Теоретические сведения

Решение системы уравнений, составленной при непосредственном применении законов Кирхгофа для расчета сложной электрической цепи, особенно если количество ветвей в электрической цепи больше трех, требует значительной затраты времени. Поэтому используются более простые методы расчета сложных электрических цепей. Одним из таких методов является метод наложения.

Данный метод основан на одном из важнейших физических принципов – принципе суперпозиции, который вытекает из линейности уравнений, составленных по законам Ома и Кирхгофа. Принцип суперпозиции используется, как правило, при рассмотрении явлений, возникающих под воздействием несколько более простых, в которых каждая из причин действует в отдельности независимо от других, а результаты этих воздействий, накладываясь друг на друга, образуют общее явление.

В отношении электрических цепей принцип суперпозиции заключается в том, что если линейная электрическая цепь подвергается воздействию нескольких источников э.д.с. одновременно, то реакция (электрический ток) цепи на эти источники равна алгебраической сумме реакций (токов) на каждое воздействие. Данный принцип используется также и для того, чтобы результат воздействия одной э.д.с. сложной формы заменить воздействием составляющих э.д.с. более простых форм.

Расчет сложных электрических цепей с несколькими источниками э.д.с. методом наложения сводится к следующему.

По возможности упростив расчетную схему, указывают на ней известные направления э.д.с. источников и произвольно положительные направления токов в ветвях.

Вначале полагают, что в цепи действует только один из источников. Э.д.с. всех остальных источников приравниваются к нулю. При этом сопротивления цепи и внутренние сопротивления источников остаются включенными в схему. После исключения всех э.д.с., кроме одной, в цепи остается простое смешанное соединение резистивных элементов. Токи в ветвях такой цепи, действующие только от одной э.д.с. и называемые частичными, рассчитываются, как правило, методом сворачивания схемы. Далее повторяют расчет поочередно для всех других э.д.с. Действительный ток каждой ветви определяется как алгебраическая сумма найденных частичных токов. При этом

обязательно учитываются направления частичных токов и предварительно выбранные направления результирующих токов. Если направления частичного и результирующего токов не совпадают, частичный входит в уравнение с отрицательным знаком.

В качестве примера рассмотрим расчет сложной электрической цепи, изображенной на рисунке 6.1, с помощью метода наложения.

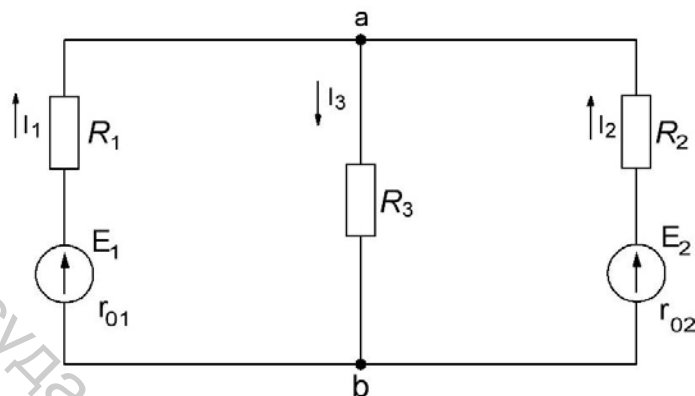


Рисунок 6.1 – Сложная электрическая цепь постоянного тока

Вначале укажем положительные направления токов, а затем рассчитаем методом сворачивания схемы значения токов, создаваемых э.д.с. E_1 , полагая $E_2 = 0$, но учитывая внутреннее сопротивление источника исключаемой э.д.с. r_{02} (рис. 6.2).

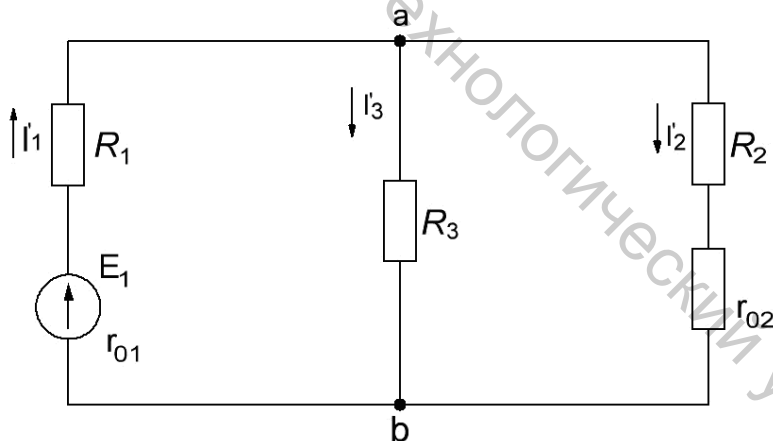


Рисунок 6.2 – Электрическая цепь постоянного тока с источником E_1

Таким образом будут определены частичные токи I_1' , I_2' , I_3' .

Затем, исключая э.д.с. E_1 ($E_1 = 0$), но, оставляя внутреннее сопротивление этого источника r_{01} , указываем направления частичных токов, создаваемых э.д.с. E_2 , и рассчитываем методом сворачивания схемы их значения (рис. 6.3).

В результате получаем частичные токи I_1'' , I_2'' , I_3'' .

Действительные токи в ветвях схемы находим как алгебраическую сумму частичных токов, проходящих через соответствующие ветви.

$$I_1 = I_1' - I_1'';$$

$$I_2 = I_2'' - I_2';$$

$$I_3 = I_3' + I_3''.$$

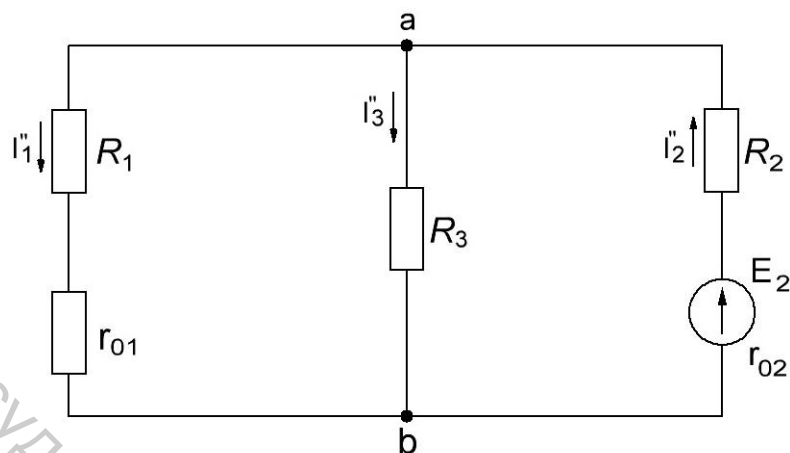


Рисунок 6.3 – Электрическая цепь постоянного тока с источником E_2

Если в результате токи каких-либо ветвей получились с отрицательными знаками, то это значит, что их действительные направления противоположны выбранным.

Проверкой правильности расчета является составление уравнения баланса мощностей с учетом только реальных, но не частичных токов.

Для рассматриваемой схемы с учетом выбранных направлений токов в ветвях уравнение баланса мощностей будет иметь вид

$$E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 = I_1^2 (R_1 + r_{01}) + I_2^2 (R_2 + r_{02}) + I_3^2 \cdot R_3.$$

Порядок выполнения работы

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля пять резисторов $R_1 \dots R_5$.

2. Собрать схему, представленную на рисунке 6.4, состоящую из источников нерегулируемого постоянного напряжения U_1 и регулируемого U_2 , резисторов $R_1 \dots R_5$, вольтметров V_1 и V_2 и амперметров $A_1 \dots A_5$.

3. Установив значение напряжения регулируемого источника U_2 в пределах $15 \dots 20$ В и измерив напряжение U_1 , записать данные в таблицу 6.1.

4. Измерить значения токов и занести в таблицу 6.1. При занесении данных в таблицу учесть направление токов (рис. 6.4.).

5. Отключить источник U_1 и замкнуть цепь в точках 1 и 1'. Напряжение U_2 установить таким же, как и в п. 3. Измерить значения частичных токов в ветвях схемы, данные занести в таблицу 6.1.

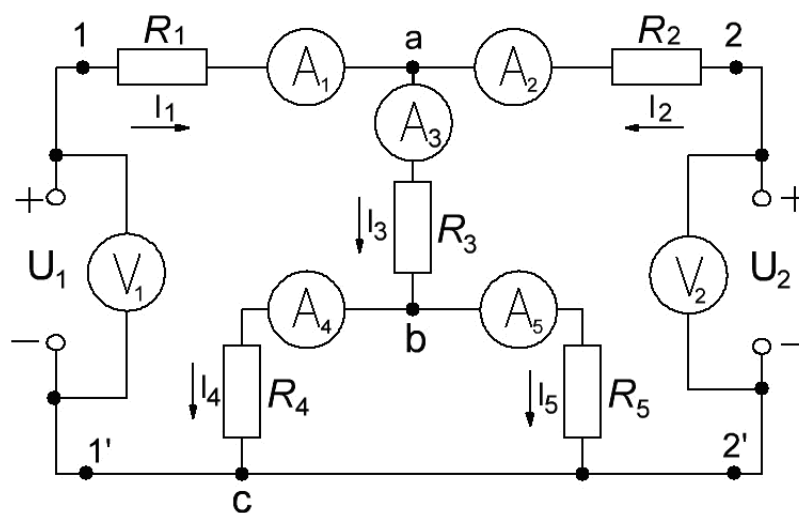


Рисунок 6.4 – Схема для исследования сложной электрической цепи постоянного тока

Таблица 6.1 – Экспериментальные и расчетные данные

		$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$I_4, мА$	$I_5, мА$
При действии обоих источников	Измерено							
	Вычислено							
При действии источника U_2	Измерено							
	Вычислено							
При действии источника U_1	Измерено							
	Вычислено							

6. Отключить источник U_2 и замкнуть цепь в точках 2 и 2'. Убрав перемычку между точками 1 и 1', подключить к ним источник U_1 . Измерить значения частичных токов в ветвях схемы, данные занести в таблицу 6.1.

7. С помощью омметра измерить сопротивления резисторов $R_1 \dots R_5$. Данные занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Экспериментальные данные

$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$

8. Считая э.д.с. источников равными их напряжениям U_1 и U_2 и используя данные таблицы 6.2, рассчитать значения токов в ветвях цепи (рисунок 6.4) методом наложения. Результаты расчета занести в таблицу 6.1.

9. Сравнить расчетные и экспериментальные данные. Составить уравнение баланса мощностей для электрической цепи, представленной на рисунке 6.4.

Контрольные вопросы

1. На каком физическом явлении основан принцип наложения?
2. В чем заключается принцип суперпозиции в применении к электрическим цепям?
3. Поясните порядок расчета сложной электрической цепи методом наложения.
4. Опишите порядок нахождения токов в ветвях схемы предложенной преподавателем электрической цепи.
5. Каким образом проводится проверка правильности расчета электрической цепи методом наложения?

Лабораторная работа № 7

Экспериментальная проверка метода контурных токов для расчета сложной электрической цепи постоянного тока

Цель работы: изучение правил расчета сложной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов и ее экспериментальное исследование.

Теоретические сведения

Метод контурных токов наиболее часто применяют на практике для расчета разветвленных сложных цепей постоянного тока, так как он позволяет, составив количество уравнений меньше количества неизвестных величин, находить все неизвестные величины. Данный метод заключается в том, что вместо действительных токов ветвей в уравнения, составляемые по 2-му закону Кирхгофа, включают так называемые контурные токи, действующие в независимых контурах схемы.

Контурным называется такой условно принятый ток, который замыкается только по своему контуру, оставаясь в пределах данного контура неизменным.

В этом случае количество уравнений, составляемых по 2-му закону Кирхгофа, будет равно числу независимых контуров схемы и определится из уравнения

$$K = m - (n - 1),$$

где m – количество ветвей схемы; n – количество узлов схемы.

Независимым называют контур, включающий в себя хотя бы одну ветвь, не принадлежащую остальным контурам.

Расчет электрической цепи методом контурных токов проводят следующим образом.

По возможности, упростив расчетную схему, указывают на ней заданные направления э.д.с. и произвольно положительные направления токов в ветвях. Разбивают схему на k независимых контуров. Произвольно выбирают направление обхода каждого контура, принимая его, как правило, совпадающим с положительным направлением контурного тока.

Составляют систему из k уравнений по 2-му закону Кирхгофа, включая в эти уравнения контурные, но не действительные токи. Значения э.д.с. в этих уравнениях берутся со знаком “+”, если направление обхода контура совпадает с направлением э.д.с., и со знаком “-” – если они не совпадают. Падения напряжений при прохождении контурного тока по сопротивлениям собственного контура оказывается положительным, если направление контурного тока совпадает с направлением обхода данного контура, и отрицательным – если не совпадает. Падение напряжения при прохождении контурного тока смежного контура по общему для двух контуров сопротивлению будет положительным, если направление контурного тока смежного контура будет при этом совпадать с направлением контурного тока данного контура, и отрицательным, если они совпадать не будут.

Решая полученную систему уравнений, определяют значения контурных токов. Используя их, находят с помощью 1-го закона Кирхгофа значения действительных токов в ветвях схемы.

Ток ветви, принадлежащей только одному контуру, равен по величине контурному току данного контура. При этом, если направление контурного тока не совпадает с первоначально выбранным направлением действующего тока ветви, в равенство он входит со знаком “-”.

Ток ветви, принадлежащей смежным контурам, равен алгебраической сумме контурных токов смежных контуров. При этом со знаком “+” в данное равенство входят те контурные токи, направления которых совпадают с первоначально выбранным направлением тока в данной ветви, и со знаком “-” – направления которых не совпадают.

В качестве примера расчета сложной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов рассмотрим расчет электрической цепи, представленной на рисунке 7.1. Разобьем ее на три независимых контура, в каждом из которых будет протекать свой контурный ток I_{k1} , I_{k2} , I_{k3} . Направления этих токов выберем во всех контурах одинаковыми – по часовой стрелке. Такими же примем и направления обхода каждого из контуров.

Составляем систему уравнений из 3-х уравнений по 2-му закону Кирхгофа:

$$\text{для 1-го контура } E_1 + E_2 = I_{k1}(R_1 + R_2 + R_5) - I_{k2} \cdot R_2 - I_{k3} \cdot R_5;$$

$$\text{для 2-го контура } -E_2 - E_3 = I_{k2}(R_2 + R_3 + R_6) - I_{k1} \cdot R_2 - I_{k3} \cdot R_3;$$

$$\text{для 3-го контура } E_3 - E_4 = I_{k3}(R_3 + R_4 + R_5) - I_{k1} \cdot R_5 - I_{k2} \cdot R_3.$$

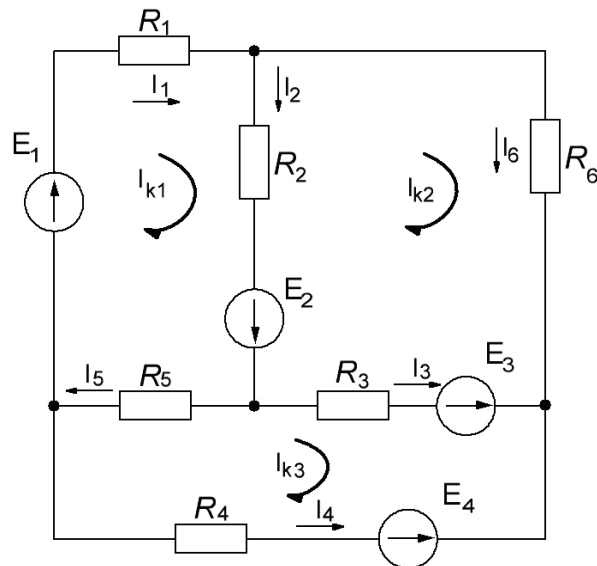


Рисунок 7.1 – Сложная электрическая цепь постоянного тока

Решив данную систему, можно найти значения контурных токов I_{k1} , I_{k2} , I_{k3} , используя которые легко определить действительные токи в ветвях схемы:

$$I_1 = I_{k1}; I_6 = I_{k2}; I_4 = -I_{k3}$$

$$I_2 = I_{k1} - I_{k2}; I_3 = I_{k3} - I_{k2}; I_5 = I_{k1} - I_{k3}.$$

Если в результате значение какого-либо тока окажется отрицательным, то это значит, что действительное направление данного тока противоположно выбранному. Проверку правильности расчета сложной электрической цепи проводят составлением уравнения баланса мощностей.

Порядок выполнения работы

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля шесть резисторов $R_1 \dots R_6$.
2. С помощью омметра измерить сопротивления резисторов $R_1 \dots R_6$. Данные занести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Экспериментальные данные

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

3. Собрать схему, представленную на рисунке 7.2, состоящую из источников нерегулируемого постоянного напряжения U_1 и регулируемого U_2 , резисторов $R_1 \dots R_6$, вольтметров V_1 и V_2 и амперметров $A_1 \dots A_6$.

3. Установив значения напряжения регулируемого источника U_2 в пределах $15 \dots 20 \text{ В}$ и измерив напряжение U_1 , записать данные в таблицу 7.2.

4. Измерить значения токов и занести их в таблицу 7.2. При занесении данных в таблицу учесть направления токов (рисунок 7.2).

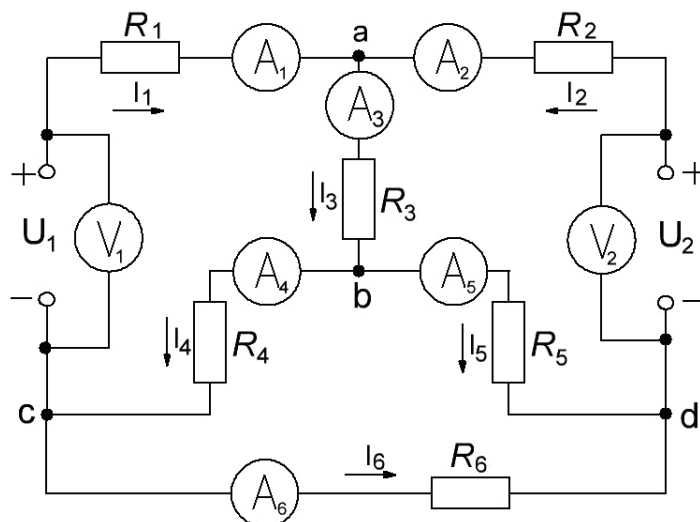


Рисунок 7.2 – Схема для исследования сложной электрической цепи постоянного тока

Таблица 7.2 – Экспериментальные и расчетные данные

	$U_1,$ B	$U_2,$ B	$I_1,$ mA	$I_2,$ mA	$I_3,$ mA	$I_4,$ mA	$I_5,$ mA	$I_6,$ mA
Экспериментальные данные								
Расчетные данные								

6. Считая э.д.с. источников равными их напряжениям U_1 и U_2 используя данные таблицы 7.1, рассчитать значения токов в ветвях цепи (рисунок 7.2) методом контурных токов. Результаты расчета занести в таблицу 7.2.

7. Сравнить расчетные и экспериментальные данные. Составить уравнение баланса мощностей для исследуемой электрической цепи.

Контрольные вопросы

1. Какова необходимость применения метода контурных токов?
2. Какой ток называется контурным? Сколько контурных токов необходимо определить для расчета электрической цепи данным методом?
3. Охарактеризуйте порядок расчета сложных электрических цепей методом контурных токов.
4. Каким образом определяются действительные токи ветвей исследуемой схемы по значениям контурных токов?
5. Опишите порядок расчета токов в ветвях схемы, предложенной преподавателем электрической цепи.

Лабораторная работа № 8

Экспериментальная проверка метода напряжения между двумя узлами для расчета сложной электрической цепи постоянного тока

Цель работы: изучение правил расчета сложной электрической цепи постоянного тока методом напряжения между двумя узлами и ее экспериментальное исследование.

Теоретические сведения

Иногда исследуемая сложная цепь постоянного тока содержит только два узла или путем несложных преобразований может быть приведена к такой цепи. Она может включать в себя как пассивные, так и активные ветви. В реальных электрических цепях дополнительное подключение источников питания параллельно работающим производят, если номинальный ток приемников превышает величину номинального тока от работающих источников. Расчет таких цепей наиболее просто проводится с помощью метода напряжения между двумя узлами.

Рассмотрим пример расчета этим методом сложной электрической цепи постоянного тока (рисунок 8.1), содержащей $n = 4$ параллельных ветвей, в том числе $m = 3$ – активных.

Расчет такой цепи, заключающийся в нахождении токов всех ветвей при известных э.д.с. и сопротивлениях резисторов, начинают с выбора условно положительного направления напряжения, действующего между узлами a и b , и обозначения его стрелкой на схеме. Так как потенциал узла a согласно выбранному направлению выше потенциала b , токи пассивных ветвей схемы сонаправлены с напряжением U_{ab} . Положительные направления токов активных ветвей первоначально определить невозможно, поэтому задают их условно-положительные направления.

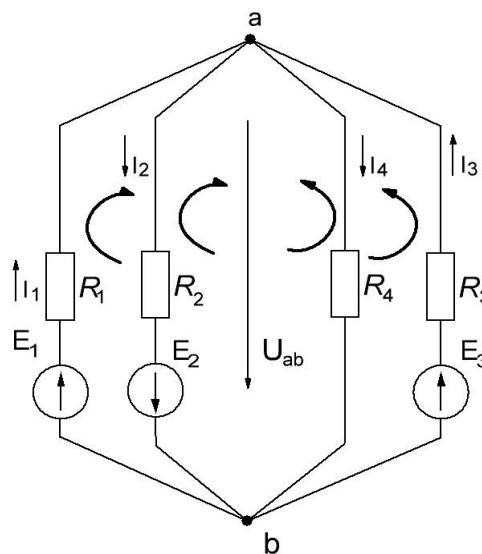


Рисунок 8.1 – Сложная электрическая цепь постоянного тока

Составляют по 2-му закону Кирхгофа n уравнений для контуров, каждый из которых включает в себя одну из параллельных ветвей и напряжение U_{ab} . Направления обхода каждого контура выбирают произвольно и обозначают на схеме стрелками.

$$\begin{aligned} E_1 &= I_1 \cdot R_1 + U_{ab}; \\ -E_2 &= -I_2 \cdot R_2 + U_{ab}; \\ E_3 &= I_3 \cdot R_3 + U_{ab}; \\ 0 &= -I_4 \cdot R_4 + U_{ab}. \end{aligned} \quad (8.1)$$

Из составленных уравнений выражают токи ветвей:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = (E_1 - U_{ab})g_1; \\ I_2 &= \frac{E_2 + U_{ab}}{R_2} = (E_2 + U_{ab})g_2; \\ I_3 &= \frac{E_3 - U_{ab}}{R_3} = (E_3 - U_{ab})g_3; \\ I_4 &= \frac{U_{ab}}{R_4} = U_{ab} \cdot g_4, \end{aligned} \quad (8.2)$$

где $g_i = \frac{1}{R_i}$ – проводимость i -й ветви.

Согласно 1-му закону Кирхгофа, алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю, т. е. для узла a схемы справедливо равенство

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0.$$

Подставляем в данное равенство выражения токов

$$(E_1 - U_{ab})g_1 - (E_2 + U_{ab})g_2 + (E_3 - U_{ab})g_3 - U_{ab} \cdot g_4 = 0.$$

Выражаем из данного соотношения узловое напряжение U_{ab}

$$U_{ab} = \frac{E_1 \cdot g_1 - E_2 \cdot g_2 + E_3 \cdot g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4}, \quad (8.3)$$

которое в общем случае будет равно

$$U_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^m E_k \cdot g_k}{\sum_{k=1}^n g_k}. \quad (8.4)$$

Из (8.4) следует, что напряжение между двумя узлами параллельной цепи равно алгебраической сумме произведений э.д.с. и проводимости каждой активной ветви, деленной на сумму проводимостей всех ветвей схемы.

В формуле (8.4) произведения $E_k g_k$ берут со знаком “+” в том случае, если направление э.д.с. E_k противоположно выбранному направлению напряжения U_{ab} , и со знаком “-”, когда они совпадают. Определив напряжение U_{ab} и подставив его значение в выражение (8.2), можно найти токи ветвей исследуемой схемы. Если рассчитанные значения узлового напряжения или токов в ветвях получаются отрицательными, это означает, что их действительные направления противоположны выбранным.

В общем случае величина и направление тока какой-либо активной ветви в параллельных цепях зависят только от соотношения между э.д.с. источника, находящегося в данной ветви, и узлового напряжения, действующего в цепи. Если э.д.с. источника больше узлового напряжения, то источник работает в генераторном режиме и ток данной ветви сонаправлен с э.д.с. Если э.д.с. источника меньше узлового напряжения, то ток такой ветви меняет свое направление и источник работает в режиме приемника электрической энергии. Если э.д.с. источника равна узловому напряжению, то ток этой ветви равен нулю, источник работает в режиме холостого хода и на работу остальной части цепи не влияет. Таким образом, регулируя величины э.д.с. работающих параллельно друг другу источников, можно перераспределять между ними нагрузку в необходимом направлении.

Порядок выполнения работы

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля три резистора R_1, R_2, R_3 .
2. Собрать схему, представленную на рисунке 8.2, состоящую из источников нерегулируемого постоянного напряжения U_1 и регулируемого U_2 , резисторов R_1, R_2, R_3 , вольтметров V_1, V_2, V_3 и амперметров A_1, A_2, A_3 .
3. Установив значения напряжения регулируемого источника U_2 в пределах $15 \dots 20 \text{ В}$ и измерив напряжение U_1 , записать данные в таблицу 8.1.

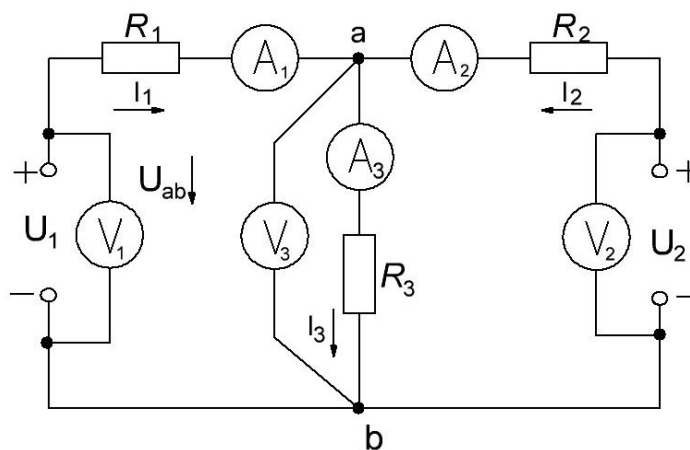


Рисунок 8.2 – Схема для исследования сложной электрической цепи постоянного тока

4. Измерить значения токов и занести их в таблицу 8.1. При занесении данных в таблицу учесть направление токов (рисунок 8.2).

Таблица 8.1 – Экспериментальные и расчетные данные

	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_{ab}, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$
Экспериментальные данные						
Расчетные данные						

5. С помощью омметра измерить сопротивления резисторов R_1 , R_2 , R_3 . Данные занести в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 – Экспериментальные данные

$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$

6. Считая э.д.с. источников равными их напряжениям U_1 и U_2 и используя данные таблицы 8.2, рассчитать значения токов в ветвях цепи (рисунок 8.2) методом напряжения между двумя узлами. Результаты расчета занести в таблицу 8.1.

7. Сравнить расчетные и экспериментальные данные. Составить уравнение баланса мощностей для исследуемой электрической цепи.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте сложные параллельные цепи постоянного тока. Чем обусловлена необходимость их создания?

2. Поясните порядок расчета сложной электрической цепи методом напряжения между двумя узлами.

3. Каким образом определяется узловое напряжение параллельной электрической цепи?

4. Как определить режим, в котором работает источник э.д.с., включенный в параллельную сложную цепь постоянного тока?

5. Опишите порядок расчета токов методом напряжения между двумя узлами в ветвях схемы предложенной преподавателем электрической цепи.

Литература

1. Электротехника / под ред. В. С. Пантюшина. – Москва : Высшая школа, 1976. – 593 с.

2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – Москва : Гардарики, 2007. – 704 с.

3. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов [и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1985. – 559 с.

4. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – Москва : Высшая школа, 1983. – 442 с.

5. Электротехника / под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высшая школа, 1985. – 768 с.

6. Морозов, А.Г. Электротехника, электроника и импульсная техника / А. Г. Морозов. – Москва : Высшая школа, 1987. – 448 с.