

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей электротехники

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОНИКА
СЛОЖНЫЕ ЦЕПИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА

Методические указания к лабораторной работе
для специальности 21.05.02

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 621.3(073)

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА. Сложные цепи постоянного тока: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Э.В. Яковлева, Т.В. Пудкова, Е.О. Замятин*. СПб, 2020. 21 с.

Содержат информацию об основных понятиях, элементах и законах электрических цепей постоянного тока с несколькими источниками питания, особенности сборки таких цепей и присоединению измерительных приборов, пояснения для выполнения необходимых расчетов, перечень контрольных вопросов и задач для самопроверки и подготовке к защите лабораторной работы.

Предназначены для студентов специальности 21.05.02 «Прикладная геология».

Научный редактор проф. *Я.Э. Шклярский*

Рецензент канд. техн. наук *А.П. Шевчук* (ООО «Производственное объединение «Энергосистема»)

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее методическое указание к выполнению лабораторной работы «Сложные цепи постоянного тока» служит для подготовки студентов к проведению экспериментов сложных цепей постоянного тока в рамках изучения дисциплины «Электротехника и Электроника»

При проведении работы студенты должны научиться сборке сложных электрических цепей постоянного тока, правильному подключению электроизмерительных приборов и источников электропитания, снятию показаний приборов, навыки опытно подтверждать основные законы цепей постоянного тока, принцип суперпозиции, а также научатся анализировать полученные результаты измерений. Кроме того, студенты закрепят знания, полученные в лекционном курсе, о методах расчета сложных цепей постоянного тока – наложения, контурных токов, узловых потенциалов и эквивалентного генератора.

Перед началом каждой лабораторной работы студент должен уяснить цели и задачи опытов, изучить теоретические основы тематики лабораторной работы, пользуясь лекционным материалом, методическими указаниями к проведению лабораторных работ и дополнительной литературой. Для самопроверки знаний приведены контрольные вопросы и схема для самопроверки.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Сложные электрические цепи

Сложными называются разветвленные электрические цепи с несколькими источниками энергии.

В соответствии с принципом суперпозиции реакция цепи на действие нескольких независимых источников может быть представлена как наложение частных реакций, каждая из которых находится при действии в цепи только одного источника и равенстве нулю напряжения/тока других источников. Для иллюстрации принципа суперпозиции рассмотрим цепь с двумя источниками, показанную на рисунке 1.

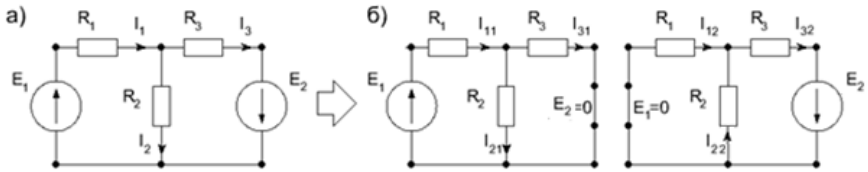


Рис. 1. Схема цепи с двумя источниками – а) и схемы для определения частных реакций –б)

Источник напряжения и источник тока взаимозаменяемы (рис.2). Данное свойство применяется для удобства расчета цепей, если возникает такая необходимость.

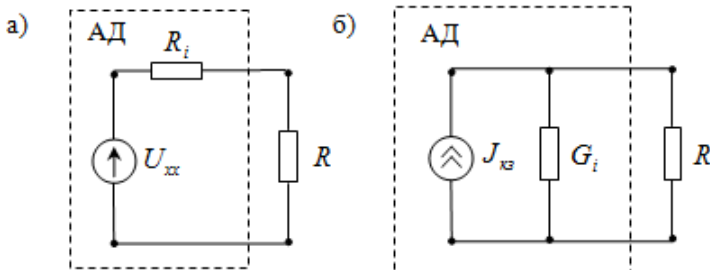


Рис. 2. Схема эквивалентного источника напряжения - а) и схема эквивалентного источника тока - б)

ИН (источника напряжения) соединен с внутренним сопротивлением последовательно.

ИТ (источник тока) соединен с внутренним сопротивлением параллельно.

Напряжение на источнике напряжения называется «напряжение холостого хода» U_{xx} , ток на источнике тока называется «ток короткого замыкания» $J_{кз}$.

Переход от одного вида источника к другому осуществляется через формулы:

$$J_{кз} = U_{xx}/R_i \text{ и } G_i = 1/R_i$$

Метод расчета цепей, где применяется переход от одного вида источника к другому называется эквивалентный генератор (ЭГ). Эквивалентный генератор имеет два полюса (два вывода), которыми подключается к нагрузке, т.е. он представляет собой двухполюсник.

Двухполюсником называется часть электрической цепи любой сложности и произвольной конфигурации, выделенная относительно двух зажимов (двух полюсов).

Двухполюсник, не содержащий источников энергии или содержащий скомпенсированные источники (суммарное действие которых равно нулю), называется пассивным. Если в схеме двухполюсника имеются нескомпенсированные источники, он называется активным.

Методы расчета сложных цепей постоянного тока

Для расчета сложных цепей, т.е. для определения токов во всех ветвях применяют следующие методы: простейший метод, метод контурных токов, метод узловых потенциалов, метод наложения и метод эквивалентного генератора.

При решении задачи простейшим методом, необходимо составить систему уравнений по законам Кирхгофа. Общее число уравнений в системе должно соответствовать числу неизвестных токов, т. е. числу ветвей.

По первому закону Кирхгофа составляется число уравнений, на единицу меньшее числа узлов цепи, поскольку уравнение для последнего узла есть следствие всех предыдущих уравнений и не дает ничего нового для расчета. По второму закону Кирхгофа составля-

ются все недостающие уравнения для любых произвольно выбранных независимых контуров цепи. Независимым контуром является такой, который отличается от всех других контуров как минимум одной ветвью.

Кроме метода непосредственного применения законов Кирхгофа существуют: метод контурных токов, метод узловых потенциалов, метод наложения и метод эквивалентного генератора.

1.1. Метод контурных токов

В основе метода контурных токов лежит представление о независимых контурах, по которым протекают независимые друг от друга контурные токи.

Независимым называется контур, который содержит хотя бы одну новую ветвь, не входящую в другие контуры.

Метод контурных токов основан на втором законе Кирхгофа и двух допущениях:

В любом контуре схемы протекает ток, называемый контурным.

Ток в ветви, равен алгебраической сумме контурных токов, которые протекают через эту ветвь.

Следует иметь в виду, что контурный ток является расчетной величиной, которая вводится для того, чтобы уменьшить число неизвестных в уравнении.

Рассмотрим электрическую схему, представленную на рисунке 3.

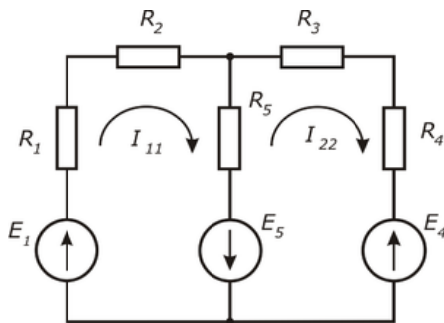


Рис. 3. Сложная электрическая схема

Для расчета сложной электрической схемы методом контурных токов выберем в ней два независимых контура I_{11} и I_{22} и произвольно задать им направление. Далее записать уравнения по второму закону Кирхгофа относительно этих токов. Они будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_2 + R_5) - I_{22}R_5 = E_1 - E_5 \\ I_{22}(R_3 + R_4 + R_5) - I_{11}R_5 = -E_4 - E_5 \end{cases}$$

Суммы сопротивлений $R_1 + R_2 + R_5 = R_{11}$ и $R_3 + R_4 + R_5 = R_{22}$ называются собственными сопротивлениями контуров 11 и 22. Все собственные сопротивления входят в уравнения со знаком «+». Сумму сопротивления общих для любых двух смежных независимых контуров называется взаимным сопротивлением и обозначат двойной индексацией вида R_{12} и R_{21} . Взаимные сопротивления входят в уравнение для каждого независимого контура со знаком «+», если контурные токи смежных контуров направлены в них в одну сторону (согласно) и со знаком «-», если в разные стороны (встречно).

В рассмотренной системе знак «-» перед произведениями $I_{22} \cdot R_5$ и $I_{11} \cdot R_5$ говорит о том, что контурные токи I_{11} и I_{22} встречно направлены в ветви с резистором R_5 . Эта ветвь является внутренней и принадлежит обоим контурам.

Решив полученную систему уравнений относительно I_{11} и I_{22} , токи ветвей находятся по 2 допущению. Во внешних ветвях токи равны контурным, однако могут иметь противоположное направление, если контурные токи будут отрицательные. Токи в смежных (внутренних) ветвях будут равны алгебраической сумме контурных токов смежных контуров.

1.2. Метод узловых потенциалов (напряжений)

Метод основан на положении о том, что токи во всех ветвях сложной цепи можно рассчитать, если известны напряжения на всех ее ветвях. Для этого после определения узловых напряжений, используя закон Ома для обобщенной ветви, легко определить токи во всех ветвях.

Узловые потенциалы являются промежуточными неизвестными данного метода расчета. Относительно них составляется система уравнений. При этом произвольно выбирается узел, называемый опорным, потенциал у которого принимают равным нулю.

Например, для сложной схемы, имеющей три узла, опуская ряд несложных промежуточных преобразований, получаем систему уравнений относительно неизвестных потенциалов узлов цепи в следующем виде:

$$\begin{cases} \varphi_1 = 0 \\ \varphi_2 G_{22} - \varphi_3 G_{23} = \sum E_{2N} G_{2N} + \sum I_{2K} \\ \varphi_3 G_{33} - \varphi_2 G_{32} = \sum E_{3M} G_{3M} + \sum I_{3P} \end{cases}$$

В этой системе уравнений:

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – потенциалы узлов 2 и 3;

G_{22}, G_{33} – суммарная проводимость всех ветвей, сходящихся в узлах 2 и 3 соответственно;

G_{23}, G_{32} – суммарная проводимость ветвей между узлами 2 и 3;

$\sum E_2 G_2$ – алгебраическая сумма произведений ЭДС источников питания ветвей E_{2N} , примыкающих к узлу 2 на проводимость ветви G_{2N} , в которой находится источник ЭДС. При этом со знаком «+» берутся те произведения, в которых ЭДС направлена к узлу, если от узла, то будет знак «-». Аналогично для $\sum E_3 G_3$;

K, N, M, P – количество источников, примыкающих к узлам;

$\sum I_{2K}, \sum I_{3P}$ – алгебраическая сумма токов источников тока, примыкающих к узлам 2 и 3. Знак берется аналогично источникам напряжения.

Решив данную систему уравнений относительно неизвестных потенциалов, токи ветвей находят по закону Ома.

1.3. Метод наложения

Этот метод расчета основан на фундаментальном физическом принципе суперпозиции. Применительно к электрическим цепям он формулируется следующим образом: ток в любой ветви электрической цепи есть алгебраическая сумма токов в этой ветви от действия каждого из источников энергии этой цепи по отдельности.

Применяя принцип наложения для расчета цепи, следует по очереди оставлять в ней только один источник энергии и для каждой такой схемы рассчитывать токи во всех ее ветвях. Реальные токи ветвей являются результатом наложения этих частных токов от действия каждого источника энергии по отдельности. При формировании схемы с одним каким-либо конкретным источником энергии все ЭДС остальных источников заменяют короткозамкнутыми переключками, а у источников тока размыкают ветви с током, оставляя в цепи ветви с их внутренними проводимостями источников тока. Заметим, что метод наложения применим только к линейным электрическим цепям, у которых сопротивления ветвей не зависят от величины токов и напряжений, и при всех преобразованиях цепей остаются постоянными величинами.

1.4. Метод эквивалентного генератора

Метод эквивалентного генератора применяется для расчета тока в какой-либо одной выделенной ветви сложной цепи. В его основе лежит теорема об эквивалентном генераторе (источнике), суть которой состоит в следующем: любая сколь угодно сложная электрическая цепь относительно выделенной ветви может быть представлена одним эквивалентным источником ЭДС или одним эквивалентным источником тока.

Если представлена сложная цепь со многими источниками и многими сопротивлениями в виде активного двухполюсника и требуется определить ток I в выделенном из этой цепи сопротивлении R , двухполюсник представляют в виде эквивалентного источника ЭДС с параметрами E_{Γ} и R_{Γ} и получают в соответствии со вторым законом Кирхгофа искомый ток цепи:

$$I = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R}$$

Неизвестные величины $E_{Г}$ и $R_{Г}$ можно найти из опыта холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ).

При проведении опыта ХХ ветвь с сопротивлением R размыкается и на ее зажимах возникает напряжение $U_{ХХ}$, равное ЭДС эквивалентного генератора.

При проведении опыта КЗ отключаются все ЭДС цепи и заменяются перемычками без сопротивления. Тогда входное сопротивление цепи становится равным сопротивлению эквивалентного генератора.

Схема замещения источника напряжения и источника тока показана на рисунке 4.

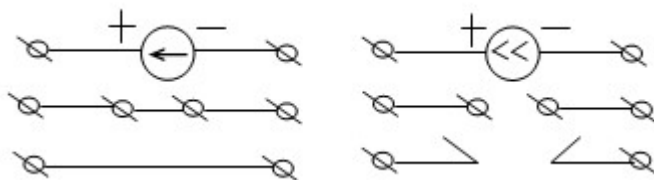


Рис.4. Схемы замещения идеальных источника напряжения и источника тока

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Цель работы: изучение свойств сложных линейных цепей постоянного тока. Проверка принципа суперпозиции и законов Кирхгофа.

2.1. Порядок выполнения работы

Схема исследуемой цепи с двумя источниками энергии цепи E_1 и E_2 и сопротивлениями R_1, R_2, R_3 показана на рисунке 5.

В качестве источников питания используются источник постоянного напряжения 5 В и регулируемый источник постоянного напряжения 0...10 В, расположенные на панели источников питания слева и справа от наборного поля. Реакции цепи измеряются с помощью амперметров и вольтметров. Полярность включения приборов соответствует положительным направлениям токов, указанным на схеме. Отрицательным показаниям приборов соответствуют противоположные направления токов.

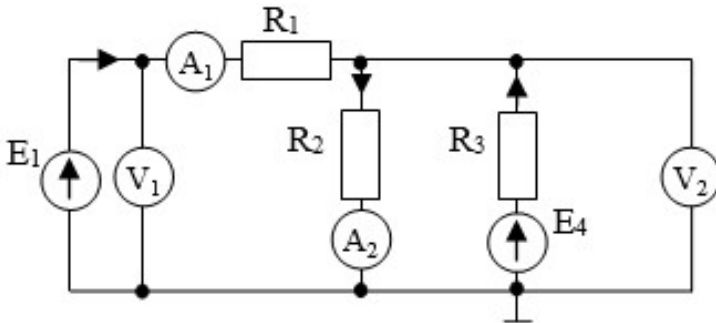


Рис.5. Схема цепи для исследования метода суперпозиции

2.2. Эксперимент и расчет

Собрать схему, изображенную на рисунке.

Измерить ток, напряжения на отдельных элементах. Результаты измерений занести в табл. 1.

Рассчитать ток, напряжения и мощности на оставшихся элементах. Результаты расчетов занести в табл. 2.

Таблица 1.

E_4	E_1	I_1	I_2	I_3	$U_{\text{нар}}(U_{V2})$	U_{R3}	U_{R1}
В	В	мА	мА	мА	В	В	В
1	2	3	4	5	6	7	8
+	+	+	+		+		
+	+	+	+		+		
+	+	+	+		+		
+	+	+	+		+		

Расчётные формулы (для указанного на рисунке 5 направления токов):

$$I_3 = I_2 - I_1;$$

$$U_{\text{ПАР}} = U_{R2};$$

$$U_{R3} = I_3 R_3;$$

$$U_{R1} = I_1 R_1$$

Проверка:

$$U_{R3} = E_4 - U_{R2};$$

$$U_{R1} = E_1 - U_{R2}.$$

Таблица 2

P_1	P_2	P_3	$P_{\text{потр}}$	P_{E1}	P_{E2}	$P_{\text{ист}}$	R_{E1}	R_{E2}
мВт	мВт	мВт	мВт	мВт	мВт	мВт	Ом	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Расчётные формулы:

$$P_1 = I_1^2 R_1;$$

$$P_2 = I_2^2 R_2;$$

$$P_3 = I_3^2 R_3$$

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3;$$

$$P_{E1} = I_{E1} E_1;$$

$$P_{E2} = I_{E1} E_1;$$

$$P_{\text{ИСТ}} = P_{E1} + P_{E2}.$$

2.3. Проверка методом наложения

Найти частные реакции от нерегулируемого источника E_4 .

Пример. Исходная схема примет вид, как на рисунке 6.

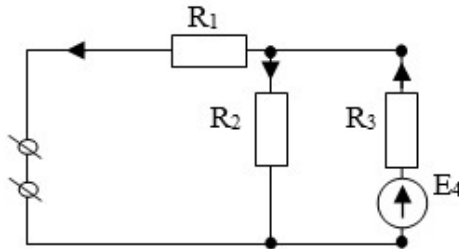


Рис.6. Схема электрической цепи для исследования вклада источника E_4

Расчетные формулы:

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2};$$

$$R_{E4} = R_3 + R_{12};$$

$$I' = I'_3 = \frac{E_4}{R_{общ}};$$

$$U'_3 = I'_3 R_3;$$

$$U'_{12} = U'_1 = U'_2 = I' R_{12};$$

$$I'_2 = \frac{U'_2}{R_2};$$

$$I'_1 = \frac{U'_1}{R_1}.$$

Занести в таблицу 2 значение эквивалентного сопротивления R_{E4} .

Найти частные реакции от регулируемого источника E_1 . Расчет провести для опыта $E_1 = \max$.

Пример. Исходная схема примет вид, как на рисунке 7.

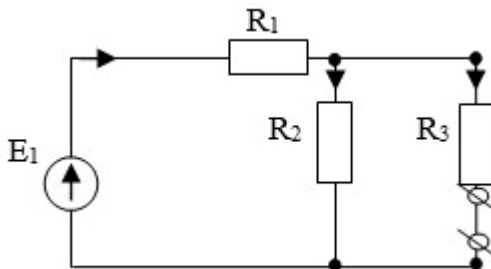


Рис. 7. Схема электрической цепи для исследования вклада источника E_1

Расчетные формулы аналогичны случаю 2.1 (не идентичны, а аналогичны. Будьте внимательны). Присваивайте токам и напряжениям обозначение I'' , U'' .

Занести в таблицу 2 значение эквивалентного сопротивления R_{E1} .

Найти полные реакции в цепи, путем алгебраического сложения ранее посчитанных величин напряжения и тока. Для случая на рисунке 7:

$$I_1 = -I'_1 + I''_1;$$

$$I_2 = I'_2 + I''_2;$$

$$I_3 = I'_3 - I''_3.$$

$$U_1 = -U'_1 + U''_1;$$

$$U_2 = U'_2 + U''_2;$$

$$U_3 = U'_3 - U''_3.$$

Проанализировать расчеты, сравнив их с экспериментальными значениями.

2.4. Проверка простейшим методом

Как уже было сказано в теоретической части, для расчета сложной цепи постоянного тока простейшим методом необходимо составить уравнения по первому и второму законам Кирхгофа.

Для этого рассмотрим схему, изображенную на рисунке 5. Необходимо отметить, что при расчете токов в ветвях, измерительные приборы не учитываются. Таким образом в схеме остаются только резисторы и источники ЭДС.

Предположим, что в схеме направления токов в активных ветвях совпадает с направлением источников ЭДС, ток в ветви с рези-

стором R_2 направлен вниз (те направление токов как на рисунке 5). Следует учитывать, что при изменении напряжения регулируемого источника E_1 направления токов могут измениться.

Согласно второму закону Кирхгофа для направления обхода контура $E_1 - R_1 - R_2$ по часовой стрелке уравнение будем иметь следующий вид:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = E_1$$

Для контура $E_4 - R_3 - R_2$ при обходе контура против часовой стрелки уравнение по второму закону Кирхгофа будет выглядеть следующим образом:

$$I_3 R_3 + I_2 R_2 = E_4$$

Для любого из узлов уравнение согласно первому закону Кирхгофа, будет иметь следующий вид:

$$I_1 + I_3 = I_2$$

Таким образом получается система из трех уравнений с тремя неизвестными величинами:

$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_2 R_2 = E_1 \\ I_3 R_3 + I_2 R_2 = E_4 \\ I_1 + I_3 - I_2 = 0 \end{cases}$$

Решая данную систему уравнений, находим искомые токи в ветвях. Если токи получаются отрицательными, то это говорит о том, что изначально было выбрано неверное направление токов в ветвях. В этом случае необходимо указать обратное направление токов в схеме.

Для проверки необходимо выполнить расчет баланса мощностей. Для этого необходимо рассчитать мощности источников напряжений и мощности потребителей.

Для расчета мощностей необходимо использовать формулы

$$P_1 = I_1^2 R_1; P_2 = I_2^2 R_2; P_3 = I_3^2 R_3$$

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3;$$

$$P_{E1} = I_{E1} E_1; P_{E2} = I_{E2} E_2; P_{ИСТ} = P_{E1} + P_{E2}.$$

Следует отметить, что если мощность источника ЭДС получается отрицательной, то это значит, что источник работает в режиме нагрузки и потребляет энергию из цепи.

2.5. Проверка результатов расчетов и эксперимента

Если все расчеты и измерения выполнены верно, то с учетом округления, результаты должны сходиться с погрешностью 3-5%.

2.6. Отчет

В отчете необходимо представить схему электрической цепи, результаты эксперимента, заполненные таблицы с расчетами, выполненными в ходе проведения эксперимента. Согласно выбранному преподавателем значению источника ЭДС E_4 выполнить расчет токов в ветвях схемы методом наложения и простейшим методом, а также проверку по балансу мощностей.

Кроме того, необходимо представить выводы о результатах проведенной работы.

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое сложная электрическая цепь?
2. Чему равны внутренние сопротивления источников тока и ЭДС?
3. В чем заключается принцип суперпозиции?
4. Какой метод называется простейшим методом?
5. Каким образом рассчитывается сложная цепь согласно простейшему методу?
6. На чем основан метод контурных токов?
7. Можно ли измерить величину контурного тока амперметром?
8. Каким образом учитывают направления контурных токов, при составлении уравнений по методу контурных токов?
9. Каким образом составляется система уравнений при нахождении токов ветвей методом узловых потенциалов?
10. Каким образом находятся токи ветвей в методе узловых потенциалов?
11. Каким образом учитываются источники ЭДС при нахождении токов ветвей методом узловых потенциалов?
12. Каким образом находятся токи ветвей, при расчете схемы методом наложения?
13. Сформулируйте баланс мощностей.
14. Можно ли составить баланс мощностей для частичных токов?
15. Как рассчитывается мощность резистора?
16. Как рассчитывается мощность источников питания?
17. В каком случае мощность источника будет отрицательной?
18. Что такое двухполюсник?
19. На чем основан метод эквивалентного генератора?
20. Каким образом находят ЭДС эквивалентного генератора и его внутренне сопротивление?

4. СХЕМА ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Для схемы, указанной на рисунке 8 записать системы уравнений в общем виде по методу контурных токов и методу узловых потенциалов. Нарисовать схемы для нахождения частичных токов согласно методу наложения.

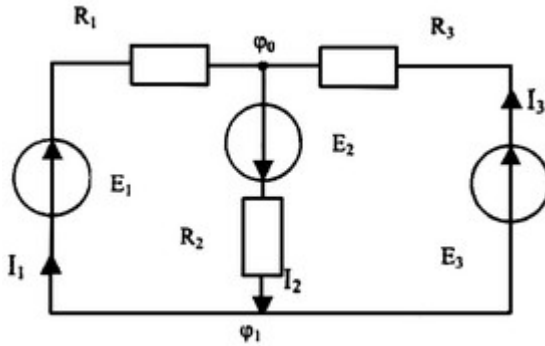


Рис.8. Схема электрической цепи для самопроверки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бутырин П.А.* Основы электротехники [Электронный ресурс]: Учебник для студентов средних и высших учебных заведений профессионального образования по направлениям электротехники и электроэнергетики/ Бутырин П.А., Толчеев О.В., Шакирзянов Ф.Н.— Электрон. текстовые данные.— М.: Издательский дом МЭИ, 2014.— 360 с
2. *Герасимова В.Г.* Электротехника: Учебн. для вузов - М.: Высшая школа, 1983, 480 с.
3. *Жаворонков М.А.* Электротехника и электроника: Учебн. пособие. М.: Академия, 2005, 394 с.
4. *Касаткин А.С.* Электротехника: Учебн. пособие / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. - М.: Академия, 2005, 544 с.
5. Информационно-измерительная техника и электроника: Учеб. пособие / Под ред. проф. Г.Г. Раннева. - М.: Академия, 2006, 512 с.
6. Электротехника и электроника: Учеб. пособие / Н.В. Нефедова, П.М. Каменев, О.М. Большунова. - СПбГИ, 2002, 120 с.
7. *Яковлева Э.В., С.В.Соловьев, И.Н. Войтюк* Электротехника. Часть I. Учебное пособие. С.-Петербург. горн. ун-т. - СПб : Инфо-Да, 2018. – 83 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Теоретическая часть	4
1.1. Метод контурных токов	6
1.2. Метод узловых потенциалов (напряжений).....	7
1.3. Метод наложения	9
1.4. Метод эквивалентного генератора.....	9
2. Эксперимент.....	11
2.1. Порядок выполнения работы.....	11
2.2. Эксперимент и расчет	12
2.3. Проверка методом наложения.....	13
2.4. Проверка простейшим методом	15
2.5. Проверка результатов расчетов и эксперимента	17
2.6. Отчет.....	17
3. Вопросы для самопроверки	18
4. Схема для самопроверки.....	19
Библиографический список.....	20

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОНИКА
СЛОЖНЫЕ ЦЕПИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

*Методические указания к лабораторной работе
для студентов специальности 21.05.02*

Сост.: *Э.В. Яковлева, Т.В. Пудкова, Е.О. Замятин*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
общей электротехники

Ответственный за выпуск *Э.В. Яковлева*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 29.10.2020. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,2. Усл.кр.-отт. 1,2. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 75 экз. Заказ 785.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2