

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: научиться использовать законы Кирхгофа для анализа электрических цепей и проверить выполнение второго закона Кирхгофа с помощью потенциальных диаграмм.

1.1. Основные теоретические сведения

1.1.1. Электрическая цепь и ее элементы

Электрической цепью называется совокупность устройств, предназначенных для передачи, распределения и взаимного преобразования электромагнитной, тепловой, световой и других видов энергии, если процессы, протекающие в устройствах, могут быть описаны при помощи таких понятий, как ЭДС, напряжение и ток.

Основными **элементами** электрической цепи являются источники и приемники электрической энергии, которые соединяются между собой проводниками. В **источниках** электрической энергии (аккумуляторы, гальванические элементы, генераторы и т.п.) химическая, механическая, тепловая и другие виды энергии преобразуются в электрическую энергию. В **приемниках** энергии (нагреватели, электрические машины, осветительные приборы и т.п.) электрическая энергия преобразуется в иные виды энергии.

Электрические цепи, в которых получение, передача и преобразование электрической энергии происходит при постоянных во времени токах и напряжениях, называются **цепями постоянного тока**, а при переменных во времени токах и напряжениях – **цепями переменного тока**.

Для расчета и исследования процессов, протекающих в электрической цепи, ее заменяют **расчетной схемой замещения**, т.е. идеализированной цепью, которая служит расчетной моделью реальной цепи. При получении такой схемы каждый реальный элемент цепи заменяется расчетной моделью – элементом схемы. Математи-

ческое описание каждого элемента должно отражать основные протекающие в нем физические процессы.

Одним из приемников электрической цепи является резистивный элемент – **резистор**. В резистивном элементе с сопротивлением R электрическая энергия необратимо преобразуется в другие виды (тепловую, механическую, энергию излучения и т.п.), чаще всего в тепло. Величина активного сопротивления измеряется в Омах (Ом). Мгновенная мощность, с которой происходит преобразование энергии, определяется соотношением: $p = i^2 R$. Резистивные (или активные) сопротивления вводятся в схемы замещения других элементов цепи для учета необратимого преобразования электромагнитной энергии в другие виды.

Для расчета токов и напряжений в цепи задаются положительными направлениями токов и напряжений. Положительным направлением тока и напряжения полагается их направление от узла с большим потенциалом к узлу с меньшим потенциалом.

На рис. 1.1 $\varphi_1(t) \geq \varphi_2(t)$, поэтому направление тока и напряжения (падения напряжения) задано от узла с потенциалом $\varphi_1(t)$ к узлу с потенциалом $\varphi_2(t)$. В резистивном элементе напряжение связано с током законом Ома:

$$u_R(t) = R \cdot i_R(t). \quad (1.1)$$

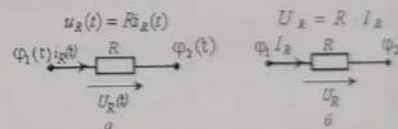


Рис. 1.1. Токи и напряжения на участке цепи

Для цепи постоянного тока (рис. 1.1, б) или для действующих значений резистивной цепи с гармоническими источниками $U_R = R \cdot I_R$. Если значение сопротивления резистора не зависит от тока, протекающего через него, то такой резистор называется **линейным**, а электрическая цепь, состоящая только из таких резисторов, – **линейной резистивной**.

В первой лабораторной работе рассматриваются цепи, содержащие только линейные элементы (резисторы и источники ЭДС и тока).

Источником напряжения (ЭДС, тока) называют источник, напряжение (ЭДС, ток) которого не зависит от сопротивления внешней цепи R_H . Схемы замещения реальных источников приведены на рис. 1.2: источник ЭДС (напряжения) – на рис. 1.2, а, источник тока – на рис. 1.2, б. Величина ЭДС источника (E) измеряется в режиме холостого хода (т.е. при токе в источнике $I_k = 0$) и равна напряжению на его зажимах. В схемах замещения источников резистор $R_{ин} = 1/G_{ин}$ учитывает тепловые потери энергии, выделяемые внутри источника. Если внутреннее сопротивление источника ЭДС (напряжения) равно нулю, а источника тока – бесконечности, то такие источники называют идеальными (рис. 1.2, в, г).

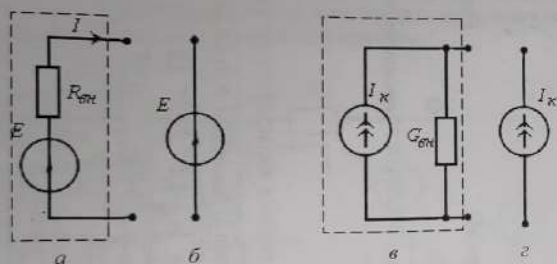


Рис. 1.2. Идеальные и реальные источники энергии

В реальных источниках внутреннее сопротивление $R_{ин}$ имеет конечное значение, поэтому на практике за источник ЭДС (напряжения) принимают источник, для которого выполняется условие $10R_{ин} \leq R_H \leq \infty$, а при условии $0 \leq R_H \leq 10R_{ин}$ – за источник тока, где R_H – сопротивление нагрузки, к которому подключен источник.

Источники напряжения, ЭДС и тока характеризуются внешними вольт-амперными характеристиками (ВАХ): для источников напряжения и ЭДС – зависимостями напряжения или ЭДС от тока, протекающего через источник, а для источника тока – зависимостями тока от напряжения на его зажимах. На рис. 1.3, а, в показаны внешние характеристики реальных источников ЭДС и тока, где имеются линейный (рабочий, с небольшим наклоном) и нелинейный

(с резким изменением) участки характеристик, на которых источник может выйти из строя. На рис. 1.3, б, г изображены внешние характеристики идеальных источников ЭДС и тока. В данной работе рассматриваются источники, которые работают на линейном участке характеристики.

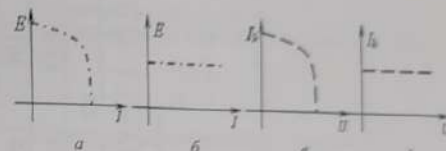


Рис. 1.3. Вольт-амперные характеристики источников энергии

1.1.2. Законы Кирхгофа

Для любой электрической цепи справедливы законы Кирхгофа для токов и напряжений.

Узлом в электрической цепи называется место соединения трех и более ветвей. Место соединения двух ветвей называется устранимым узлом.

Первый закон Кирхгофа: *алгебраическая сумма токов в проводниках, соединенных в узел, равна нулю:*

$$\sum_i (\pm I_i) = 0 \quad (1.2)$$

В (1.2) ток берется со знаком плюс, если он втекает в узел, и со знаком минус, если вытекает.

Ветвью называется участок цепи между двумя узлами, состоящий только из последовательно соединенных элементов. Замкнутым **контуром** цепи называется путь по ветвям цепи, который начинается и заканчивается в одном и том же узле, при прохождении которого ни один из элементов не проходит дважды. Контур называется **взаимно независимым**, если в каждом из них есть хотя бы одна ветвь, которой нет в других контурах.

Второй закон Кирхгофа: *алгебраическая сумма ЭДС всех*

источников в любом замкнутом контуре цепи равна алгебраической сумме напряжений на остальных элементах того же контура:

$$\sum_n (\pm E_n) = \sum_k (\pm U_k). \quad (1.3)$$

Для составления уравнения необходимо задать направление обхода контура (по направлению часовой стрелки либо против). В (1.3) ЭДС и напряжения берутся со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением обхода контура, если не совпадают, то со знаком минус. Падения напряжения в (1.3) могут быть по закону Ома выражены через токи и сопротивления.

Система независимых контуров выбирается так, что в контур включаются только ветви с неизвестными токами, а в каждый последующий контур должна входить хотя бы одна ветвь с неизвестным током, не вошедшая в предыдущие контуры.

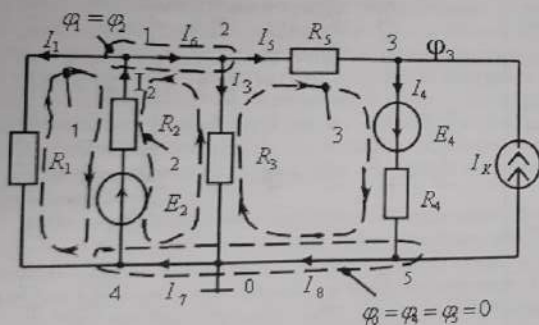


Рис. 1.4. Разветвленная электрическая цепь

Для нахождения токов в электрической цепи **методом уравнений Кирхгофа** составляется система уравнений из n_1 уравнений по первому закону Кирхгофа и n_2 уравнений по второму закону Кирхгофа.

$$n_1 = q - 1;$$

$$n_2 = p - q + 1,$$

где q — число узлов в схеме;

p — число ветвей в схеме, не содержащих источники тока.

Так, для схемы рис. 1.4 точки 1 и 2 представляют собой один узел, а точки 4, 0 и 5 — другой.

$$q = 3; p = 5; n_1 = 2; n_2 = 3.$$

Составлены системы уравнений:

- по первому закону Кирхгофа для двух верхних узлов:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0, \\ I_4 - I_1 - I_5 = 0; \end{cases}$$

- по второму закону Кирхгофа для контуров 1-3:

$$\begin{cases} -I_1 R_1 - I_2 R_2 = -E_1, \\ -I_3 R_3 - I_2 R_2 = -E_2, \\ -I_4 R_4 + I_5 R_5 + I_3 R_3 = E_3. \end{cases}$$

Решая систему уравнений, можно определить токи в ветвях.

1.1.3. Закон Ома для ветви с источниками ЭДС

Закон Ома для ветви с источниками ЭДС (рис. 1.5) может быть получен из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа для контура, образованного этой ветвью и напряжением между узлами, к которым она присоединена:

$$I \cdot R_1 + I \cdot R_2 - U_{12} = E_1 - E_2. \quad (1.4)$$

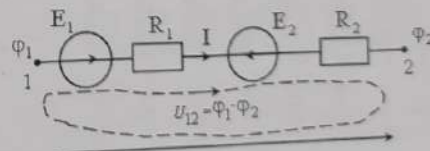


Рис. 1.5. Участок цепи между двумя узлами

Преобразуя уравнение (1.4), получим закон Ома для ветви с источниками ЭДС (*обобщенный закон Ома*):

$$I = \frac{U_{12} + E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{12} + \sum (\pm E_i)}{\sum R_j} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \sum (\pm E_i)}{\sum R_j}. \quad (1.5)$$

При определении тока I положительное направление напряжения U_{12} необходимо выбрать по току, а ЭДС E_i взять с положительным знаком, если ток и ЭДС совпадают по направлению, и с отрицательным, если не совпадают.

1.1.4. Потенциальная диаграмма

Для наглядного отображения распределения потенциалов в электрической цепи постоянного тока используется графическое представление в виде *потенциальной диаграммы*. Потенциальная диаграмма представляет собой график распределения потенциала вдоль участка цепи или контура, при этом по оси абсцисс откладываются нарастающим порядком сопротивления резистивных элементов, встречающихся на пути обхода ветви или контура, а по оси ординат — потенциалы соответствующих точек. Таким образом, каждой точке рассматриваемого участка или контура соответствует точка на потенциальной диаграмме (точка не обязательно должна соответствовать одному из узлов схемы, это просто место соединения двух элементов).

Потенциал любой точки электрической цепи может быть вычислен через потенциал предыдущей точки и падение напряжения на элементе, включенном между рассматриваемой точкой и предыдущей. Если между этими точками расположен источник ЭДС, то величина ЭДС берется со знаком плюс, если источник направлен к рассматриваемой точке, иначе — со знаком минус:

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} \pm E_k.$$

Если между этими точками расположен резистор, то падение напряжения на нем берется со знаком плюс, если протекающий через него ток направлен к предыдущей точке, иначе — со знаком минус:

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} \pm i_k R_k.$$

Рассмотрим построение потенциальной диаграммы на примере схемы рис. 1.6.

При параметрах схемы $E_1 = 48$ В, $E_2 = 37$ В, $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 4$ Ом, $R_3 = 3$ Ом, $R_4 = 1$ Ом токи в ветвях схемы равны: $I_1 = 10$ А, $I_2 = -5$ А, $I_3 = -2$ А.

Построим потенциальную диаграмму для контура $abcd$. Для выбора масштаба по горизонтальной оси просуммируем сопротивления резисторов вдоль рассматриваемого контура (если в условии задач не указаны внутренние сопротивления источников, то они считаются нулевыми для источников ЭДС и равными бесконечности для источников тока):

$$R_\Sigma = R_2 + R_3 + R_4 = 4 + 3 + 1 = 8 \text{ [Ом]}.$$

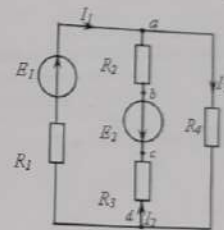


Рис. 1.6. Резистивная цепь

Потенциалы точек контура вычислим относительно потенциала точки a , потенциал которой принят за нуль:

$$\varphi_b = \varphi_a + I_2 \cdot R_2 = 0 - 5 \cdot 4 = -20 \text{ [В]};$$

$$\varphi_c = \varphi_b + E_2 = -20 + 37 = 17 \text{ [В]};$$

$$\varphi_d = \varphi_c + I_3 \cdot R_3 = 17 - 2 \cdot 3 = 11 \text{ [В]};$$

$$\varphi_a = \varphi_d + I_1 \cdot R_1 = 11 - 10 \cdot 5 = -39 \text{ [В]}.$$

Таким образом, координаты точек потенциальной диаграммы: $a(0; 0)$; $b(4; -20)$; $c(4; 17)$; $d(7; 11)$; $a(8; 0)$. С учетом выбранных мас-

штабов на рис. 1.7 построена потенциальная диаграмма для контура $abcd$.

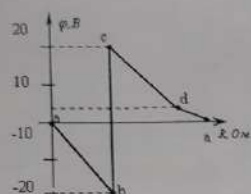


Рис. 1.7. Потенциальная диаграмма

1.2. Домашнее задание

1. При подготовке к лабораторной работе следует изучить теоретический материал данной работы, соответствующие разделы учебников и конспекта лекций, ответить на контрольные вопросы.
2. Рассчитать токи ветвей и падения напряжения на резисторах для схем на рис. 1.8–1.10 в соответствии с номером варианта. Примеры вариантов приведены в табл. 1.1. Конкретные значения параметров варианта для каждой подгруппы задаются преподавателем. Если задано отрицательное значение параметра, то направление источника изменяется на противоположное по сравнению с обозначенным на схеме. Рассчитанные значения занести в табл. 1.2.

Таблица 1.1

Исходные данные для расчета и эксперимента

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_1 , В	5,5	-6	7	-8	7	8	-9	9	10	-10
J_1 , мА	10	9	-8	7	6	5,5	-6	-7	8	-9

3. Для схем рис. 1.8–1.10 построить потенциальные диаграммы (для внешних и одного внутреннего контура).

1.3. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, изображенную на рис. 1.8.

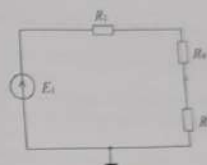


Рис. 1.8. Нерастветленная электрическая цепь

2. Установить регулятором напряжение источника E_1 в соответствии с номером варианта.
3. Измерить ток(и) амперметром. Измерить вольтметром падения напряжения на резисторах. Занести значение в табл. 1.2.
4. Собрать схему, изображенную на рис. 1.9. Повторить пункты 2, 3 для этой схемы.

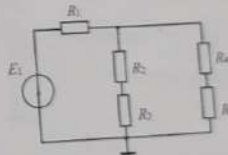


Рис. 1.9. Разветвленная электрическая цепь

5. Собрать схему, изображенную на рис. 1.10.

R_1 R_2

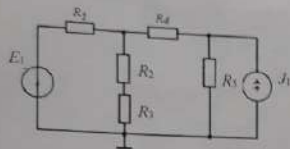


Рис. 1.10. Сложная разветвленная электрическая цепь.

6. Установить регулятором напряжение источника E_1 и ток источника J_1 в соответствии с номером варианта.
7. Измерить амперметром токи. Измерить вольтметром падения напряжения на резисторах. Занести значения в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Расчетные и экспериментальные значения

		I_1 мА	I_2 мА	I_3 мА	I_4 мА	U_{R1} В	U_{R2} В	U_{R3} В	U_{R4} В	U_{R5} В
Схема 1	Расчет									
	Опыт									
Схема 2	Расчет									
	Опыт									
Схема 3	Расчет									
	Опыт									

1.4. Обработка результатов эксперимента

По экспериментальным значениям построить потенциальные диаграммы (экспериментальные и расчетные диаграммы строить для каждой схемы на одном графике).

1.5. Содержание отчета по лабораторной работе

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Расчетное задание в соответствии с вариантом.
4. Описание эксперимента и схемы исследуемых цепей.
5. Результаты эксперимента (расчеты, таблицы, графики зависимостей).
6. Анализ результатов (сравнение экспериментальных резуль-

татов с расчетными и теорией).

7. Выводы по работе.

1.6. Контрольные вопросы и задания

1. Какие элементы содержит электрическая цепь и для чего эти элементы предназначены?
2. Как строится схема замещения электрической цепи?
3. Изложите основные сведения об источниках напряжения и тока.
4. Нарисуйте вольт-амперные характеристики идеальных источников напряжения и тока.
5. Как записывается закон Ома для ветви с последовательным соединением ЭДС и резисторов?
6. Сформулируйте законы Кирхгофа.
7. Как выбираются знаки у составляющих, которые входят в первый и второй законы Кирхгофа?
8. Сколько уравнений необходимо составить по первому и второму законам Кирхгофа для определения токов в цепи?
9. Изложите суть метода расчета цепей по методу уравнений Кирхгофа.
10. Составьте систему уравнений по методу уравнений Кирхгофа для схемы рис. 1.10.
11. Запишите обобщенный закон Ома для ветвей схемы рис. 1.10.