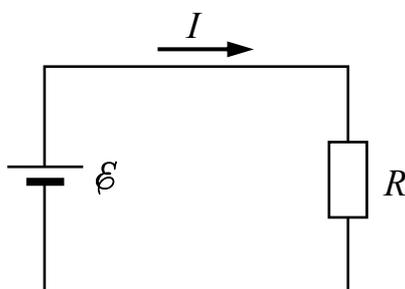


ПОСТОЯННЫЙ ТОК



• ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ •

БК 535
УДК В343я73-5
Б907

Рецензент

Доктор технических наук, профессор ТГТУ
Д.М. Мордасов

Составители:

*Н.А. Булгаков, О.С. Дмитриев,
А.М. Савельев, Ю.П. Ляшенко*

Б907 Постоянный ток : лабораторные работы / Сост. : Н.А. Булгаков, О.С. Дмитриев, А.М. Савельев, Ю.П. Ляшенко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 24 с. – 200 экз.

Представлены методические указания по выполнению пяти лабораторных работ раздела "Постоянный ток" курса общей физики. Даны описания лабораторных установок, теоретическое обоснование соответствующих методов экспериментального решения поставленных задач, а также методика обработки полученных результатов. Приведены контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Предназначены для выполнения студентами 1-2 курсов всех специальностей и форм обучения инженерного профиля.

ББК 535
УДК В343я73-5

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный
технический университет" (ТГТУ), 2008
Министерство образования и науки Российской Федерации

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Лабораторные работы



Тамбов
• Издательство ТГТУ •
2008

Учебное издание

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Лабораторные работы

Составители:

БУЛГАКОВ Николай Александрович,
ДМИТРИЕВ Олег Сергеевич,
САВЕЛЬЕВ Александр Михайлович,
ЛЯШЕНКО Юрий Петрович

Редактор Т.М. Глинкина

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано к печати 03.07.2008

Формат 60 × 84/16. 1,39 усл. печ. л. Тираж 200 экз. Заказ № 312

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

Лабораторная работа 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА "УИТСТОНА"

Цель работы: ознакомление с принципом работы измерительной мостовой схемы и экспериментальное определение величины неизвестного сопротивления.

Приборы и принадлежности: источник постоянной ЭДС, магазин сопротивлений, неизвестные сопротивления, реохорд, гальванометр, ключ.

Методические указания и описание установки

Одним из наиболее точных способов измерения сопротивлений является метод мостика Уитстона. Принципиальная схема представляет собой замкнутый прямоугольник, образованный сопротивлениями R_1, R_2, R_3, R_4 (рис. 1). В диагональ AC подсоединяется источник постоянного тока ε , а в BD , образующую "мост", нуль-гальванометр G . Сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 называются *плечами моста*. При произвольно выбранных сопротивлениях R_1, R_2, R_3, R_4 в диагонали BD будет идти ток, вызывающий отклонение стрелки гальванометра в ту или другую сторону. Величина этого тока определяется по закону Ома:

$$I_g = \frac{\varphi_B - \varphi_D}{r_g},$$

где φ_B и φ_D – потенциалы в точках B и D ; r_g – сопротивление гальванометра. Подбирая определенные соотношения сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 , можно добиться отсутствия тока в цепи гальванометра ($I_g = 0$).

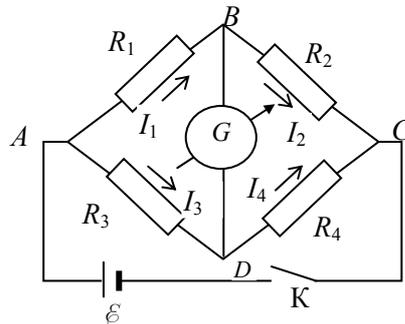


Рис. 1

Это означает, что потенциалы точек B и D одинаковы, т.е. $\varphi_B = \varphi_D$. В этом случае мост называют *сбалансированным*.

Токи, текущие через сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 , обозначим соответственно I_1, I_2, I_3, I_4 . Для нахождения одного из этих сопротивлений запишем закон Ома для каждого из участков цепи через разности потенциалов на концах соответствующих сопротивлений:

$$I_1 R_1 = \varphi_A - \varphi_B; \quad (1)$$

$$I_3 R_3 = \varphi_A - \varphi_D; \quad (2)$$

$$I_2 R_2 = \varphi_B - \varphi_C; \quad (3)$$

$$I_4 R_4 = \varphi_D - \varphi_C. \quad (4)$$

При условии $I_g = 0$, когда $\varphi_B = \varphi_D$, в уравнениях (1), (2) и (3), (4) правые части равны, следовательно, равны и левые части:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3, \quad (5)$$

$$I_2 R_2 = I_4 R_4 . \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) называются уравнениями сбалансированного моста. Для последовательно соединенных сопротивлений R_1 и R_2 , R_3 и R_4 и отсутствия тока в диагонали BD имеем $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$. Разделив почленно уравнение (5) на (6) получаем:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} ,$$

откуда, например,

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4} . \quad (7)$$

В настоящей работе используется установка, электрическая схема которой показана на рис. 2. Сопротивление R_1 заменено неизвестным сопротивлением R_x , величину которого нужно определить; вместо постоянного резистора R_2 включен магазин сопротивлений R_m , позволяющий менять значение этого сопротивления в широком диапазоне; сопротивления R_3 и R_4 заменены единой эталонированной проволокой ADC (ее сечение одинаково по всей длине) – *реохордом*. Движок D , перемещаясь по реохорду, меняет плечи мостика R_3 и R_4 .

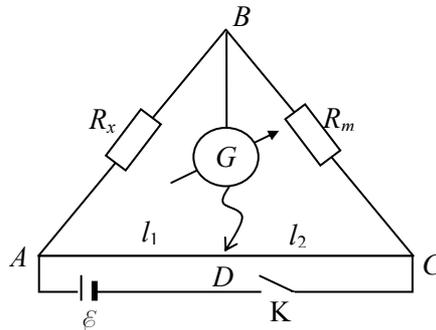


Рис. 2

Так как сопротивление однородного цилиндрического проводника

$$R = \rho \frac{l}{S} ,$$

где ρ – удельное сопротивление; l – длина и S – сечение проволоки реохорда, при постоянных ρ и S пропорционально длине l , то отношение сопротивлений R_3 / R_4 в уравнении (7) будет эквивалентно отношению плеч реохорда, т.е.

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{l_1}{l_2} . \quad (8)$$

В итоге, уравнение (7) для расчета неизвестного сопротивления (R_x) принимает окончательный вид:

$$R_x = R_m \frac{l_1}{l_2} . \quad (9)$$

Порядок выполнения работы

1. В плечо AB (рис. 2) включите одно из двух заданных преподавателем неизвестных сопротивлений R_{x1} , R_{x2} . Движок реохорда поставьте так, чтобы он находился в средней трети длины реохорда. Замкните ключ K , нажав кнопку, и вращением декад магазина сопротивлений R_m (исключая X10000) выберите интервал сопротивлений, при котором стрелка гальванометра не зашкаливает ни вправо, ни влево и легко выводится на нуль. Для первоначального положения движка реохорда декадами R_m установите стрелку на нуль, а полученные значения l_1 и l_2 и соответствующее сопротивление магазина запишите в табл. 1.

Измените сопротивление магазина R_m , увеличив или уменьшив его на 10 % от первоначального значения.

Передвигая движок реохорда при нажатой кнопке ключа, вновь добейтесь нулевого тока в цепи гальванометра и занесите новые значения l_1 , l_2 и R_m в табл. 1. Прodelайте 5 таких измерений, изменяя каждый раз сопротивление магазина R_m на 10 % от предыдущего значения.

2. В этой же последовательности произведите измерения второго неизвестного сопротивления R_{xj} , а затем величины общих сопротивлений $R_{xi} R_{xj}$ посл и $R_{xi} R_{xj}$ пар при последовательном и параллельном соединении сопротивлений R_{xi} и R_{xj} . Данные занесите в табл. 2 – 4.

Таблица 1

$R_{xi,j}$	№ п\п	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	R_{xi} , Ом	ΔR_{xi} , Ом	$R_{xi} = R_{xi\text{ ср}} \pm \Delta R_{xi\text{ ср}}$, Ом
R_{xi}	1						
	...						
					$R_{xi\text{ ср}} =$	$\Delta R_{xi\text{ ср}} =$	

Таблица 2

$R_{xi,j}$	№ п\п	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	R_{xj} , Ом	ΔR_{xj} , Ом	$R_{xj} = R_{xj\text{ ср}} \pm \Delta R_{xj\text{ ср}}$, Ом
R_{xj}	1						
	...						
					$R_{xj\text{ ср}} =$	$\Delta R_{xj\text{ ср}} =$	

Таблица 3

$R_{xi,j}$	№ п\п	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	$R_{xi,j}$ посл, Ом	$\Delta R_{xi,j}$ посл, Ом	$R_{xi,j}$ посл = $R_{xi,j}$ посл. ср \pm $\pm \Delta R_{xi,j}$ посл. ср, Ом
$R_{xi,j}$ посл	1						
	...						
					$R_{xi,j}$ посл. ср =	$\Delta R_{xi,j}$ посл. ср =	

Таблица 4

$R_{xi,j}$	№ п\п	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	$R_{xi,j}$ пар, Ом	$\Delta R_{xi,j}$ пар, Ом	$R_{xi,j}$ пар = $R_{xi,j}$ пар. ср \pm $\pm \Delta R_{xi,j}$ пар. ср, Ом
$R_{xi,j}$ пар	1						
	...						
					$R_{xi,j}$ пар. ср =	$\Delta R_{xi,j}$ пар. ср =	

3. По формуле (9), используя результаты измерений, рассчитайте по пять значений сопротивлений R_{xi} и R_{xj} и найдите их средние значения ($R_{xi\text{ ср}}$) и ($R_{xj\text{ ср}}$).

4. По формуле (9) аналогично рассчитайте по 5 значений общих сопротивлений $R_{xi} R_{xj}$ при последовательном и параллельном соединении сопротивлений R_{xi} и R_{xj} . Найдите их средние значения.

5. Вычислите абсолютные погрешности ΔR_{xi} и ΔR_{xj} для каждого искомого сопротивления, а также абсолютные ошибки общих сопротивлений при последовательном и параллельном включении сопротивлений R_{xi} и R_{xj} . Рассчитайте среднюю абсолютную погрешность для каждого неизвестного сопротивления и среднюю абсолютную погрешность общих сопротивлений при последовательном и параллельном соединении сопротивлений R_{xi} и R_{xj} .

6. По найденным средним величинам сопротивлений и средним значениям их абсолютных ошибок рассчитайте для каждого случая относительные погрешности E .

7. Сравните экспериментально полученные значения общих сопротивлений в табл. 3 и 4 с теоретическими, рассчитываемыми при последовательном и параллельном соединении резисторов R_{xi} и R_{xj} .

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схему мостика Уитстона и объясните принцип его действия.
2. Выведите расчетную формулу (9).
3. Напишите и объясните законы Ома для однородного, неоднородного участков и полной цепи.
4. Объясните физический смысл закона Ома в дифференциальной форме.
5. Зависит ли погрешность измерений от положения движка реохорда?
6. Получите расчетную формулу (9) с использованием правила Кирхгофа.
7. Используя классическую теорию электропроводности металлов, получите выражение для удельной электропроводности металлов.
8. Как зависит электрическое сопротивление проводника от его температуры?
9. Получите закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах.
10. Что такое электрический ток, сила тока, плотность тока?

Лабораторная работа 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ТОКА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Цель работы: ознакомление с методом компенсации и применение его для измерения электродвижущих сил гальванических элементов.

Приборы и принадлежности: источник питания 12 В, эталонный и неизвестный источники ЭДС, нуль-прибор, реохорд, балластное и переменное сопротивления, два сопротивления известного номинала, ключи.

Методические указания и описание установки

ЭДС источника – это энергия, которую приобретает единичный заряд, проходя через источник тока, измеряемая отношением работы, совершаемой при перемещении заряда сторонними силами по замкнутой цепи, к величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} = \oint E_{\text{ст}} dl, \quad (1)$$

где $E_{\text{ст}}$ – напряженность поля сторонних сил, перемещающих заряд q по цепи; dl – элементарный участок замкнутого контура.

Сторонние силы всегда не электрического происхождения осуществляют разделение разноименных зарядов в источнике и поддерживают разность потенциалов на концах проводника.

В электрической цепи, содержащей помимо источника ЭДС с внутренним сопротивлением r еще и внешнее сопротивление R , величина \mathcal{E} равна сумме падений напряжений на сопротивлениях $R(U_R)$ и $r(U_r)$, т.е. $\mathcal{E} = U_R + U_r$ или $\mathcal{E} = IR + Ir$, откуда

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (2)$$

Это закон Ома для *полной цепи*. Заменив ток I на U/R для внешней цепи, уравнение (2) преобразуем к виду:

$$U = \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + r \right) R = \frac{\mathcal{E}}{(1 + r/R)}. \quad (3)$$

Видно, что U всегда меньше \mathcal{E} и поэтому ЭДС не может быть измерена точно с помощью вольтметра, у которого хотя и велико, но всегда конечное значение сопротивления R_V .

В то же время из закона Ома для полной цепи $\mathcal{E} = U + Ir$ следует, что $\mathcal{E} = U$ при отсутствии тока во внешней цепи ($I = 0$). Это используется для определения величины ЭДС источника в так называемом методе компенсации, рассматриваемом в настоящей лабораторной работе. В основу метода компенсации положен метод сравнения электродвижущих сил двух элементов, ЭДС одного из которых известна. На рис. 1 представлена принципиальная

схема метода. Источники \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_x с внутренними сопротивлениями соответственно r_1 и r_2 , соединены одноименными полюсами. При этом \mathcal{E}_1 должна быть больше \mathcal{E}_x ($\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_x$). R_1 и R_2 – сопротивления участков AB и BC , G – гальванометр. Стрелками указано направление токов. Запишем уравнения по правилам Кирхгофа. По первому – для узла A :

$$I_1 - I_2 - i = 0. \quad (4)$$

По второму правилу для контуров $AC \mathcal{E}_1 A$ и $A \mathcal{E}_x BA$:

$$I_1(R_2 + r_1) + iR_1 = \mathcal{E}_1,$$

$$iR_1 - I_2 r_2 = \mathcal{E}_x \quad (5)$$

(внутренним сопротивлением гальванометра G пренебрегаем).

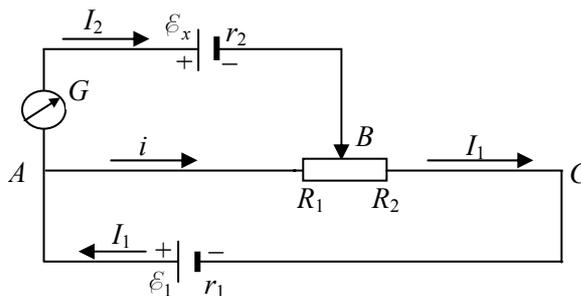


Рис. 1

Изменяя соотношение сопротивлений R_1 и R_2 (перемещением контакта B), можно добиться того, чтобы ток (I_2) через гальванометр, а значит, и элемент \mathcal{E}_x не протекал. При $I_2 = 0$ ток $I_1 = i$ и уравнения (5) получают вид:

$$I_1(R_2 + r_1 + R_1) = \mathcal{E}_1;$$

$$I_1 R_1 = \mathcal{E}_x. \quad (6)$$

Следовательно, сила тока в цепи элемента \mathcal{E}_x равна нулю в том случае, когда ЭДС неизвестного элемента компенсируется падением напряжения на участке AB . Поэтому и метод называется "компенсационным". Из (6) получаем:

$$\frac{\mathcal{E}_x}{\mathcal{E}_1} = \frac{R_1}{(R_1 + R_2 + r_1)}. \quad (7)$$

В уравнении остается неизвестным сопротивление r_1 . Чтобы его исключить проводят сравнение с эталонным источником тока, включаемым вместо источника \mathcal{E}_x . Таким источником является нормальный элемент, ЭДС которого \mathcal{E}_N . ЭДС \mathcal{E}_N теперь будет компенсироваться при других соотношениях сопротивлений R_1 и R_2 . Обозначим их через R'_1 и R'_2 . Тогда уравнение (7) перепишется:

$$\frac{\mathcal{E}_N}{\mathcal{E}_1} = \frac{R'_1}{(R'_1 + R'_2 + r_1)}, \quad (8)$$

так как $R_1 + R_2 = R'_1 + R'_2$, из уравнений (7) и (8) следует, что

$$\frac{\mathcal{E}_N}{\mathcal{E}_x} = \frac{R'_1}{R_1} \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \frac{R_1}{R'_1}. \quad (9)$$

Как правило, в качестве сопротивлений $(R_1 + R_2) = (R'_1 + R'_2)$ используется эталонированная проволока (*реохорд*). Сопротивление такого проводника определяется его параметрами, т.е. $R_1 = \rho (l_1 / S)$, а $R'_1 = \rho (l'_1 / S)$, следовательно, отношение $R_1 / R'_1 = l_1 / l'_1$. Так как $l_1 = k n_1$, а $l'_1 = k n'_1$, где k – цена деления реохорда, а n_1 и n'_1 – отсчеты по шкале реохорда, то $l_1 / l'_1 = n_1 / n'_1$. Тогда расчетная формула (9) окончательно запишется в виде:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \frac{n_1}{n'_1} \quad (10)$$

Работа выполняется на установке, электрическая схема которой дана на рис. 2. Здесь \mathcal{E} – источник питания постоянного тока; G – гальванометр; ABC – реохорд; K_1 и K_2 – ключи; K – перекидной ключ, позволяющий поочередно включать элементы \mathcal{E}_N и \mathcal{E}_x ; R – балластное сопротивление, включаемое для уменьшения тока в цепи нормального элемента и гальванометра в начальные моменты опыта, так как через нормальный элемент можно пропускать ток, не превышающий 10^{-5} А (это ограничение существенно и для гальванометра); R_0 – переменное сопротивление, с помощью которого можно изменять условия опыта.

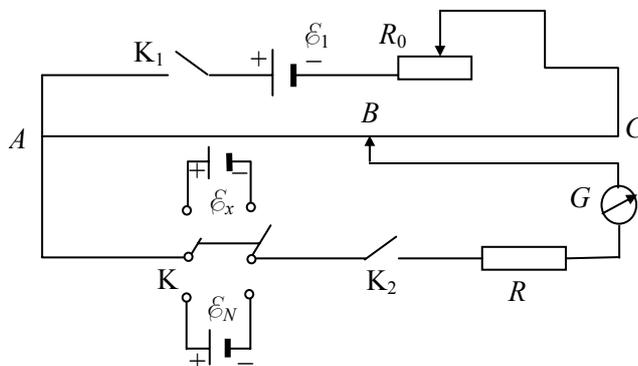


Рис. 2

Порядок выполнения работы и обработка результатов

1. Ознакомьтесь с устройством установки и проверьте правильность сборки элементов согласно схеме на рис. 2, обратите внимание на полярность источников \mathcal{E}_x и \mathcal{E}_N .
2. Соблюдая полярность, включите вилку элемента \mathcal{E} в розетку "+12 В–", установленную на лабораторном столе.
3. Ключом K включите в цепь элемент \mathcal{E}_x , ключи K_1 и K_2 замкните.
4. Переместите движок B реохорда в правую его половину. С помощью реостата R_0 добейтесь того, чтобы стрелка гальванометра G установилась на нуль. Возьмите отсчет n_1 по шкале реохорда между точками A и C и запишите его в таблицу.
5. Передвиньте подвижный контакт реостата R_0 немного вправо или влево и для нового его положения движком реохорда вновь установите стрелку гальванометра на нуль. Отметьте в таблице новое значение n_1 .
6. Повторите п. 5 еще для трех значений R_0 , а величины n_1 внесите в таблицу.

Таблица

№ п/п	n_1 , дел.	n'_1 , дел.	Δn_1 , дел.	$\Delta n'_1$, дел.	$(\Delta n_1)^2$, дел. ²	$(\Delta n'_1)^2$, дел. ²	$\Delta n_{1\text{ср}}$, дел.	$\Delta n'_{1\text{ср}}$, дел.
1								
...								

7. Ключом K переключите цепь на эталонный элемент \mathcal{E}_N и проделайте операции п. 4 – 6. Значения n'_1 запишите в таблицу.
8. По измеренным значениям n_1 и n'_1 рассчитайте их средние величины и найдите $\mathcal{E}_{x\text{ср}}$.
9. По методу Стьюдента рассчитайте относительную E_1 и абсолютную погрешность $\Delta \mathcal{E}_x$.
10. Конечную величину искомой ЭДС \mathcal{E}_x дайте в виде:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_{x \text{ ср}} \pm \Delta \mathcal{E}_x.$$

11. Проанализируйте полученный результат и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое сторонние силы, каковы их природа и роль в электрической цепи?
2. Что понимают под ЭДС источника тока, разностью потенциалов и напряжением на участке цепи?
3. Напишите закон Ома для полной цепи и поясните смысл выражения "сумма падений напряжений".
4. Объясните, почему напряжение на клеммах источника всегда меньше значения его ЭДС?
5. Почему вольтметром нельзя точно измерить величину ЭДС источника?
6. При каких условиях величина напряжения может быть равна ЭДС?
7. В чем состоит сущность метода компенсации, используемого для определения ЭДС источника?
8. Почему ЭДС известного источника должна быть больше ЭДС как неизвестного, так и эталонного источников?
9. Запишите и объясните физический смысл законов Ома для однородного и неоднородного участков цепи.
10. Выведите формулу (9) и поясните необходимость использования эталонного источника.
11. Как рассчитать величину сопротивления любого линейного резистора?
12. Почему в рассматриваемом методе определения ЭДС нужно использовать эталонированный провод (реохорд)?
13. Запишите конечную формулу для расчета неизвестной ЭДС и объясните целесообразность замены ею формулы (9).
14. Какова роль использованных в установке балластного R и добавочного R_0 сопротивлений?
15. Напишите и поясните суть правил Кирхгофа.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩЕГО ЭДС

Цель работы: экспериментально исследовать зависимость тока в цепи от разности потенциалов на неоднородном участке; снять зависимость разности потенциалов на участке от сопротивления внешней цепи.

Приборы и принадлежности: источники ЭДС \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , амперметр, вольтметр, магазин сопротивлений, набор резисторов для сопротивлений $R_{\text{вч}}$, ключи.

Методические указания

Закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}, \quad (1)$$

где I – ток на участке 1-2, сопротивление которого R ; $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов на концах этого участка; \mathcal{E} – ЭДС источника тока (рис. 1).

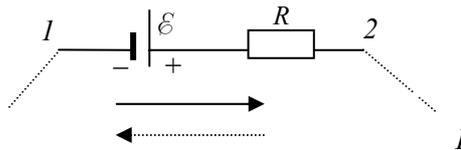


Рис. 1

В локальной (векторной) форме закон Ома представляется:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \sigma (\vec{E}_k + \vec{E}_{\text{ст}}), \quad (2)$$

где \vec{j} – плотность тока; σ – удельная электропроводность; $\vec{E}_{\text{ст}}$ – напряженность поля сторонних сил, под действием которых на полюсах источника происходит накопление зарядов противоположных знаков; \vec{E}_k – напряженность кулоновского потенциального поля, создаваемого зарядами, накопившимися на полюсах источника; \vec{E} – результирующая напряженность поля сторонних и электрических сил.

При использовании обобщенного закона Ома (1) следует обращать внимание на принципиальное различие между разностью потенциалов, электродвижущей силой и напряжением. Каждая из этих величин определяется как удельная работа сил поля, т.е. отношением A/q . Но разность потенциалов – это работа кулоновского потенциального поля, ЭДС – работа непотенциального стороннего поля (локализованного внутри источника). Под напряжением понимают удельную работу результирующего поля электростатических и сторонних сил ($\vec{E} = \vec{E}_k + \vec{E}_{\text{ст}}$) и согласно (1) напряжение равно произведению силы тока на полное сопротивление рассматриваемого участка цепи. Направление тока, протекающего через источник, определяется по вектору результирующей

напряженности \vec{E} . В зависимости от состава внешней цепи разность потенциалов на исследуемом участке может быть как больше нуля, так и меньше или равна нулю.

Исследование закона Ома для участка цепи, содержащего ЭДС, проводится по схеме, показанной на рис. 2. Ветвь $1\varepsilon_1R_{\text{уч}}2$ – исследуемый участок цепи, содержащий ЭДС. Участок $1\varepsilon_2R2$ – внешняя цепь. $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$. $R_{\text{уч}}$ – сопротивление исследуемого участка цепи, включающего сопротивление амперметра R_A , внутреннее сопротивление источника r и ступенчато меняющееся сопротивление набора резисторов. R – переменное сопротивление внешней цепи (калиброванный реостат или магазин сопротивлений).

Разность потенциалов на участке измеряется вольтметром V с нулем в середине шкалы, а ток – амперметром A .

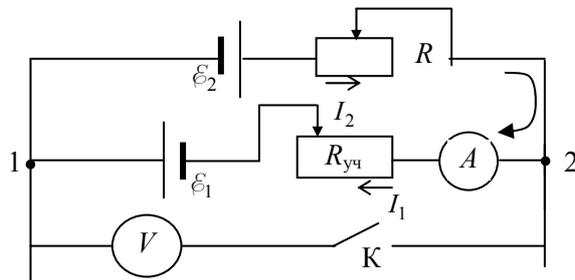


Рис. 2

Поскольку сопротивление вольтметра велико, так что

$$I_V \approx 0$$

и, следовательно,

$$I_1 \approx I_2 \approx I,$$

запишем соотношения:

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_2 \quad \text{и} \quad -IR_{\text{уч}} = (\varphi_1 - \varphi_2) - \varepsilon_1,$$

решая которые, получаем:

$$I = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{R + R_{\text{уч}}}. \quad (3)$$

Закон Ома для изучаемого участка $2R_{\text{уч}}\varepsilon_11$ (направление обхода выбрано от точки 2 к точке 1), запишется в виде

$$IR_{\text{уч}} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_1,$$

откуда

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_1}{R_{\text{уч}}}. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) находим:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\varepsilon_2 R_{\text{уч}} - \varepsilon_1 R}{R + R_{\text{уч}}}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует: если $\varepsilon_2 R_{\text{уч}} > \varepsilon_1 R$, то $\varphi_1 - \varphi_2 > 0$; если $\varepsilon_2 R_{\text{уч}} < \varepsilon_1 R$, то $\varphi_1 - \varphi_2 < 0$; если $\varepsilon_2 R_{\text{уч}} = \varepsilon_1 R$, то $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ (см. рис. 1). Таким образом, изменяя внешнее сопротивление цепи R , можно получить разность потенциалов между точками 1 и 2 участка разной полярности и зафиксировать это по отклонению стрелки вольтметра влево или вправо от нуля шкалы. Из уравнения (4) следует, что зависимость $I = f(\varphi_1 - \varphi_2)$ является линей-

ной функцией. При этом для графика $I = f(\varphi_1 - \varphi_2)$ угловой коэффициент прямой равен $1 / R_{yч}$, а точка пересечения графика с осью токов соответствует $I = \mathcal{E}_1 / R_{yч}$ при $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$.

Порядок выполнения работы

Внимание! 1. В качестве источников ЭДС \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 в установке используется смонтированный блок, запитываемый от сети 220 В. Их включение производится соответствующим выключателем (ВКЛ / ВЫКЛ).

2. Величина сопротивления $R_{yч}$ определяется положением переключателя $R_{yч}$ (положения 1 – 7). Два из этих значений задаются преподавателем.

1. Установите одно из заданных значений положений переключателя $R_{yч}$.

2. Подключите установку к сети 220 В. Соответствующими переключателями включите источники питания \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 .

3. Магазином сопротивлений поставьте значение внешнего сопротивления R примерно 5...7 кОм. При периодическом кратковременном подключении вольтметра с помощью ключа К, увеличивая или уменьшая величину сопротивления R , добейтесь отклонения стрелки вольтметра на 40 – 50 делений влево от нуля шкалы. Зафиксируйте это значение сопротивления. Затем, уменьшая сопротивление магазина с периодическим кратковременным включением ключа К, добейтесь того же отклонения стрелки вольтметра вправо от нуля шкалы. Отметьте минимальное значение сопротивления R .

4. В полученном диапазоне сопротивлений магазина выберите такие их значения (всего 9 – 11), чтобы разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) между ними равномерно менялась от максимальной ее отрицательной величины (слева от нуля шкалы) до максимальной положительной (справа) с регистрацией нулевого значения.

5. Для намеченных значений сопротивлений замерьте соответствующие им величины токов I и разности потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$), учитывая цену деления шкалы вольтметра. Результаты всех измерений внесите в табл. 1.

Таблица 1

R , Ом								
I , мА								
$\varphi_1 - \varphi_2$, В								

Таблица 2

R , Ом								
I , мА								
$\varphi_1 - \varphi_2$, В								

6. Поставьте другое заданное положение переключателя $R_{yч}$. Проведите все операции п. 3 – 5, а полученные опытные измерения занесите в табл. 2.

7. Используя данные измерений, постройте для обоих случаев зависимости $I = f(\varphi_1 - \varphi_2)$. По угловым коэффициентам полученных прямых и точкам пересечения прямых с осью ординат рассчитайте сопротивления участка $R_{yч,i,j}$ и величину \mathcal{E}_1 источника тока.

8. Постройте графические зависимости $\varphi_1 - \varphi_2 = f(R)$.

Контрольные вопросы

1. Что значит неоднородный участок цепи?
2. Напишите в скалярной форме закон Ома для неоднородного участка.
3. Объясните физический смысл закона Ома в локальной (векторной) форме.
4. Какова природа сторонних сил источника тока и их роль в электрической цепи?
5. Что такое напряженность кулоновского потенциального поля?
6. В чем состоит различие между разностью потенциалов, электродвижущей силой и напряжением?

7. Чем определяется направление тока, протекающего через источник, находящийся на неоднородном участке?
8. Нарисуйте электрическую схему используемой установки и укажите ее основные элементы.
9. Напишите для исследуемого участка и участка внешней цепи уравнения по второму правилу Кирхгофа
10. Выведите конечное соотношение (5) для разности потенциалов между точками 1 и 2 неоднородного участка.
11. Объясните влияние величины сопротивления внешней цепи на изменение полярности разности потенциалов исследуемого участка.
12. Объясните полученные графические закономерности $I = f(\varphi_1 - \varphi_2)$ и $\varphi_1 - \varphi_2 = f(R)$.

Лабораторная работа 4

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ, ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И КПД ИСТОЧНИКА ОТ НАГРУЗКИ

Цель работы: научиться экспериментальным путем определять полную, полезную мощности и КПД источника в зависимости от величины сопротивления цепи.

Приборы и принадлежности: источник тока, вольтметр, амперметр, реостат, мостик Уитстона, ключи.

Методические указания и описание установки

1. *Закон Ома для полной цепи:*

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}, \quad (1)$$

где \mathcal{E} – ЭДС источника тока; R и r – сопротивления внешней цепи и внутреннего источника. При постоянных значениях \mathcal{E} и r ток является функцией от R ($I = f(R)$).

Из уравнения (1) следует, что падение напряжения на внешнем сопротивлении $U = IR = \mathcal{E} - Ir$ или

$$U = \frac{\mathcal{E}R}{R+r} = \frac{\mathcal{E}}{1 + \frac{r}{R}}, \quad (2)$$

т.е. при постоянных \mathcal{E} и r также является функцией R ($U = f(R)$). Видно, что $U = \mathcal{E}$ при $I = 0$ ($R \rightarrow \infty$ – цепь разомкнута) и $U = 0$ при $R = 0$ (короткое замыкание).

2. *Полная мощность, развиваемая источником:*

$$P = \mathcal{E}I. \quad (3)$$

3. *Полезная мощность, т.е. мощность расходуемая во внешней цепи:*

$$P_{\text{п}} = IU = I^2R. \quad (4)$$

С учетом (1) получаем:

$$P_{\text{п}} = \frac{R\mathcal{E}^2}{(R+r)^2}. \quad (5)$$

Кроме того, учитывая, что $U = \mathcal{E} - Ir$, имеем:

$$P_{\text{п}} = \mathcal{E}I - I^2r, \quad (6)$$

где $P_i = I^2r$ – выделяющееся внутри источника тепло, т.е. бесполезно теряемая мощность.

Из соотношения (6) видно, что зависимость полезной мощности от тока [$P_{\text{п}} = f(I)$] является параболической. Дифференцируя выражение (5) по R и приравнявая производную нулю, можно показать, что $P_{\text{п}}$ будет максимальной при $R = r$. Из (6) следует, что $P_{\text{п}} = 0$, когда ток в цепи равен нулю, т.е. когда цепь разомкнута ($R \gg r$), или при коротком замыкании, когда величина тока в цепи равна

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r} \quad (R = 0).$$

4. Коэффициент полезного действия источника равен

$$\eta = \frac{P_{\text{п}}}{P} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{(\mathcal{E}I - rI^2)}{\mathcal{E}I} = 1 - I \frac{r}{\mathcal{E}}. \quad (7)$$

Из (7) вытекает, что КПД источника может мало отличаться от единицы при малых внешних токах и будет уменьшаться по линейному закону, обращаясь в нуль при коротком замыкании, т.е. при

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Качественный характер зависимостей P , $P_{\text{п}}$ и η от силы тока I показан на рис. 1.

Видно, что условия получения наибольшей полезной мощности и максимального КПД несовместимы. Когда $P_{\text{п}}$ достигает наибольшего значения, сила тока равна $\mathcal{E} / 2r$ и $\eta = 1/2$ или 50 %. Когда же КПД близок к 1, полезная мощность мала по сравнению с максимальной мощностью, которую мог бы развить источник тока.

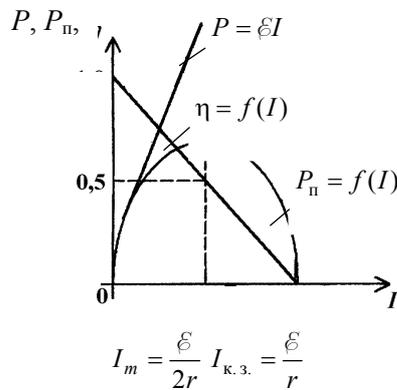


Рис. 1

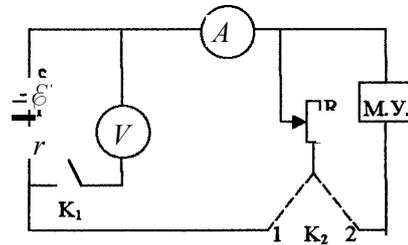


Рис. 2

В работе используется установка, электрическая схема которой представлена на рис. 2, где V – вольтметр с большим внутренним сопротивлением; R – реостат, значения сопротивления которого при разных положениях движка замеряются с помощью мостика Уитстона (М.У.); A – амперметр; K_1 и K_2 – ключи.

Порядок выполнения и обработки результатов

1. Проверьте правильность сборки установки согласно схеме на рис. 2. *Выставьте на амперметре и вольтметре необходимые пределы измеряемых величин и определите цену деления каждого.* Запишите в свой отчет класс точности приборов.

2. Подключите установку к розетке "+12 В-", укрепленной на лабораторном столе. Ключ K_2 поставьте в положение 2, ключ K_1 замкните и замерьте вольтметром напряжение на клеммах источника (U_0). В дальнейших расчетах величину U_0 принимать за значение ЭДС источника, т.е. $U_0 = \mathcal{E}$.

3. Установите максимально возможное значение внешнего сопротивления R , передвинув движок реостата в крайнее от себя положение. Оставьте ключ K_2 в положении 2 и с помощью мостика Уитстона измерьте это сопротивление. Для этого установите делитель мостика на цифру 1, нажмите на кнопку питания моста и, вращая ручку кругового реохорда, подведите стрелку нуль-гальванометра точно к исходному значению. Против стрелки вблизи кругового реохорда возьмите отсчет величины сопротивления. Затем ключ K_2 переведите в положение 1 и снимите показания амперметра и вольтметра при данном значении R . Полученные результаты занесите в таблицу.

4. Уменьшая величину внешнего сопротивления R и повторяя операции п. 3, замерьте ток и напряжение для каждого из значений сопротивления. Измерения проведите для 10 – 12 значений R . Результаты внесите в таблицу.

$R, \text{ Ом}$										
$I, \text{ А}$										
$U, \text{ В}$										
$P, \text{ Вт}$										
$P_{\text{п}}, \text{ Вт}$										
$\eta, \%$										

5. По полученным значениям I , U и величине ЭДС ($\mathcal{E} \approx U_0$) источника, для каждого значения сопротивления внешней цепи вычислите полную мощность (P), полезную мощность ($P_{\text{п}}$) и КПД источника (η) по формулам: $P = I\mathcal{E}$; $P_{\text{п}} = IU$; $\eta = P_{\text{п}} / P$ соответственно.

6. По экспериментальным данным постройте графики зависимостей $I = f(R)$, $U = f(R)$ и $P_{\text{п}} = f(R)$.

7. По табличным величинам постройте графики зависимостей $P = f(I)$, $P_{\text{п}} = f(I)$ и $\eta = f(I)$ (см. рис. 1). Исходя из графиков, найдите величины внутреннего сопротивления (r) источника и тока короткого замыкания ($I_{\text{к.з.}}$).

Контрольные вопросы

1. Объясните физический смысл закона Ома в векторной (дифференциальной) форме.
2. Что называется КПД источника тока, его полной и полезной мощностями?
3. Объясните изменение полярности разности потенциалов между двумя точками неоднородного участка в зависимости от величины сопротивления внешней цепи.
4. Объясните полученные графические закономерности $I = f(\varphi_1 - \varphi_2)$ и $\varphi_1 - \varphi_2 = f(R)$.
5. Закон Ома для однородного участка цепи в интегральной и дифференциальной формах.
6. Закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной и дифференциальной формах.
7. Принципиальная схема лабораторной установки, назначение приборов и методика проведения исследования по изучению закона Ома для полной цепи.
8. Закон Ома для полной цепи. Понятие ЭДС источника тока.
9. Ток короткого замыкания.
10. Объясните физический смысл понятий напряжения, разности потенциалов и ЭДС.
11. Что такое электрический ток, сила тока и плотность тока?

Лабораторная работа 5

ПРОВЕРКА ПРАВИЛ КИРХГОФА ДЛЯ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ

Цель работы: экспериментальная проверка правил Кирхгофа для сложной цепи постоянного тока.

Приборы и принадлежности: источники постоянного тока, резисторы, вольтметр, переключатели, ключи.

Методические указания и описание установки

Правила Кирхгофа применяются при расчете сложных электрических цепей постоянного тока, имеющих несколько точек разветвления и содержащих несколько источников ЭДС.

I правило: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_1^n I_i = 0. \quad (1)$$

II правило: в любом произвольно выбранном замкнутом контуре разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжений на участках этого контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum_1^n I_i R_i = \sum_1^n \mathcal{E}_i. \quad (2)$$

Произведение тока I на величину сопротивления R называется падением напряжения на этом сопротивлении.

Число независимых уравнений, составленных по правилам I и II Кирхгофа, должно быть равно числу токов, идущих в разветвленной цепи.

Измерив значение падения напряжения на каждом известном по величине резисторе, определяются силы токов в них: I_1, I_2, \dots, I_n . Алгебраическое суммирование токов должно удовлетворять уравнению (1).

Зная величины токов I_1 и I_5 (см. рис. 1), а также падение напряжения δU_1 и δU_2 на источниках \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 при разомкнутой и замкнутой цепи, рассчитываются величины внутренних сопротивлений r_1 и r_2 источников тока:

$$r_1 = \frac{\mathcal{E}_1 - \varphi_1}{I_1} = \frac{\delta U_1}{I_1}; \quad r_2 = \frac{\mathcal{E}_2 - \varphi_2}{I_5} = \frac{\delta U_2}{I_5}, \quad (3)$$

где \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 – значения ЭДС источников при разомкнутой цепи; φ_1 и φ_2 – разности потенциалов на клеммах этих источников при замкнутой цепи.

По падению напряжений на всех сопротивлениях, входящих в какой-либо выделенный из сложной цепи замкнутый контур, проверяется II уравнение Кирхгофа.

Работа выполняется на установке, электрическая схема которой показана на рис. 1. Здесь $R_1 - R_6$ – известные сопротивления, \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 – источники постоянных ЭДС.

Внимание! Сопротивление R_2 представляет собой блок из 10 отдельных резисторов, подсоединяемых в цепь с помощью переключателя.

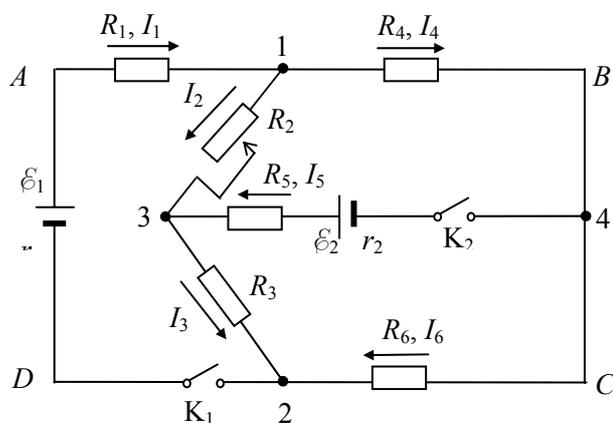


Рис. 1

Падения напряжений на отдельных участках цепи измеряются вольтметром (V). Так как сопротивление вольтметра много больше любого резистора в цепи, то его подключение практически не влияет на величину тока в конкретном сопротивлении и распределение токов во всей цепи. Значения ЭДС $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ и сопротивлений $R_1 - R_6$ подобраны такими, чтобы направления токов совпадали с указанными на рис. 1, а величины напряжений $U_{i,j}$ были всегда положительными.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой и проверьте правильность подключения каждого элемента согласно схеме на рис. 1.
2. Определите цену деления вольтметра V и запишите в отчет класс его точности.
3. Переключателем сопротивления R_2 поставьте одно из двух заданных преподавателем значений.
4. Подключите, соблюдая полярность, выходы источника \mathcal{E}_1 к розетке "+40 В-", а источника \mathcal{E}_2 к розетке "+12 В-", установленным на лабораторном столе.
5. При разомкнутых ключах K_1 и K_2 , используя переключатель вольтметра, замерьте величины ЭДС \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , результаты занесите в табл. 1.
6. Замкните ключи K_1 и K_2 и замерьте значения φ_1 и φ_2 , а также падения напряжений на всех сопротивлениях, поочередно меняя положение переключателя вольтметра. Все данные запишите в табл. 1.
7. Переключателем сопротивления R_2 поставьте другое заданное его значение. Пропейдите все операции п. 5 и 6, а полученные результаты внесите в табл. 2.

Таблица 1

№ п/п	$\mathcal{E}_1, \text{В}$	$\varphi_1, \text{В}$	$\mathcal{E}_2, \text{В}$	$\varphi_2, \text{В}$	$U_i, \text{В}$	$\Delta U_i, \text{В}$	$I_i, \text{А}$	$r_1, \text{Ом}$	$r_2, \text{Ом}$
1									
...									

Таблица 2

№ п/п	$\mathcal{E}_1, \text{В}$	$\varphi_1, \text{В}$	$\mathcal{E}_2, \text{В}$	$\varphi_2, \text{В}$	$U_j, \text{В}$	$\Delta U_j, \text{В}$	$I_j, \text{А}$	$r_1, \text{Ом}$	$r_2, \text{Ом}$
1									
...									

8. По замеренным напряжениям на каждом сопротивлении и величинам самих сопротивлений, по закону Ома рассчитайте токи $I_1 - I_6$ на каждом участке для обоих значений R_2 и запишите их в табл. 1 и 2.

9. Проведите проверку первого правила Кирхгофа (1) для всех узлов цепи. Например, для узла 1:

$$\sum I = I_1 - I_2 - I_4 = \frac{U_1}{R_1} - \frac{U_2}{R_2} - \frac{U_4}{R_4} = 0.$$

За счет погрешностей ΔU и $\Delta R \sum I_{i,j}$ может отличаться от нуля не более чем на величину

$$\sum \Delta \left(\frac{U}{R} \right) = \frac{R_1 \Delta U_1 + U_1 \Delta R_1}{R_1^2} + \frac{R_2 \Delta U_2 + U_2 \Delta R_2}{R_2^2} + \frac{R_4 \Delta U_4 + U_4 \Delta R_4}{R_4^2},$$

при этом погрешности ΔU берутся по классу точности вольтметра, а значения сопротивлений и их погрешности указаны на установке.

10. По формулам (3) найдите величины внутренних сопротивлений r_1 и r_2 источников ЭДС \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Внесите их в табл. 1 и 2.

11. Используя найденные значения токов, известные величины сопротивлений и ЭДС источников, проверьте уравнение (2) для трех независимых контуров (указать, каких именно). Несовпадение $\sum \mathcal{E}_{i,j}$ с $\sum I_{i,j} R_{i,j}$ не должно превышать величины $\sum \Delta \mathcal{E}_{i,j} + \sum \Delta U_{i,j}$. Погрешность $\Delta \mathcal{E}_{i,j}$ также берется по классу точности вольтметра.

12. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

- Используя уравнение непрерывности и закон Ома для неоднородного участка цепи, выведите правила Кирхгофа.
- Что такое узел, участок, замкнутый контур в разветвленной электрической схеме?
- Сколько уравнений необходимо составлять, используя I правило Кирхгофа?, II правило Кирхгофа? Какие правила знаков для токов и ЭДС источников применяются при составлении уравнений?
- Используя правила Кирхгофа, составьте необходимое число уравнений для нахождения токов во всех участках конкретной электрической схемы, предложенной преподавателем.
- Используя результаты измерений и расчетов, выполненных в этой работе, докажите справедливость I и II правил Кирхгофа на примерах узлов, замкнутых контуров, выбранных в электрической схеме, которая изучалась в этой работе (см. рис. 1).
- Что такое электрический ток, сила тока, плотность тока?
- Получите и сформулируйте законы Ома для однородного и неоднородного участков цепи в дифференциальной форме.
- Понятие о электродвижущей силе источника тока, сторонних силах, напряженности поля сторонних сил.
- Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца.
- Принципиальная схема лабораторной установки, назначение приборов и методика проведения исследования в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахматов, А.С. Лабораторный практикум по физике / А.С. Ахматов, В.М. Андреевский [и др.]. – М. : Высшая школа, 1980.
2. Гольдин, Л.Л. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Л.Л. Гольдин [и др.]. – М. : Наука, 1973.
3. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М. : Высшая школа, 1989.
4. Базакуца, В.А. Лабораторный практикум по физике / В.А. Базакуца, Л.Г. Волкова [и др.]. – Харьков, 1964.
5. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М., 1982. – Т. 2.
6. Иродов, И.Е. Основные законы электромагнетизма / И.Е. Иродов. – М. : Высшая школа, 1983.
7. Зисман, Г.А. Курс общей физики / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – М. : Наука, 1971. – Т. 2.
8. Длужневский, Г.И. Лабораторные работы по физике / Г.И. Длужневский [и др.]. – М. : Высшая школа, 1960.