

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Рабочая тетрадь
для лабораторных работ

студента _____
Ф.И.О.

группа _____

УДК 535
ББК В343я73-5
Б907

Р е ц е н з е н т

Доктор технических наук, профессор
кафедры «Автоматизированные системы и приборы» ТГТУ
Д.М. Мордасов

С о с т а в и т е л и:

Н.А. Булгаков, А.М. Савельев, О.В. Исаева

Б907 Постоянный ток: рабочая тетрадь для лабораторных работ /
сост. : Н.А. Булгаков, А.М. Савельев, О.В. Исаева. – Тамбов : Изд-
во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. – 40 с. – 200 экз.

Содержит пять лабораторных работ по разделу «Постоянный ток» курса общей физики. Даны описания лабораторных установок, теоретическое обоснование соответствующих методов экспериментального решения поставленных задач, методика обработки полученных результатов, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Предназначена для студентов 1 курса всех специальностей и форм обучения.

УДК 535

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2010

ББК В343я73-5

Учебное издание

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Рабочая тетрадь для лабораторных работ

С о с т а в и т е л и:

БУЛГАКОВ Николай Александрович

САВЕЛЬЕВ Александр Михайлович

ИСАЕВА Ольга Вячеславовна

Редактор М.С. Мордасова

Инженер по компьютерному макетированию Т.Ю. Зотова

Подписано в печать 01.02.2010

Формат 60 × 84/16. 2,32 усл. печ. л. Тираж 200 экз. Заказ № 48

Издательско-полиграфический центр ТГТУ

392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

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.

I. 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 \mathcal{E} , 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 определённые соотношения между плечами моста, можно добиться отсутствия тока в цепи гальванометра ($I_g = 0$).

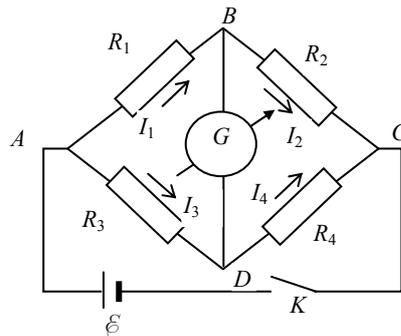


Рис. 1

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 соединённых 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 сопротивления 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 (её сечение одинаково по всей длине) – *реохордом*. Движок D , перемещаясь по реохорду, меняет плечи мостика R_3 и R_4 .

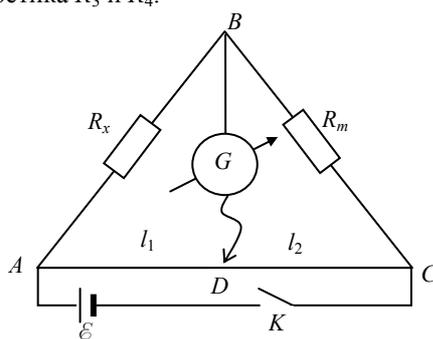


Рис. 2

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.

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

И тогда уравнение (7) для расчёта неизвестного сопротивления (R_x) принимает окончательный вид:

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

II. Экспериментальная часть

$$R_x = R_{\text{_____}}; R_y = R_{\text{_____}},$$

где R_x – любой из шести резисторов; R_y – второй резистор в паре с первым (номера резисторов задаются преподавателем).

1. В плечо AB (рис. 2) включите одно из двух заданных преподавателем неизвестных сопротивлений R_x , R_y . 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 значение магазина сопротивлений запишите в табл. 1.

Не меняя сопротивление магазина R_m , передвиньте движок реохорда влево или вправо на 70...80 делений. Нажав кнопку ключа и возвращая движок реохорда к первоначальному положению, добейтесь нулевого тока в цепи гальванометра, и

занесите полученные значения l_1 и l_2 в табл. 1. Проведите аналогичные измерения ещё три раза (всего 5 раз), записывая данные в табл. 1.

1. Для заданного резистора R_x

i	$R_M, \text{ Ом}$	$l_1, \text{ мм}$	$l_2, \text{ мм}$	$\Delta l_{1i} = l_{1i} - l_{1\text{ср}}$	$\Delta l_{2i} = l_{2i} - l_{2\text{ср}}$	$(\Delta l_{1i})^2$	$(\Delta l_{2i})^2$
1						
2							
3							
4							
5							
		$l_{1\text{ср}}$	$l_{2\text{ср}}$			$\Sigma(\Delta l_{1i})^2$	$\Sigma(\Delta l_{2i})^2$

2. В этой же последовательности произведите измерения плеч l_1 и l_2 реохорда при измерении второго неизвестного сопротивления R_y , а затем для случаев последовательного и параллельного соединения сопротивлений резисторов R_x и R_y . Все замеры внесите в табл. 2 – 4.

2. Для заданного резистора R_y

i	$R_M, \text{ Ом}$	$l_1, \text{ мм}$	$l_2, \text{ мм}$	$R_{yi}, \text{ Ом}$	$\Delta R_y, \text{ Ом}$	$R_y = R_{y\text{ср}} \pm \Delta R_y$
1
2						
3						
4						
5						
		$l_{1\text{ср}}$	$l_{2\text{ср}}$	$R_{y\text{ср}}$		

3. При последовательном соединении R_x и R_y

i	$R_M, \text{ Ом}$	$l_1, \text{ мм}$	$l_2, \text{ мм}$	$R_{x,yi}, \text{ Ом}$	$\Delta R_{x,y}, \text{ Ом}$	$R_{x,y} = R_{x,y\text{ср}} \pm \Delta R_{x,y}$
1
2						
3						
4						
5						
		$l_{1\text{ср}}$	$l_{2\text{ср}}$	$R_{x,y\text{ср}}$		

4. При параллельном соединении R_x и R_y

i	$R_M, \text{ Ом}$	$l_1, \text{ мм}$	$l_2, \text{ мм}$	$R_{x,yi}, \text{ Ом}$	$\Delta R_{x,y}, \text{ Ом}$	$R_{x,y} = R_{x,y\text{ср}} \pm \Delta R_{x,y}$
1
2						
3						
4						
5						
		$l_{1\text{ср}}$	$l_{2\text{ср}}$	$R_{x,y\text{ср}}$		

Работа выполнена " ____ " _____ 20 ____ г. _____ (подпись)

III. Обработка результатов

1. По формуле (9) рассчитаем пять значений и среднюю величину R_x :

$$R_{x1} = \dots \cdot \dots = \dots \text{ Ом};$$

$$R_{x2} = \dots \cdot \dots = \dots \text{ Ом};$$

$$R_{x3} = \dots \cdot \dots = \dots \text{ Ом};$$

$$R_{x4} = \dots \cdot \dots = \dots \text{ Ом};$$

$$R_{x5} = \dots \cdot \dots = \dots \text{ Ом};$$

$$R_{x\text{cp}} = \frac{\dots + \dots + \dots + \dots}{5} = \dots \text{ Ом}$$

Абсолютную погрешность найдём из соотношения:

$$\Delta R_x = R_{x\text{cp}} \cdot \left(\frac{\Delta R_M}{R_M} + \frac{\Delta l_1}{l_{1\text{cp}}} + \frac{\Delta l_2}{l_{2\text{cp}}} \right),$$

которое получается после преобразований формулы (9) для расчёта абсолютной и относительной погрешности при косвенных измерениях. Здесь $\Delta R_M/R_M = 0,02\%$ – относительная погрешность магазина сопротивлений; l_1 и l_2 замерены в миллиметрах.

Погрешности Δl_1 и Δl_2 находим по методу Стьюдента

$$\Delta l_1 = \alpha S = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\Delta l_{1i})^2}{n(n-1)}}; \quad \Delta l_2 = \alpha S = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\Delta l_{2i})^2}{n(n-1)}},$$

где $\alpha = 2,8$ – коэффициент Стьюдента, S – средняя квадратичная погрешность. Подставляя числовые значения, получаем:

$$\Delta l_1 = 2,8 \cdot \sqrt{\frac{\dots}{20}} = \dots \text{ мм}; \quad \Delta l_2 = 2,8 \cdot \sqrt{\frac{\dots}{20}} = \dots \text{ мм}$$

$$\Delta R_x = \dots \cdot \left(0,0002 + \dots + \dots \right) = \dots \text{ Ом}$$

$$R_x = R_{x\text{cp}} \pm \Delta R_x = \dots \pm \dots \text{ Ом}.$$

Все рассчитанные величины внесём в табл. 1

По аналогии рассчитываем значения R_y и $R_{x,y}$ при последовательном и параллельном соединении резисторов R_x и R_y и заполняем табл. 2, 3, 4.

2. Таким образом, искомые величины сопротивлений равны:

1) $R_x = R_{\dots} = \bar{R}_{\dots} \pm \Delta R_{\dots} = \dots \pm \dots \text{ Ом};$

2) $R_y = R_{\dots} = \bar{R}_{\dots} \pm \Delta R_{\dots} = \dots \pm \dots \text{ Ом};$

3) $R_{x,y(\text{послед.})} = R_{\dots} = \bar{R}_{\dots} \pm \Delta R_{\dots} = \dots \pm \dots \text{ Ом};$

4) $R_{x,y(\text{паралл.})} = R_{\dots} = \bar{R}_{\dots} \pm \Delta R_{\dots} = \dots \pm \dots \text{ Ом}.$

3. Сравним экспериментальные значения общих сопротивлений при последовательном и параллельном соединении резисторов с теоретическими, рассчитываемыми по формулам:

$$R_{\text{общ(послед.)}} = R_1 + R_2 ;$$

$$\frac{1}{R_{\text{общ(паралл.)}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{\text{общ(паралл.)}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

$$R_{\dots}(\text{послед.}) = R_{\dots} + R_{\dots} = \dots + \dots = \dots \text{ Ом};$$

$$R_{\dots}(\text{паралл.}) = \frac{R_{\dots} \cdot R_{\dots}}{R_{\dots} + R_{\dots}} = \frac{\dots \cdot \dots}{\dots + \dots} = \dots \text{ Ом}.$$

4. Выводы: _____

Работа зачтена " ____ " _____ 20 __ г. _____
(подпись)

Контрольные вопросы

1. Чем определяется сопротивление проводника?
2. Нарисуйте схему мостика Уитстона и объясните принцип его действия.
3. Что значит сбалансированный мостик Уитстона?
4. Выведите расчётную формулу (9).
5. Напишите и объясните законы Ома для однородного, неоднородного участков и полной цепи.
6. Объясните физический смысл закона Ома в дифференциальной форме.
7. Получите расчётную формулу (9) с использованием правила Кирхгофа.
8. Используя классическую теорию электропроводности металлов, получите выражение для удельной электропроводности металлов.
9. Как зависит электрическое сопротивление проводника от его температуры?
10. Зависит ли погрешность измерений от положения движка реохорда?
11. Получите закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах.
12. Что такое электрический ток, сила тока, плотность тока?
13. Поясните суть метода Стюдента, используемого в данной работе.
14. Что такое относительная погрешность для магазина сопротивлений?

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.

I. 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:

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

где $E_{ст}$ – напряжённость 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*. Заменяв 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 эле-

ментов, 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 одноимёнными 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 :

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

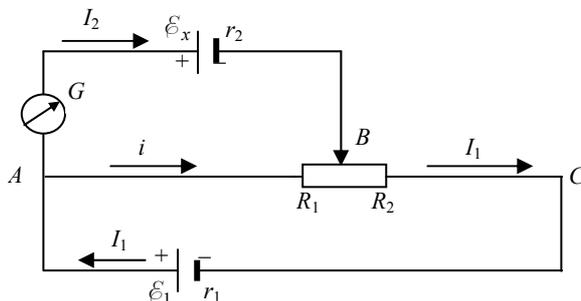


Рис. 1

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).

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 остаётся 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 будет компенсироваться при других соотношениях сопротивлений R_1 и R_2 . Обозначим их через R'_1 и R'_2 . Тогда уравнение (7) переписывается:

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

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 $l_1 = kn_1$, а $l'_1 = kn'_1$, где k – цена деления реохорда, а n_1 и n'_1 – отсчёты по шкале реохорда, то $l_1/l'_1 = n_1/n'_1$. Тогда расчётная формула (9) окончательно запишется в виде:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_N \frac{n_1}{n'_1} \quad (10)$$

Работа выполняется на установке, электрическая схема которой дана на рис. 2. Здесь E – источник питания постоянного тока; G – гальванометр; ABC – реохорд; K_1 и K_2 – ключи; K – перекидной ключ, позволяющий поочередно включать элементы ε_N и ε_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.

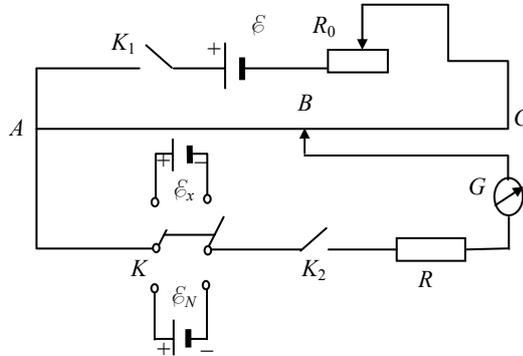


Рис. 2

II. Экспериментальная часть

1. Ознакомьтесь с устройством установки и проверьте правильность сборки элементов согласно схеме на рис. 2, обратите внимание на полярность источников ε_x и ε_N .
2. Соблюдая полярность, включите вилку элемента E в розетку "+12 В–", установленную на лабораторном столе.
3. Ключом K включите в цепь элемент ε_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 отсчёт n_1 по шкале реохорда между точками A и C и запишите его в таблицу.
5. Не меняя сопротивление реостата R_0 , передвиньте движок реохорда влево или вправо на 70...80 делений и возвращая движок реохорда к первоначальному положению, добейтесь нулевого тока в цепи гальванометра, и занесите полученные значения n_1 в табл. 1. Проведите аналогичные измерения еще три раза (всего 5 раз), записывая данные в табл. 1.
6. Ключом K переключите цепь на эталонный элемент E_N и проделайте операции п. 5. Значения n'_1 запишите в табл. 1.

Таблица 1

№ 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	$\Delta n_{1\text{cp}}$, дел.	$\Delta n'_{1\text{cp}}$, дел.	
1									
2									
3									
4									
5									
		$n_{1\text{cp}}$	$n'_{1\text{cp}}$						

Работа выполнена " ___ " _____ 20 ___ г. _____
(подпись)

III. Обработка результатов

1. По измеренным значениям n_1 и n'_1 рассчитаем их средние величины:

$$n_{1\text{cp}} = \frac{\quad + \quad + \quad + \quad + \quad}{5} = \quad \text{дел.};$$

$$n'_{\text{ср}} = \frac{\quad + \quad + \quad + \quad +}{5} = \quad \text{дел.}$$

2. Среднее значение искомой \mathcal{E}_X :

$$\mathcal{E}_{X \text{ ср}} = \mathcal{E}_N \frac{n_{1 \text{ ср}}}{n'_{1 \text{ ср}}} = \quad \cdot \frac{\quad}{\quad} = \quad \text{В};$$

$$\mathcal{E}_N = \quad \pm \quad \text{В.}$$

3. По методу Стьюдента для прямых измерений вычислим $\Delta n_{1 \text{ ср}}$ и $\Delta n'_{1 \text{ ср}}$:

$$\Delta n_{1 \text{ ср}} = \alpha \cdot S = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\Delta n_1)_i^2}{n \cdot (n-1)}} =$$

$$= 2,8 \cdot \sqrt{\frac{\quad + \quad + \quad + \quad +}{5 \cdot 4}} = \quad \text{дел.};$$

$$\Delta n'_{1 \text{ ср}} = \alpha S = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\Delta n'_1)_i^2}{n \cdot (n-1)}} =$$

$$= 2,8 \cdot \sqrt{\frac{\quad + \quad + \quad + \quad +}{5 \cdot 4}} = \quad \text{дел.}$$

($\alpha = 2,8$ – коэффициент Стьюдента).

4. Для косвенных измерений относительную погрешность искомой ЭДС находим преобразованием формулы (10):

$$\frac{\Delta \mathcal{E}_{X \text{ ср}}}{\mathcal{E}_{X \text{ ср}}} = \frac{\Delta \mathcal{E}_N}{\mathcal{E}_N} + \frac{\Delta n_{1 \text{ ср}}}{n_{1 \text{ ср}}} + \frac{\Delta n'_{1 \text{ ср}}}{n'_{1 \text{ ср}}} = \quad + \quad + \quad = \quad ,$$

тогда абсолютная погрешность равна:

$$\Delta \mathcal{E}_{X \text{ ср}} = \mathcal{E}_{X \text{ ср}} \cdot \left(\frac{\Delta \mathcal{E}_N}{\mathcal{E}_N} + \frac{\Delta n_{1 \text{ ср}}}{n_{1 \text{ ср}}} + \frac{\Delta n'_{1 \text{ ср}}}{n'_{1 \text{ ср}}} \right) =$$

$$= \quad \cdot (\quad + \quad + \quad) = \quad \text{В},$$

где $\Delta \mathcal{E}_N$ – приведена в п. 2.

5. Величина искомой ЭДС:

$$\mathcal{E}_X = \mathcal{E}_{X \text{ ср}} \pm \Delta \mathcal{E}_{X \text{ ср}} = \quad \pm \quad \text{(В)}.$$

6. Выводы: _____

Работа зачтена " ____ " _____ 20 ____ г. _____ (подпись)

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 чём 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 расчёта 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 $R_{\text{уч}}$, ключи.

I. Методические указания и описание установки

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).

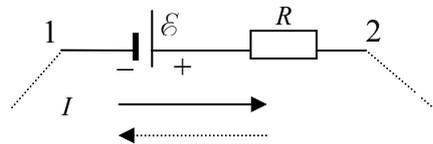


Рис. 1

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; $\vec{E}_{\text{ст}}$ – напряжённость поля сторонних сил, под действием которых на полюсах источника происходит накопление зарядов противоположных знаков; \vec{E}_k – напряжённость кулоновского потенциального поля, создаваемого зарядами, накопившимися на полюсах источника; \vec{E} – результирующая напряжённость 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 $1 \mathcal{E}_1 R_{\text{уч}} 2$ – исследуемый участок цепи, содержащий ЭДС. Участок $1 \mathcal{E}_2 R 2$ – внешняя цепь. $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$. $R_{\text{уч}}$ – 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).

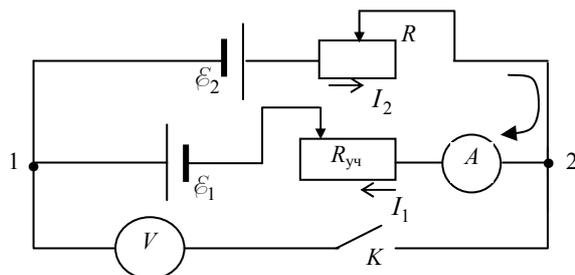


Рис. 2

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

Поскольку сопротивление вольтметра велико, будем считать, что ток, протекающий через данный вольтметр, равен нулю:

$$I_V \approx 0$$

и, следовательно,

$$I_1 \approx I_2 \approx I.$$

Для обоих участков запишем уравнения:

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

решая которые, получаем:

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

Закон Ома для изучаемого участка $2R_{\text{уч}}\varepsilon_1$ (направление обхода выбрано от точки 2 к точке 1), имеет вид:

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

откуда

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

Из выражений (3) и (4) находим:

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

Видно, что, 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 линейной функцией. При этом для графика $I = f(\varphi_1 - \varphi_2)$ угловой коэффициент прямой равен $1/R_{\text{уч}}$, а точка пересечения графика с осью токов соответствует $I = \varepsilon_1 / R_{\text{уч}}$ при $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$.

II. Экспериментальная часть

Внимание! 1. В качестве источников ЭДС ε_1 и ε_2 в установке используется смонтированный блок, запитываемый от сети 220 В. Их включение производится соответствующим выключателем (ВКЛ/ВЫКЛ).

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

1. Установите одно из заданных значений положений переключателя $R_{\text{уч}}$.

2. Подключите установку к сети 220 В. Соответствующими переключателями включите источники питания ε_1 и ε_2 .

3. Магазином сопротивлений поставьте значение внешнего сопротивления R примерно $5 \dots 7$ кОм. При периодическом кратковременном подключении вольтметра с помощью ключа K , 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 K , 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 её 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.

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

Таблица 1

$R, \text{ Ом}$												
$I, \text{ мА}$												
$\varphi_1 - \varphi_2, \text{ В}$						0						

Таблица 2

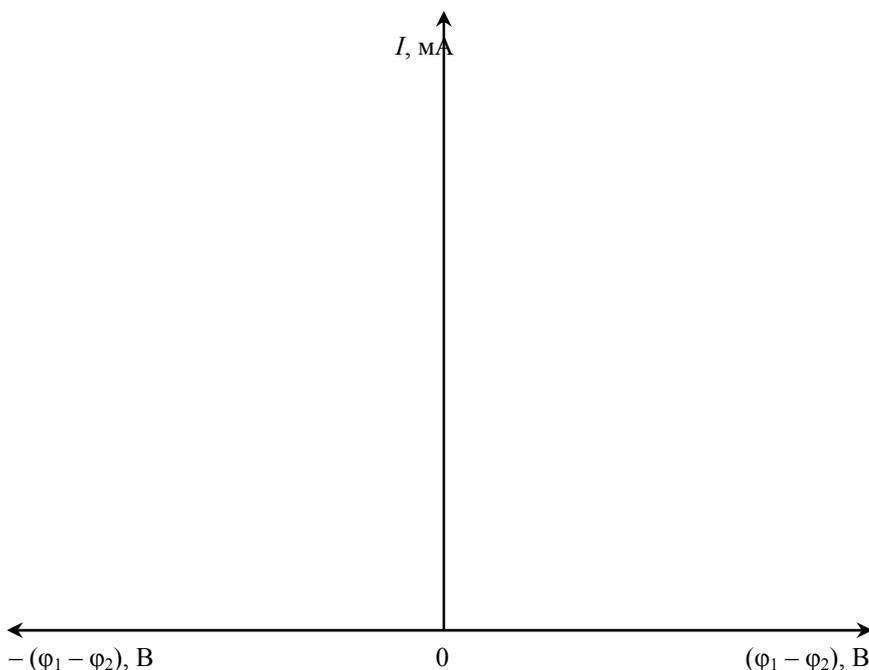
$R, \text{ Ом}$												
$I, \text{ мА}$												
$\varphi_1 - \varphi_2, \text{ В}$						0						

Работа выполнена " ___ " _____ 20__ г. _____ (подпись)

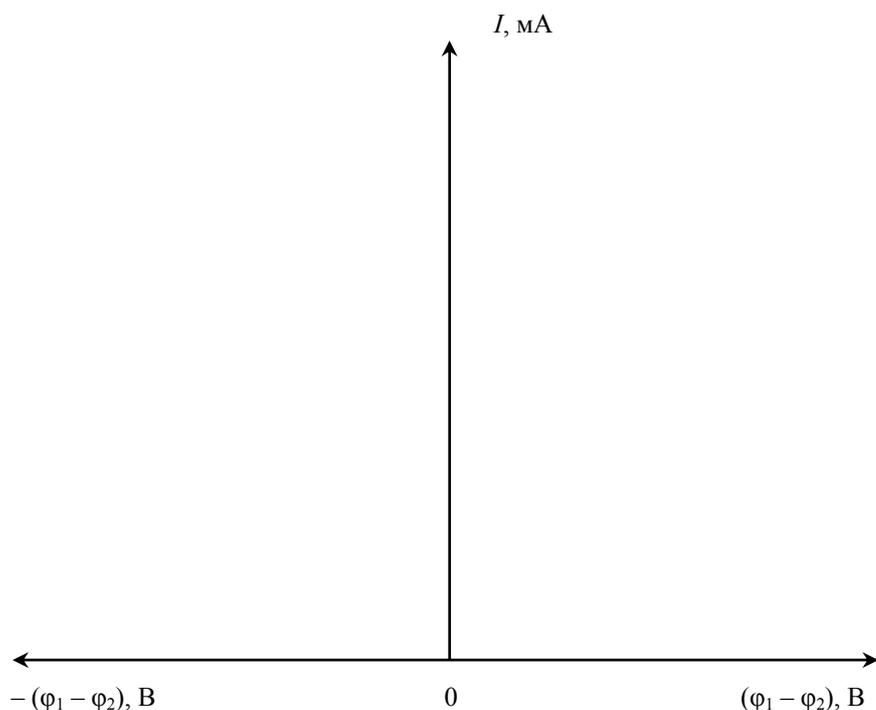
III. Обработка результатов

1. По измеренным величинам строим графики зависимости $I = f(\varphi_1 - \varphi_2)$.

а) для сопротивления участка $R'_{yч}$, соответствующего положению переключателя " ___ ".



б) для сопротивления участка $R''_{\text{уч}}$, соответствующего положению переключателя "___".



2. По угловым коэффициентам полученных прямых (тангенс угла наклона) оценим величины заданных сопротивлений участков $R'_{\text{уч}}$ и $R''_{\text{уч}}$:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I}{\Delta(\varphi_1 - \varphi_2)} = \frac{\Delta I}{\Delta(\Delta\varphi)} = \frac{1}{R_{\text{уч}}}.$$

Приращение величин тока (ΔI) и разности потенциалов [$\Delta(\Delta\varphi)$] можно брать на любом интервале, так как зависимость линейная.

При первом положении переключателя $R_{\text{уч}}$

$$\frac{1}{R'_{\text{уч}}} = \frac{\Delta I}{\Delta(\Delta\varphi)} = \text{_____} = \text{_____}; R'_{\text{уч}} = \text{_____} \text{ Ом.}$$

При втором положении переключателя $R_{\text{уч}}$

$$\frac{1}{R''_{\text{уч}}} = \frac{\Delta I}{\Delta(\Delta\varphi)} = \text{_____} = \text{_____}; R''_{\text{уч}} = \text{_____} \text{ Ом.}$$

3. Из графиков найдём величины токов, когда разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$.

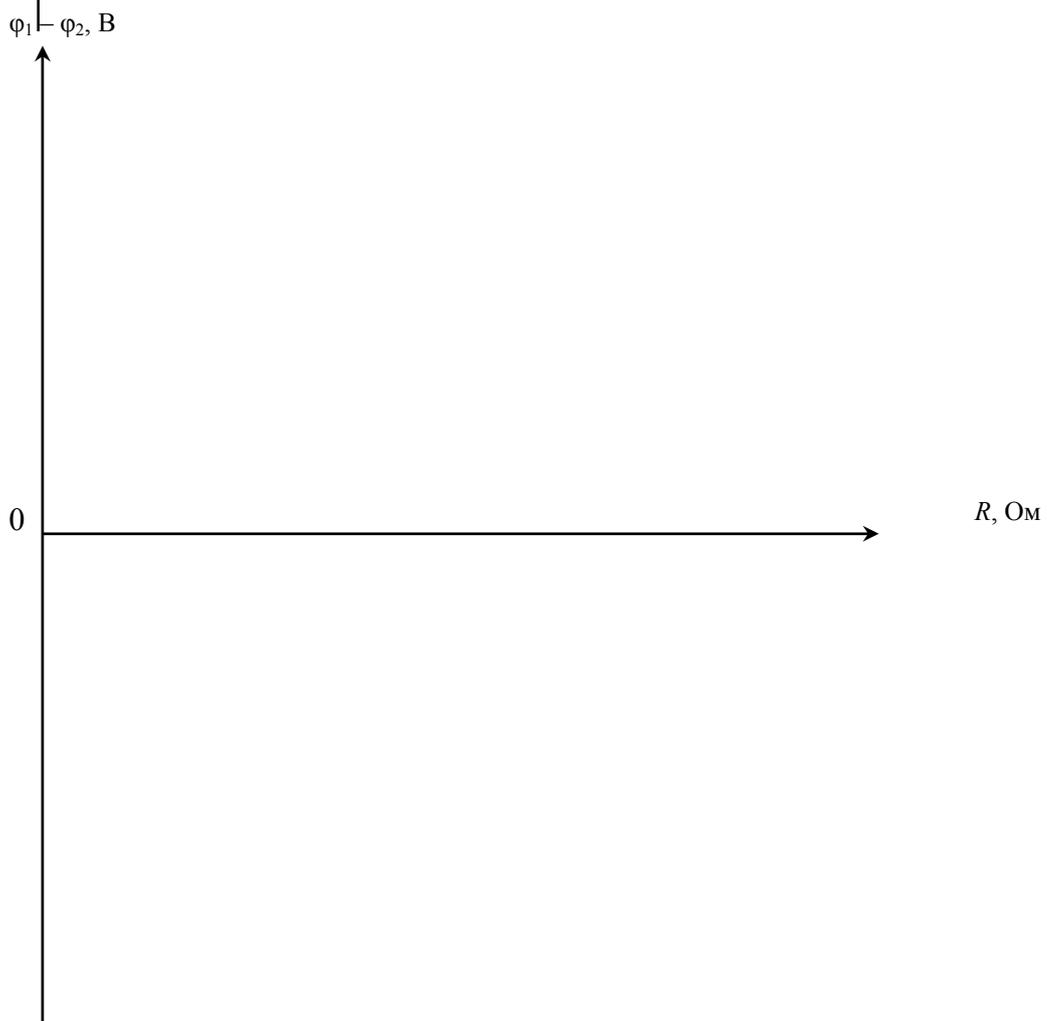
$$I' = \text{_____} \text{ А}; I'' = \text{_____} \text{ А.}$$

Из уравнения (4) при $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ и найденных значениях I и $R_{\text{уч}}$ вычислим ЭДС источника тока, включённого в исследуемый участок цепи:

1) $\mathcal{E} = I'R'_{\text{уч}} = \text{_____} \cdot \text{_____} = \text{_____} \text{ В};$

2) $\mathcal{E} = I''R''_{\text{уч}} = \text{_____} \cdot \text{_____} = \text{_____} \text{ В.}$

3. Построим графики зависимости разности потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) между точками 1 и 2 исследованного неоднородного участка цепи от величины внешнего сопротивления R .



Выводы: _____

Работа зачтена " ____ " _____ 20 ____ г. _____
(подпись)

Контрольные вопросы

1. Что означает "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 напряжённость кулоновского потенциального поля?
6. В чём 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 её 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 $\varphi_1 - \varphi_2 = f(R)$.
13. Напишите закон Ома для однородного участка цепи и поясните его отличие от закона для неоднородного участка.
14. Объясните, что значит внешнее и внутреннее сопротивление электрической цепи.
15. Из каких элементов может состоять полная электрическая цепь?
16. Запишите закон Ома для полной цепи.
17. Что такое напряжённость поля сторонних сил?

Лабораторная работа 4

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

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

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

I. 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 внутреннее 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:

$$P = EI. \quad (3)$$

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

$$P_n = IU = I^2 R. \quad (4)$$

С учётом (1) получаем:

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

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

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

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

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

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

4. Коэффициент полезного действия источника равен

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

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

$$I_{к.з.} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Качественный характер зависимостей P , P_n и η от силы тока I показан на рис. 1. Цифры на оси ординат даны для КПД (2).

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

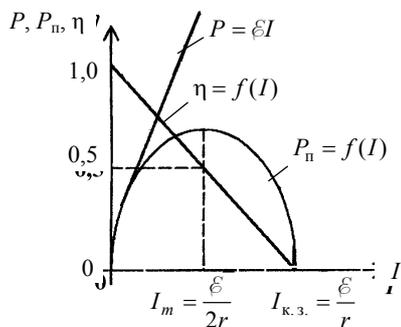


Рис. 1

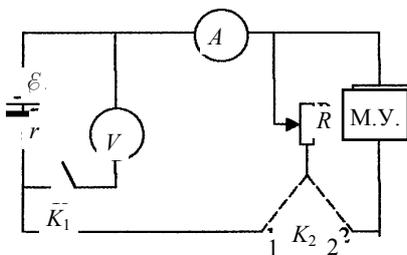


Рис. 2

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.

III. Экспериментальная часть

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 расчётной части 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 расчётах 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 нулю. Против стрелки вблизи кругового реохорда возьмите отсчёт 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.

№ п/п	$R, \text{ Ом}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$P, \text{ Вт}$	$P_n, \text{ Вт}$	$\eta, \%$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

$$E = U_0 = \text{_____ В.}$$

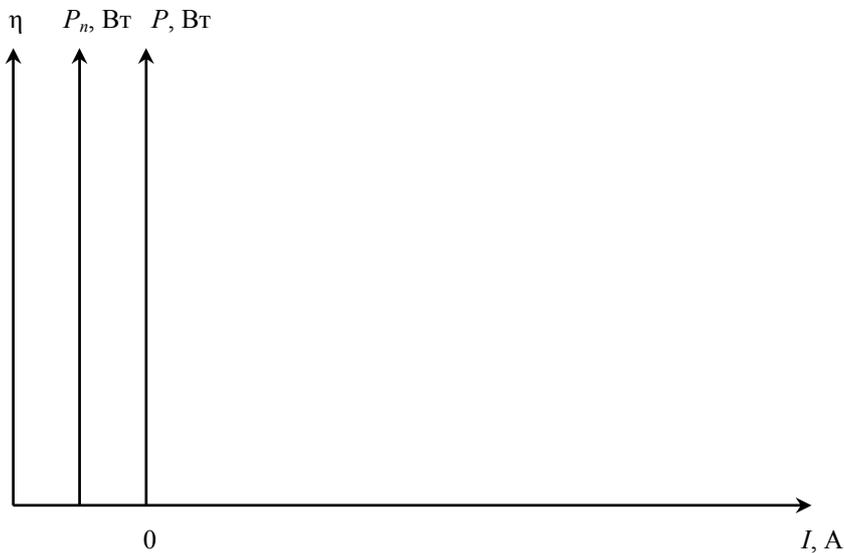
Работа выполнена " ____ " _____ 20 __ г. _____ (подпись)

III. Обработка результатов

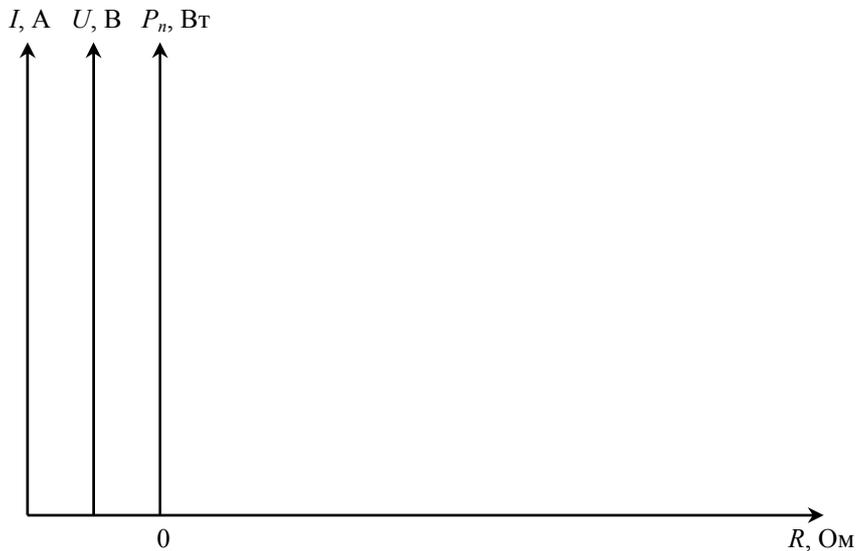
Класс точности: амперметра _____
 вольтметра _____

1. Используя измеренные значения: I , U , E по формулам: $P = IE$; $P_n = IU$; $\eta = P_n/P$, рассчитаем искомые величины и внесём их в соответствующие графы таблицы.

2. По табличным данным построим графики зависимостей: $P = f(I)$, $P_n = f(I)$, $\eta = f(I)$. Масштаб по осям ординат выбрать произвольно. Графики зависимостей изобразить (показать) разными цветами.



3. По экспериментальным данным построим графики зависимостей: $I = f(R)$, $U = f(R)$, $P_n = f(R)$.



4. Для произвольных трёх значений I и R , которые возьмём из последнего графика, вычислим величины внутреннего сопротивления источника тока:

$$r_i = \frac{U_0 - I_i R_i}{I_i}; \quad r_j = \frac{U_0 - I_j R_j}{I_j}; \quad r_k = \frac{U_0 - I_k R_k}{I_k}.$$

Подставляя числовые значения, получаем:

$$r_i = \frac{\text{---} - \text{---}}{\text{---}} = \text{---} \text{ Ом};$$

$$r_j = \frac{\text{---} - \text{---}}{\text{---}} = \text{---} \text{ Ом};$$

$$r_k = \frac{\text{---} - \text{---}}{\text{---}} = \text{---} \text{ Ом};$$

$$r_{\text{cp}} = \frac{r_i + r_j + r_k}{3} = \frac{\text{---} + \text{---} + \text{---}}{\text{---}} = \text{---} \text{ Ом}.$$

Средняя арифметическая погрешность равна:

$$\Delta r_{\text{cp}} = \frac{\Delta r_i + \Delta r_j + \Delta r_k}{3} = \frac{\text{---} + \text{---} + \text{---}}{\text{---}} = \text{---} \text{ Ом},$$

где $\Delta r_i = r_{\text{cp}} - r_i$; $\Delta r_j = r_{\text{cp}} - r_j$; $\Delta r_k = r_{\text{cp}} - r_k$.

Окончательная величина внутреннего сопротивления

$$r = r_{\text{cp}} \pm \Delta r_{\text{cp}} = \text{---} \pm \text{---} \text{ Ом}.$$

5. Величина тока короткого замыкания при отсутствии внешнего сопротивления ($R = 0$) определяется из соотношения:

$$I_{\text{к.з}} = \mathcal{E} / r_{\text{cp}} = U_0 / r_{\text{cp}}.$$

Подставляя числовые величины, получим:

$$I_{\text{к.з}} = \text{---} / \text{---} = \text{---} \text{ А}.$$

6. Выводы: _____

Работа зачтена " ____ " _____ 20 __ г _____
(подпись)

Контрольные вопросы

1. Объясните физический смысл закона Ома в векторной (дифференциальной) форме.
2. Напишите закон Ома для неоднородного участка в интегральной и дифференциальной формах.
3. Нарисуйте принципиальную схему лабораторной установки, поясните назначение приборов и методику проведения исследования по изучению закона Ома для полной цепи.
4. При каких условиях измеренное напряжение вольтметром можно приравнять к величине ЭДС источника тока?
5. Что называется полной, полезной мощностью источника и его КПД?
6. Какая связь между полезной мощностью $P_{\text{п}}$ и силой тока и при каких условиях она максимальна и равна нулю?
7. Поясните при каких условиях КПД источника тока будет мало отличаться от единицы и когда обращается в нуль?
8. Какая зависимость КПД источника от тока в цепи?
9. Почему нельзя одновременно получить максимальное значение полезной мощности и его КПД?
10. Объясните зависимости тока и напряжения от сопротивления внешней цепи.
11. Что такое ток короткого замыкания?
12. Что такое электрический ток, сила тока и плотность тока?
13. Напишите закон Ома для полной цепи. Поясните ЭДС источника тока.
14. Объясните физический смысл понятий "напряжение", "разность потенциалов" и "ЭДС".

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.

I. Методические указания и описание установки

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

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

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

II правило Кирхгофа: в любом произвольно выбранном замкнутом контуре разветвлённой 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 I и II правилам Кирхгофа, должно быть равно числу токов, идущих в разветвлённой 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 (рис. 1), а также падение напряжения δU_1 и δU_2 на источниках E_1 и 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 E_1 и 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, E_1 и E_2 – источники постоянных ЭДС.

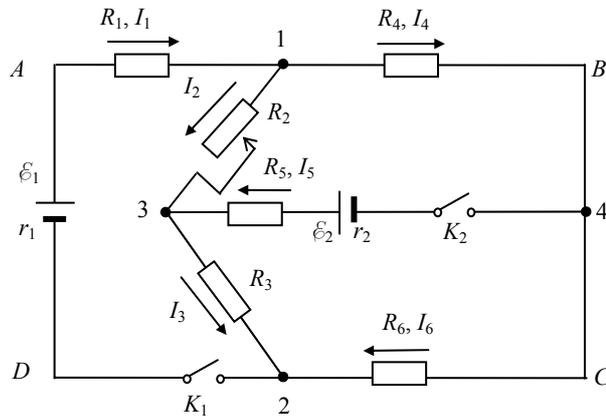


Рис. 1

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

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 E_1 , 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.

II. Экспериментальная часть

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: $R'_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом; $R''_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом.
4. Подключите, соблюдая полярность, выходы источника E_1 к розетке "+40 В-", а источника 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 E_1 и 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.

Для $R'_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом.

Таблица 1

№ п/п	E_1 , В	φ_1 , В	E_2 , В	φ_2 , В	U_i , В	ΔU_i , В	I_i , А	r_1 , Ом	r_2 , Ом
1							
2									
3									
4									
5									
6									

7. Переключателем сопротивления R_2 поставьте другое заданное его значение. Прodelайте все операции п. 5 и 6, а полученные результаты внесите в табл. 2.

Для $R''_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом.

№ п/п	$E_1, В$	$\varphi_1, В$	$E_2, В$	$\varphi_2, В$	$U_j, В$	$\Delta U_j, В$	$I_j, А$	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Работа выполнена " ____ " _____ 20__ г. _____
(подпись)

III. Обработка результатов

- По замеренным напряжениям на каждом сопротивлении и величинам самих сопротивлений, по закону Ома рассчитаем токи $I_1 - I_6$ на каждом участке для обоих значений R_2 и запишем их в табл. 1 и 2.
- Проведём проверку первого правила Кирхгофа (1) для всех узлов цепи. По методике, 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 счёт погрешностей ΔU и $\Delta R \sum I_{i,j}$ может отличаться от нуля не более чем на величину

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

абсолютные погрешности измеренных значений $U_{i,j}$

$$\Delta U_{i,j} = \frac{a \cdot U_{i,j \text{ изм}}}{100},$$

где a – класс точности вольтметра, равный 1,0; $U_{i,j \text{ изм}}$ – измеренная величина i, j -го напряжения. Значения сопротивлений и их погрешности указаны на установке.

Результаты расчётов внесём в графу ΔU обеих таблиц.

3. Проверяем ПЕРВОЕ правило Кирхгофа (уравнение 1).

I. Сопротивление $R'_2 =$ _____ Ом:

а) узел 1: $I_1 - I_2 - I_4 = 0$;

$$I_1 - I_2 - I_4 = \underline{\hspace{2cm}} - \underline{\hspace{2cm}} - \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ А.}$$

Несовпадение с нулем не должно превышать величину:

$$\begin{aligned} \sum \Delta \left(\frac{U}{R} \right) &= \frac{R_1 \Delta U_1 + U_1 \Delta R_1}{R_1^2} + \frac{R_2 \Delta U_2 + U_2 \Delta R_2}{R_2^2} + \frac{R_4 \Delta U_4 + U_4 \Delta R_4}{R_4^2} = \\ &= \underline{\hspace{2cm}} + \underline{\hspace{2cm}} + \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ А.} \end{aligned}$$

Погрешности ΔR_i берутся равными 3% от номинала. Сравнивая, видим, что первое правило _____;

Разница $\sum U_i$ с \mathcal{E}_2 равна _____ В.

Сопоставим её с суммой погрешностей:

$$\Delta\mathcal{E}_2 + \Delta U_4 + \Delta U_5 + \Delta U_2 = ______ + ______ + ______ + ______ = ______ \text{ В},$$

где $\Delta\mathcal{E}_2 = \frac{a \cdot \mathcal{E}_{2\text{изм}}}{100} = \frac{______}{100} = ______ \text{ В}.$

Видно, что вторая величина _____ первой, следовательно, второе правило для этого контура _____;

в) контур 3 4 С 2 3. Обход по часовой стрелке:

$$I_6 R_6 - I_3 R_3 - I_5 R_5 = \mathcal{E}_2 \quad \text{или} \quad U_6 - U_3 - U_5 = \mathcal{E}_2;$$

$$______ - ______ - ______ = ______ \text{ В};$$

$$\sum U_i - \mathcal{E}_i = ______ - ______ = ______ \text{ В}.$$

Сопоставим эту величину с суммой погрешностей:

$$\Delta\mathcal{E}_2 + \Delta U_6 + \Delta U_3 + \Delta U_5 = ______ + ______ + ______ = ______ \text{ В}.$$

Поскольку сумма погрешностей _____ величины несовпадения, то второе правило и для этого контура _____.

II. Сопротивление $R_2'' = ______ \text{ Ом}:$

а) контур А 1 3 2 Д А. Обход по часовой стрелке:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 \quad \text{или} \quad U_1 + U_2 + U_3 = \mathcal{E}_1;$$

$$______ + ______ + ______ = ______ \text{ В}.$$

Несовпадение левой и правой частей сравним с суммой погрешностей:

$$\Delta\mathcal{E}_1 + \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = ______ + ______ + ______ = ______ \text{ В}.$$

Поскольку сумма погрешностей _____ величины несовпадения, то правило _____;

б) контур 1 В 4 3 1. Обход по часовой стрелке:

$$I_4 R_4 + I_5 R_5 - I_2 R_2 = \mathcal{E}_2;$$

$$______ + ______ - ______ = ______ \text{ В}.$$

Разница $\sum U_j$ с \mathcal{E}_2 составляет _____ В.

Сравним её с суммой погрешностей:

$$\Delta\mathcal{E}_2 + \Delta U_4 + \Delta U_5 + \Delta U_2 = ______ + ______ + ______ + ______ = ______ \text{ В}.$$

Видно, что второе правило _____;

в) контур 3 4 С 2 3. Обход по часовой стрелке:

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.