

Министерство образования Республики Беларусь
Брестский политехнический институт
Кафедра физики

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО КУРСУ ФИЗИКИ**

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

**Э4. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА
(Методические указания)**

Брест 1999

УДК 53 (076.5)

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ ФИЗИКИ. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.
Методические указания по выполнению лабораторной работы
Э4 "ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА",
Брест, БПИ, 1998

В методических указаниях приведено описание лабораторной работы Э4 "Изучение законов постоянного электрического тока", в которой экспериментально проверяются зависимости между физическими величинами, характеризующими электрический ток в неразветвленных и разветвленных цепях, а также изучаются эквивалентные преобразования электрических цепей.

Лабораторная работа предназначена для студентов всех специальностей и всех форм обучения в БПИ.

Авторы: А.Н.Прокопеня, доцент, Н.И.Чопчиц, доцент,
А.С.Смаль, ассистент, И.Н.Прокопеня, инженер.

Рецензент: В.С.Секержицкий, доцент кафедры физики и астрономии БрГУ

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Цель работы:

- проверка законов последовательного и параллельного соединения сопротивлений;
- измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока;
- проверка закона Ома для участка цепи с источником тока;
- изучение правил Кирхгофа;
- знакомство с методом эквивалентных преобразований электрических цепей;
- изучение нелинейных элементов.

Приборы и принадлежности: набор резисторов, реостаты, гальванический элемент, источник постоянного тока, два вольтметра универсальных цифровых В7-35, соединительные провода.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

1. На панели (рис. 1) имеется ряд клемм, к которым подсоединены различные элементы: резисторы R1-R8, реостаты R9 - R11, лампочки накаливания R12 - R13, гальванический элемент ε, r . С помощью соединительных проводов

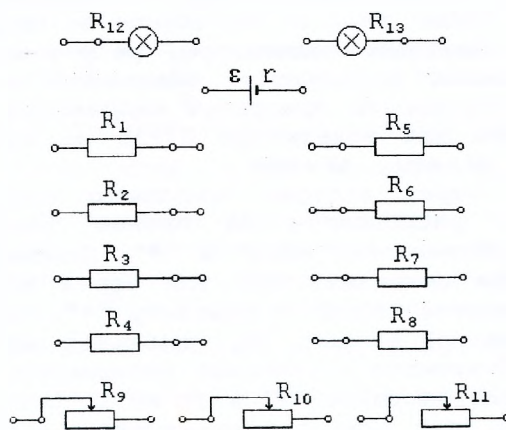


Рис. 1.

из этих элементов можно собирать различные электрические цепи.

2. Помимо гальванического элемента имеется стабилизированный источник постоянного тока (ИПТ), который обычно может работать в двух режимах: стабилизации напряжения и стабилизации тока. В режиме стабилизации напряжения на контактах "+" и "-" ИПТ поддерживается постоянная разность потенциалов, величина которой устанавливается с помощью ручки "U" на передней панели прибора и отображается на индикаторном табло. В режиме стабилизации тока ИПТ поддерживает постоянную силу тока во внешней цепи. Выбор режима работы осуществляется с помощью переключателя "V-A" на передней панели прибора, причем положение "V" переключателя соответствует режиму стабилизации напряжения.

3. Для измерения разности потенциалов, силы тока и сопротивления в работе используется вольтметр универсальный цифровой В7-35. На передней панели вольтметра расположены цифровые индикаторы и два переключателя рода работы. Для проведения измерений в цепях постоянного тока переключатель, расположенный слева от индикаторного табло, должен быть установлен в положение "-". Переключатель рода работы, расположенный справа от табло, имеет три положения:

"mV-V" - измерение разности потенциалов;

"μA-mA" - измерение силы тока;

"kΩ-MΩ" - измерение сопротивления.

Вольтметр автоматически выбирает предел измерения и отображает на табло знак и абсолютное значение измеряемой величины. Световые индикаторы, расположенные справа от табло, указывают размерность измеряемой величины. Относительная погрешность измерений напряжения, силы тока и сопротивления для вольтметра В7-35 не превышает 1%, т.е. $\Delta U = 0,01U$, $\Delta I = 0,01I$, $\Delta R = 0,01R$.

Контакты, через которые вольтметр подключается к внешней цепи, расположены на правой боковой панели вольтметра и обозначены "ВХОД" и "*". Положительные показания прибора означают, что ток через вольтметр направлен от контакта "ВХОД" к контакту "*". Например, для схемы, изображенной на рис. 2б, положительным показаниям прибора, используемого в качестве амперметра, соответствует подключение контакта "*" к точке 1. Соответственно, для вольтметра (рис. 2в) положительным показаниям соответствует подключение контакта "*" к точке с более низким потенциалом, т.е. к точке 2.

Примечание.

Подключение амперметра или вольтметра для измерения соответственно силы тока или разности потенциалов может вызвать заметное изменение тока в цепи, так как и амперметр, и вольтметр имеют собственные сопротивления. Характерной особенностью всех цифровых измерительных приборов (ЦИП) является их достаточно малое сопротивление ($\sim 10 \text{ Ом}$) в режиме измерения силы тока и большое сопротивление ($\sim 10 \text{ МОм}$) при измерении разности потенциалов.

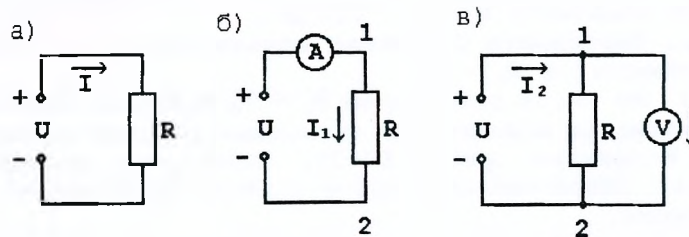


Рис. 2.

Чтобы оценить изменения силы тока в цепи, вызываемые подключением ЦИП, рассмотрим участок цепи, изображенный на рис. 2а. В соответствии с законом Ома для участка

цепи сила тока равна: $I = \frac{U}{R}$, где U - напряжение на участке цепи, R - сопротивление цепи. При подключении ЦИП в качестве амперметра (рис. 2б) сила тока в цепи становится

равной $I_1 = \frac{U}{R + R_A} = \frac{I}{1 + \frac{R_A}{R}}$, где R_A - сопротивление амперметра.

Для сопротивлений $R \sim 100 \text{ Ом}$ относительное значение изменения силы тока в цепи составляет $\frac{I - I_1}{I} = \frac{R_A}{R + R_A} \sim 0,09$,

что больше погрешности измерения силы тока $\Delta I = 0,01I$ для вольтметра В7-35. Поэтому его подключение в качестве амперметра может вызвать заметное изменение силы тока в цепи. Лишь при $R > 1000 \text{ Ом}$ относительное изменение силы тока $\frac{I - I_1}{I} < 0,01$ и сопротивлением ЦИП можно пренебречь.

При подключении ЦИП в качестве вольтметра (рис. 2в)

сила тока в цепи становится равной $I_2 = \frac{U(R + R_V)}{R \cdot R_V} = \frac{U}{R} \left(1 + \frac{R}{R_V}\right)$.

Тогда относительное значение изменения силы тока равно

$\frac{I_2 - I}{I} = \frac{R}{R_V}$ и для сопротивлений $R < 100 \text{ k}\Omega$ не превышает 0.01 , т.е. пренебрежимо мало.

ЗАДАНИЕ 1. Проверка законов параллельного и последовательного соединения сопротивлений.

1. Установите переключатели рода работы на передней панели вольтметра В7-35 слева и справа от индикаторного табло соответственно в положения “-” и “ $\text{k}\Omega\text{-M}\Omega$ ” и подсоедините вольтметр к сети “220 В”.

2. Определите с помощью вольтметра В7-35 сопротивления резисторов $R_1 - R_8$.

3. Из числа резисторов $R_1 - R_8$ выберите два или три и соедините их параллельно с помощью соединительных проводов. Используя прибор В7-35, определите величину полученного сопротивления $R_{\text{пар}}$ и оцените погрешность его определения.

Сравните результат с данными теории:

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

4. Соедините несколько резисторов из набора $R_1 - R_8$ последовательно и с помощью прибора В7-35 измерьте величину полученного сопротивления $R_{\text{послед}}$.

Сравните результат с данными теории:

$$R_{\text{послед}} = R_1 + R_2 + \dots$$

ЗАДАНИЕ 2. Измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока.

1. Установите переключатели рода работы вольтметра В7-35 в положения “-” и “ $\mu\text{A-mA}$ ”.

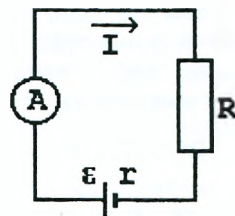


Рис. 3.

2. С помощью соединительных проводов соберите электрическую цепь, изображенную на рис. 3, используя гальванический элемент, ЦИП В7-35 и резистор R_1 . Измерьте силу тока в цепи, соответствующую сопротивлению R_1 .

3. Подключите в качестве R другой резистор и опять измерьте силу тока в цепи. Повторите измерения силы тока для всех резисторов из набора $R_1 - R_8$. В результате получится множество зна-

чений силы тока I_i , соответствующих сопротивлениям R_i , где i - номер опыта.

4. В соответствии с законом Ома для замкнутой цепи сила тока I и сопротивление R должны быть связаны между собой соотношением:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + R_0}, \quad (1)$$

где $R_0 = R_A + r$, R_A - сопротивление амперметра, r - внутреннее сопротивление гальванического элемента.

Вводя обозначения $y = \frac{1}{I}$ и $x = R$, перепишем (1) в виде:

$$y = a \cdot x + b, \quad (2)$$

где $a = \frac{1}{\varepsilon}$, $b = \frac{R_0}{\varepsilon}$ - постоянные.

Для каждой пары значений (R_i, I_i) рассчитайте величину $y_i = \frac{1}{I_i}$ и отметьте на координатной плоскости (x, y) все экспериментальные точки. Оцените визуально, хорошо ли расположение экспериментальных точек соответствует линейной зависимости (2).

5. Применяя метод наименьших квадратов (МНК) к зависимости (2), получим значения параметров a и b для наилучшей прямой, соответствующей экспериментальным точкам:

$$a = \frac{\langle x \cdot y \rangle - \langle x \rangle \cdot \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle \cdot \langle x \rangle}, \quad b = \langle y \rangle - a \langle x \rangle \quad (3)$$

где $\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\langle y \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, $\langle x^2 \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$, $\langle x \cdot y \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i$,

а n - общее число измерений. Для доверительной вероятности $P = 95\%$ погрешности Δa и Δb определяется формулами:

$$\Delta a = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2}{n(n-2)(\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle \langle x \rangle)} \right]^{1/2},$$

$$\Delta b = \left[\frac{\langle x^2 \rangle}{n(n-2)(\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle \langle x \rangle)} \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Вычислите по формулам (3), (4) параметры a и b , а также погрешности их определения Δa и Δb , и постройте на координатной плоскости (x, y) наилучшую прямую (2).

Используя найденные значения a и b , вычислите ε и R_0 , а также погрешности их определения по формулам:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta a}{a^2}, \quad \Delta R_0 = \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{a}\right)^2 + \left(\frac{b \cdot \Delta a}{a^2}\right)^2}.$$

6. Найденное значение R_0 является суммой внутреннего сопротивления гальванического элемента r и сопротивления амперметра R_A . Так как r и R_A могут быть одного порядка по величине, сопротивлением амперметра пренебречь нельзя. Для определения R_A соберите электрическую цепь (см. рис. 3) и с помощью второго вольтметра В7-35 измерьте разность потенциалов U_A между контактами амперметра. Тогда $R_A = \frac{U_A}{I}$, где I - сила тока в цепи.

Используя значения R_0 и R_A , найдите внутреннее сопротивление гальванического элемента r .

ЗАДАНИЕ 3. Проверка закона Ома для участка цепи.

1. Соберите электрическую цепь, изображенную на рис. 4, используя произвольное сопротивление из набора R_1-R_8 , гальванический элемент и вольтметр В7-35, переключатели рода работы которого установлены в положения "-" и " μA ". Клемма 1 на рис. 4 соответствует контакту "ВХОД" вольтметра. В этом случае положительные показания прибора будут соответствовать направлению тока от точки 1 к точке 2.

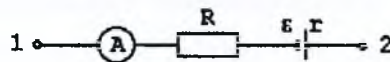


Рис. 4.

2. Установите для ИПТ режим стабилизации напряжения и соедините клеммы 1 и 2 с контактами "+" и "-" ИПТ соответственно. С помощью ручки "U" на передней панели ИПТ установите разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = 0,5$ В и измерьте силу тока в цепи.

3. Увеличьте разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ на 0,5 В и опять измерьте силу тока в цепи. Повторите измерения не менее 8 раз при значениях разности потенциалов 1,5 В, 2,0 В и т. д..

В результате получится набор пар соответствующих значений $((\varphi_1 - \varphi_2)_i, I_i)$, где i - номер опыта.

4. В соответствии с законом Ома для участка цепи значения $\varphi_1 - \varphi_2$ и I должны быть связаны между собой соотношением:

$$I \cdot (R + R_A + r) = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon. \quad (5)$$

Для проверки (5) на координатную плоскость, по оси абсцисс которой откладываются значения $x_i = (\varphi_1 - \varphi_2)_i$, а по оси ординат - значения $y_i = I_i$ силы тока в цепи, нанесите экспериментальные точки и убедитесь визуально, что они ложатся на прямую.

5. С учетом обозначений $x = \varphi_1 - \varphi_2$, $y = I$, соотношение (5) можно переписать в виде:

$$y = a \cdot x + b, \quad (6)$$

где $a = \frac{1}{R + R_A + r}$, $b = \frac{\varepsilon}{R + R_A + r}$.

Значения параметров a и b прямой, соответствующей экспериментальным точкам наилучшим с точки зрения МНК образом, определяются соотношениями (3). Вычислив по формулам (3) значения параметров a и b , найдите ЭДС гальванического элемента ε и сопротивление цепи $(R + R_A + r)$.

6. Измерьте сопротивление R с помощью вольтметра В7-35 и проверьте согласованность результатов измерения R и $(R + R_A + r)$.

7. Так как сила тока в цепи I измеряется с некоторой погрешностью, экспериментальные точки могут ложиться на прямую (6) не вполне точно. Степень достоверности соответствия экспериментальных значений (x_i, y_i) линейной зависимости (6) можно оценить, используя, например, критерий согласия Пирсона (хи-квадрат). Для этого необходимо вычислить величину χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a \cdot x_i + b - y_i}{\Delta y_i} \right)^2, \quad (7)$$

где $\Delta y_i = \Delta I_i$ - погрешность измерения силы тока в цепи в i -ом опыте. Для вольтметра В7-35 относительная погрешность измерения силы тока составляет 0.01, т.е. $\Delta I_i = 0.01 \cdot I_i$.

Найденное значение χ^2 необходимо сопоставить с таблицей, которая имеется на рабочем месте, и определить доверительную вероятность справедливости линейной зависимости (6).

ЗАДАНИЕ 4. Изучение правил Кирхгофа.

1. Используя резисторы и гальванический элемент, параметры которого известны, соберите какую-либо разветвленную электрическую цепь, например, изображенную на рис. 5. Определите, сколько узлов и элементарных контуров содержится в полученной цепи. После этого легко по-

казать, что в различных участках этой цепи текут три независимых тока. На рис. 5 соответствующие токи обозначены через I_1 , I_2 , I_3 , причем направления их выбраны произвольным образом.

2. Соедините клеммы 1 и 2 с контактами "+" и "-" ИПТ и установите разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) в пределах 2÷4

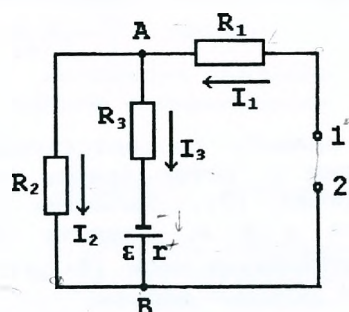


Рис. 5.

В. Подключая амперметр (ЦИП) в различные участки цепи с помощью соединительных проводов, определите значения I_1 , I_2 , I_3 и укажите на рисунке их действительные направления.

3. С помощью правил Кирхгофа легко записать систему уравнений для расчета токов во всех участках цепи, изображенной на рис. 5. При этом ИПТ можно рассматривать как обычный аккумулятор, ЭДС которого равна разности потенциалов между его контактами ($\varphi_1 - \varphi_2$), а внутреннее сопротивление равно нулю (это непосредственно следует из закона Ома для участка цепи (5)).

Соответствующая система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot (R_3 + r) = -\varepsilon \\ I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot (R_3 + r) = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

Подставив в (8) известные значения R_1 , R_2 , R_3 , r , ε и ($\varphi_1 - \varphi_2$), вычислите токи I_1 , I_2 , I_3 .

Сравните найденные значения I_1 , I_2 , I_3 с результатами измерений и сделайте выводы.

4. Применяя закон Ома для участка цепи (5), вычислите разность потенциалов между точками А и В: $\varphi_A - \varphi_B$.

Затем измерьте $\varphi_A - \varphi_B$ с помощью вольтметра и сравните полученное значение с результатом расчета.

5*. Повторите п.п. 1-4 для какой-либо другой разветвленной электрической цепи, предварительно согласовав ее схему с преподавателем.

ЗАДАНИЕ 5*. Изучение метода эквивалентных преобразований электрических цепей.

1. Из теории следует (см. Приложение), что участок цепи, содержащий три резистора, соединенные в виде трехлучевой звезды, можно заменить эквивалентным участком цепи, в котором три резистора соединены треугольником, и наоборот (см. рис. 6). При этом используемые сопротивления связаны между собой соотношениями:

$$Z_1 = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}, \quad Z_2 = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}, \quad Z_3 = R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}. \quad (9)$$

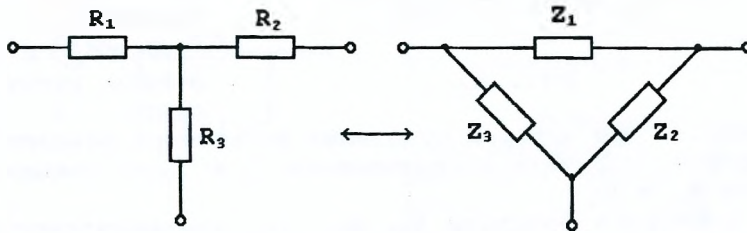


Рис. 6.

Обратные соотношения имеют вид:

$$R_1 = \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3}, \quad R_2 = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3}, \quad R_3 = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3}. \quad (10)$$

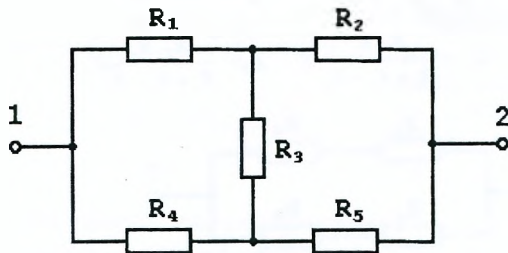


Рис. 7.

2. Для проверки соотношений (9), (10) соберите электрическую цепь, изображенную на рис. 7, используя резисторы из набора $R_1 - R_8$. С помощью вольтметра В7-35 измерьте сопротивление этой цепи.

3. Если резисторы R_1, R_2, R_3 , соединенные в виде трехлучевой звезды, заменить эквивалентным треугольником, получим цепь, изображенную на рис. 8. Легко видеть, что эквивалентная цепь состоит из набора последовательно и параллельно со-

2. Для проверки соотношений (9), (10) соберите электрическую цепь, изображенную на рис. 7, используя резисторы из набора $R_1 - R_8$.

С помощью вольтметра В7-35 измерьте сопротивление этой цепи.

3. Если резисторы

R_1, R_2, R_3 , соединенные в виде трехлучевой звезды, заменить эквивалентным треугольником, получим цепь, изображенную на рис. 8. Легко видеть, что эквивалентная цепь состоит из набора последовательно и параллельно со-

единенных резисторов. По формулам (9) рассчитайте сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 .

Резисторы с сопротивлениями величиной Z_1, Z_2, Z_3 в наборе R_1-R_8 скорее всего отсутствуют. Однако их можно

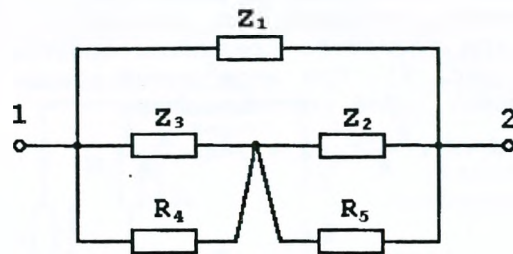


Рис. 8.

получить, используя реостаты R_9-R_{11} . Для этого необходимо соединить реостат R_9 с вольтметром В7-35, переключатели рода работы которого установлены в положения "-" и "кΩ-МΩ", и установить ручку реостата в такое

положение, при котором показания вольтметра равняются Z_1 . Аналогично получите сопротивления Z_2 и Z_3 с помощью реостатов R_{10} и R_{11} .

Используя реостаты R_9, R_{10}, R_{11} , сопротивления которых равняются соответственно Z_1, Z_2, Z_3 , соберите электрическую цепь, изображенную на рис. 8, и с помощью прибора В7-35 измерьте сопротивление этой цепи. Сравните полученную величину с сопротивлением исходной цепи.

4. Если резисторы R_1, R_3, R_4 , соединенные треугольником, заменить эквивалентной трехлучевой звездой, получим цепь, изображенную на рис. 9. Сопротивления Z_4, Z_5, Z_6 определяются из соотношений (10):

$$Z_4 = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_3 + R_4}, \quad Z_5 = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3 + R_4}, \quad Z_6 = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_1 + R_3 + R_4}.$$

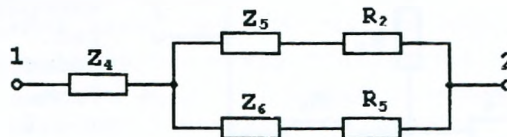


Рис. 9.

Рассчитайте сопротивления Z_4, Z_5, Z_6 . Затем установите ручки реостатов R_9, R_{10}, R_{11} в положения, соответствующие сопротивлениям Z_4, Z_5, Z_6 , и соберите электрическую цепь, изображенную на рис. 9. Измерьте сопротивление

этой цепи и сравните результат с величинами, полученными в п. 2 и 3 и сделайте вывод.

Задание 6. Изучение нелинейных элементов.

1. Соберите электрическую цепь, изображенную на рис. 10, используя одну из лампочек R_{12} , R_{13} и два ЦИП. Клеммы 1 и 2 соедините с контактами "+" и "-" ИПТ.

2. Изменяя с помощью ИПТ напряжение U на лампочке от 0 до 4 В через 0,2 В, измерьте при каждом значении U силу тока в цепи I . Используя полученные данные, постройте график зависимости $I(U)$, т.е. вольтамперную характеристику лампочки.

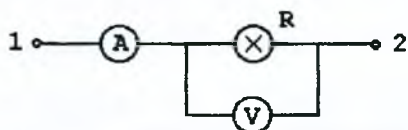


Рис. 10.

Убедитесь визуально, что зависимость $I(U)$ нелинейная.

3. Включение нелинейного элемента в электрическую цепь значительно усложняет задачу определения

силы тока. Рассмотрим, например, участок цепи, изображенный на рис. 11.

Закон Ома для участка цепи имеет вид:

$$I \cdot r + U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon, \quad (11)$$

где I - сила тока в цепи, U - напряжение на лампочке.

В случае обычных сопротивлений $U = I \cdot R$ и уравнение

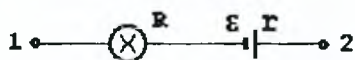


Рис. 11.

(11) легко решается относительно I . Для нелинейных элементов известен лишь график зависимости $U(I)$, т.е. вольтамперная характеристика. Поэтому определить силу тока в цепи из уравнения (11) можно двумя способами.

а) Аппроксимировать вольтамперную характеристику, т.е. подобрать такую функцию $y = y(I)$, график которой достаточно хорошо описывает экспериментальную зависимость $U(I)$. Тогда определение силы тока сведется к поиску корня уравнения

$$I \cdot r + y(I) - \varphi_1 + \varphi_2 - \varepsilon = 0.$$

б) Определить силу тока графически, используя имеющуюся вольтамперную характеристику лампочки. Для этого на координатной плоскости, на которой изображена вольт-

амперная характеристика (рис. 12), нужно построить график зависимости

$$I = \frac{U}{r} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{r}. \quad (12)$$

Тогда сила тока I_0 , соответствующая точке пересечения вольтамперной характеристики с прямой (12), и будет равна силе тока в цепи. Соответственно, U_0 - напряжение на лампочке.

4. Соберите электрическую цепь, изображенную на рис. 11, используя лампочку с известной вольтамперной характеристикой, а также гальванический элемент с известными параметрами. Соедините клеммы 1 и 2 с контактами "+" и "-" ИПТ и установите разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ в пределах $1 \div 3$ В.

С помощью вольтметра (ЦИП) измерьте напряжение на лампочке.

5. Используя координатную плоскость, на которой изображена вольтамперная характеристика лампочки, постройте прямую (12) и определите ток в цепи I_0 и напряжение на лампочке U_0 .

Сравните найденное значение U_0 с экспериментальным результатом.

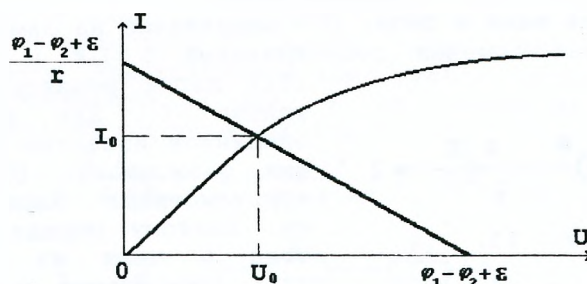


рис. 12.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Основные определения и законы постоянного электрического тока в тонких проводках.

1. (Электрический ток есть упорядоченное движение электрических зарядов.) При этом сами заряды называются носителями тока. Примерами носителей тока являются элек-

троны в металлах, положительные и отрицательные ионы в электролитах и ионизированных газах и т.д..

За направление электрического тока условились принимать направление движения положительных зарядов. Если в действительности движутся не положительные, а отрицательные заряды, то направление электрического тока противоположно направлению движения отрицательных зарядов.

Количественной характеристикой электрического тока является сила тока I , которая численно равняется заряду, проходящему через любое полное сечение проводника в единицу времени. Если dq - заряд, проходящий через сечение проводника за время dt , то $I = \frac{dq}{dt}$.


Единицей силы тока является ампер (А). При токе в 1 А через полное сечение проводника за время 1 с проходит заряд 1 Кл.

Если сила тока не изменяется с течением времени по величине и не изменяет своего направления, то говорят, что в проводнике течет постоянный ток. В этом случае сила тока одинакова во всех сечениях проводника.

2. Для возбуждения электрического тока в проводнике необходимо создать и поддерживать в нем электрическое поле. При этом для большинства проводников, в особенности для металлов, сила тока I и разность потенциалов электрического поля на концах проводника ($\varphi_1 - \varphi_2$) связаны между собой соотношением, выражающим закон Ома:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = R \cdot I. \quad (\text{П.1})$$

Направлен электрический ток в проводнике в сторону убывания потенциала ($\varphi_1 > \varphi_2$).

Коэффициент пропорциональности R (П.1) зависит от рода вещества проводника, от его геометрических размеров и формы, а также от физического состояния (его температуры, давления и т.д.), и называется электрическим сопротивлением проводника. Единицей сопротивления является ом (Ом), т.е. сопротивление такого проводника, по которому течет ток в 1 А, если на концах проводника поддерживать разность потенциалов в 1 В. Проводник с заданным сопротивлением называется резистором и на электрических схемах обозначается символом: .

3. Проводники можно соединять друг с другом, получая различные электрические цепи. Простейшие случаи последовательного и параллельного соединения двух проводников изображены на рис. П.1.

В случае постоянного тока любую электрическую цепь, состоящую из резисторов, можно заменить одним эквивалентным резистором, сопротивление которого называется сопротивлением цепи.

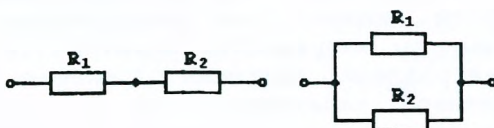


рис. П.1.

Для изображенных на рис. П.1 случаев сопротивление цепи легко рассчитать по формулам:

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2, \quad R_{\text{пар}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

4. Помимо сил со стороны электростатического поля, на электрические заряды в проводниках могут действовать еще некоторые силы неэлектростатического происхождения, обусловленные, например, химической и физической неоднородностью проводника. Таковы силы, возникающие при соприкосновении проводников различного химического состава (гальванический элемент, аккумулятор) или различной температуры (термоэлемент), при наличии градиента концентрации в растворе электролита (концентрационный гальванический элемент) и т. д.. Такие силы получили название сторонних сил, а всякое устройство, в котором возникают сторонние силы, называют источником сторонних сил.

Свойства источника сторонних сил характеризуются двумя параметрами: электрическим сопротивлением r , называемым внутренним сопротивлением источника сторонних сил, и электродвижущей силой ε (ЭДС), которая численно равняется работе, совершаемой сторонними силами при прохождении через источник единичного положительного заряда. На электрических схемах источник сторонних сил изображается символом: $\begin{array}{c} - \\ | \\ + \end{array}$.

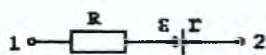


рис. П.2.

5. При наличии на участке цепи источника сторонних сил (рис. П.2) закон Ома (П.1) принимает вид:

$$\pm I \cdot (R + r) = \varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon, \quad (\text{П.2})$$

где $(R + r)$ - полное электрическое сопротивление участка цепи. Знак "+" в левой части (П.2) соответствует направлению тока от точки 1 к точке 2, знак "-" - противоположному направлению тока. ЭДС источника сторонних сил нужно считать положи-

тельной (знак "+" в правой части (П.2)), если при обходе вдоль цепи из точки 1 в точку 2 мы переходим от отрицательного полюса источника тока к положительному, и отрицательной (знак "-" в правой части (П.2)) - в противном случае.

Если точки 1 и 2 совпадают, то $\varphi_1 = \varphi_2$ и соотношение (П.2) переходит в закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}.$$

При этом во внешней части цепи (сопротивление R) электрический ток направлен от положительного полюса источника сторонних сил к отрицательному.

В разомкнутой цепи постоянный электрический ток отсутствует ($I=0$) и, следовательно, $\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon = 0$. Поэтому ЭДС источника сторонних сил можно определить как разность потенциалов между его полюсами при разомкнутой внешней цепи.

6. Для расчета токов во всех участках произвольной электрической цепи, состоящей из резисторов и источников сторонних сил, используются два правила Кирхгофа.

Первое правило Кирхгофа. В каждом узле электрической цепи, т.е. в точке, где сходится более двух проводников с током, алгебраическая сумма токов равна нулю:

$$\sum_i I_i = 0. \quad (\text{П.3})$$

При этом токи I_i , входящие в узел, считаются положительными, а токи, выходящие из узла - отрицательными (или наоборот).

Второе правило Кирхгофа. Для любого замкнутого контура алгебраическая сумма произведений сил токов I_i в отдельных участках контура на их полные сопротивления ($R_i + r_i$) равна алгебраической сумме действующих в этом контуре ЭДС:

$$\sum_i I_i \cdot (R_i + r_i) = \sum_i \varepsilon_i. \quad (\text{П.4})$$

Чтобы записать полную систему уравнений для определения токов во всех участках цепи, необходимо поступить следующим образом:

а) Определить, сколько узлов и элементарных контуров содержится в электрической цепи (элементарным считается простейший замкнутый контур, внутри которого нельзя выделить другой замкнутый контур). Тогда число независимых токов в цепи должно быть равно $N = N_{\text{уз}} + N_{\text{эл.к.}} - 1$, где $N_{\text{уз}}$, $N_{\text{эл.к.}}$ - соответственно число узлов и число элементарных контуров в цепи.

б) Произвольным образом обозначить токи I_i во всех участках цепи и с помощью стрелок указать их предполагаемые направления. Если в дальнейшем при вычислениях для какого-либо тока получится отрицательное значение, то истинное направление тока противоположно направлению стрелки.

в) Записать первое правило Кирхгофа (П.3) для произвольных $(N_{уз} - 1)$ узлов цепи.

г) Выбрав для каждого из $N_{эл.к.}$ элементарных контуров направление обхода, записать для них второе правило Кирхгофа (П.4). При этом слагаемые $I_i(R_i + r_i)$ в левой части (П.4) считаются положительными, если выбранное направление обхода контура совпадает с обозначенными направлениями токов I_i , и отрицательными - в противоположном случае. Знак ЭДС ε_i в правой части (П.4) считается положительным, если при обходе контура вдоль выбранного направления источник сторонних сил проходится от отрицательного полюса к положительному; при переходе от положительного полюса источника сторонних сил к отрицательному знак ε_i считается отрицательным.

В результате получается система из N линейных уравнений относительно N независимых токов. Решение этой системы определяет токи во всех участках цепи.

7. Во многих случаях расчет электрических цепей может быть значительно упрощен путем их эквивалентного преобразования. Примером такого преобразования является замена участка цепи, содержащего три резистора, соединенные треугольником, трехлучевой звездой, и наоборот (рис. П.3). При этом эквивалентность "треугольника" и "звезды" означает, что при заданных значениях потенциалов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ токи I_1, I_2, I_3 в соответствующих участках обеих цепей будут одинаковы.

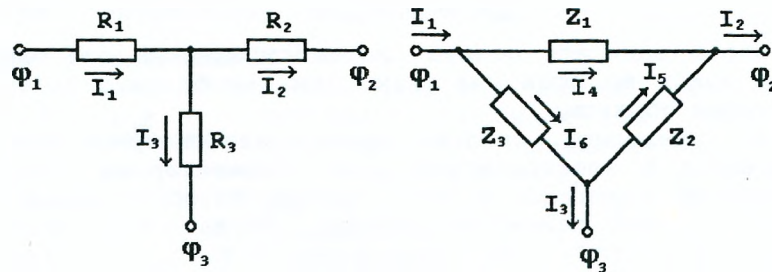


Рис. П.3.

Чтобы получить соотношения между сопротивлениями R_1, R_2, R_3 и Z_1, Z_2, Z_3 , используем закон Ома для участка цепи (П.2) и первое правило Кирхгофа (П.3). В результате для схемы, в которой сопротивления соединены треугольником, получаем:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_4 + I_6 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{Z_1} + \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{Z_3}, \\ I_2 &= I_4 + I_5 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{Z_1} + \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{Z_2}, \\ I_3 &= I_6 - I_5 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{Z_3} - \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{Z_2}. \end{aligned} \quad (\text{П.5})$$

Система уравнений для определения токов I_1, I_2, I_3 в схеме звезды имеет вид:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0, \\ \varphi_1 - \varphi_2 = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2, \\ \varphi_1 - \varphi_3 = I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3, \end{cases}$$

Отсюда находим:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \cdot R_3 + (\varphi_1 - \varphi_3) \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}, \\ I_2 &= \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \cdot R_3 + (\varphi_3 - \varphi_2) \cdot R_1}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}, \\ I_3 &= \frac{(\varphi_1 - \varphi_3) \cdot R_2 - (\varphi_3 - \varphi_2) \cdot R_1}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}. \end{aligned} \quad (\text{П.6})$$

Сравнивая (П.5) и (П.6), получаем соотношения между используемыми сопротивлениями:

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}, \\ Z_2 &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}, \\ Z_3 &= R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}. \end{aligned} \quad (\text{П.7})$$

Таким образом, если сопротивления R_1, R_2, R_3 и Z_1, Z_2, Z_3 связаны между собой соотношениями (П.7), то участок цепи, в котором сопротивления R_1, R_2, R_3 соединены звездой, эквивалентен участку цепи, в котором сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 соединены треугольником.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Электрический ток и его характеристики.

Она для участка цепи с гальваническим эле-

3. Правила Кирхгофа.
4. Какие преобразования электрических цепей называются эквивалентными ? Примеры.
5. Как определить силу тока в цепи, содержащей нелинейный элемент ?

ЛИТЕРАТУРА.

1. И.В.Савельев. Курс физики. Т. 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика.- М., 1989.- С.95-105.
2. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Т. III. Электричество.- М., 1977.- С.174-177. 190-201.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители: Прокопеня Александр Николаевич
Чопчиц Николай Игнатъевич
Смаль Александр Сергеевич
Прокопеня Ирина Николаевна

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ ФИЗИКИ. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

Методические указания по выполнению
лабораторной работы Э4.

Ответственный за выпуск Прокопеня А.Н.
Редактор Строкач Т.В.

Подписано к печати 17.12.98 . Формат 60x84/16. Печать офсетная. Усл.п.л. 1,1. Уч.изд.л. 1,25. Тираж 200 экз.
Заказ № 271 . Бесплатно. Отпечатано на ризографе Брестского политехнического института.
224017. Брест, ул. Московская, 267.