

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № П1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ИСТОЧНИКА ТОКА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Цель работы: изучение компенсационного метода измерений и определение электродвижущей силы источника тока.

Оборудование: источник тока, резистор, нормальный элемент, исследуемый источник тока, реохорд, ключ, переключатель, гальванометр.

Краткие теоретические сведения

Ток в проводнике существует при наличии свободных зарядов и электрического поля. В замкнутой цепи постоянный ток существует при наличии, помимо кулоновских, так называемых сторонних сил.

Физическая природа сторонних сил различна. В гальванических элементах - это силы межмолекулярного взаимодействия. Разделение зарядов происходит в результате химических реакций. В фотоэлементах возникновение электродвижущей силы (ЭДС) происходит вследствие взаимодействия света с веществом. В электрогенераторах – за счет электромагнитной индукции. Термо-ЭДС возникает по причине различия температурных зависимостей положения уровней Ферми двух контактирующих металлов.

При наличии сторонних сил дифференциальная форма закона Ома имеет вид:

$$\vec{j} = \sigma \cdot (\vec{E}_k + \vec{E}_{ст}), \quad (1)$$

где \vec{j} – плотность тока, σ – удельная электропроводность, \vec{E}_k – напряженность поля кулоновских сил, $\vec{E}_{ст}$ – напряженность поля сторонних сил.

Рассмотрим участок 1-2 замкнутой цепи L , на котором находится источник тока, например, гальванический элемент (рис. 1). Выделим на этом участке малый элемент dl такой, чтобы можно было считать площадь поперечного сечения элемента S неизменной, а напряженности и плотность тока однородными и направленными вдоль него. Умножим левую и правую части равенства (1) на dl и, учитывая, что $j = I/S$, где I – сила тока, и $\sigma = 1/\rho$, где ρ – удельное сопротивление, запишем его в скалярном виде:

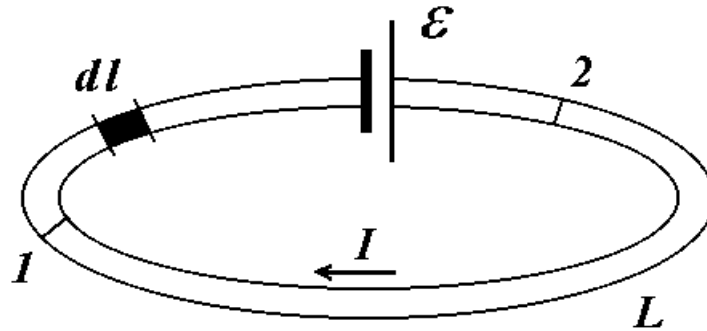


Рис. 1.

$$\frac{I}{S} dl = \frac{1}{\rho} (E_{\kappa} + E_{\text{ст}}) dl$$

Или

$$I \frac{\rho}{S} dl = E_{\kappa} dl + E_{\text{ст}} dl.$$

Интегрируя последнее выражение, получим

$$IR_{12} = \int_1^2 E_{\kappa} dl + \int_1^2 E_{\text{ст}} dl, \quad (2)$$

где величина $R_{12} = \int_1^2 \frac{\rho}{S} dl$ представляет сопротивление участка 1-2.

Первое слагаемое в правой части (2) равно убыли потенциала на участке 1-2

$$\int_1^2 E_{\kappa} dl = - \int_1^2 d\varphi = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (3)$$

второе слагаемое есть ЭДС - величина, численно равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда

$$\int_1^2 E_{\text{ст}} dl = \mathcal{E}. \quad (4)$$

Таким образом, закон Ома для неоднородного участка электрической цепи запишется в виде

$$IR_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}. \quad (5)$$

Если перемещать точку 2 вдоль проводника, то она в итоге совпадет с точкой 1. В этом случае $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ и, следовательно, для замкнутой цепи закон Ома принимает вид

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R}, \quad (6)$$

где $(r + R)$ – полное сопротивление замкнутой цепи, равное сумме внутреннего сопротивления источника тока r и внешнего сопротивления цепи R .

Компенсационный метод

На практике для определения ЭДС источника тока часто используют приближенный метод. Он состоит в том, что к клеммам источника тока присоединяют вольтметр с внутренним сопротивлением R_V . Показание прибора приближенно совпадает со значением ЭДС. Действительно, падение напряжения во внешней цепи (показание вольтметра)

$$U_V = IR_V = \mathcal{E} \frac{R_V}{r + R_V}.$$

Так как во многих случаях $R_V \gg r$, то $U_V \approx \mathcal{E}$. Недостатком этого метода является необходимость применять для измерения ЭДС вольтметр с большим внутренним сопротивлением.

Для более точного измерения ЭДС можно применить компенсационный метод, суть которого в данном случае заключается в компенсации измеряемой ЭДС известной разностью потенциалов.

Из (5) имеем, что при $I = 0$, $\varphi_2 - \varphi_1 = \mathcal{E}$. Поэтому отсутствие тока в цепи гальванометра (рис. 2) свидетельствует о том, что ЭДС исследуемого элемента компенсирована разностью потенциалов (падением напряжения) $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C$

на участке AC . Точность измерений по данному методу ограничивается в основном точностью значения эталонной ЭДС и точностью установки 0 на гальванометре.

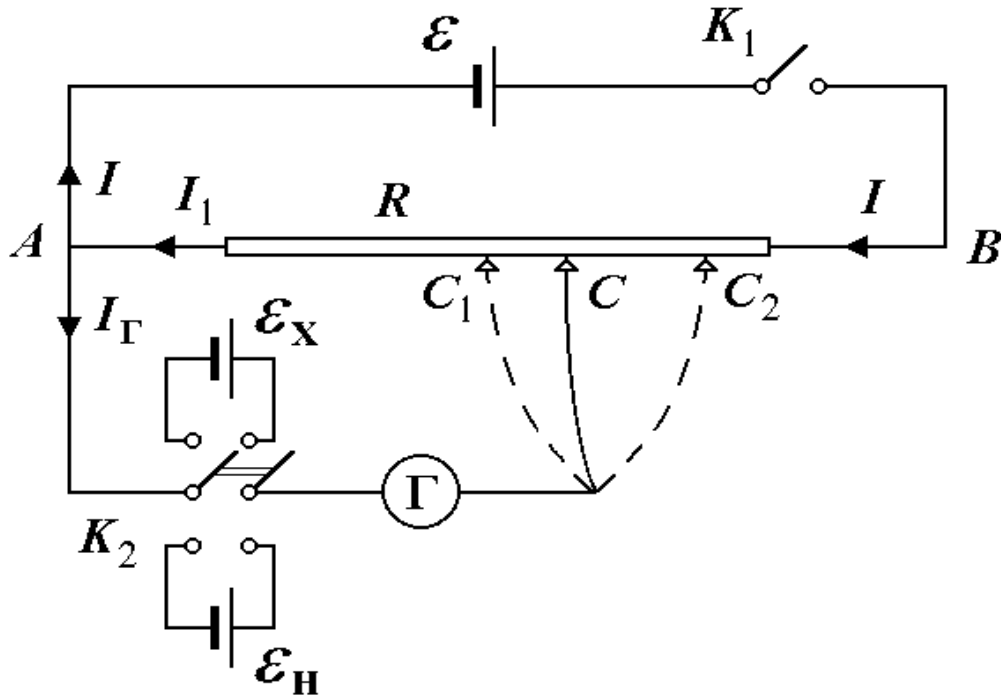


Рис. 2.

Описание экспериментальной установки

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из трех участков (рис. 2), один из которых содержит источник тока с измеряемой ЭДС \mathcal{E}_X или эталонной ЭДС \mathcal{E}_H , гальванометр и подвижный контакт C . Второй участок AB представляет собой реохорд – струну (стальная проволока) с полным сопротивлением R . Третий содержит вспомогательный источник тока с ЭДС \mathcal{E} .

Рассмотрим работу электрической цепи при условии, что $\mathcal{E} > \mathcal{E}_X$ и $\mathcal{E} > \mathcal{E}_H$. Для определенности будем считать, что в цепь включен сначала испытуемый элемент \mathcal{E}_X . Существует такое положение подвижного контакта реохорда C_1 , при котором ток в гальванометре отсутствует. Это означает, что разность потенциалов $\Delta\varphi_{CA}$ между точками C и A на реохорде равна \mathcal{E}_X :

$$\Delta\varphi_{CA} = \varphi_C - \varphi_A = \mathcal{E}_X. \quad (7)$$

С другой стороны падение напряжение на участке CA $\Delta\varphi_{CA} = IR_1$. Ток I через реохорд в момент компенсации ($I_\Gamma = 0$) рассчитывается по закону Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}, \quad (8)$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока \mathcal{E} , R – сопротивление реохорда, R_1 – сопротивление участка реохорда AC_1 .

Из (7) и (8) находим, что

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E} \frac{R_1}{R+r}. \quad (9)$$

С помощью переключателя K_2 вместо \mathcal{E}_x включим в цепь эталонный источник \mathcal{E}_H . Проведя рассуждения, аналогичные вышеизложенным, получим

$$\mathcal{E}_H = \mathcal{E} \frac{R_2}{R+r}, \quad (10)$$

где R_2 – сопротивление участка AC_2 .

Из (9) и (10) находим, что

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_H \frac{R_1}{R_2}. \quad (11)$$

Так как струна реохорда однородна, то ее сопротивление

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

где ρ – удельное сопротивление струны, L – длина струны, S – площадь поперечного сечения струны. Следовательно, отношение сопротивлений равно отношению длин участков струны

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2}, \quad (12)$$

где L_1 – длина участка струны AC_1 , L_2 – длина участка AC_2 .

Подставляя (12) в (11), получим

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_H \frac{L_1}{L_2}. \quad (13)$$

Формула (13) позволяет определить ЭДС исследуемого элемента.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь согласно рис. 2. Включить ключ K_1 .
2. Переключателем K_2 включить исследуемый источник тока с электродвижущей силой \mathcal{E}_x . Перемещением подвижного контакта реохорда C найти положение C_1 , при котором ток в гальванометре отсутствует. Длину участка струны $L_1 = AC_1$ записать в табл. 1.

Таблица 1

	L_1			L_2		
i	$L_{1i}, \text{см}$	$L_{1i} - \langle L_1 \rangle$	$(L_{1i} - \langle L_1 \rangle)^2$	$L_{2i}, \text{см}$	$L_{2i} - \langle L_2 \rangle$	$(L_{2i} - \langle L_2 \rangle)^2$
1						
2						
3						
	$\langle L_1 \rangle$		$\Sigma(L_{1i} - \langle L_1 \rangle)^2$	$\langle L_2 \rangle$		$\Sigma(L_{2i} - \langle L_2 \rangle)^2$

3. Переключателем K_2 подключить к цепи нормальный элемент с ЭДС \mathcal{E}_H . Найти положение подвижного контакта реохорда C_2 , при котором ток в гальванометре равен нулю. Результат измерения $L_2 = AC_2$ записать в табл. 1.

4. Провести измерения последовательно по п.2 и п.3 три раза.

5. Вычислить \mathcal{E}_x по формуле $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_H \frac{\langle L_1 \rangle}{\langle L_2 \rangle}$.

6. Вычислить ΔL_1^2 по формуле

$$\Delta L_1^2 = \frac{t_\alpha^2(N)}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \left(L_{1i} - \langle L_1 \rangle \right)^2, \quad (14)$$

где $t_\alpha(N)$ – коэффициент Стьюдента (для надежности $\alpha = 0,95$ и числа измерений $N = 3$ он равен 4,3).

7. Вычислить ΔL_2^2 по формуле, аналогичной (14).

8. Найти относительную ошибку ε по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta L_1}{\langle L_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L_2}{\langle L_2 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathcal{E}_H}{\mathcal{E}_H}\right)^2},$$

где значение отношения $\Delta \mathcal{E}_H / \mathcal{E}_H$ (относительная ошибка) и значение \mathcal{E}_H указаны на лабораторном стенде.

9. Определить абсолютную ошибку $\Delta \mathcal{E}_X = \varepsilon \mathcal{E}_X$.

10. Окончательные результаты измерений представить в виде

$$\mathcal{E}_X = \langle \mathcal{E}_X \rangle \pm \Delta \mathcal{E}_X.$$

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током? Каковы условия существования тока? Дайте определение силы и плотности тока.
2. Вывести закон Ома для замкнутой цепи. Дать определение ЭДС. Какова природа сторонних сил?
3. Почему метод измерения называется компенсационным?
4. От чего зависит сопротивление проводника?
5. Укажите условия отсутствия тока в гальванометре.

Библиографический список

1. Курс физики: Учебник для вузов: В 2 т. Т. 1./ ред. В. Н. Лозовский. – СПб.: Лань, 2007. – § 2.28, 2.30, 2.33, 2.34
2. Савельев, И.В. Курс общей физики в 3-х т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М.: Наука, 2005. – § 31, 33, 34, 36.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2001. – § 96, 98, 101.