

Работа 3.6

Измерение электродвижущей силы источника тока и градуировка термоэлемента

Упражнение 1. Определение ЭДС источника тока методом компенсации.

Оборудование: нормальный элемент, 3 аккумулятора, магазин сопротивлений, реохорд, зеркальный гальванометр, двойной ключ, соединительные провода.

Введение

Любой источник тока с электродвижущей силой \mathcal{E} обладает определенным внутренним сопротивлением. Именно поэтому если «обычный» вольтметр, стрелка которого отклоняется за счет тока в его рамке, присоединить к полюсам источника тока, то показание вольтметра не будет равным ЭДС источника тока. Присоединение вольтметра к полюсам источника создает замкнутую цепь, в которой будет течь ток. На основании закона Ома для замкнутой цепи (рис. 3.18) можно записать:

$$\varphi_A - \varphi_B = \mathcal{E} - Ir, \quad (1)$$

где r — внутреннее сопротивление источника тока, Ir — падение потенциала на этом сопротивлении. Из (1) следует, что показание вольтметра $\varphi_A - \varphi_B$ всегда меньше ЭДС \mathcal{E} . Показание вольтметра будет равным ЭДС \mathcal{E} только в том случае, когда ток через него не проходит (например, если используется электростатический вольтметр). При использовании «обычных» (потребляющих ток) электроизмерительных приборов, для определения ЭДС \mathcal{E} по формуле (1), кроме показания вольтметра, необходимо еще измерить ток I и внутреннее сопротивление источника тока r .

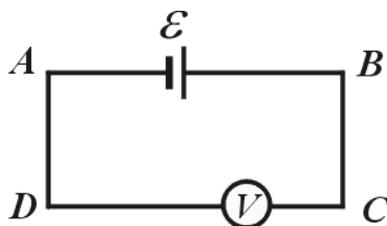


Рис. 3.18

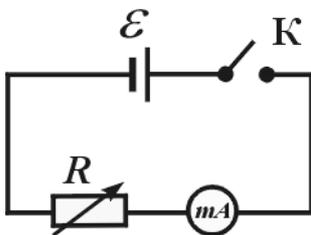


Рис. 3.19

Однако условия измерения можно выбрать так, что необходимость в определении внутреннего сопротивления r отпадает. Рассмотрим схему, представленную на рис. 3.19. Источник тока, ключ K , миллиамперметр mA и магазин сопротивлений R соединены последовательно. Величина тока в цепи зависит от сопротивления магазина. Пусть при сопротивлении магазина R_1 ток равен I_1 , а при сопротивлении R_2 — I_2 . На основании второго правила Кирхгофа можно записать:

$$\mathcal{E} = I_1 R_1 + I_1 (r + r_a), \quad (2)$$

$$\mathcal{E} = I_2 R_2 + I_2 (r + r_a), \quad (3)$$

где r — внутреннее сопротивление источника тока, r_a — внутреннее сопротивление миллиамперметра.

Если из (2) и (3) исключить $r + r_a$, то получим:

$$\mathcal{E} = \frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2} (R_2 - R_1). \quad (4)$$

Токи I_1 и I_2 измеряются миллиамперметром и поэтому выражение (4) дает возможность определить ЭДС источника \mathcal{E} .

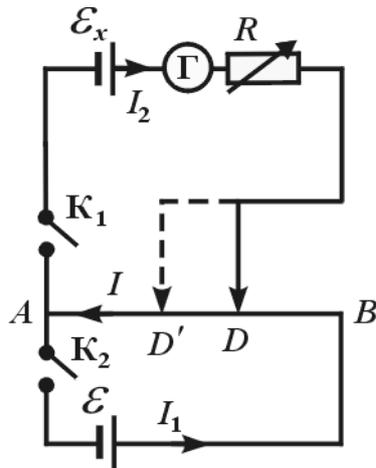


Рис. 3.20

Однако такой метод измерения ЭДС не отличается высокой точностью. При более точных измерениях используют другой метод, получивший название метода компенсации. Суть его заключается в том, что во время измерений ток, проходящий через исследуемый источник ЭДС, компенсируется током другого источника. Рассмотрим схему, приведенную на рис. 3.20.

Здесь \mathcal{E} — источник постоянного напряжения, \mathcal{E}_x — исследуемый источник тока, G — гальванометр, AB — реохорд, R — магазин сопротивлений, K_1 и K_2 — двойной ключ. Двойной ключ должен срабатывать так, чтобы контакт K_1 замыкался раньше контакта K_2 . Если подвижный контакт передвигать по реохорду, то можно найти такое его положение (рис. 3.20), в котором при замыкании двойного ключа ток в гальванометре не возникает. Тогда $I_2 = 0$ и $I = I_1$. Запишем второе правило Кирхгофа для контура $ARDA$. С учетом того, что $I_2 = 0$, будем иметь:

$$\mathcal{E}_x = IR_{AD}.$$

Но так как $IR_{AD} = \varphi_A - \varphi_B$, то

$$\varphi_A - \varphi_B = \mathcal{E}_x. \quad (5)$$

Аналогично для контура $AB\mathcal{E}A$ при условии, что $I_2 = 0$, имеем:

$$\mathcal{E} = I(R_{AB} + r), \quad (6)$$

где r — внутреннее сопротивление источника тока \mathcal{E} .

Из (5) и (6) следует:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E} \frac{R_{AD}}{R_{AB} + r}. \quad (7)$$

Если \mathcal{E}_x заменить другим источником тока ЭДС \mathcal{E}_N , то компенсация произойдет при другом положении подвижного контакта реохорда, и вместо соотношения (7) можно записать:

$$\mathcal{E}_N = \mathcal{E} \frac{R_{AD'}}{R_{AB} + r}. \quad (8)$$

Из соотношений (7) и (8) получим:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \frac{R_{AD}}{R_{AD'}} = \mathcal{E}_N \frac{l_x}{l_N}. \quad (9)$$

Здесь учтено, что вследствие однородности струны реохорда AB сопротивление ее частей AD и AD' пропорциональны их длинам l_x и l_N .

В качестве источника \mathcal{E}_N используется нормальный элемент, ЭДС которого постоянна и известна с высокой точностью.

Таким образом, измерение ЭДС методом компенсации сводится к одной операции — измерению длин l_x и l_N , при которых происходит компенсация тока в цепи гальванометра.

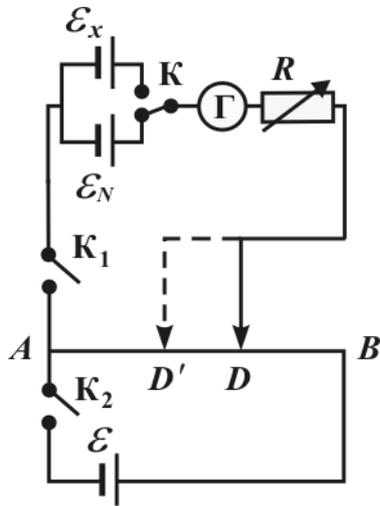


Рис. 3.21

Описание установки и метода. Для измерения ЭДС \mathcal{E}_x собирается схема, представленная на рис. 3.21. Переключатель K предназначен для поочередного подключения \mathcal{E}_N и \mathcal{E}_x . Струна реохорда натянута на масштабной линейке, что дает возможность непосредственно отсчитывать l_x и l_N (расстояния AD и AD'). С целью защиты элементов \mathcal{E}_N , \mathcal{E}_x и гальванометра Γ от больших токов при нескомпенсированном мосте, последовательно с ними включено большое сопротивление R .

В работе используется высокочувствительный гальванометр со шкалой, нулевое деление которой находится посередине. В качестве исследуемых элементов используются щелочные аккумуляторы. Элементом с известной ЭДС \mathcal{E}_N служит нормальный элемент Вестона. Его ЭДС при температуре 20°C $\mathcal{E}_N = 1,0183$ В.

Внимание! Нормальный элемент Вестона — это эталон ЭДС. Максимально допустимый ток через него — несколько микроампер. Поэтому нормальный элемент можно использовать только при условии защиты его от перегрузки сопротивлением R порядка 10^5 Ом. Уменьшение величины этого сопротивления с целью увеличения чувствительности установки допустимо только в состоянии компенсации.

Порядок выполнения упражнения

Задание 1.

1. Соберите электрическую цепь согласно рис. 3.19.

2. При двух разных значениях сопротивлений R_1 и R_2 магазина R запишите значения токов I_1 и I_2 и по формуле (4) вычислите ЭДС.

3. Повторите измерения 3 — 5 раз, найдите среднее значение ЭДС и вычислите погрешность измерений. Результаты измерений и расчетов запишите в таблицу:

№ п/п	R , Ом	I , А	\mathcal{E} , В	$\Delta\mathcal{E}$, В	$\frac{\Delta\mathcal{E}}{\mathcal{E}}$, %	$\mathcal{E} = \bar{\mathcal{E}}(B) \pm \Delta\mathcal{E}(B)$
-------	----------	---------	-------------------	-------------------------	---	---

Задание 2.

1. Соберите схему согласно рис. 3.21. Проследите за тем, чтобы в точке A были соединены одноименные полюса элементов \mathcal{E}_N , \mathcal{E}_x и \mathcal{E} .

2. Установите сопротивление магазина порядка 10^5 Ом. С помощью переключателя K включите элемент \mathcal{E}_{x1} . Замыкая на короткое время двойной ключ, перемещением подвижного контакта реохорда добейтесь отсутствия тока в гальванометре. С целью увеличения чувствительности установки повторите эту операцию несколько раз, каждый раз уменьшая сопротивление R , пока оно не станет равным нулю. Запишите l_x .

3. С помощью переключателя включите элемент \mathcal{E}_N , проделайте те же операции и запишите l_N .

4. Вычислите \mathcal{E}_{x1} по формуле (9), повторите измерения не менее 3 — 5 раз, найдите среднее значение и вычислите погрешность измерений.

5. Выполните такие же измерения и расчеты для элемента \mathcal{E}_{x2} .

6. Соедините элементы \mathcal{E}_{x1} и \mathcal{E}_{x2} один раз последовательно, а второй — параллельно и измерьте соответствующие соединениям ЭДС батарей \mathcal{E}'_x и \mathcal{E}''_x .

7. Сравните полученные ЭДС с вычисленными теоретически. Результаты измерений запишите в таблицу:

№ п/п	l_x , мм	l_N , мм	\mathcal{E}_{x1} , В	\mathcal{E}_{x2} , В	\mathcal{E}'_x , В		\mathcal{E}''_x , В	
					эсп.	теор.	эсп.	теор.

У п р а ж н е н и е 2. Градуировка термоэлемента.

Оборудование: термоэлемент, сосуд с водой и льдом, электронагреватель, электронный цифровой прибор М890G, магазин сопротивлений, соединительные провода.

Введение

При контакте двух металлов с различными работами выхода A_1 и A_2 и концентрациями свободных электронов n_1 и n_2 между ними возникает *контактная разность потенциалов*, состоящая из алгебраической суммы двух частей — внешней и внутренней.

Внешняя контактная разность потенциалов $\Delta\varphi_{\text{вн}}$ обусловлена различием работ выхода электронов из металлов и по абсолютной величине равна

$$|\Delta\varphi|_{\text{вн}} = \frac{A_2 - A_1}{e}, \quad (1)$$

а внутренняя контактная разность потенциалов $\Delta\varphi_i$ — различием концентраций n_1 и n_2 электронов в металлах. По абсолютной величине она равна

$$|\Delta\varphi_i| = \frac{kT}{e} \left| \ln \frac{n_1}{n_2} \right|, \quad (2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона.

Если сварить или спаять концы проводников разных металлов и составить замкнутую цепь (рис. 3.22), то в местах спая 1 и 2 возникает контактная разность потенциалов противоположных знаков. При одинаковых температурах спаев суммарная разность потенциалов будет равна нулю (закон Вольта). Если температуры T_1 и T_2 контактов 1 и 2 различны, то, согласно формуле (2), алгебраическая сумма контактных разностей потенциалов не будет равна нулю. Эта сумма $\mathcal{E} = \Delta\varphi_{i1} + \Delta\varphi_{i2}$ называется термоэлектродвижущей силой (термоЭДС). Согласно (2), получим:

$$\mathcal{E} = \Delta\varphi_{i1} + \Delta\varphi_{i2} = \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} = \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} (T_1 - T_2). \quad (3)$$

Описание установки и метода. Прибор из двух разных проводников со спаянными концами называется термоэлементом или термопарой. Формулу (3) можно записать в виде:

$$\mathcal{E} = \alpha (T_1 - T_2), \quad (4)$$

где $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$ (постоянная термопары термоЭДС, которая возникает при разности температур спаев в 1 К).

Для разных пар металлов α имеет разные значения. В общем случае α зависит от температуры, но для термопар, которые используются для измерения температур (медь — константан, хромель — алюмель, платина — родий и др.), она практически постоянна.

Для градуировки термопары собирают схему согласно рис. 3.23.

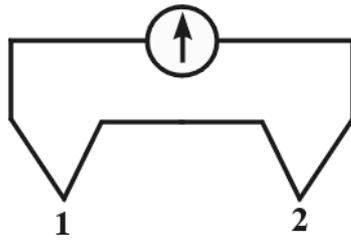


Рис. 3.22

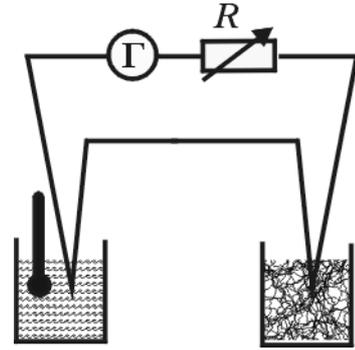


Рис. 3.23

Свободные концы термопары через магазин сопротивлений R замыкают на гальванометр Γ . При наличии разности температур между спаями в цепи возникает ток I , который зависит от величины термоЭДС \mathcal{E} и полного сопротивления цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_{\Gamma} + R_0}, \quad (5)$$

где R — сопротивление магазина, R_{Γ} — сопротивление гальванометра, R_0 — сопротивление термопары и соединительных проводов.

С целью обеспечения критического режима работы гальванометра на магазине сопротивлений необходимо установить сопротивление R , равное внешнему критическому сопротивлению гальванометра, значение которого указано на его передней панели.

Тогда выражение (5) будет иметь вид:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_k + R_{\Gamma} + R_0},$$

отсюда

$$\mathcal{E} = I(R_k + R_{\Gamma} + R_0). \quad (6)$$

Сопротивление термопары и соединительных проводов R_0 мало по сравнению с суммой сопротивлений $R_k + R_{\Gamma}$ ($R_0 \ll R_k + R_{\Gamma}$), поэтому вместо выражения (6) можно записать:

$$\mathcal{E} = I(R_k + R_{\Gamma}) = U = C_V n, \quad (7)$$

где $U = I(R_k + R_{\Gamma})$ — напряжение на клеммах гальванометра, C_V — постоянная гальванометра по напряжению, n — отклонение его светового указателя.

Таким образом, чтобы определить зависимость термоэлектродвижущей силы от разности температур между спаями термопары, достаточно изменять температуру одного из спаев и наблюдать отклонение светового указателя гальванометра.

Порядок выполнения упражнения

1. Соберите схему согласно рис. 3.23. Опустите один спай термопары в сосуд с водой и льдом, а второй — в трубчатый электронагреватель. В трубчатый электронагреватель опустите термопару, соединенную с прибором М890G. Подготовьте этот прибор для измерения температуры.

2. Включите электронагреватель. По мере увеличения температуры на 5 К фиксируйте отклонение светового указателя гальванометра. Повторяйте измерения, пока температура не увеличится до 80 °С.

3. Результаты измерений занесите в таблицу:

№ п/п	ΔT , К	n , дел.	\mathcal{E} , В	α , мкВ/К
-------	----------------	------------	-------------------	------------------

4. Вычислите термоЭДС по формуле (7). Постройте график $\mathcal{E} = f(\Delta T)$ и по нему определите коэффициент α .

5. Определите температуру нагретого тела (например, пальцев руки).

ЗАДАНИЕ ДЛЯ УИР

Исследуйте температурную зависимость термоэлектродвижущей силы термопары Cu — Fe и определите температуру инверсии термоЭДС.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электродвижущая сила?
2. Каково назначение сопротивления R в цепи (рис. 3.21)?
3. Как устроен и действует гальванический элемент Даниеля, Вольта?
4. Как устроены и действуют щелочный и кислотный аккумуляторы?
5. В чем суть метода компенсации?
6. Почему при измерениях ЭДС методом компенсации используется двойной ключ?
7. Почему возникает контактная разность потенциалов?
8. Как измерить температуру тела с помощью термопары?
9. От чего зависит знак термоЭДС?
10. Каково назначение сопротивления R в цепи рис. 3.23?