

**ИЗУЧЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС
МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ**

**Методические указания
для выполнения лабораторной работы**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ИЗУЧЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Методические указания для выполнения лабораторной работы


Томск

Издательский Дом Томского государственного университета

2018

РАССМОТРЕНО И УТВЕРЖДЕНО методической комиссией
физического факультета

Протокол № 3 от «15» декабря 2017 г.

Председатель комиссии:  М.А. Баныщикова

Работа посвящена изучению постоянного тока.
Рассматривается методика определения ЭДС источника тока
компенсационным методом.

Методические указания рассчитаны на студентов
нефизических специальностей очной и заочной форм обучения.

СОСТАВИТЕЛИ: доцент Н.А. Александров,
зав. лаб. Н.И. Иванова

ИЗУЧЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Цель работы: 1) изучение основных характеристик электрического поля и электрического тока; 2) экспериментальное определение ЭДС методом компенсации.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Все тела способны электризоваться, т.е. приобретать электрический заряд. Носителями зарядов являются элементарные частицы (электрон, протон). Заряд всех элементарных частиц одинаков по абсолютной величине и представляет собой наименьший встречающийся в природе электрический заряд, называемым **элементарным зарядом** (обозначается e). Экспериментально найдено, что $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл. Из элементарных частиц, протонов и электронов, построены атомы любого вещества. Обычно электроны и протоны имеются в равных количествах и распределены в теле с одинаковой плотностью. В этом случае алгебраическая сумма зарядов равна нулю, вследствие чего тело оказывается электрически нейтральным. Если создать в теле избыток частиц какого-либо знака, тело окажется заряженным.

Когда говорят, что два тела заряжены, то это означает что они способны взаимодействовать определенным образом. Для описания взаимодействия между удаленными заряженными телами введено понятие **электрического поля – особой формы материи, которая выполняет функцию передатчика взаимодействия между этими телами.** Взаимодействие **неподвижных** зарядов осуществляется посредством

электрического поля. Взаимодействие **движущихся** зарядов осуществляется кроме электрического поля также посредством магнитного поля.

Всякий заряд возбуждает в окружающем его пространстве электрическое поле, которое проявляет себя в том, что на помещенный в какую-либо его точку пробный заряд q_{np} действует сила, по закону Кулона равная

$$\vec{F} = \frac{qq_{np}\vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}, \quad (1)$$

где \vec{r} – радиус-вектор, определяющий положение пробного заряда относительно заряда q . Из закона Кулона следует, что для **данной** точки поля отношение $\frac{\vec{F}}{q_{np}} = const.$, т.е. не зависит от

величины q_{np} , поэтому его используют в качестве величины, характеризующей электрическое поле

$$\frac{\vec{F}}{q_{np}} = \vec{E} \quad (2)$$

Векторную величину \vec{E} называют **напряженностью** электрического поля в данной точке. Из (1) следует, что напряженность поля точечного заряда определяется выражением

$$\vec{E} = \frac{q\vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (3)$$

В системе СИ единицей измерения напряженности является $\frac{H}{Kл} = \frac{B}{м}$

Поскольку на внесенный в электрическое поле заряд действует сила, он будет перемещаться в поле. Кулоновская сила является центральной – её направление проходит через неподвижный центр (заряд). Центральные силы являются консервативными: работа этих сил не зависит от пути перехода из одной точки поля в другую, а зависит только от начального и конечного положения этих точек. Поэтому работа этих сил по замкнутому пути будет равна нулю.

Известно, что работа есть мера изменения энергии. Пробный заряд, внесенный в поле заряда Q и находящийся на расстоянии r от заряда, обладает потенциальной энергией взаимодействия

$$W = \frac{qQ_{np}}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (4)$$

Из (4) следует, что для **данной** точки поля отношение $\frac{W}{Q_{np}} = const.$, т.е. не зависит от величины Q_{np} , поэтому его используют в качестве второй величины, характеризующей электрическое поле – потенциал

$$\frac{W}{Q_{np}} = \varphi \quad (5)$$

Потенциал точечного заряда согласно (4) может быть записан в виде

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (6)$$

Единицей измерения потенциала в системе СИ является вольт (B).

Потенциал точечного заряда является энергетической характеристикой электростатического поля т.е. потенциал точечного заряда в какой-либо точке электростатического поля соответствует потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в эту точку.

Предположим, что в точку 1 электростатического поля заряда q помещен точечный заряд q' . Работа, совершаемая полем по перемещению заряда q' из точки 1 в точку 2

$$A_{1,2} = W_1 - W_2 = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_2}$$

Вынесем за скобку переносимый заряд, тогда работу можно представить в виде

$$A_{1,2} = q' \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_2} \right) = q' (\varphi_1 - \varphi_2)$$

Выражение $U = (\varphi_1 - \varphi_2)$ называется разностью потенциалов или **напряжением** электрического поля между точками 1 и 2, тогда работа равна

$$A = q' U \tag{7}$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЗАКОН ОМА

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.

Носителями тока могут быть электроны, а также положительные и отрицательные ионы.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо наличие свободных электрически заряженных частиц и электрического поля, за счет энергии которого осуществлялось бы упорядоченное движение зарядов. *Носители тока находятся в беспорядочном тепловом движении.* Через воображаемую площадку переносится в обоих направлениях одинаковый заряд и ток отсутствует. *При наличии электрического поля на хаотическое движение накладывается упорядоченное движение носителей:* под действием электрического поля, заданного вектором напряженности \vec{E} , перемещение положительных зарядов происходит вдоль поля, а отрицательных – против поля, т.е. возникает ток. Количественной мерой электрического тока является сила тока – **силой тока называется заряд, переносимый через некоторую воображаемую поверхность (например, через поперечное сечение проводника) в единицу времени.** Если за время dt переносится заряд dq , то сила тока

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (8)$$

В системе СИ единицей силы тока является ампер $A = \frac{Кл}{с}$.

На носители тока, кроме электрической силы действует сила, тормозящая их движение. Эта сила «трения» обусловлена взаимодействием носителей тока с атомами и молекулами проводника. Препятствие направленному движению носителей тока характеризуется электрическим сопротивлением проводника. Для однородного линейного проводника величина электрического сопротивления R прямо пропорциональна длине ℓ проводника и обратно пропорциональна площади поперечного сечения S проводника

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \quad (9)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление. Это индивидуальная характеристика проводника, представляющая собой сопротивление проводника длиной 1 м с площадью сечения 1 м^2 .

Ток, сила и направление которого не меняются со временем, называют постоянным.

Как следует из (6), наличие электрического поля приводит к перемещению зарядов из точки с большим потенциалом в направлении меньшего. Перемещение носителей тока в этом случае приведет к выравниванию потенциалов во всех точках проводника и к исчезновению электрического поля и тока. А так как работа электростатической силы по замкнутому пути равна нулю, поэтому для наличия постоянного тока в цепи необходимо иметь так называемый источник тока, способный создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы **сил неэлектрического происхождения** (Рис.1). Эти силы называют **сторонними**, так как действуют они на заряды со стороны источника тока. Сторонние силы могут действовать либо на всем протяжении цепи, либо на отдельных её участках. Природа сторонних сил может быть разной, например, в генераторах они возникают за счет механической энергии вращения ротора генератора в магнитном поле, в гальванических элементах – за счет энергии химического реагирования между электродами и электролитом.

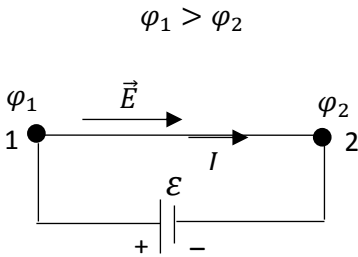


Рис.1

Действие сторонних сил обеспечивает движение зарядов против сил электростатического поля внутри источника тока. Благодаря этому на концах участка 1–2 поддерживается неизменная разность потенциалов и в цепи течет постоянный электрический ток. Сторонние силы при этом совершают работу по перемещению носителей тока.

Работу сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда называют электродвижущей силой ЭДС источника тока

$$\varepsilon = \frac{A_{см}}{q} \quad (10)$$

Единицей измерения ЭДС в системе СИ является вольт (B).

Участок электрической цепи, в котором нет источника сторонних сил, принято рассматривать как однородный участок цепи (рис.2). Ом экспериментально установил закон, согласно которому сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения U на проводнике

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1}{R}(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (11)$$

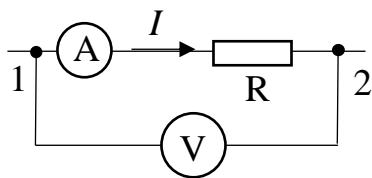


Рис.2

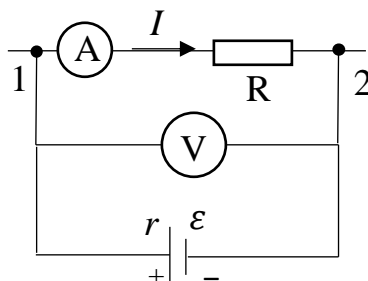


Рис.3

Есть также понятие неоднородного участка цепи 1–2, который характеризуется наличием ЭДС ε и разностью потенциалов на его концах $(\varphi_1 - \varphi_2)$. Закон Ома для неоднородного участка цепи

$$I = \frac{U + \varepsilon}{R + r}, \quad (12)$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока.

Для замкнутой цепи, т.к. $(\varphi_1 - \varphi_2) = U = 0$, закон Ома принимает вид

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (13)$$

ЭДС источника тока невозможно непосредственно измерить с помощью обычного вольтметра, т.к. вольтметр измеряет разность потенциалов на клеммах источника тока, а согласно (13)

$$IR + Ir = \varepsilon \text{ или}$$

$$U + Ir = \varepsilon \quad (14)$$

т.е. разность потенциалов на клеммах источника не равна ЭДС этого источника.

Как следует из (14), ЭДС источника тока равна разности потенциалов на клеммах источника ($U = \varepsilon$) только тогда, когда сила тока на участке цепи равна нулю $I = 0$. Это условие реализуется в методе компенсации.

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД

Компенсационные методы широко используются в измерениях электрических величин благодаря своей универсальности и высокой точности измерений (можно измерить ЭДС, напряжение, ток, сопротивление).

Целью данной работы является измерение ЭДС источника тока методом компенсации, в котором определение ЭДС исследуемого элемента производится путем сравнения с известной ЭДС нормального элемента по компенсационной схеме (рис. 4).

Здесь \mathcal{E} – источник питания, \mathcal{E}_x – ЭДС исследуемого элемента, \mathcal{E}_n – ЭДС нормального элемента, G – гальванометр, AB – калиброванная проволока. Необходимо

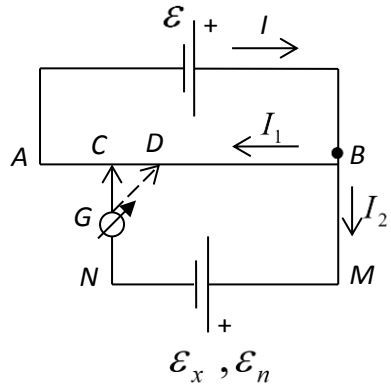


Рис.4.

подключать \mathcal{E} и \mathcal{E}_x или \mathcal{E} и \mathcal{E}_n одноименными полюсами навстречу друг другу (причем берется $\mathcal{E} > \mathcal{E}_n$; $\mathcal{E} > \mathcal{E}_x$).

Сущность метода компенсации заключается в том, что измеряемая ЭДС \mathcal{E}_x компенсируется (уравновешивается) напряжением на участке BC , создаваемое источником тока \mathcal{E} , в этом случае ток через источник не идет $I_2 = 0$ и

$$I_1 R_{BC} = \mathcal{E}_x \quad (15)$$

Напряжение на участке BC меняем за счет изменения сопротивления при перемещении движка реохорда.

Заменим исследуемый элемент нормальным, ЭДС которого известна. Передвигая контакт C , добьемся такого положения, чтобы ток через гальванометр отсутствовал (положение контакта C в некоторой точке D). Тогда выражение (15) можно переписать в виде

$$I_1 R_{BD} = \varepsilon_n \quad (16)$$

Ток через участок AB остается прежним, так как в ветви $BMNC$ тока нет. Разделив выражение (15) на (16), получим

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{R_{BC}}{R_{BD}} \quad (17)$$

Ввиду того, что проволока на участке AB калиброванная, т.е. имеет одинаковую площадь сечения по всей длине, согласно (9) можно записать

$$\frac{R_{BC}}{R_{DC}} = \frac{BC}{DC} = \frac{\ell_x}{\ell_n},$$

где ℓ_x и ℓ_n - длины участков BC и BD , на которых происходит компенсация ЭДС неизвестного элемента ε_x и нормального элемента ε_n , соответственно. Поэтому рабочая формула принимает вид

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{\ell_x}{\ell_n} \quad (18)$$

В качестве эталона ЭДС используется ртутно-кадмиевый нормальный элемент Вестона (его ЭДС при температуре $t = 20^{\circ}C$ равна $\underline{\underline{\varepsilon_n = 1,0183 V}}$). Его ЭДС очень мало меняется с температурой.

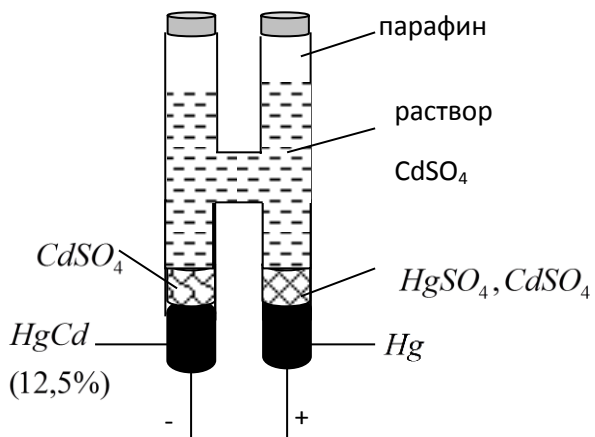


Рис.5.

Устройство ртутно-кадмиевого нормального элемента показано на рисунке 5. Он состоит из двух соединяющихся стеклянных пробирок, в дно которых впаяны платиновые проволоки. На дне одной из пробирок находится небольшое количество ртути, а поверх положена паста из смеси сернокислой ртути и сернокислого кадмия. На дне другой пробирки имеется амальгама кадмия (раствор металлического кадмия и ртути). Пробирки заполнены насыщенным раствором сернокислого кадмия. В этом элементе анодом служит ртуть, а катодом – амальгама кадмия (12,5%). Элемент Вестона применяется исключительно в компенсационных схемах. Он требует бережного отношения: его нельзя переворачивать, встряхивать, особенно следует остерегаться короткого замыкания.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме (рис.6). Кнопочный ключ K_2 (клеммы 1-2 и 3-4) используется для предохранения гальванометра от токов замыкания: с помощью его сначала подключается цепь реохорда и только после этого цепь гальванометра.

2. Магазин сопротивлений (м с) в цепи гальванометра поставить на максимальное сопротивление (он предназначен для предохранения гальванометра от сильных токов, возникающих при неполной компенсации).

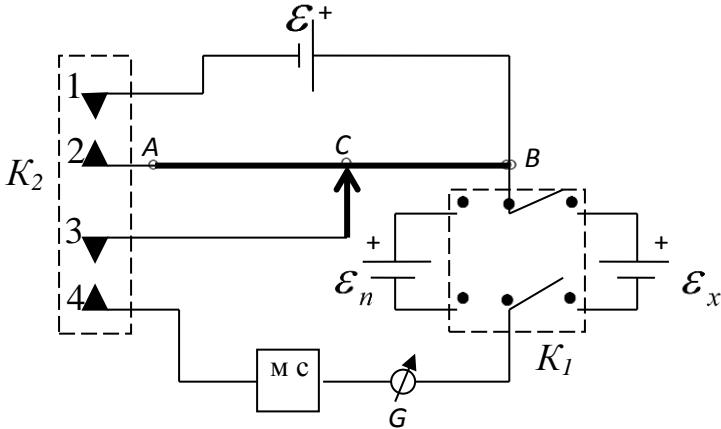


Рис.6.

3. Двойным ключом K_1 (переключателем) подключить элемент с неизвестной ЭДС \mathcal{E}_x .

4. Замкнуть ключ K_2 , передвижением движка реохорда C добиться компенсации (ток в цепи гальванометра равен нулю).

5. Постепенно уменьшая сопротивление магазина сопротивлений до нуля, добиться полной компенсации.

6. Снять отсчет ℓ_x , равный длине BC на реохорде.

7. Восстановить максимальное сопротивление магазина сопротивления.

8. Ключом K_1 включить нормальный элемент \mathcal{E}_n , и проведя аналогичные операции, снять отсчет ℓ_n - измерить длину BC на реохорде.

9. Восстановить максимальное сопротивление (м с).

10. Измерения для \mathcal{E}_x и \mathcal{E}_n необходимо провести несколько раз; результаты занести в таблицу.

11. Вычислить погрешность измерения по формуле

$$\left(\frac{\Delta \mathcal{E}_x}{\bar{\mathcal{E}}_x}\right)^2 = \left(\frac{\Delta \ell_x}{\bar{\ell}_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \ell_n}{\bar{\ell}_n}\right)^2,$$

где $\Delta \ell_x = t_{\alpha N} \sqrt{\frac{N \sum_{i=1}^N (\bar{\ell}_x - \ell_{xi})^2}{N(N-1)}} + \delta \ell^2$. Здесь $t_{\alpha N}$ -

коэффициент Стьюдента при $\alpha = 0,95$; N - число измерений; $\delta \ell$ - систематическая погрешность измерения длины $\Delta \ell_n$ вычисляется аналогично.

Таблица измерений и вычислений

№ п/п	ℓ_x (см)	ℓ_n (см)	$\bar{\ell}_x$ (см)	$\bar{\ell}_n$ (см)	$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n \frac{\ell_x}{\ell_n}$ (В)	$\bar{\mathcal{E}}_x$ (В)

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон Кулона.
2. Электрическое поле точечного заряда и его характеристики.
3. Работа, совершаемая полем по перемещению заряда.
4. Какие силы называются сторонними и их роль в поддержании тока?
5. Что такое ЭДС источника тока?
6. В чем заключается метод компенсации в определении ЭДС источника тока?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М. : АСТ, 2004.
2. Демидченко В.И. Физика. Высшее образование. Ростов н/Д, 2008.

Издание подготовлено в авторской редакции

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 2991 от «01» февраля 2018 г. Тираж 50 экз.

