

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучить компенсационный метод измерения ЭДС источника. Измерить ЭДС гальванического элемента.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: гальванометр, источник с неизвестной ЭДС \mathcal{E}_x , эталонный источник ЭДС $\mathcal{E}_{эм}$ и вспомогательный источник ЭДС \mathcal{E} , реохорд, соединительные провода, ключ, двухполюсный рубильник, кнопочный ключ, добавочное сопротивление.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Упорядоченное движение свободных зарядов, возникающее в проводнике под действием электрического поля, называется током проводимости. Количественно ток проводимости характеризуется скалярной величиной I , называемой силой тока и определяемой как производная по времени от заряда Q , проходящего через поперечное сечение проводника:

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (1)$$

Если сила тока и его направление, которое совпадает с направлением упорядоченного движения положительных зарядов, не изменяется со временем, то ток называется постоянным, и в этом случае

$$I = \frac{Q}{t}. \quad (2)$$

Следовательно, сила тока численно равна заряду, проходящему через сечение проводника в единицу времени.

Необходимыми условиями существования электрического тока являются наличие проводящей среды, свободных зарядов и электрического поля, характеризуемого разностью потенциалов. Однако, движение зарядов под действием электрического поля приводит к электростатическому равновесию зарядов внутри проводника и, значит, к выравниванию потенциалов и исчезновению в итоге электрического поля внутри проводника. Таким образом, для того, чтобы поддерживать ток достаточно долгое время, необходимо поддерживать электрическое поле внутри проводника, а для этого нужно от конца проводника

с меньшим потенциалом (носители заряда предполагаются положительными) непрерывно отводить приносимые сюда током заряды к концу с большим потенциалом. Иными словами, необходимо осуществить круговорот зарядов, при котором они двигались бы по замкнутому пути.

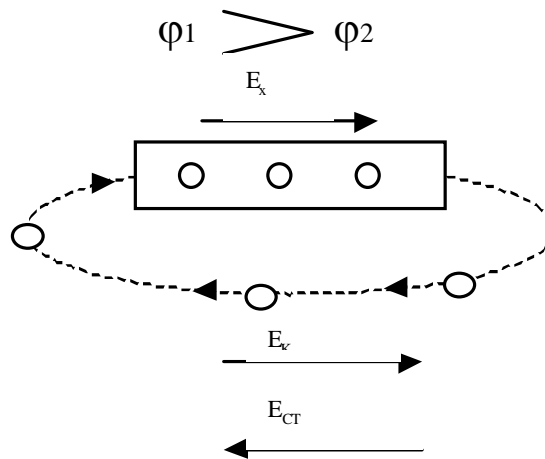


Рисунок
движения зарядов по замкнутой цепи

1 - Схема

$E_{ст}$ - напряженность поля сторонних сил, $E_{κ}$ - напряженность поля кулоновских сил.

В замкнутой цепи наряду с участками, на которых положительные заряды движутся в сторону убывания потенциала, должны иметься участки, на которых перенос положительных зарядов происходит в направлении возрастания потенциала, т.е. против сил электростатического поля (см. изображенную пунктиром часть цепи на рис.1). В этой части цепи для поддержания тока должны действовать источники тока.

В каждом источнике тока под действием сторонних сил происходит разделение электрических зарядов, в результате чего заряжаются электроды (полюса) этого источника. При этом сторонние силы совершают работу против электростатических сил. Сторонние силы по своей природе отличны от сил электростатических. Они могут быть обусловлены химическими процессами, явлением электромагнитной индукции, фотоэффектом, диффузией носителей заряда в неоднородной среде, действием сил инерции и т.д. Критерием сторонних сил является соотношение

$$\oint_L \vec{E}_{ст} d\vec{l} \neq 0.$$

Работа, совершенная сторонними силами при перенесении положительного заряда между полюсами незамкнутого на внешнюю цепь источника, определяет его электродвижущую силу (сокращенно ЭДС). По определению электродвижущая сила

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{Q}, \quad (3)$$

где A_{cm} - работа сторонних сил, совершаемая в источнике при перемещении заряда Q . Измеряется ЭДС в вольтах (В). При ЭДС, равной 1В, сторонние силы, перемещая заряд в 1 Кулон (Кл), совершают работу в 1 Джоуль (Дж).

Стороннюю силу F_{cm} , действующую на заряд Q , можно представить в виде

$$\vec{F}_{cm} = Q\vec{E}_{cm}, \quad (4)$$

где E_{cm} - напряженность поля сторонних сил. Тогда работа сторонних сил по перемещению заряда Q на участке цепи 1-2 :

$$A_{cm1,2} = \int_{(1)}^{(2)} \vec{F}_{cm} d\vec{l} = Q \int_{(1)}^{(2)} \vec{E}_{cm} d\vec{l}, \quad (5)$$

где $d\vec{l}$ - элементарное перемещение заряда. Следовательно, ЭДС, действующая на этом же участке, равна :

$$\mathcal{E}_{1,2} = \int_{(1)}^{(2)} \vec{E}_{cm} d\vec{l}. \quad (6)$$

Для определения ЭДС, действующей во всей цепи, интегрирование нужно выполнить по всей замкнутой цепи (т.е. по замкнутому контуру) :

$$\mathcal{E} = \oint_L \vec{E}_{cm} d\vec{l}. \quad (7)$$

Таким образом, ЭДС, действующая в замкнутой цепи, определяется циркуляцией вектора напряженности поля сторонних сил по контуру этой цепи.

Это общее определение ЭДС. Если известно, какие силы вызывают движение зарядов в рассматриваемом источнике, то можно найти напряженность поля этих сторонних сил и по формуле (7) рассчитать ЭДС источника. Экспериментально ЭДС может быть измерена различными методами.

2 ТЕОРИЯ МЕТОДА

Наиболее просто и быстро можно измерить ЭДС источника с помощью вольтметра, подключенного к его полюсам. (рис.2).

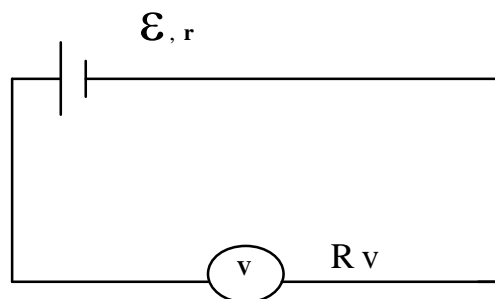


Рисунок 2 - Схема включения вольтметра для измерения ЭДС

Действительно, в этом случае по закону Ома для замкнутой цепи ЭДС источника

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

где R - сопротивление вольтметра, r - внутреннее сопротивление источника.

Если $R \gg r$, то $\mathcal{E} \approx IR = U$, т.е. показания вольтметра U приблизительно будут равны искомой ЭДС. Заметим, что если в схеме рис.2 включить вольтметр электростатической системы (постоянный ток через такой вольтметр не течет), то $\mathcal{E} = U$. Однако, такие вольтметры имеют большой нижний и верхний пределы измерения, большое значение цены деления и неравномерность в градуировке шкалы. Поэтому сравнительно небольшие значения ЭДС с высокой точностью ими измерить сложно.

Более точно ЭДС можно измерить методом компенсации. Рассмотрим принципиальную электрическую схему измерения, представленную на рисунке 3. Вспомогательная батарея с ЭДС \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r замыкается на реохорд AB с подвижным контактом D .

Исследуемый источник с ЭДС \mathcal{E}_x и внутренним сопротивлением r_x одним полюсом соединяются с одноименным полюсом (узел А) вспомогательной батареи, ЭДС которой \mathcal{E} , а другим через гальванометр Γ , сопротивление которого R_Γ с узлом D.

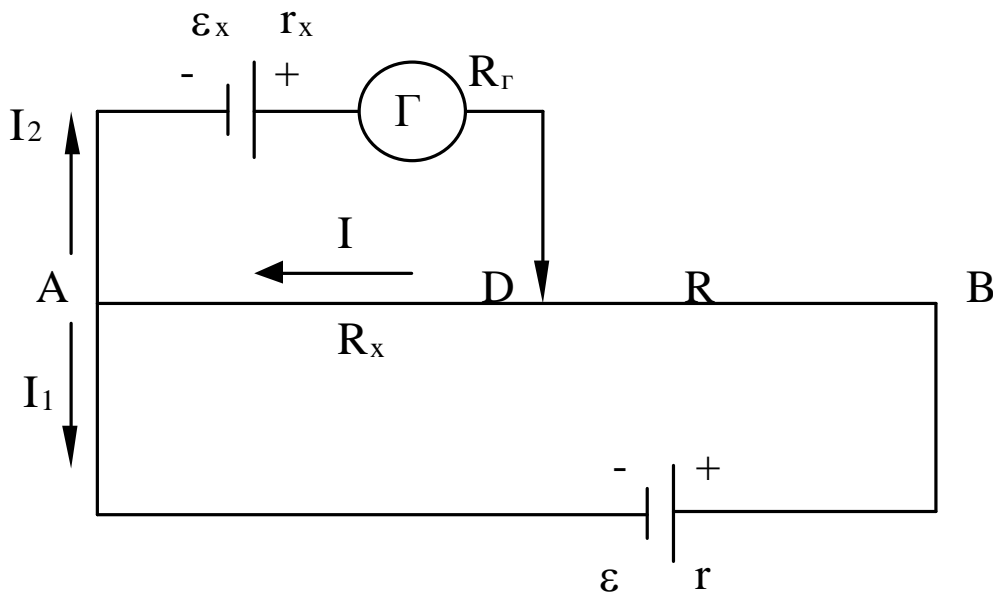


Рисунок 3 - Принципиальная схема метода компенсации

По первому правилу Кирхгофа для узла A имеем :

$$I - I_1 - I_2 = 0, \quad I = I_1 + I_2. \quad (8)$$

Применяя второе правило Кирхгофа к контурам $AEBA$ и AE_xDA , получим:

$$I_1 r + I_1 R + IR_x = \mathcal{E}, \quad (9)$$

$$I_2 R_r + I_2 r_x + IR_x = \mathcal{E}_x. \quad (10)$$

Если $\mathcal{E} > \mathcal{E}_x$, то падение напряжения U_{AB} больше, чем ЭДС исследуемого источника \mathcal{E}_x . Поэтому можно подобрать такое положение контакта D (значения сопротивлений R_x и R), при котором падение напряжения U_{AD} на сопротивлении R_x будет равно значению \mathcal{E}_x . Тогда тока I_2 на участке AE_xDA не будет (стрелка гальванометра будет оставаться на нулевой отметке, расположенной посередине шкалы). В этом случае ток I_1 , текущий через \mathcal{E} в узлах A и D , не разветвляется и будет протекать только по участку AB . Из уравнений (8-10) имеем :

$$I = I_1$$

$$\mathcal{E} = I(r + R + R_x)$$

$$\mathcal{E}_x = IR_x. \quad (11)$$

Таким образом, в случае, когда $\mathcal{E} > \mathcal{E}_x$ при встречном включении этих ЭДС, можно подобрать такое положение подвижного контакта D , при котором ЭДС \mathcal{E}_x исследуемого элемента равна падению напряжения IR_x на участке AD . В этом случае говорят, что ЭДС исследуемого элемента \mathcal{E}_x уравнивается или компенсируется падением потенциала между узлами A и D .

Решая систему (11) относительно \mathcal{E}_x имеем

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E} \frac{R_x}{r + R + R_x}. \quad (12)$$

Если вместо \mathcal{E}_x подключить источник с известным значением ЭДС $\mathcal{E}_{эм} < \mathcal{E}$ то аналогично, добившись компенсации при новых значениях сопротивлений участков AD и DB соответственно равных R'_x и R' , получим

$$\mathcal{E}_{эм} = \frac{\mathcal{E} R'_x}{r + R' + R'_x}. \quad (13)$$

Сопротивление участка AB в обоих случаях одинаково: $R + R_x = R' + R'_x$.

Поэтому из равенств (12) и (13) определяем значение \mathcal{E}_x :

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_{эм} \frac{R_x}{R'_x}. \quad (14)$$

Учитывая, что сопротивление однородного проводника определяется выражением

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (15)$$

где ρ - удельное сопротивление, S - площадь поперечного сечения провода, L - длина провода. Выразив R_x и R'_x через длины L_x и L'_x формулу (14) можно записать в виде:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_{\text{эт}} \frac{L_x}{L'_x}, \quad (16)$$

где L_x - длина участка AD при включении элемента \mathcal{E}_x , L' - длина участка AD , при включении элемента $\mathcal{E}_{\text{эт}}$.

Соотношение (16) лежит в основе сравнения ЭДС методом компенсации. При этом существенно, что для определения \mathcal{E}_x из соотношения (16) не надо знать ни внутренних сопротивлений источников, ни сопротивления гальванометра, ни ЭДС вспомогательной батареи \mathcal{E} . Необходимо только, чтобы \mathcal{E} во время измерений оставалась постоянной и была бы больше каждой из \mathcal{E}_x и $\mathcal{E}_{\text{эт}}$.

3 ОПИСАНИЕ СХЕМЫ

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4. Она отличается от принципиальной схемы. Во-первых, исследуемый и эталонный источники \mathcal{E}_x и $\mathcal{E}_{\text{эт}}$ включаются в цепь гальванометра попеременно с помощью двухполюсного перекидного ключа (рубильника) K_2 . Во-вторых, для предотвращения больших токов в эталонном элементе и в гальванометре последовательно им включено большое добавочное сопротивление $R_{\text{доб}} \sim 10^5 \text{ Ом}$. Сначала необходимое положение контакта D (сопротивление R_x и R) для компенсации находят грубо (со включенным добавочным сопротивлением $R_{\text{доб}}$). И только после этого, нажав кнопочный ключ K_n ($R_{\text{доб}}$ выключено), условие компенсации уточняют.

В процессе работы ЭДС источников \mathcal{E} , \mathcal{E}_x , $\mathcal{E}_{\text{эт}}$ могут уменьшаться, а сопротивление однородного провода AB вследствие нагревания увеличиваться. Это приводит к тому, что сила тока I на участке AB будет уменьшаться. Чтобы уменьшить связанную с этим погрешность, рекомендуется включать в цепь исследуемый источник \mathcal{E}_x и эталонный источник $\mathcal{E}_{\text{эт}}$ поочередно.

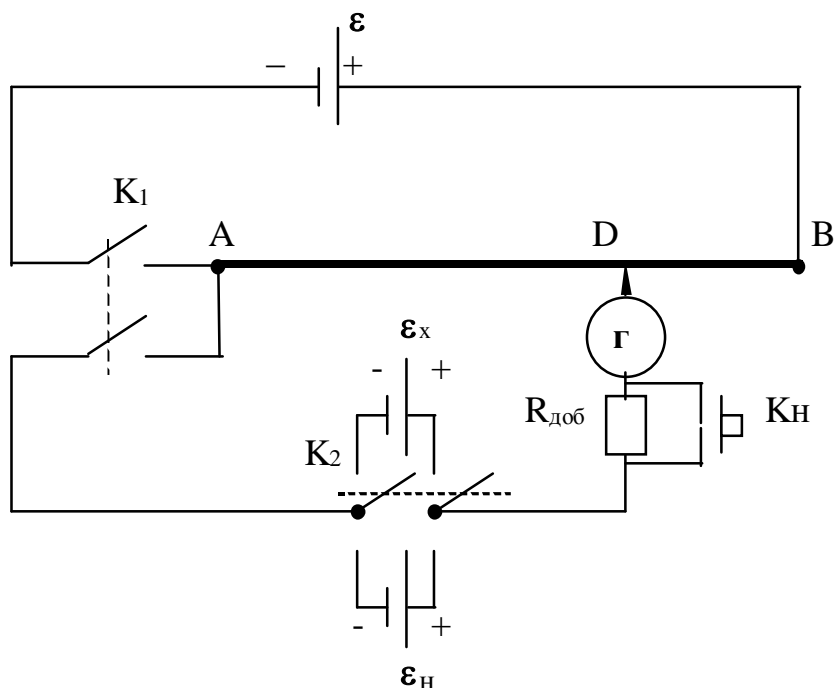


Рисунок 4 - Схема экспериментальной установки

4 ХОД РАБОТЫ

- 1 Движок D реохорда установите примерно на середину шкалы.
- 2 С помощью ключа K_2 включите в цепь исследуемый элемент ε_x .
- 3 Ключом K_1 замкните электрическую цепь.
- 4 Перемещая контакт D добейтесь компенсации (стрелка гальванометра на нулевом штрихе шкалы) с добавочным сопротивлением $R_{доб}$.
- 5 Уточните компенсацию без добавочного сопротивления (кнопка K_n нажата).
- 6 При полной компенсации произведите отсчет длины L_x .
- 7 С помощью ключа K_2 вместо исследуемого элемента ε_x включите эталонный $\varepsilon_{эт}$. Аналогичным образом (П 4-5) добейтесь компенсации (**сначала с сопротивлением $R_{доб}$ и лишь потом без него**). Произведите отсчет длины L'_x .
- 8 Поочередно включая источники ε_x и $\varepsilon_{эт}$ проведите серию из $3 \div 5$ измерений.
- 9 Разомкните ключом K_1 электрическую цепь.

10 Используя формулу (16), определите среднее значение ЭДС \mathcal{E}_x . В качестве эталонного элемента $\mathcal{E}_{эм}$ используется насыщенный элемент Вестона, значение ЭДС которого при $t=20^0$ С, $\mathcal{E}_{эм}=1,0185$ В и класс точности $\gamma=0,05$.

11 Оцените погрешность измерения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Дайте определение электрического тока и основных его характеристик.
- 2 Каковы условия существования тока ?
- 3 Дайте понятие о сторонних силах, какова их природа?
- 4 Приведите определение ЭДС источника, ЭДС действующей в замкнутой цепи.
- 5 Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи.
- 6 Как можно измерить ЭДС источников? В чем преимущества и недостатки разных методов?
- 7 Начертите компенсационную схему определения ЭДС. Выведите рабочую формулу (16).
- 8 Почему рассматриваемый метод называется методом компенсации?
- 9 Почему в методе компенсации \mathcal{E} должно быть больше чем \mathcal{E}_x и $\mathcal{E}_{эм}$?
- 10 Почему рекомендуется поочередное включение исследуемого и эталонного источников?
- 11 Для чего последовательно с гальванометром включают большое добавочное сопротивление? Для чего оно шунтируется кнопочным ключом?

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Трофимова Т.И. Курс физики. М.: В.Ш.,1997, с. 180-189.
- 2 Цэдрьк М.С. Курс агульнай фізікі. - Мн.:В.Ш.,1995.
- 3 Наркевич И.И и др. Физика для ВТУзов, ч. 2. - Мн.: В.Ш., 1994.
- 4 Савельев И.В. Курс общей физики, т.2. - М.: Наука, 1988.
- 5 Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. - М.: В.Ш.,1970, стр. 206-207