

**Специализированный учебно-научный центр -
факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
Школа имени А.Н. Колмогорова
Кафедра физики**

Общий физический практикум

Лабораторная работа №3.2

**Измерение ЭДС
и внутреннего сопротивления
источника тока**

Составитель Т.П. Корнеева.
Под редакцией
В.И.Лобышева

2011 г.

Измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

Цель работы

Изучение работы источника тока с различной нагрузкой и снятие нагрузочной кривой, а также измерение ЭДС гальванического элемента компенсационным методом.

Приборы и оборудование

Источник питания с регулируемым выходным напряжением; потенциометр с прикрепленной линейкой для отсчета длин (он же используется в качестве реостата); эталонный источник постоянного тока с заданной ЭДС; исследуемые источники тока; приборы для измерения токов и напряжений.

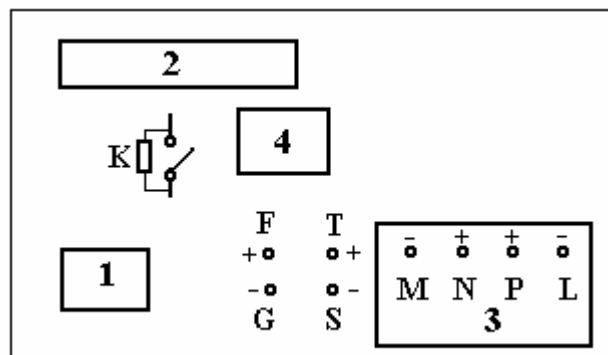


Рис.1.

Схема расположения приборов на панели экспериментальной установки.

На схеме обозначены:

- 1** – нуль-гальванометр; **2** – потенциометр (реостат);
3 – объединенные в общем корпусе:
 амперметр (клеммы **MN**),

источник тока, исследуемый методом вольтамперной характеристики (клеммы **PL**);

4 – гнездо для батареи с неизвестной ЭДС, определяемой методом компенсации;

К - ключ с подключенным к нему параллельно большим сопротивлением;

FG – клеммы эталонного источника;

TS – клеммы батареи с неизвестной ЭДС

Введение.

1. Физические основы работы химических источников тока (гальванических элементов)

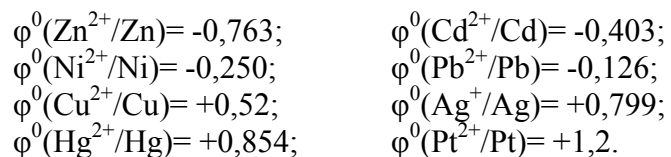
Из курса химии известно, что если железный или оцинкованный гвоздь опустить в раствор сернокислой меди (CuSO_4), гвоздь покроется слоем меди, а ионы железа (цинка) перейдут в раствор. Этот процесс проходит в две стадии: атомы железа отдают электроны (окисление железа) и ионы железа уходят в раствор, а ионы меди забирают электроны (восстановление меди) и осаждаются на электроде в виде нейтральных атомов. Реакции такого типа называют окислительно-восстановительными. В рассмотренной химической реакции происходит обмен электронами, локализованный на атомарном уровне.

В гальванических элементах процессы отдачи и приема электронов пространственно разделены, т.е. окисление происходит на одном электроде, а восстановление – на другом. Это приводит к движению ионов в растворе и позволяет получить макроскопический ток в цепи

Гальваническим элементом можно назвать пару любых разнородных металлических электродов, погруженных в какой-либо водный раствор. При погружении металла в раствор молекулы воды и анионы раствора «атакуют» металлический каркас и отрывают некоторую часть катионов каркасной решетки. Катионы переходят в раствор, но остаются вблизи

поверхности металла, так как их притягивают оставшиеся в металле электроны. В результате на границе металл – раствор образуется так называемый «двойной электрический слой». Он создает внутри себя электрическое поле, обладающее разностью потенциалов, которую называют электродным потенциалом (ЭП) полуэлемента и обычно обозначают буквой ϕ . Этот потенциал тем больше, чем больше заряжен двойной слой, то есть, чем лучше растворяется металл в растворе. Иначе говоря, величина ЭП зависит от активности протекания реакции в полуэлементе (Me^+/Me) или от активности металла. Если в раствор погрузить два любых металла, то оба они зарядятся, но менее активный металл несколько слабее, т.к. его решетка менее склонна отдавать ионы. Потенциал двойного электрического слоя зависит как от вида металла, так и от концентрации раствора, температуры и давления. Поэтому вводится понятие стандартного ЭП, измеренного для произвольного металлического электрода в стандартных условиях с помощью платинового электрода в растворе, насыщенном водородом. При этом значение потенциала водородного (платинового) электрода принимается равным нулю.

Приведем величины стандартных ЭП (в вольтах) наиболее часто используемых металлов:



2. История создания химических источников тока

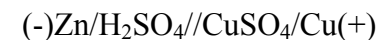
Исторически первым гальваническим элементом был элемент, предложенный в 1800 г. итальянским ученым Алессандро Вольта. Он состоял из серебряного и цинкового дисков, разделенных картоном или сукном, пропитанным водой или соевым раствором. Вскоре серебро было заменено медью. А.Вольта назвал его гальваническим элементом в честь итальянского ученого Луиджи Гальвани, обнаружившего ранее

сокращения нервно-мышечного препарата лягушки при контактах с разнородными металлами.

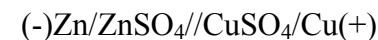
А.Вольта установил, что принципиально нельзя создать гальванический элемент, состоящий из одних только металлов (имеющих, разумеется, одинаковую температуру). Необходим, по крайней мере, один электролит, т.е. вещество, обеспечивающее процессы окисления и восстановления металлов, и их пространственное разделение. Существенным недостатком элемента Вольта при включении его на внешнюю нагрузку было восстановление ионов водорода на электроде из серебра (или меди) до молекулярного водорода, покрывавшего мелкими пузырьками электрод, вследствие чего ток прекращался.

Тем не менее, были созданы так называемые Вольтовы столбы – батареи из последовательно соединенных элементов Вольта, служившие ученым во множестве экспериментов с электрическим током. Так, русский ученый В.В.Петров смонтировал Вольтов столб из 2100 элементов и с его помощью впервые получил электрическую дугу (названную им Вольтовой дугой) уже в 1802 г.

В 1836 г. английский ученый Дж. Даниель объявил о создании стабильного гальванического элемента, состоящего из двух полуэлементов - цинкового электрода, помещенного в разбавленный раствор серной кислоты и медного электрода, помещенного в раствор медного купороса. Оба полуэлемента отделены друг от друга пористой мембраной, допускающей прохождение электрического тока, где носителями заряда являются ионы. Схематически элемент Даниэля представляется так:



В этом элементе при замкнутой внешней цепи на медном электроде восстанавливаются ионы меди, и нет выделения газа, но цинк расходуется (растворяется в серной кислоте) даже при разомкнутой внешней цепи. Этот недостаток был устранен в элементе Даниэля-Якоби:



Здесь вместо кислоты используется раствор сернокислого цинка. Такой элемент характеризуется длительной стабильностью.

Элемент Даниэля-Якоби широко применялся на практике для получения электрической энергии.

Дальнейшее существенное усовершенствование гальванических элементов было сделано в 1865 г. французским ученым Ж. Лекланше. Он сконструировал элемент, состоящий из цинкового стаканчика, заполненного раствором хлористого аммония NH_4Cl , в который был помещен агломерат (брикет) из смеси двуокиси марганца MnO_2 с угольным порошком и угольным токоотводом, заменяющим медный электрод. Механизм электрохимического восстановления двуокиси марганца обеспечивается переменной валентностью ионов марганца, сложен и не будет рассматриваться в этой работе.

Модификации элемента Лекланше с добавлением крахмала и других загустителей для раствора хлористого аммония, называемые *солевыми батарейками*, производятся до сих пор.

Важным шагом в деле создания химических источников тока явилось создание в 1895 г. первого аккумулятора – элемента Планте. Такой элемент можно было «заряжать», пропуская через него ток в противоположном направлении от другого источника, при этом величина ЭДС элемента восстанавливалась до первоначального значения.

Об устройстве современного свинцового аккумулятора и некоторых гальванических элементов можно прочитать в [1].

3. ЭДС гальванического элемента.

Одной из важнейших характеристик гальванического элемента (и любого другого источника тока) является физическая величина, которую называют его «электродвижущей силой» или, сокращенно, ЭДС.

Как было показано выше, в гальваническом элементе вблизи каждого из металлов (электродов) возникает электрическое поле, характеризующееся своей разностью потенциалов (ЭП). При одинаковой концентрации электролитов в обоих полуэлементах в первом приближении можно считать, что она определяется величиной стандартного ЭП. Тогда разность потенциалов между двумя электродами при разомкнутой

внешней цепи может быть найдена как разность ЭП этих металлов. Например, для элемента Даниэля-Якоби разность потенциалов между положительным (медь) и отрицательным (цинк) электродами будет равна

$$\varphi^+ - \varphi^- = \varphi^0(\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}) - \varphi^0(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) = 0,52 + 0,76 = 1,28 \text{ В.}$$

Электрическое поле между электродами возникает вследствие действия химических сил, приводящих к пространственному разделению зарядов. Силы не электростатического происхождения, действующие на заряженные частицы и приводящие к разделению зарядов, называют *сторонними силами*. К возникновению сторонних сил могут приводить, помимо химических, магнитные, гравитационные и другие взаимодействия.

Подобно тому, как электрическое поле между электродами характеризуется разностью потенциалов, поле сторонних сил может быть охарактеризовано величиной ЭДС, которая определяется следующим образом.

ЭДС источника тока – это отнесенная к величине заряда работа сторонних сил при переносе заряда внутри источника.

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$$

Заметим, что сторонние силы совершают положительную работу, когда заряды перемещаются от «-» к «+» источника.

При разомкнутой внешней цепи действие сторонних сил на заряженные частицы внутри источника уравнивается действием электрических сил. При этом разность потенциалов численно равна ЭДС:

$$\varphi^+ - \varphi^- = \varepsilon$$

В замкнутой цепи электрическое поле совершает над заряженными частицами положительную работу во внешней части цепи и отрицательную работу внутри источника. Полная работа электростатического поля при прохождении тока по замкнутому контуру равна нулю. Между тем, при прохождении тока в цепи выделяется тепло, ток может совершать механическую работу, могут происходить и другие

энергетические превращения. Все это осуществляется за счет энергии источника тока.

Часть I

Снятие нагрузочной кривой и определение по ней ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока.

Теория метода

Немецкий ученый Георг Ом (1787-1854) установил экспериментально, что при прохождении тока через проводник сила тока прямо пропорциональна разности потенциалов на концах проводника или, другими словами, приложенному напряжению:

$$I = \Lambda U, \quad (1)$$

где $U = \varphi_1 - \varphi_2$ (ток идет от точки 1 к точке 2), а коэффициент Λ называется электропроводностью данного проводника.

Часто вместо Λ используют обратную ей величину $R = 1/\Lambda$, которая называется сопротивлением данного проводника, и тогда закон Ома (1) принимает вид:

$$I = U/R \quad (1a)^1$$

Для цилиндрического проводника (провода) было экспериментально установлено, что его сопротивление зависит от материала проводника и геометрических параметров:

$$R = \rho L/S, \quad (2)$$

где ρ - удельное сопротивление материала, L - длина и S - площадь поперечного сечения проводника.

Из закона Ома в виде $U = IR$ и формулы (2) следует, что разность потенциалов между двумя точками однородного проводника с током пропорциональна длине соответствующей части проводника:

$$U = (\rho I/S)L. \quad (1b)$$

¹ Проводники, для которых выполняется соотношение (1a), часто называют «омическими»

Но разность потенциалов может быть пропорциональна расстоянию только в однородном поле, если рассматривать точки, лежащие на одной силовой линии. Следовательно, можно прийти к выводу, что электрическое поле внутри проводника с током однородно, т.е. напряженность электрического поля, а, следовательно, и сила, действующая на свободную заряженную частицу, одинакова в любой точке внутри проводника.

Поскольку электрический ток - это упорядоченное движение заряженных частиц, то для проводника постоянного сечения S сила тока может быть выражена следующим образом:

$$I = qnvS, \quad (3)$$

где q - заряд частиц, образующих ток (свободных носителей заряда),

n - концентрация свободных носителей заряда в проводнике,

v - скорость упорядоченного движения заряженных частиц в электрическом поле (скорость дрейфа).

Когда по проводнику протекает постоянный ток, скорость упорядоченного движения частиц и связанная с этим движением кинетическая энергия не меняются вдоль проводника. Более того, как видно из сопоставления (1b) и (3), скорость упорядоченного движения оказывается пропорциональной напряженности поля, а значит, силе, действующей на заряженную частицу:

$$E = U/L = \rho I/S = \rho qnv, \text{ т.е. } v \sim E$$

Здесь уместно вспомнить аналогичную ситуацию в механике, когда при падении тела в вязкой жидкости или газе скорость установившегося движения оказывается пропорциональной действующей на тело силе тяжести. Причиной этого являются силы вязкого трения, пропорциональные скорости ($F_c = kV$). В результате действия этих сил скорость тела при падении достигает определенного значения $V_{уст} = mg/k$, и кинетическая энергия падающего тела перестает меняться. При этом уменьшение его потенциальной энергии равно увеличению внутренней энергии тела и вязкой среды. Часто говорят, что потенциальная энергия падающего в вязкой среде тела «переходит в тепло».

Вытекающая из закона Ома пропорциональность скорости заряженных частиц действующей на них со стороны электрического поля силе позволяет предположить, что при протекании тока через проводник в нем существуют «силы сопротивления», аналогичные вязкому трению. В результате действия этих сил работа электрического поля идет, в конечном итоге, не на увеличение кинетической энергии движущихся заряженных частиц, а на увеличение внутренней энергии проводника. Подробнее рассмотреть механизм возникновения таких сил позволяет молекулярно-кинетическая теория [2,3].

Рассмотрим проводник, через который протекает ток, равный I , в течение времени τ . При этом через проводник пройдет заряд $Q = I\tau$.

Перепишем соотношение (1а) в виде $U = IR$ и умножим обе части равенства на величину заряда, прошедшего через проводник за это время. Получим:

$$IU\tau = I^2R\tau \quad (4)$$

Физический смысл полученного соотношения очевиден: величина в левой части равенства равна работе сил электрического поля над зарядом Q , а величина в правой части равна работе над этим зарядом «сил сопротивления», результатом чего и является выделение тепла.

В то же время соотношение (4) представляет собой экспериментально установленный закон Джоуля-Ленца, согласно которому в стационарном режиме (температура проводника не меняется) при протекании через проводник с сопротивлением R тока I за время τ выделяется количество тепла, равное

$$W = I^2R\tau. \quad (5)$$

Рассмотрим теперь включенный в электрическую цепь источник постоянного тока, например, гальванический элемент. Как уже было сказано, на разомкнутом источнике разность потенциалов равна численно ЭДС источника.

При протекании через источник электрического тока разность потенциалов на его полюсах (или напряжение) будет изменяться. Наша задача – выяснить характер этого изменения.

Функциональная связь между напряжением на каком-либо элементе цепи и током через него называется вольтамперной характеристикой элемента. Анализ вольтамперной характеристики позволяет понять процессы, происходящие в данном элементе при прохождении через него тока.

Электрическая схема для снятия вольтамперной характеристики источника тока (ее обычно называют нагрузочной кривой) приведена на рисунке:

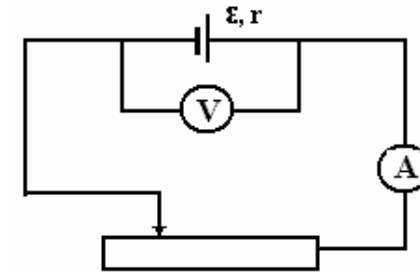


Рис. 2.

Схема для снятия вольтамперной характеристики источника тока

Результаты эксперимента обычно представляют графически:

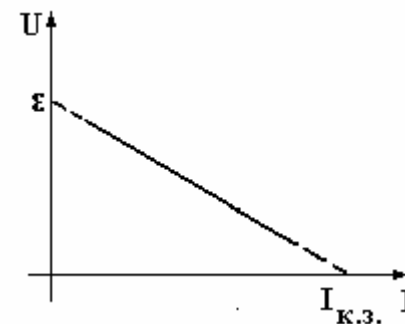


Рис. 3.

Полученная экспериментально зависимость между током и напряжением на источнике.

Нетрудно увидеть, что график функции $U(I)$ представляет линейную зависимость вида

$$U(I) = \varepsilon - rI, \quad (6)$$

где Γ - угловой коэффициент получившейся прямой.

Для дальнейшего рассмотрения заметим, что в приведенной схеме принято считать, что $U \equiv (\varphi^+ - \varphi^-)$, и что ток течет через источник от «-» к «+», т.е. положительные заряды движутся в направлении действия сторонних сил.

Перепишем соотношение (6):

$$\varepsilon + (\varphi^- - \varphi^+) = rI$$

и умножим обе части, как и ранее, на заряд, прошедший через источник за время τ .

$$I\tau[\varepsilon + (\varphi^- - \varphi^+)] = I^2 r\tau. \quad (7)$$

Данное соотношение отличается от соотношения (5) только тем, что в левой части этого равенства записана суммарная работа сторонних и электрических сил, действующих на прошедший по участку цепи заряд. Так как кинетическая энергия движущихся частиц не меняется (ток постоянный), выражение в правой части равно работе «сил сопротивления», которая в стационарном режиме приводит к выделению тепла на данном участке цепи.

Сравнивая выражение для количества теплоты (5) и правую часть уравнения (7), мы видим, что коэффициент Γ с полным правом может быть назван сопротивлением данного участка цепи. Обычно его называют *внутренним сопротивлением источника тока*.

Мощность тепловых потерь на участке цепи, содержащем источник тока, можно рассчитать, пользуясь тем же соотношением, что и для однородного проводника:

$$P_{\text{тепл}} = I^2 r.$$

Экспериментальная часть.

В настоящей работе Вам предлагается определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока методом снятия вольтамперной (нагрузочной) характеристики источника.

Приборы и оборудование.

Исследуемый источник тока; электронный вольтметр; миллиамперметр с пределом измерения 100 мА; реостат. Все приборы (кроме вольтметра) расположены на панели, представленной на рис.1.

Порядок выполнения работы.

1. Найдите на панели все перечисленные выше приборы.
2. Соберите электрическую схему в соответствии со схемой, приведенной на рис.4

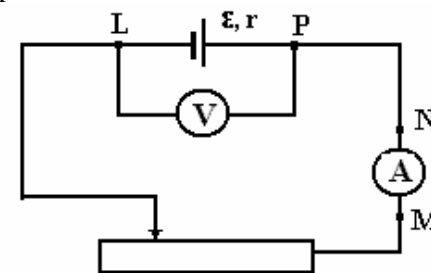


Рис. 4

3. Изменяя сопротивление внешней цепи, регистрируйте силу тока и напряжение на зажимах источника. При снятии значений силы тока запишите показания миллиамперметра, а затем пересчитайте их с учетом его предела измерения 100 мА. Полученные данные занесите в таблицу (не менее 15 значений).

Обработка результатов измерений

1. Полученные пары значений нанесите на график $U(I)$, *выбрав подходящий масштаб*.

Погрешность измерений напряжения ΔU электронным вольтметром при измерениях в пределах 0 – 2 В не превышает 0,005 В, величину ΔI определите самостоятельно, используя класс точности прибора.

2. Проведите по полученным точкам прямую, экстраполировав ее до пересечения с осями U и I , и определите ЭДС и ток короткого замыкания. Вычислите внутреннее сопротивление источника как угловой коэффициент полученной прямой с учетом размерности откладываемых на осях величин.

3. Запишите результаты измерений и сделайте выводы о проделанной работе.

ЧАСТЬ II

Определение ЭДС гальванического элемента компенсационным методом

Теория метода.

Компенсационный метод широко применяется в физике в тех случаях, когда измеряемая величина может быть сопоставлена с эталонной, значение которой известно с высокой степенью точности. Таковы, например, мостовые схемы измерения сопротивления, емкости и индуктивности.

Преимуществом компенсационных схем является то обстоятельство, что при измерениях удается добиться практически полного отсутствия тока на определенном участке цепи, что позволяет применять высокочувствительные гальванометры.

В данной работе для измерения ЭДС источника применяется компенсационный метод Поггендорфа-Боша, суть которого состоит в следующем.

Рассмотрим принципиальную электрическую схему:

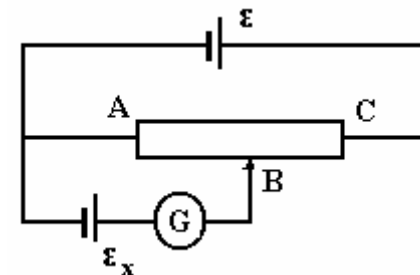


Рис.5

На рисунке обозначены:

ϵ - вспомогательная батарея, ϵ_x – исследуемая батарея, AC – реохорд (калиброванная проволока), G – гальванометр.

Если ЭДС исследуемого элемента меньше, чем ЭДС вспомогательной батареи ($\epsilon_x < \epsilon$), то на реохорде всегда можно найти такую точку B , что разность потенциалов ($\phi_B - \phi_A$) окажется равной по величине ϵ_x . В этом случае ток через гальванометр отсутствует. В такой ситуации говорят, что произошла компенсация источника в цепи гальванометра. При этом

$$\begin{aligned} \phi_B - \phi_A &= \epsilon_x, \\ \phi_B - \phi_A &= I R_{AB}, \end{aligned}$$

где I – сила тока в цепи вспомогательной батареи и реохорда.

Следовательно, при компенсации

$$\epsilon_x = I R_{AB} \quad (9)$$

Заменим теперь элемент ϵ_x другим элементом ϵ_y , и найдем теперь такую точку D на реохорде, когда ток в цепи гальванометра отсутствует. При этом

$$\begin{aligned} \phi_D - \phi_A &= \epsilon_y, \\ \phi_D - \phi_A &= I R_{AD}, \end{aligned}$$

где I – та же сила тока в цепи вспомогательной батареи и реохорда, что и в первом случае, поскольку тока в цепи гальванометра нет.

В этом случае

$$\varepsilon_y = I R_{AD} \quad (10)$$

Из (9) и (10) получаем, что отношение ЭДС двух элементов равно отношению сопротивлений соответствующих участков реохорда, которое, в свою очередь, равно отношению длин этих участков:

$$\varepsilon_x : \varepsilon_y = L_{AB} : L_{AD}$$

Заметим, что в полученный результат не входят значения ЭДС вспомогательной батареи и внутренние сопротивления всех используемых источников тока. Единственным условием успешного проведения эксперимента является соотношение:

$$\varepsilon > \varepsilon_x, \varepsilon_y.$$

Экспериментальная часть

Приборы и оборудование: источник питания с регулируемым выходным напряжением (вспомогательная батарея); потенциометр с прикрепленной линейкой для отсчета длин (играет роль реохорда); нуль-гальванометр; ключ K с подключенным (внутри) параллельно большим сопротивлением для исключения больших токов через гальванометр и источники тока; эталонный источник постоянного тока с заданной ЭДС, исследуемые источники тока (батарейки).

Все приборы (кроме источника питания) расположены на панели, представленной на рис.1.

Порядок выполнения работы.

1. Соберите установку в соответствии с приведенной на рис.6 схемой, включив в нее исследуемый источник ε_x , используя клеммы TS .

Проверьте полярность источников!

Обратите внимание: ключ K не предназначен для замыкания цепи (см. Рис.6). **Не замыкайте контакт в точке T !**

2. Установите напряжение на источнике питания $U_{\text{вых}}$ примерно равным 4 В.

3. Замыкая на короткое время контакт в точке T , найдите такое положение движка потенциометра, при котором гальванометр показывает отсутствие тока.

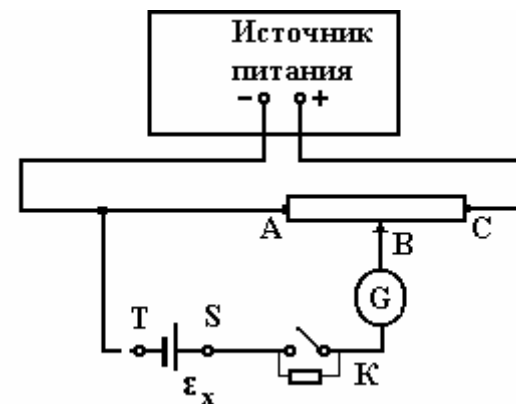


Рис.6

4. Замкните контакт в т. T , а затем ключ K , и скорректируйте положение движка при большей чувствительности гальванометра.

5. В таблицу для записи результатов запишите длину L_{AB} соответствующей части потенциометра, указав значение напряжения на источнике питания $U_{\text{вых}}$.

6. При том же значении напряжения на источнике питания вместо источника ε_x подключите эталонный источник $\varepsilon_{\text{эт}}$, используя клеммы FG .

7. Повторите все действия п.п. 3 – 5 и запишите длину L_{AD} .

8. Повторите все измерения при значениях $U_{\text{вых}}$ примерно равных 6 В и 8В.

9. Для исключения систематической ошибки, связанной с неравномерностью катушки потенциометра, измените схему, соединив гальванометр с точкой С, а клемму Т (F) с движком потенциометра (см. рис.7).

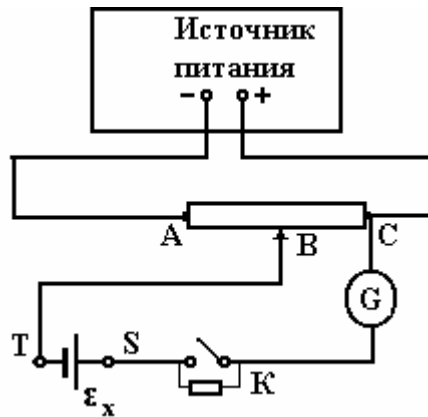


Рис.7

10. Повторите все измерения п.п. 2 – 8, получив, таким образом, всего 6 пар длин соответствующих участков потенциометра.

Обработка результатов измерений.

1. Для каждой из пар измеренных длин вычислите ϵ_x по формуле:

$$\epsilon_x = \epsilon_{\text{эт}} (L_{AB} / L_{AD}) \text{ или } \epsilon_x = \epsilon_{\text{эт}} (L_{BC} / L_{DC}).$$

Величину ЭДС эталонного элемента примите $\epsilon_{\text{эт}} = 3,000 \text{ В}$.

2. Подсчитайте среднее значение ЭДС исследуемого элемента $\langle \epsilon_x \rangle$ и ошибку среднего $\Delta \epsilon_x$ в серии из шести измерений.
3. Подсчитайте ошибку одного измерения, оценив ΔL и считая $\Delta \epsilon_{\text{эт}} = 5 \text{ мВ}$.
4. Запишите окончательный результат измерения ЭДС и *сделайте выводы о проделанной работе.*

Вопросы для получения допуска к выполнению лабораторной работы.

1. Сформулируйте цель работы.
2. Какие задания Вы будете выполнять в данной работе, в какой последовательности?
3. Какие приборы будут Вами использованы для выполнения измерений в первой и во второй части работы? Найдите их среди приборов и оборудования лабораторной работы.
4. В какой форме Вы будете представлять результаты измерений в первой и во второй части работы?

Вопросы к защите результатов лабораторной работы.

1. Какую физическую величину называют ЭДС источника тока?
2. Как устроен гальванический элемент?

3. От чего зависит ЭДС гальванического элемента?
4. Что называют внутренним сопротивлением источника тока?
5. Как рассчитать тепловую мощность, выделяющуюся внутри источника тока?
6. Как зависит разность потенциалов на зажимах источника тока от величины силы тока через источник?
7. Что такое “ток короткого замыкания”?
8. Что такое компенсационный метод измерения ЭДС источника тока? В чем его преимущество?
9. Покажите, исходя из соотношений (1а) и (2), что электрическое поле внутри цилиндрического проводника с током однородно.

Рекомендуемая литература

1. Г.Я.Мякишев и др. **Физика (10-11)**. Электродинамика
Москва, Дрофа, 2002 г.
2. Калашников С.Г. Электричество, Глава XIV
Москва, Наука, 1977
3. Парселл Э. Электричество и магнетизм, БКФ т. II, Глава 4.
Москва, Наука, 1975

