

Ку Аи: 5(075)

3-19

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени С. П. КОРОЛЕВА

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

(задания 2—3, 2—5, 2—7, 2—29)

КУЙБЫШЕВ 1979

82
84

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

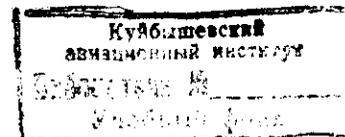
КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени С. П. ГОРОДЕВА

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
(задания 2—3, 2 - 5, 2 - 7, 2 - 29)

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока



КУЙБЫШЕВ 1979

Составители: доц. Л. П. Муркин, ас. И. П. Карпухина,
ас. Л. Ф. Сарбатова

Под редакцией доц. А. И. Федосова

Утверждена редакционно-издательским советом института
17 ноября 1978 г.

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Упорядоченное движение заряженных частиц называется электрическим током. Различают ток конвективный, ток поляризации, ток проводимости. В дальнейшем рассматривается, главным образом, ток проводимости, обусловленный наличием в телах свободных носителей зарядов — электронов и ионов.

Величина электрического тока характеризуется скалярной величиной I , называемой *силой тока*:

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

где dq — заряд, перенесенный через поперечное сечение проводника за время dt .

Более детально ток характеризуется *плотностью тока* \vec{j} , численное значение которого определяется как

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad (2)$$

где dS_{\perp} — элементарная площадка поперечного сечения проводника, расположенная перпендикулярно направлению движения носителей зарядов; dI — ток через эту площадку.

За направление вектора плотности тока \vec{j} принимается направление упорядоченного движения положительных зарядов.

Пусть средняя скорость упорядоченного движения зарядов равна u , концентрация заряда — n , значение заряда — e . Тогда плотность тока определится выражением

$$\vec{j} = enu \quad (3)$$

Электрический ток, значение которого не изменяется во времени, называется *постоянным током*. Для того, чтобы поддерживать ток в проводнике в течение достаточно длительного времени, необходимо непрерывно отводить заряды от конца проводника с меньшим потенциалом и подводить их к концу проводника с большим потенциалом (рис. 1). Это перемещение возможно осуществить лишь силами стороннего *электрического поля*, т. е. поля, обусловленного тепловыми процессами, химическими реакциями, контактными явлениями, ме-

ханическими силами и другими неэлектростатическими процессами. Такое же перемещение зарядов может осуществлять

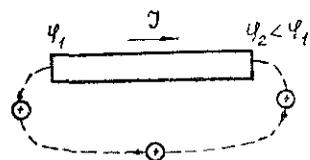


Рис. 1

электродвижущая сила (ЭДС).

Электродвижущей силой источника тока называется физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению электрического заряда по замкнутому контуру «источник — внешняя цепь» к величине заряда. Таким образом, ЭДС источника тока является его энергетической характеристикой. Согласно определению ЭДС, единицы электродвижущей силы совпадают с единицами разности потенциалов.

Кроме сторонних сил, на заряд в проводнике действуют силы электростатического поля. Если разность потенциалов на концах проводника равна $\varphi_1 - \varphi_2$, а ЭДС, действующую на этом участке, обозначить E_{12} , то величина

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) + E_{12}, \quad (4)$$

численно равная работе электростатических и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда на участке 1—2, называется *напряжением*.

Закон Ома для участка цепи, в котором действует ЭДС, записывается в виде:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + E_{12}}{R}, \quad (5)$$

где R — сопротивление участка 1—2.

Частные случаи:

1. Если цепь замкнута, то $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ и $I = \frac{E}{R}$.
2. Если на участке цепи не действует ЭДС, то $I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \stackrel{\text{Э}}{=}$

В этом случае напряжение и разность потенциалов на концах проводника совпадают. Из последнего соотношения следует, что сопротивление участка цепи есть величина, обратная коэффициенту пропорциональности между током и напряжением на этом участке.

Опыт показывает, что сопротивление однородного по химическому составу проводника сечением S и длиной l определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (5)$$

где ρ — называется *удельным сопротивлением* материала проводника. Величина, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной проводимостью*.

Зависимость удельного сопротивления от температуры определяет так называемый *температурный коэффициент сопротивления* α :

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dT}. \quad (7)$$

В общем случае $\alpha = f(T)$, но для металлов в сравнительно широком диапазоне температур можно принять, что $\alpha = \text{const}$. Например, α меди практически не изменяется в интервале $-50^\circ\text{C} \div +150^\circ\text{C}$. Поэтому можно записать

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (8)$$

Для металлов $\alpha > 0$, т. е. сопротивление металлов растет с увеличением температуры. Это явление объясняется теорией проводимости металлов следующим образом. С увеличением температуры возрастает амплитуда колебаний ионов в кристаллической решетке, что приводит к увеличению эффективного сечения рассеяния электронов, а, следовательно, и к увеличению сопротивления проводника.

ПРАВИЛА КИРХГОФА

Для сложных разветвленных цепей применимы следующие правила Кирхгофа:

1. В узле (месте соединения трех и более проводников) алгебраическая сумма токов равна нулю:

$$\sum_i I_i = 0. \quad (9)$$

Это правило является следствием стационарности распределения зарядов при постоянном токе.

2. Для любого замкнутого контура справедливо соотношение

$$\sum_k I_k R_k = \sum_k E_k, \quad (10)$$

где суммирование ведется по всем участкам контура.

При использовании второго правила Кирхгофа необходимо соблюдать следующие правила знаков:

а) выбрать определенное направление обхода контура и приписать токам знаки следующим образом: если ток совпадает с направлением обхода, то он берется со знаком «плюс», противоположен этому направлению — со знаком «минус»;

б) ЭДС берется со знаком «плюс», если ЭДС повышает потенциал на рассматриваемом участке в направлении обхода. В противном случае ЭДС приписывается знак «минус». Решая систему уравнений (9) и (10), можно определить ток во всех участках цепи.

Пример. Пусть задана цепь, схема которой приведена на рис. 2. Заданы сопротивления R_1, R_2, R_3 и значения ЭДС E_1, E_2, E_3 . Требуется определить токи в участках цепи I_1, I_2, I_3 .

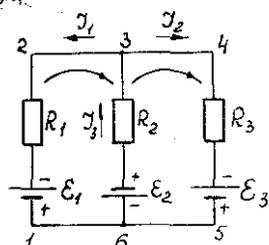


Рис. 2

Решение:

а) задаем направление обхода контуров, например, по часовой стрелке;

б) проставляем направление токов произвольно;

в) первое правило Кирхгофа,

применяемое к узлу 3, дает

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0;$$

г) второе правило Кирхгофа для контуров 1—2—3—6—1 и 3—4—5—6—3 дает еще два уравнения:

$$-I_1 R_1 - I_3 R_2 = -E_1 - E_2,$$

$$I_2 R_3 + I_3 R_2 = E_3 + E_2.$$

Из полученной системы трех уравнений определяются I_1, I_2, I_3 . Если значение какого-либо тока получится отрицательным, то это означает, что данный ток имеет направление, противоположное выбранному.

ПРОВОДИМОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Электролитическая проводимость обусловлена наличием в растворе ионов, которые возникают в результате диссоциации молекул растворимого вещества при взаимодействии их с молекулами растворителя, причем степень диссоциации

зависит от природы как молекул растворимого вещества, так и растворителя.

При отсутствии внешнего электрического поля ионы в электролите движутся хаотично, вследствие чего результирующий ток равен нулю. При наличии поля на беспорядочное тепловое движение накладывается упорядоченное движение ионов, и в растворе возникает электрический ток.

Установившаяся скорость движения ионов пропорциональна напряженности поля, т. е.

$$\vec{V}^- = -u^- \vec{E},$$

$$\vec{V}^+ = u^+ \vec{E}. \quad (11)$$

Величины u^- и u^+ называются подвижностями соответственно отрицательных и положительных ионов.

При комнатной температуре подвижность ионов в воде имеет порядок $10^{-7} - 10^{-8} \frac{\text{м/с}}{\text{В/м}}$.

Направленное движение ионов в электролите представляет собой электрический ток, плотность которого можно выразить формулой

$$\vec{j} = n^+ Ze \vec{V}^+ + n^- (-Ze) \vec{V}^-, \quad (12)$$

где $n^+ = n^- = n$ — концентрация ионов; Z — валентность иона.

Учитывая выражение (11), можно уравнение (12) записать в виде:

$$\vec{j} = nZe (u^+ + u^-) \vec{E}. \quad (13)$$

Величина

$$\sigma = nZe (u^+ + u^-) \quad (14)$$

по определению является удельной проводимостью электролита.

При повышении температуры электролита его проводимость увеличивается по двум основным причинам: во-первых, возрастает концентрация ионов вследствие повышения степени диссоциации; во-вторых, возрастает подвижность ионов вследствие уменьшения вязкости растворителя.

Задание 2—3

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель задания: измерение сопротивления резисторов с помощью моста Уитстона.

Приборы и инструменты: реохорд, набор резисторов, гальванометр, магазин сопротивлений, мост постоянного тока, нажимной ключ.

Описание схемы моста постоянного тока

Схема моста постоянного тока, называемого иначе мостом Уитстона, представлена на рис. 3. Резисторы R_1 , R_2 , r_1 , r_2 называют плечами моста. В одну диагональ моста включается источник питания E , в другую — индикатор с двухсторонней шкалой G (гальванометр).

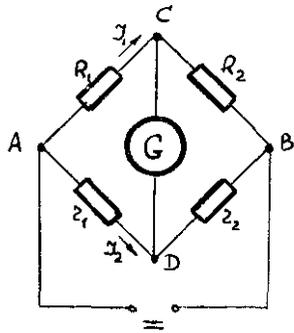


Рис. 3

Уравнение (15) может служить для отыскания любого из четырех сопротивлений, если известны остальные три.

Упражнение 1

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МАКЕТА МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 4 представлена схема моста постоянного тока, используемая в данном упражнении. На этой схеме R_x — неизвестное сопротивление, R — магазин сопротивлений, K_1 — на-

жимной ключ. Сопротивления r_1 , r_2 являются участками длинной проволоки (реохорда), намотанной на керамический каркас. Вдоль каркаса установлена шкала. При перемещении контактного движка и укрепленного на нем указателя вдоль шкалы изменяются сопротивления r_1 и r_2 участков реохорда:

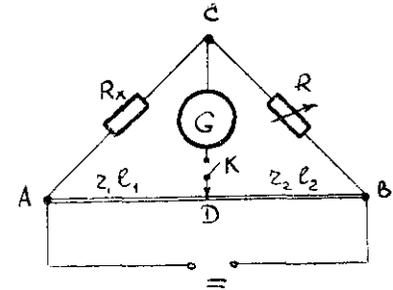


Рис. 4

$$r_1 = \rho \frac{\pi D n l_1}{S}; \quad r_2 = \rho \frac{\pi D n l_2}{S}, \quad (16)$$

где ρ — удельное сопротивление проволоки реохорда;

l_1 — длина участка AD ;

l_2 — длина участка DB ;

S — сечение проволоки реохорда;

n — число витков на единицу длины;

D — диаметр керамического каркаса.

Так как $\rho = \text{const}$, $S = \text{const}$, $D = \text{const}$, то из уравнения (16) следует, что

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (17)$$

С учетом (17) соотношение (15) имеет вид:

$$R_x = R \cdot \frac{l_1}{l_2} = R \frac{l_1}{l - l_1}, \quad (18)$$

где l — общая длина реохорда.

Порядок выполнения упр. 1

1. Собрать схему моста согласно рис. 4.
2. Уравновесить мост. Эту операцию следует производить в следующей последовательности:
 - а) установить контактный движок на середину реохорда;
 - б) включить питание схемы;
 - в) изменяя значение сопротивления магазина, добиться наименьшего отклонения стрелки гальванометра от нуля (при этом гальванометр в схему следует включать на короткое время, так как в процессе предварительной настройки через него может идти значительный ток);

г) путем перемещения движка реохорда окончательно уравновесить мост.

3. Несколько раз произвести измерения сопротивления каждого из двух неизвестных резисторов.

4. Полученные результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

№ сопротивления	№ опыта	R Ом	l_1 мм	$l-l_1$ мм	R_x Ом

Обработка результатов измерений

1. Оценить случайную погрешность результата измерений

$$\Delta R_x = t_{x, n} \cdot S_{\bar{R}}$$

2. Оценить погрешность метода измерений

$$\Delta R_x = R_x \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l-l_1}\right)^2},$$

где $\frac{\Delta R}{R}$ определяется классом магазина сопротивлений;

Δl — перемещение движка реохорда, вызывающее заметное отклонение стрелки гальванометра ($\sim 1/4$ деления шкалы).

3. Сравнить оба вида погрешности.

4. Записать окончательный результат измерения.

5. Аналогичную обработку провести для второго резистора.

Упражнение 2

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА МО-47

Мост постоянного тока предназначен для точных измерений омических сопротивлений в пределах от 10 до 10^6 Ом. Класс точности моста — 0,1. Упрощенная схема моста МО-47 представлена на рис. 5.

Плечи моста A и B представляют собой штепсельные магазины сопротивлений. Установка определенного соотношения между плечами A и B осуществляется с помощью специ-

ального коммутатора, расположенного на верхней панели прибора.

Плечо R выполнено в виде рычажного магазина сопротивлений, имеющего пять декад.

В четвертое плечо моста включается неизвестное сопротивление X . Схема питается от источника постоянного тока B , который подключается к одной из диагоналей моста с помощью ключа K_2 . Для уравновешивания моста используется внешний гальванометр Γ , подключаемый к схеме с помощью ключа K_1 .

Так как схема моста в принципе ничем не отличается от схемы, рассмотренной в предыдущих разделах, то при равновесии моста остается справедливым соотношение (15), которое в обозначениях рис. 5 имеет вид:

$$\frac{B}{R} = \frac{A}{X}, \text{ откуда } X = \frac{A}{B} R. \quad (19)$$

Таким образом, установив соотношение плеч $\frac{A}{B}$ и уравновесив мост с помощью сопротивления R , можно найти неизвестное сопротивление X по формуле (19).

Все узлы прибора смонтированы в деревянном корпусе, закрытом панелью (рис. 6). На панели установлены:

1. Клеммы для подключения источника постоянного тока и гальванометра, обозначенные соответственно «Б» и «Г».

2. Зажимы «X» для подключения неизвестного сопротивления.

3. Пять ручек управления декадами переменного сопротивления, обозначенные «x1000», «x100», «x10», «x1», «x0,1».

4. Коммутатор для установки соотношения плеч $\frac{A}{B}$. Он

состоит из трех контактных пластин и десяти круглых контактов, расположенных между пластинами в два ряда. Соединение контактов с контактными пластинами производится с помощью двух штекеров, которые устанавливаются в соответствующие гнезда: один штекер соединяет пластину A с каким-либо из контактов верхнего ряда, другой штекер соеди-

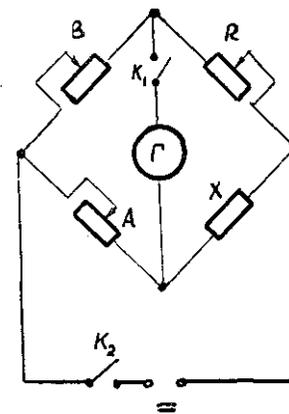


Рис. 5

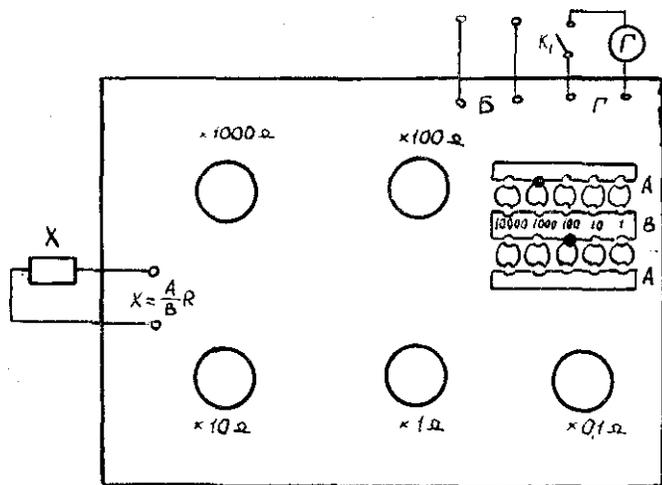


Рис. 6

няет пластину B с каким-либо из контактов нижнего ряда. В этом случае отношение $\frac{A}{B}$ равно отношению цифр, нанесенных на пластине B против гнезд, в которых установлены штекеры. Например, отношение $\frac{A}{B}$ для положения штекеров, указанного на рис. 6, равно 10.

Порядок выполнения упр. 2

1. Подключить к мосту источник питания, гальванометр и один из неизвестных резисторов, используемых в упражнении 1.
2. Установить на коммутаторе плечи моста A и B . Пока величина сопротивления неизвестна, соотношение плеч выбирается равным 1. В этом случае штекеры устанавливаются в гнезда с надписью 1000.
3. Подключить к мосту питание, а затем уже подключить гальванометр — кратковременным нажатием на ключ K_1 . Вращением рукояток декадных сопротивлений добиться отсутствия тока через гальванометр. В этом случае величина неизвестного сопротивления будет равна отсчету по декадам.
4. Для определения точного значения сопротивления следует повторить измерения несколько раз, каждый раз с но-

вым соотношением плеч A и B , выбираемых по таблице, которая приведена на внутренней стороне крышки прибора, и сделать соответствующую оценку допустимой погрешности.

5. Произвести измерение сопротивления другого неизвестного резистора.
6. Соединить резисторы последовательно и измерить сопротивление полученной цепи.
7. Соединить резисторы параллельно и измерить сопротивление полученной цепи.

Результаты записать в табл. 2.

Таблица 2

№ сопр.	R Ом	A	B	R_x Ом	$R_{расч}$ Ом
Последовательное соединение					
Параллельное соединение					

8. Сравнить результаты измерений с расчетными данными, которые определяются по формулам:

$$R_{\text{послед}} = R_1 + R_2, \quad (20)$$

$$\frac{1}{R_{\text{парал}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (21)$$

Задание 2—5.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ИСТОЧНИКА ТОКА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Цель задания: измерение ЭДС источника тока компенсационным методом и с помощью потенциометра.

Приборы и инструменты: нормальный элемент Вестона; исследуемый элемент; гальванометр; реохорд; двойной ключ; перекидной двойной переключатель; потенциометр.

Описание метода компенсации

Принципиальная схема установки для определения ЭДС источника тока методом компенсации приведена на рис. 7.

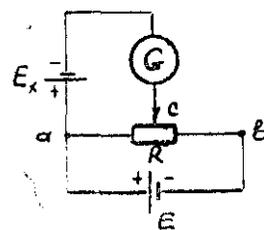


Рис. 7

Обозначения на схеме: E — вспомогательный источник тока; E_x — исследуемый источник; G — гальванометр; R — переменный резистор.

Переменный резистор выполнен таким образом, что при перемещении контакта c меняется сопротивление между точками a и c , c и b , а сопротивление между точками a и b остается постоянным.

Рассмотрим работу схемы. Если ЭДС исследуемого источника E_x меньше, чем ЭДС вспомогательного источника E , то можно найти такое положение контакта c' , при котором ток через гальванометр будет равен нулю. В этом случае ЭДС исследуемого источника равна напряжению на участке ac' , т. е.

$$E_x = I_1 R_{ac'} \quad (22)$$

где I_1 — сила тока на этом участке при отсутствии тока через гальванометр.

Итак, ЭДС исследуемого элемента можно найти по формуле (22), если измерить I_1 и $R_{ac'}$. Погрешность рассмотренного метода определяется, в основном, погрешностью измерения силы тока, т. е. величиной порядка $10^{-1}\%$.

Повышение точности достигается обычно следующим способом. Вместо исследуемого источника включается элемент с известной ЭДС E_n , называемый нормальным элементом. Затем находится новое положение контакта c'' , при котором ток через гальванометр будет равен нулю. В этом случае, аналогично предыдущему, можно записать

$$E_n = I_2 R_{ac''} \quad (23)$$

Токи I_1 и I_2 равны, так как при отсутствии тока через гальванометр I_1 и I_2 определяются лишь величиной ЭДС вспомогательного источника, его внутренним сопротивлением и сопро-

тивлением R_{ab} . Тогда из уравнений (22) и (23) следует, что

$$E_x = E_n \frac{R_{ac'}}{R_{ac''}} \quad (24)$$

Таким образом, для определения неизвестной ЭДС достаточно найти отношение двух сопротивлений, полученных при компенсационных измерениях с исследуемым источником тока и с нормальным элементом.

Упражнение 1 ИЗМЕРЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ТОКА КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

На рис. 8 представлена схема экспериментальной установки.

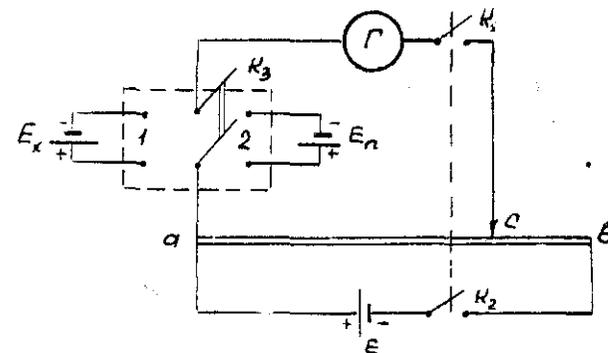


Рис. 8

В качестве сопротивления ab в схеме применен реохорд — длинная калиброванная проволока, намотанная на керамический каркас, вдоль которого установлена шкала. Вдоль реохорда по направляющему стержню может перемещаться движок (на схеме — точка c).

С помощью перекидного ключа K_3 в цепь гальванометра можно включить либо исследуемый источник тока, либо нормальный элемент.

Пусть при компенсационных измерениях с исследуемым источником тока длина участка реохорда от точки «а» до движка равна l_1 , а при измерениях с нормальным элемен-

том — l_2 . Тогда сопротивления этих участков будут равны соответственно:

$$R_{ac'} = \rho \frac{\pi D n l_1}{S}, \quad R_{ac''} = \rho \frac{\pi D n l_2}{S},$$

где n — число витков на единицу длины реохорда;
 ρ — удельное сопротивление материала реохорда;
 S — сечение проволоки реохорда;
 D — диаметр керамического каркаса.

Используя эти выражения, формуле (24) можно придать вид

$$E_x = E_n \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (25)$$

Зная величину E_n и измеряя l_1 и l_2 , легко определить ЭДС исследуемого источника тока.

В качестве нормального элемента в данной работе применен элемент Вестона. ЭДС элемента Вестона, хотя и слабо, но зависит от температуры. Эта зависимость выражается формулой $E_n = 1,01830 - 4,06 \cdot 10^{-5} (t^\circ - 20^\circ) - 9,5 \cdot 10^{-7} (t^\circ - 20^\circ)^2$.

При выполнении данной работы можно принять с достаточной точностью $E_n = 1,018$ В.

Порядок выполнения упр. 1

1. Собрать схему согласно рис. 8, соблюдая полярность включения источника тока.
2. Поставить переключатель K_3 в пол. 1.
3. Замкнуть двойной ключ K_1-K_2 и, перемещая движок реохорда, добиться, чтобы ток через гальванометр был равен нулю. Записать значение l_1 .
4. Поставить переключатель K_3 в пол. 2 и, следуя п. 3, найти значение l_2 .
5. Повторить измерения l_1 и l_2 несколько раз.
6. Результаты измерений записать в таблицу.

Таблица

№ опыта	l_1 мм	l_2 мм	E_n В	E_x В	$(E_x)_{cp}$ В

Обработка полученных результатов

1. Вычислить значение E_x по формуле (25).
2. Определить случайную погрешность результата измерений

$$\Delta E_x = t_{\alpha, n} \cdot S E_x.$$

3. Определить погрешность метода измерений

$$\Delta E_x = (E_x) \sqrt{\left(\frac{\Delta l_1}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_2}{l_2}\right)^2},$$

где $\Delta l_1 = \Delta l_2$ определяется перемещением движка реохорда, вызывающего заметное ($\sim 1/4$ деления гальванометра) отклонение стрелки гальванометра.

4. Сравнить оба вида погрешностей.
5. Записать окончательный результат измерений.

Упражнение 2

ИЗМЕРЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ТОКА С ПОМОЩЬЮ ПОТЕНЦИОМЕТРА

При измерении ЭДС источников тока на практике пользуются потенциометрами постоянного тока различных типов, в основе которых лежит компенсационная схема.

Упрощенная принципиальная схема потенциометра типа Р-300, Р-307 приведена на рис. 9. Если поставить переключатель K в положение «НЭ», то нормальный элемент будет подключен к участку цепи $a-b$. Значение сопротивления этого участка можно менять в небольших пределах в зависимости от значения ЭДС нормального элемента так, чтобы отношение $\frac{E_n}{R_{ab}}$ оставалось постоянным. С помощью переменного резистора устанавливается рабочий ток потенциометра, т. е. такой ток, при котором падение напряжения на сопротивлении R_{ab} компенсирует ЭДС нормального элемента. Значение этого тока равно

$$I_1 = \frac{E_n}{R_{ab}}.$$

Для данной конструкции потенциометра рабочий ток является постоянным. Таким образом, нормальный элемент служит для установления определенного значения рабочего тока.

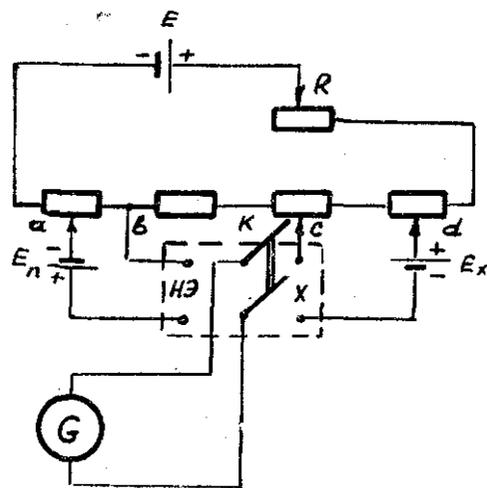


Рис. 9

Если теперь поставить переключатель K в положение «Х» и, изменяя сопротивление участка $c-d$, добиться компенсации ЭДС исследуемого источника, то значение искомой ЭДС может быть найдено по формуле

$$E_x = I_1 \cdot R_{cd}.$$

Так как $I_1 = \text{const}$, то E_x является функцией лишь сопротивления R_{cd} . Значение этого сопротивления устанавливается ручьятками потенциометра, с которыми связаны специальные шкалы, проградуированные в единицах напряжения. Поэтому при компенсации численное значение E_x получается непосредственно на шкалах.

Все узлы потенциометра Р-300 смонтированы в деревянном корпусе, который закрыт панелью (рис. 10). На панель выведены:

1. Три пары клемм «Х₁», «Х₂», «Х₃» для подключения трех исследуемых источников тока.
2. Клеммы «Г» — для подключения гальванометра.
3. Клеммы «НЭ» — для подключения нормального элемента.
4. Ручьятки 1—2—3—4, предназначенные для грубой и тонкой регулировки рабочего тока (на схеме — резистор R).

5. Ручьятка «НЭ», с помощью которой устанавливается значение сопротивления R_{ac} в соответствии со значением ЭДС нормального элемента.

6. Ручьятка «НЭ — Х» (на схеме — переключатель K).

7. Ручьятка «Х₁ — ВЫКЛ — Х₂ — ВЫКЛ — Х₃», предназначенная для подключения к схеме какого-либо одного из трех исследуемых источников.

8. Ручьятки «х0,1», «х0,01», «х0,001», «х0,0001», «х0,00001» (на схеме — сопротивление $c-d$). ЭДС исследуемого источника определяется суммированием произведений цифр, видимых в окошках около ручек, на соответствующие множители.

9. Кнопки управления гальванометром:

- кнопка «430000» предназначена для грубой установки нуля гальванометра (начальный период компенсации);
- кнопка «0» предназначена для тонкой установки нуля гальванометра (заключительный период компенсации);
- кнопка «УСПОКОЕНИЕ» прекращает сильные колебания стрелки гальванометра.

Конструкция потенциометра Р-307 отличается от описанной незначительно.

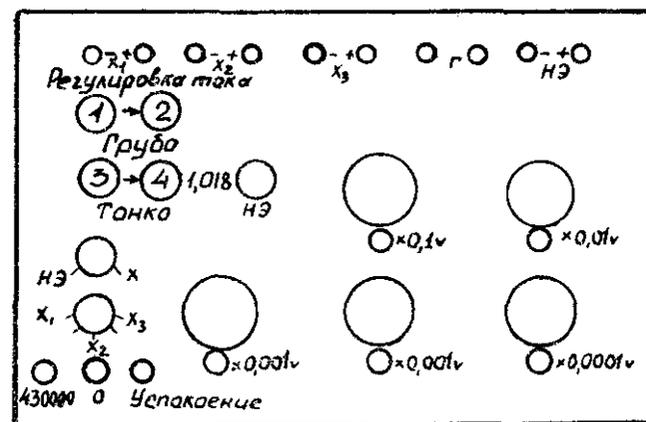


Рис. 10

Порядок выполнения упр. 2

1. Подключить нормальный элемент Вестона, гальванометр и исследуемый источник E_x к зажимам потенциометра «НЭ», «Г» и «Х» (любая пара) с соблюдением полярности.

2. Установить рабочий ток потенциометра. Для этого установить рукоятку «НЭ—Х» в положение «НЭ». С помощью рукояток регулировки рабочего тока установить нуль тока через гальванометр. При этом гальванометр следует включать сначала кнопкой «430000 Ом», а в конце регулировки—кнопкой «0».

3. Поставить рукоятку «НЭ—Х» в положение «Х». Нажав кнопку «430000 Ом», установить с помощью рукояток «х0,1», «х0,01» и т. д. нуль тока через гальванометр. Затем, нажав кнопку «0», уточнить нуль тока через гальванометр, пользуясь рукоятками, как в первом случае.

4. Определить значение измеряемой ЭДС суммированием произведений цифр, видимых в окошках около рукояток, на соответствующие множители.

5. Сравнить полученный результат с данными расчетов ЭДС в упр. 1.

Задание 2—7

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель задания— изучение зависимости удельного сопротивления раствора электролита от температуры.

Приборы и инструменты: электропечь, в которой закреплена U-образная трубка с исследуемым раствором электролита; милливольтметр; реохорд; постоянный резистор; вибрационный гальванометр.

Описание экспериментальной установки

Для измерения сопротивления раствора электролита обычно используется мостиковая схема, питаемая от источника переменного тока. Применение переменного тока необходимо по той причине, что при протекании постоянного тока изменяются потенциалы электродов (так называемое явление поляризации), и измеренное сопротивление не соответствует истинному значению сопротивления раствора электролита. Кроме помех в измерении, связанных с поляризацией электродов, существенно и то, что при прохождении постоянного

тока постепенно меняется состав раствора электролита вследствие электролиза.

Мостиковая схема для измерения сопротивления раствора электролита изображена на рис. 11. Она представляет собой замкнутый четырехугольник, составленный из резисторов R_x , R , r_1 , r_2 . В одну из диагоналей схемы включается источник переменного напряжения, в другую диагональ—вибрационный гальванометр G .

Резисторы r_1 и r_2 являются участками реохорда, они разделены контактом D ; R —постоянный резистор, сопротивление которого известно.

В схеме через R_x обозначено сопротивление раствора электролита, который находится в U-образной трубке, снабженной неокисляющимися металлическими электродами (рис. 12).

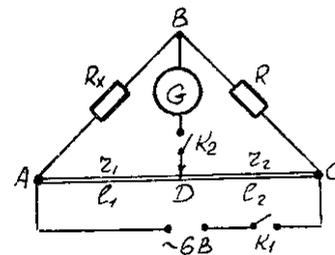


Рис. 11

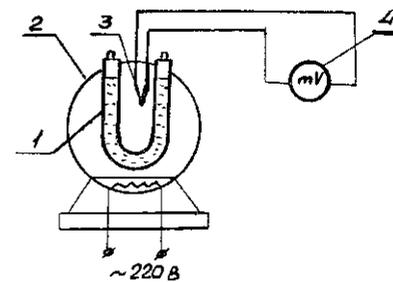


Рис. 12

Трубка 1 с раствором электролита находится в электропечи 2, которая нагревается переменным током напряжением 220 В. Температура в печи измеряется с помощью термопары 3, соединенной с милливольтметром 4. Для перехода от показаний милливольтметра к температуре воздуха в печи необходимо пользоваться тарировочным графиком, который имеется на установке. Термопара дает возможность определять лишь разность между температурой воздуха в печи и комнатной температурой, поэтому истинная температура воздуха в печи должна вычисляться по формуле:

$$t_{\text{в}} = t_{\text{приб}} + t_{\text{комн}} \quad (26)$$

где $t_{\text{приб}}$ — температура, найденная по тарировочному графику; $t_{\text{комн}}$ — комнатная температура.

Процесс измерения на мостиковой схеме заключается в отыскании такого положения движка реохорда, при котором

ток через гальванометр будет равен нулю. При этом условии легко показать, опираясь на второй закон Кирхгофа, что

$$\frac{R_x}{R} = \frac{r_1}{r_2}$$

или

$$R_x = R \cdot \frac{r_1}{r_2} \quad (27)$$

Реохорд калиброван, следовательно, отношение сопротивлений $\frac{r_1}{r_2}$ можно заменить отношением длин соответствующих участков реохорда. Тогда уравнение (27) принимает вид:

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2} = R \cdot \frac{l_1}{l - l_1}, \quad (28)$$

где l — общая длина реохорда.

Следует отметить, что для моста переменного тока соотношение (27) будет справедливо лишь при пренебрежительно малых индуктивных и емкостных сопротивлениях его элементов.

В качестве индикатора нуля в мостиковых схемах переменного тока часто применяются вибрационные гальванометры. Работа вибрационного гальванометра основана на взаимодействии между катушкой возбуждения, по которой протекает переменный ток, и подвижным постоянным магнитом. При отсутствии переменного тока в катушке подвижный магнит устанавливается в нулевое положение. Переменный ток, включаемый в катушку, вызывает вибрации магнита около нулевого положения. Вибрации подвижного магнита можно наблюдать по размытию световой полоски на шкале, получающейся в результате отражения лучей от зеркальца, связанного с магнитом.

Таким образом, чем меньше переменный ток, проходящий через гальванометр, тем уже световая полоска на шкале.

В данной работе используется вибрационный гальванометр типа ВГ. Правила обращения с прибором приведены на боковой панели гальванометра.

Порядок выполнения задания

1. Собрать схему согласно рис. 11. В данном задании ключ K_1 находится на шитке лабораторного стола, ключ K_2 — на верхней панели вибрационного гальванометра.

2. Включить электропечь, осветитель вибрационного гальванометра и питание моста.

3. Записать в таблицу длину участка реохорда l_1 , соответствующую положению равновесия моста, и показания милливольтметра, соединенного с термопарой $U_{\text{приб}}$ при увеличении температуры от $t_{\text{комн}}$ до $\approx 90^\circ$, затем, выключив печь, при уменьшении температуры от 90° до $t_{\text{комн}}$. Все измерения проводить при закрытой печи.

Таблица

№ п.п.	$U_{\text{приб}}$	$t_{\text{приб}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{в}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$l_1 \text{ мм}$	$R_x \text{ Ом}$	$\rho \text{ Ом м}$

4. Определить температуру воздуха в печи $t_{\text{в}}$, пользуясь тарировочным графиком и формулой (26).

5. Рассчитать сопротивление раствора электролита по формуле (28).

6. Определить величину удельного сопротивления раствора электролита для соответствующих значений температуры. Удельное сопротивление связано с геометрическими размерами и полным сопротивлением проводника зависимостью

$$R_x = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (29)$$

откуда

$$\rho = \frac{R_x \cdot S}{l}, \quad (30)$$

где l — длина столба исследуемого раствора электролита, м; S — площадь поперечного сечения, м^2 .

Численные значения величин l и S приведены на корпусе печи.

7. Все полученные результаты записать в таблицу.

8. По данным таблицы построить график зависимости $\rho = f(t)$ для процессов нагревания и охлаждения на одном листе в одной и той же координатной сетке.

9. Вследствие того, что температура раствора электролита ниже температуры воздуха при нагревании, а при охлаждении наоборот, то построенные зависимости $\rho = f(t)$ не совпадают для процессов нагревания и охлаждения, поэтому результирующая зависимость $\rho = f(t)$ определяется усредненной кривой.

Задание 2—29

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель задания — экспериментальное определение температурного коэффициента сопротивления металлов.

Приборы и инструменты: электропечь, в которой установлены термометр и терморезисторы; мост постоянного тока.

Описание установки

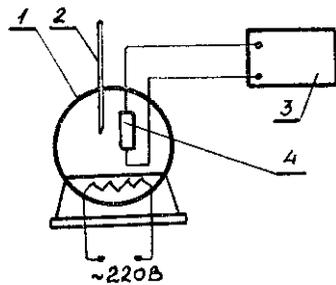


Рис. 13

Схема установки приведена на рис. 13. В электропечи 1, питаемой от сети переменного тока, смонтированы термометр 2 и терморезистор 4. Терморезистор изготовлен из тонкой проволоки, намотанной на изоляционный каркас, который для предохранения от повреждений, заключен в защитный металлический кожух. Сопротивление этой проволоки можно

определить с помощью моста постоянного тока 3.

Порядок выполнения задания

1. Включить электропечь.
2. В процессе нагревания терморезистора регистрировать его сопротивление и температуру в печи. Правила включения и работы с мостом постоянного тока приведены в задании 2—3.
3. Выключить печь, когда температура в ней достигнет $\sim 120^\circ\text{C}$. Регистрировать сопротивление терморезистора и температуру при охлаждении печи.
4. Результаты наблюдений записать в таблицу.

Таблица

Нагревание		Охлаждение	
$t^\circ\text{C}$	R Ом	$t^\circ\text{C}$	R Ом

Обработка результатов наблюдений

1. По данным таблицы построить график $R = f(t)$. Наличие двух серий результатов — при нагревании и охлаждении терморезистора — позволяет учесть гистерезис, т. е. отличие температуры терморезистора от температуры воздуха в печи за счет тепловой инерции. Это запаздывание изменения температуры имеет разные знаки при нагревании и охлаждении, поэтому результирующий график $R = f(t)$ должен представлять собой прямую, проводимую с использованием графического усреднения нанесенных экспериментальных точек.

2. Зависимость сопротивления проводника R_t от температуры дается формулой

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (31)$$

где R_0 — сопротивление проводника при $t = 0^\circ\text{C}$.

Из формулы (31) следует:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{t_2 - t_1}. \quad (32)$$

3. Определить значение R_0 , экстраполируя график на $t = 0$. Вычислить значение α , выбрав произвольно значения t_1 и t_2 и взяв по графику соответствующие значения R_{t_2} и R_{t_1} (рис. 14).

4. Определить погрешность результата измерения α . При этом для нахождения погрешностей R_0 и $\Delta R = R_{t_2} - R_{t_1}$ необходимо использовать график $R = f(t)$.

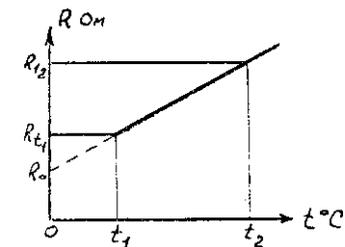


Рис. 14

Контрольные вопросы

К заданию 2—3

1. Начертите электрическую схему моста Уитстона и выведите расчетную формулу для определения неизвестного сопротивления.
2. Применимы ли правила Кирхгофа для цепей переменного тока?
3. Выведите формулу относительной погрешности для R_x и определите, при каком положении движка на реохорде погрешность измерения будет наименьшей.
4. Какой гальванометр применяется в схеме моста Уитстона?

К заданию 2—5

1. Компенсация каких величин имеется в виду в данной лабораторной работе?
2. В чем заключается различие между ЭДС и напряжением?
3. Начертите принципиальную схему потенциометра.
4. В каком случае измерение ЭДС источника можно произвести непосредственно вольтметром путем подключения его к клеммам источника?
5. ЭДС вспомогательного элемента увеличивается. В какую сторону перемещается точка на реохорде, соответствующая отсутствию тока в гальванометре?

К заданию 2—7

1. Вывести формулу, связывающую между собой плотность тока и подвижность ионов в растворе электролита.
2. Почему сопротивление раствора электролита уменьшается с повышением температуры?
3. Почему питание измерительного моста в данном задании производится от источника переменного, а не постоянного напряжения?
4. Начертите схему применяемой в данном задании экспериментальной установки.
5. Какова размерность удельного сопротивления проводника в системе СИ?
6. Какова размерность удельной электропроводности в системе СИ?
7. В чем заключается явление электролитической диссоциации?

К заданию 2—29

1. Дать определение величинам: сопротивление, удельное сопротивление.
2. Записать приближенную зависимость удельного сопротивления от температуры для металлов.
3. Почему в формуле (31) данного задания не учитывается линейное расширение проводника? Оценить погрешность, возникающую вследствие такого допущения.
4. Начертить график $\rho = f(t)$ и объяснить ход этого графика.
5. Как устроен терморезистор?

6. Объяснить принцип действия моста постоянного тока и порядок работы с ним.

7. Что называется гистерезисом, как он учитывается в данном задании?

Литература

Савельев И. В. Курс общей физики, т. 2, М., «Наука», 1964 г. и последующие издания, гл. 5, § 31, 32, 33, 36; гл. 9, § 79, 82.

Составители: *Леонид Павлович Муркин, Инна Петровна Карпухина,
Лидия Федоровна Сарбатова*

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Лабораторная работа (задания 2--3, 2--5, 2--7, 2--29)

Редактор И. М. Чулкова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Л. М. Соколова

Сдано в набор 08.01.79 г. Подписано в печать 19.01.79 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага оберточная белая. Высокая печать. Усл. п. л. 1,62. Уч.-изд. л. 1,6.
Заказ № 49. Тираж 2000 экз. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.