

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА**

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Составители: **И. П. Муркин, И. П. Карпухина, Л. Ф. Сарбатова**

УДК 530 (075.8)

Законы постоянного тока: Метод. указания к лабораторной работе /Куйбышев. авиац. ин-т, Сост. И. П. Муркин, И. П. Карпухина, Л. Ф. Сарбатова. Куйбышев, 1990. 14 с.

Методические указания знакомят с методами измерения ЭДС источника постоянного тока, содержат инструктивные материалы для работы на лабораторной установке и рекомендации по обработке результатов измерений. Приведены основные понятия, законы и соотношения, необходимые для расчета параметров цепей постоянного тока.

Предназначаются для студентов всех факультетов дневного и вечернего отделений.

Работа выполнена на кафедре «Физика».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королева

Рецензент **Д. Ф. Китаев**

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

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

Электрический ток характеризуется скалярной величиной I , называемой *силой тока*

$$I = dq/dt,$$

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

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

$$j = dl/dS_{\perp},$$

где dS_{\perp} — элементарная площадка поперечного сечения проводника, расположенная перпендикулярно направлению движения носителей зарядов; dl — 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

$$\vec{j} = en\vec{u}.$$

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, механическими силами и другими неэлектрическими процессами.

Такое же перемещение зарядов

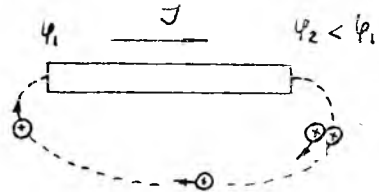


Рис. 1

может осуществлять индуцированное электрическое поле, которое возбуждается переменным магнитным полем. Устройства, обеспечивающие возникновение сторонних электрических полей, а следовательно, в сторонних сил, называются источниками тока (напряжения). Важнейшей характеристикой источника тока является его *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 заряду. 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

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

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

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

$$I = \frac{U}{R} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + E_{12}}{R}, \quad (1)$$

где R — сопротивление участка 1—2.

Частные случаи:

1. Если цепь замкнута, то $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ и $I = \frac{E_{12}}{R}$.

2. Если на участке цепи не действует ЭДС, то $I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$.

В этом случае напряжение и разность потенциалов на концах проводника совпадают. Из соотношения (1) 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

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — *удельное сопротивление* материала проводника. Величина, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной проводимостью*.

Зависимость удельного сопротивления от температуры определяется так называемым *температурным коэффициентом сопротивления* α :

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dT}.$$

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 $-50 \dots +150^\circ\text{C}$. Поэтому можно записать

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

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:

$$\sum_i I_i = 0. \quad (2)$$

Это правило является следствием стационарности распределения зарядов при постоянном токе.

2. Для любого замкнутого контура справедливо соотношение

$$\sum_k I_k R_k = \sum_k E_k, \quad (3)$$

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 она повышает потенциал на рассматриваемом участке в направлении обхода. В противном случае ЭДС приписывается знак «минус». Решая систему уравнений (2) и (3), 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 .

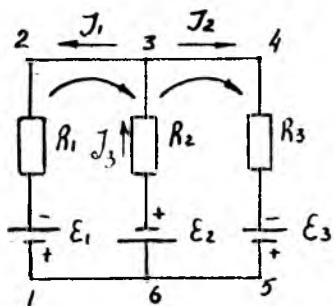


Рис. 2

Решение:

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

б) предоставляем 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 молекулы растворенного 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.

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

$$\vec{V}^+ = u^+ \vec{E}. \quad (4)$$

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

$$\vec{j} = n^+ Ze \vec{V}^+ + n^- (-Ze) \vec{V}^-, \quad (5)$$

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

Учитывая выражение (4), можно уравнение (5) записать в виде

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

Величина $\sigma = nZe (u^+ + u^-)$

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—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. 3.

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

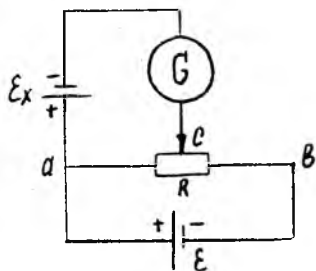


Рис. 3

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.

$$E_x = I_1 R_{ac'}, \quad (6)$$

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

Итак, ЭДС исследуемого элемента можно найти по формуле (6), 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 через гальванометр будет равен нулю. В этом случае, аналогично предыдущему, можно записать

$$E_n = I_2 R_{ac''}. \quad (7)$$

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 сопротивлением R_{ab} . Тогда из уравнений (6) и (7) следует, что

$$E_x = E_n \frac{R_{ca'}}{R_{ac''}}. \quad (8)$$

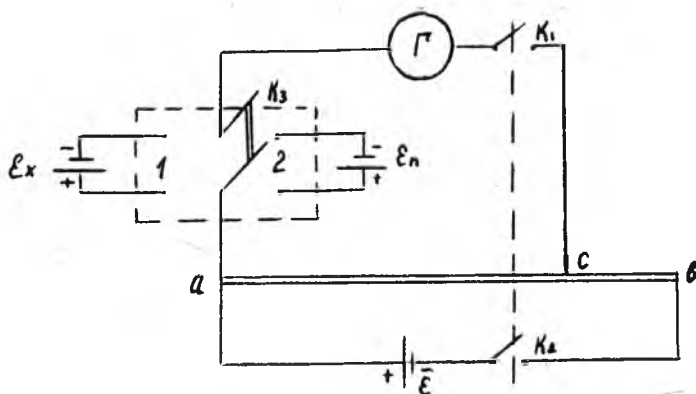
Таким образом, для определения неизвестной ЭДС достаточно найти отношение двух сопротивлений, полученных при компенсационных измерениях с исследуемым источником тока и с нормальным элементом.

Упражнение 1

ИЗМЕРЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ТОКА КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

На рис. 4 представлена схема экспериментальной установки.

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).



Р и с. 4

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 a до движка равна l_1 , а при измерениях с нормальным элементом — l_2 . Тогда сопротивления этих участков будут 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 (8) можно придать вид

$$E_x = E_n \frac{l_1}{l_2}. \quad (9)$$

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 упражнения 1

1. Собрать схему согласно рис. 4, 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 значения 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.

Номер опыта	l_1 , мм	l_2 , мм	$E_{\text{в}}$, В	E_x , В	$(E_x)_{\text{ср}}$, В

Обработка полученных результатов

1. Вычислить значение E_x по формуле (9).
2. Определить случайную погрешность результата измерений

$$\Delta E_x = t_{a,n} S_{\bar{E}_x}.$$

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. 5. 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.

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

$$E_x = I_1 R_{cd}$$

Так как $I_1 = \text{const}$, то E_x является функцией сопротивления R_{cd} . Значение этого сопротивления устанавливается рукоятками 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. 6). На панель выведены:

1. Три пары клемм X_1, X_2, X_3 для подключения трех исследуемых источников тока.

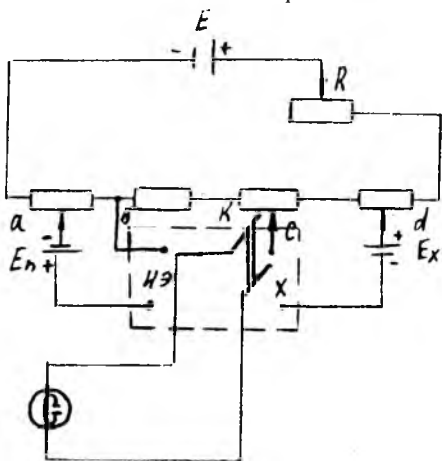


Рис. 5

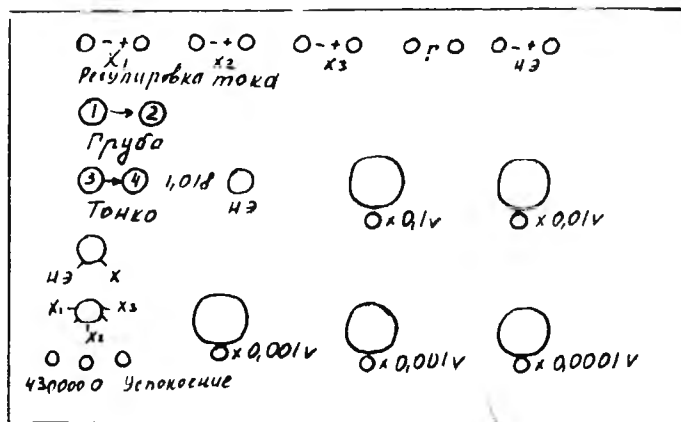


Рис. 6

2. Клеммы Г — для подключения гальванометра.
 3. Клеммы НЭ — для подключения нормального элемента.
 4. Рукоятки 1—2—3—4, предназначенные для грубой и тонкой регулировки рабочего тока (на схеме — резистор R).
 5. Рукоятка НЭ, с помощью которой устанавливается значение сопротивления $R_{ав}$ в соответствии со значением ЭДС нормального элемента.
 6. Рукоятка НЭ — X (на схеме — переключатель K).
 7. Рукоятка X_1 — ВЫКЛ — X_2 — ВЫКЛ — X_3 , предназначенная для подключения к схеме какого-либо одного из трех исследуемых источников.
 8. Рукоятки $x0,1$, $x0,01$, $x0,001$, $x0,0001$, $x0,00001$ (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.

Порядок выполнения упражнения 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 рукоятки 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 $\times 0,1$, $\times 0,01$ 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.

Контрольные вопросы

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?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1964. Гл. 5, § 31, 32, 33, 36; Гл. 9, § 79, 82.

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

Редактор Т. К. Кр е т и н и н а
Техн. редактор Н. М. К а л е п ю к
Корректор Н. Д. Ч а й н и к о в а

Сдано в набор 5.09.90. Подписано в печать 26.11.90.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.
Гарнитура литературная. Печать высокая.
Мсл.л. 0,73. Мсл.кр.-отт. 0,79. Уч.-изд.л. 0,75.
Тираж 2000 экз. Заказ 731. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королёва,
443086 Куйбышев, Московское шоссе, 34.

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института,
443001 Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.