

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ МОСТИКА УИТСТОНА

Приборы и принадлежности: Реохорд, магазин сопротивлений, два неизвестных сопротивления, нуль-гальванометр, аккумулятор, ключ.

Цель работы: Определение сопротивления методом мостика Уитстона. Изучение правил Кирхгофа и обобщенного закона Ома.

Краткая теория

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов. Направлением электрического тока считается то направление, в котором упорядоченно движутся положительные заряды. Силой тока называется скалярная величина I , равная количеству электричества, которое за единицу времени переносится сквозь поперечное сечение проводника

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Для постоянного тока в металлическом проводнике

$$I = en \langle v \rangle S,$$

где e – абсолютное значение заряда электрона, n – концентрация электронов, $\langle v \rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения электронов, S – площадь поперечного сечения проводника.

Для существования в проводнике постоянного тока необходимо выполнение следующих условий:

- 1) напряженность электрического поля в проводнике должна быть отличной от нуля и постоянной во времени;
- 2) цепь постоянного тока должна быть замкнута;
- 3) в цепи должны находиться источники энергии (источники тока), которые совершают работу, необходимую для обеспечения упорядоченного движения электрических зарядов в проводнике, и обеспечивают движение электрических зарядов внутри источника тока в направлении, противоположном действию сил электростатического поля, приводящего к упорядоченному движению зарядов в проводнике. Для самого общего описания действия источника тока в цепи, независимо от его природы, вводят понятие — «сторонние» силы. В этом случае под

работой источника понимают работу этих «сторонних» сил, т.е. сил не электростатического происхождения.

Электродвижущая сила (ЭДС) \mathcal{E} — характеристика источника тока, равная работе, производимой источником при переносе единичного положительного заряда по замкнутой цепи

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q}.$$

Напряжение (падение напряжения) на участке цепи 1-2 — физическая величина, равная полной работе, которая совершается электростатическими и «сторонними» силами при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2 цепи

$$U_{2-1} = \frac{A_{1-2}}{q} = \frac{A_{1-2}^{эл.ст}}{q} + \frac{A_{1-2}^{стор.}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{2-1},$$

где φ_1 и φ_2 — потенциалы точек 1 и 2 соответственно.

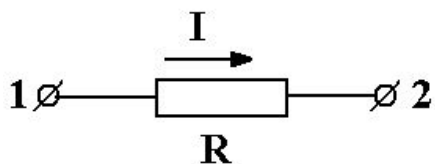


Рис. 1

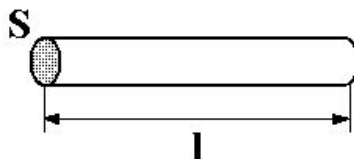


Рис. 2

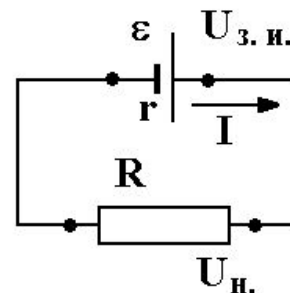


Рис. 3

Для металлического проводника (рис. 1) справедливо соотношение (закон Ома для однородного участка цепи)

$$U_{2-1} = \varphi_1 - \varphi_2 = RI$$

($\mathcal{E}_{2-1} = 0$, т.е. на участке цепи отсутствуют источники «сторонних» сил).

В случае однородного цилиндрического проводника (рис. 2) его сопротивление равно

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

(1)

где ρ — удельное сопротивление проводника, l — длина проводника, S — площадь поперечного сечения, $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, ρ_0 — удельное

сопротивление при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, t – температура по шкале Цельсия, α – температурный коэффициент сопротивления.

Закон Ома для полной цепи, состоящей из источника с ЭДС ε , внутренним сопротивлением r и внешнего сопротивления R (нагрузки) (рис. 3)

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Напряжение на зажимах источника $U_{з.и.}$ (рис. 3) равно напряжению на нагрузке U_H и меньше ε на величину, равную падению напряжения на внутреннем сопротивлении

$$U_{з.и.} = U_H = \varepsilon - Ir.$$

В режиме зарядки источника (батарейки или аккумулятора), изображенном на рис. 4

$$U_{з.и.} = \varepsilon + Ir.$$

Расчет разветвленных электрических цепей удобно производить, используя *два правила Кирхгофа*:

1) узлом А в разветвленной цепи называется точка, в которой сходится (пересекается) не менее трех проводников. Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0, \text{ например, на рис. 5 } I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0. \text{ Токи}$$

считаются положительными, если они втекают в узел, и отрицательными, если они вытекают из узла.

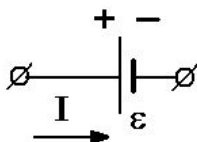


Рис. 4

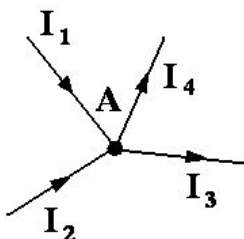


Рис. 5

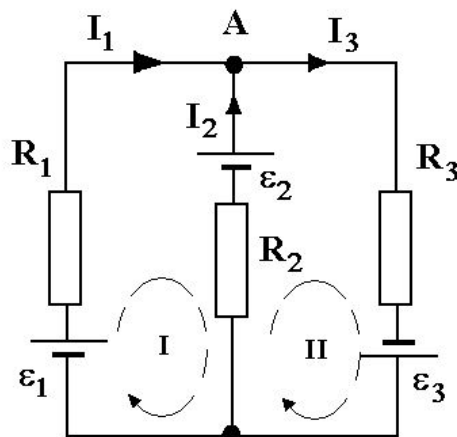


Рис. 6

2) В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивления R_i соответствующих участков этого

контур равна алгебраической сумме имеющихся ЭДС
$$\sum_{i=1}^N I_i R_i = \sum_{i=1}^M \mathcal{E}_i .$$

Если токи I_i совпадают с выбранным направлением обхода контура, то они считаются положительными. ЭДС \mathcal{E}_i источников считаются положительными, если они создают токи, направленные в сторону обхода контура.

Расчет разветвленной цепи постоянного тока проводится в следующей последовательности: а) произвольно выбираются направления токов во всех участках цепи; б) записываются $n - 1$ независимых уравнений правила узлов, где n — число узлов в цепи; в) произвольные замкнутые контуры выделяются так, чтобы каждый новый контур содержал по крайней мере один участок цепи, не входящий в ранее рассмотренные контуры. В разветвленной цепи, содержащей n узлов и m участков цепи между соседними узлами, число независимых уравнений правила контуров равно $m - n + 1$.

П р и м е р. На рис. 6 стрелками указаны выбранные направления токов I_1, I_2, I_3 на участках цепи. Пунктирными линиями показаны выделенные замкнутые контуры I и II и направления их обхода. Внутренние сопротивления источников ЭДС приняты равными нулю. Для узла А имеем

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

для контура I

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 ,$$

для контура II

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 .$$

Если известны параметры элементов цепи (R_i, \mathcal{E}_i и r_i) и необходимо рассчитать силу и направление протекающих в цепи токов (I_i), то полученная система уравнений является достаточной. Направление тока определяется знаком полученной при решении системы уравнений алгебраической величины силы тока: если полученное решение для силы тока положительное, то направление тока на данном участке цепи совпадает с выбранным, если отрицательное, то направление тока противоположное выбранному.

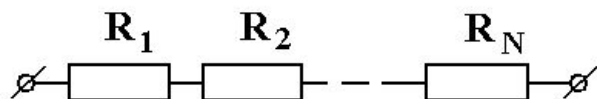


Рис. 7 а

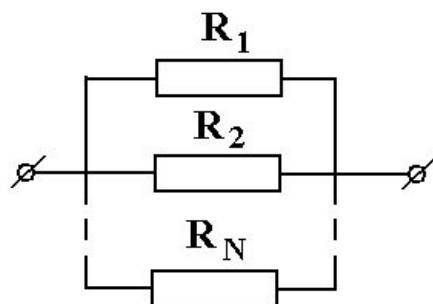


Рис. 7 б

При составлении электрической цепи проводники могут соединяться последовательно или параллельно. При последовательном соединении проводников (рис. 7 а) сила тока во всех частях цепи одинакова; б) падение напряжения в цепи равно сумме падений напряжений на отдельных участках

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_N$$

в) эквивалентное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

При параллельном соединении проводников (рис. 7 б):

а) сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов, текущих по отдельным проводникам

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_N$$

б) падения напряжения в параллельно соединенных участках цепи одинаковы; в) складываются величины, обратные сопротивлениям параллельно соединенных участков

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}.$$

Если шкала амперметра содержит N одинаковых делений и рассчитана на максимальную силу тока I_0 , то при отклонении стрелки амперметра на S делений через него проходит ток

$$I = \frac{I_0}{N} S = C_A S$$

где C_A – цена одного деления.

Чтобы расширить пределы измерения силы тока в n раз и измерять токи до значений $I > I_0$, параллельно амперметру нужно присоединить шунт (рис. 8) с сопротивлением

$$R_{ш} = \frac{I_0 R_0}{I - I_0} = \frac{R_0}{n - 1},$$

где R_0 — внутреннее сопротивление амперметра.

Показание вольтметра равно падению напряжения на сопротивлении прибора:

$$U_V = I_V R_0$$

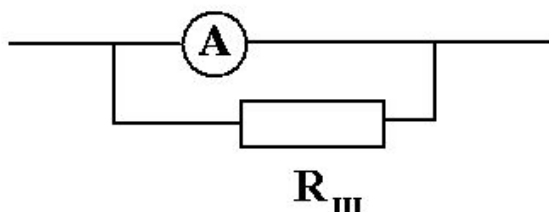


Рис. 8

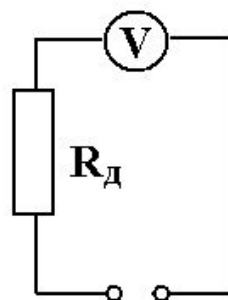


Рис. 9

и в то же время

$$U_V = \frac{U_0}{N} s = C_V s,$$

где U_0 — напряжение на зажимах прибора, при котором стрелка отклоняется на всю шкалу, C_V — цена деления шкалы вольтметра.

Чтобы расширить пределы измерения напряжения в n раз и измерять напряжения до значений $U > U_0$, последовательно вольтметру нужно присоединить дополнительное сопротивление (рис. 9)

$$R_D = \frac{U - U_0}{U_0} R_0 = (n - 1)R_0,$$

где R_0 - внутреннее сопротивление вольтметра.

Если электрический ток постоянен, то при перемещении зарядов на участке электрической цепи за время t электрические и «сторонние» силы совершают работу

$$A = IUt,$$

где I – сила тока, U – падение напряжения на рассматриваемом участке.

В общем случае, если ток переменный $I(t)$, то

$$A = \int_0^t I(t)U(t)dt.$$

Мощность (мгновенная) электрического тока

$$P = iU.$$

Если проводник (сопротивлением R), по которому протекает ток силой I , неподвижен и в нем не происходят химические реакции, то мгновенная мощность тока

$$P = I^2 R = U^2 / R = IU$$

и характеризует скорость выделения теплоты в проводнике, поскольку в этом случае вся работа по перемещению зарядов затрачивается на нагрев проводника.

В цепи, содержащей источник тока (рис. 3), тепловая мощность, выделяющаяся на нагрузке, считается полезной, на внутреннем сопротивлении — бесполезной. Коэффициент полезного действия (КПД) цепи η определяется соотношением

$$\eta = \frac{R}{R + r}.$$

График зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки представлен на рис. 10. Наибольшая полезная мощность $P_{\max} = \varepsilon^2 / 4r$ достигается при $R = r$. КПД цепи в этом случае составляет 50%.

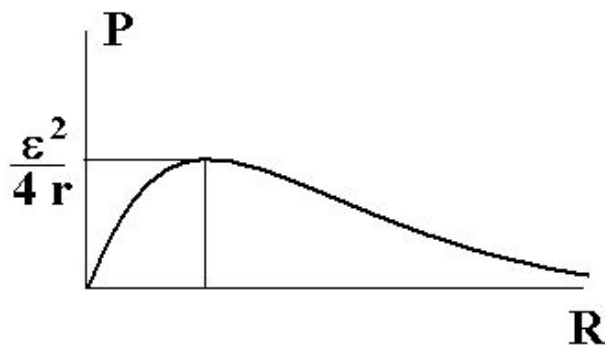


Рис. 10

Для определения величины сопротивлений в работе используют мостик Уитстона (рис. 11), где R_x – неизвестное сопротивление; R – магазин сопротивлений, ADB – реохорд.

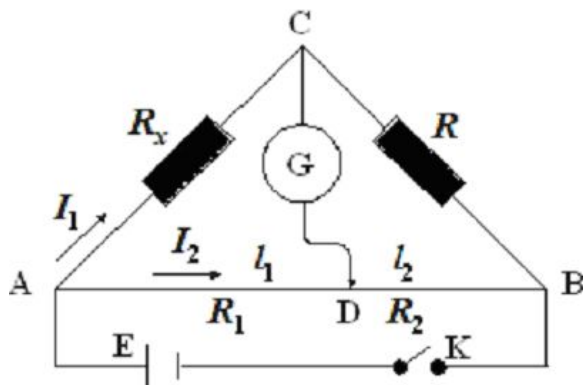


Рис.11

Мостиком, является ветвь CD , содержащая гальванометр G . При замыкании ключа K , ток от источника E будет идти по разветвленной цепи и мостику CD .

Меняя соотношение R_1 и R_2 , можно добиться того, чтобы по мостику CD ток не шел. В этом случае потенциалы точек C и D будут одинаковы. Одинаковыми будут и разности потенциалов между точками A и C , A и D . По закону Ома $U = IR$ и значит

$$I_1 R_x = I_2 R_1 \quad (2)$$

где I_1 и I_2 – сила тока в ветвях AC и AD соответственно.

По той же причине, из равенства разности потенциалов между точками C и B , а также D и B следует, что

$$I_1 R = I_2 R_2 \quad (3)$$

Разделив формулу (1) на (2), получим $R_x / R = R_1 / R_2$ или

$$R_x = R \frac{R_1}{R_2}$$

где R_1 и R_2 – сопротивления провода реохорда слева и справа от его движка (скользящего контакта рис.11). Используя формулу (1), легко получить, что

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2} \quad (4)$$

где l_1 и l_2 - длины плеч реохорда (расстояние от концов реохорда до его движка).

2. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 11. Установка позволяет оперировать с двумя неизвестными сопротивлениями R_{x1} и R_{x2} . Их можно включать в цепь порознь, а также вместе: последовательно и параллельно.
2. Вычислить первое из двух неизвестных сопротивлений R_{x1} при четырех значениях сопротивления магазина R . Для этого, передвигая движок реохорда, добиться исчезновения тока через гальванометр. Затем, измерив длины плеч реохорда l_1 и l_2 вычислить R_x по формуле (4).
3. Повторяя действия п. 2, вычислить второе из неизвестных сопротивлений R_{x2} .
4. Соединить оба неизвестных сопротивления последовательно и, повторяя действия предыдущих пунктов, вычислить их совместное сопротивление. Сравнить полученный результат с тем, что предсказывает теория.
5. Соединить оба неизвестных сопротивления параллельно и, повторяя действия предыдущих пунктов, вычислить их совместное сопротивление. Сравнить полученный результат с тем, что предсказывает теория.

| Измеряемая величина | № измерения | R_M | l_1 | l_2 | R_x | Среднее значение R_x |
|---------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| R | 1 | 2 Ом | | | | |

| | | | | | | |
|------------|---|-------|--|--|--|--|
| | 2 | | | | | |
| | 3 | | | | | |
| | 4 | | | | | |
| R_{x2} | 1 | 5 Ом | | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 3 | | | | | |
| | 4 | | | | | |
| $R_{посл}$ | 1 | 10 Ом | | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 3 | | | | | |
| | 4 | | | | | |
| $R_{пар}$ | 1 | 20 Ом | | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 3 | | | | | |
| | 4 | | | | | |

1. Что такое электрический ток?
2. Что такое сила тока, потенциал и разность потенциалов?
3. Перечислить виды соединений в электрических цепях.
4. Почему при определенных условиях ток между точками С и D (рис.11) не течет?
5. Нарисуйте схему мостика Уитстона и объясните, как с ее помощью можно определить величину неизвестных сопротивлений?