

ЛАБОРОТОРНАЯ РАБОТА № 3-7: ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Студент _____ группа _____

Допуск _____ Выполнение _____ Защита _____

Цель работы: ознакомление с методами компенсации и применение этого метода для измерения электродвижущей силы гальванического элемента в электрической цепи.

Приборы и принадлежности: установка для определения ЭДС неизвестного элемента тока

Принципиальная схема установки изображена на рис 1

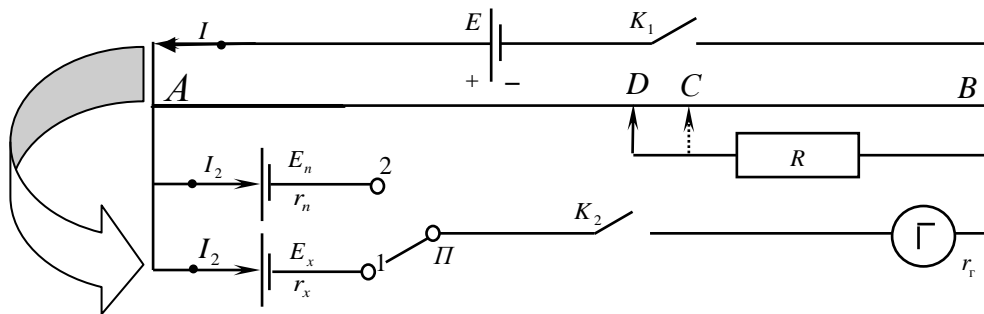


Рис. 1

На рисунке 1:

E - источник питания цепи,

E_x - исследуемый источник тока,

E_n - нормальный элемент Вестона

Электродвижущей силой \mathcal{E} называется величина равная отношению работы сторонних сил $A_{\text{сторонних}}$ по перемещению положительного заряда q на данном участке электрической цепи, к величине этого заряда q :

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{сторонних}}}{q}$$

Электродвижущая сила гальванических элементов не зависит от размеров электродов и количества электролита, а определяется лишь их химическим составом и при данных условиях постоянна. Каждый тип элементов даёт свою определенную ЭДС.

Измерение ЭДС нельзя произвести обычным вольтметром, так как он требует для своей работы наличия тока в цепи, следовательно, измеренная им разность потенциалов будет меньше, чем ЭДС, поэтому при необходимости применяют вольтметры с большим внутренним сопротивлением, у которых ток в цепи мал, и тогда $E = U$.

ЭДС элементов более точно можно определить методом компенсации. Для расчёта ЭДС методом компенсации применяются правила Кирхгофа (см. теоретическую часть).

Применим правила Кирхгофа. Для этого выберем произвольно направления токов и направление обхода по контурам (против часовой стрелки) так, как показано на рис. 1, и применим к рассматриваемой схеме законы Кирхгофа.

По второму закону Кирхгофа для контура AE_xGA : $I_2(r_x + r_g + R) - I_1R_{AC} = -E_x$, (6)

где r_x - внутреннее сопротивление батареи; r_g - внутреннее сопротивление гальванометра; R_{AC} - сопротивление участка AC .

Когда ток через гальванометр $I_2 = 0$, то $I_1R_{AC} = E_x$, (7)

то есть в этом случае падение напряжения на участке AC , создаваемое батареей E , равно ЭДС неизвестного элемента (произошла компенсация).

Заменим исследуемый элемент нормальным элементом Вестона, ЭДС которого $E_n = 2.0366$ В. Передвигая контакт C , добьемся такого его положения D , чтобы ток через гальванометр не проходил. Тогда по второму закону Кирхгофа для контура AE_nGDA :

$$I_2(r_n + r_g + R) - I_1R_{AD} = -E_n$$

где r_n - внутреннее сопротивление нормального элемента; R_{AD} - сопротивление участка AD . Но так как $I_2 = 0$, то

$$I_1R_{AD} = E_n. \quad (8)$$

Ток через участок AB остается прежним, так как в цепи AGD тока нет. Разделив выражение (7) на (8), получим:

$$E_x = E_n \frac{R_{AC}}{R_{AD}}$$

Так как проволока на участке калиброванная, т.е. имеет одинаковое сечение и удельное сопротивление, то отношение сопротивлений проволоки можно заменить отношением их длин. Тогда

$$E_x = E_n \frac{L_1}{L_2}, \quad (9)$$

где L_1 и L_2 - длины участков AC и AD в произвольных единицах. Зная E_n и измерив AC и AD, по формуле (9) вычислим искомое ЭДС.

Следует обратить внимание на то, что в данной работе гальванометр регистрирует отсутствие тока, а не измеряет его, поэтому точность компенсации не зависит от класса точности прибора, а зависит только от его чувствительности. Нуль шкалы находится посередине для более удобного определения момента отсутствия тока. Магазин сопротивлений включают в цепь гальванометра для того, чтобы ограничить ток через гальванометр и нормальный элемент в некомпенсированной схеме.

В качестве эталона ЭДС используют ртутно-кадмиевый нормальный элемент Вестона. Ввиду постоянства ЭДС нормального элемента, ее удобно сравнивать с другими неизвестными ЭДС.

От элемента Вестона нельзя брать токи свыше $10^{-6} - 10^{-5}$ А, поэтому он применяется исключительно в компенсационных схемах.



Рис. 2 Внешний вид лабораторной установки

Выполнение работы

1. Поставьте подвижной контакт C посередине реохорда P и замкните ключ K_1 .
2. Установите переключатель Π в положение E_x (значение задается преподавателем).
3. Замкнув ключ K_2 , передвигая подвижный контакт C (вправо или влево), добейтесь отсутствия тока в цепи гальванометра Γ . Запишите в таблицу длину L_1 .
4. Установите переключатель Π в положение E_n и снова добейтесь отсутствия тока в цепи гальванометра. Запишите в таблицу длину L_2 .
5. Проведите измерения 3 раза. Результаты измерений занесите в таблицу 1.
6. В качестве абсолютной погрешности в измерении величин ΔL_1 и ΔL_2 возьмите приборную погрешность (она равна половине единицы цены деления шкалы прибора).
7. В качестве абсолютной погрешности в измерении величины ΔE_n возьмите погрешность округления (она равна половине единицы последнего разряда округлённой табличной величины)
8. Вычислите неизвестную ЭДС E_x по формуле $E_x = E_n \frac{L_1}{L_2}$.

9. Рассчитайте среднее значение ЭДС неизвестного элемента: $\langle E_x \rangle = \frac{\sum E_{xi}}{n}$,

10. Погрешность измерения ЭДС неизвестного элемента определите по формуле: $S_{\langle E \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (E_{xi} - \langle E_x \rangle)^2}{n(n-1)}}$,

где n - число измерений.

11. Рассчитайте доверительный интервал $\Delta E_x = S_{\langle E \rangle} t_{pk}$, где $t_{p,k} = 4.3$ для вероятности доверительного интервала $p = 95\%$.

12. Рассчитайте относительную погрешность измерений по формуле $\frac{\Delta E_x}{E_x}$.

Таблица 1

N опыта	L_1	ΔL_1	L_2	ΔL_2	E_n	ΔE_n	E_x	ΔE_x	$\frac{\Delta E_x}{E_x}$
1									
2									
3									

12. Окончательный ответ запишите в виде: $E_x = \langle E_x \rangle \pm S_{\langle E \rangle} t_{pk}$.

Контрольные вопросы:

1. Электрический ток, основные характеристики постоянного тока: сила тока и плотность тока.
2. Дайте определение ЭДС, падения напряжения. Укажите единицы их измерения и раскройте их физический смысл.
3. Сопротивление участка цепи, зависимость сопротивления металлического проводника от его геометрических размеров и температуры.
4. Сформулируйте законы Ома для различных участков цепи.
5. Сформулируйте законы Кирхгофа и правила их применения для расчёта цепей постоянного тока.
4. Работа и мощность электрического тока.

Основные теоретические сведения

Сила постоянного тока

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

где I – сила тока, $[I] = [A]$ – Ампер,

Δq – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время Δt , Кл,

Плотность постоянного тока

$$j = \frac{I}{S}$$

где j – плотность тока, $[j] = \left[\frac{A}{m^2} \right]$, S – площадь поперечного сечения проводника, $[S] = [m^2]$

Зависимость сопротивления проводника от его геометрических размеров

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

где ρ – удельное сопротивление проводника, Ом·м, l – длина проводника, м,

S – площадь поперечного сечения проводника, м²

Зависимость сопротивления и удельного сопротивления от температуры

$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$, где R_0 и ρ_0 – сопротивление Ом и удельное сопротивление Ом·м при температуре $t = 0$ С,

$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t)$ R_t и ρ_t – сопротивление Ом и удельное сопротивление Ом·м при температуре t .

α – температурный коэффициент сопротивления, $[\alpha] = \left[\frac{1}{^\circ C} \right] \equiv \left[\frac{1}{K} \right]$

Закон Ома для однородного участка цепи

$$I = \frac{U}{R}$$

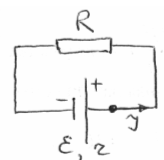
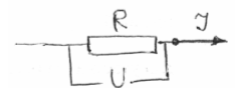
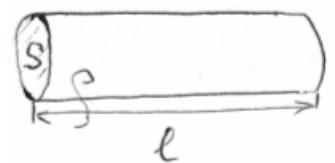
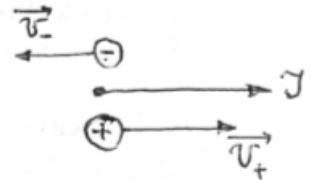
Закон Ома для неоднородного участка цепи

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm E}{r},$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов. $E > 0$, если ток J направлен внутри источника от (-) к (+).

Закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$



где E – электродвижущая сила; I – сила тока; R – сопротивление внешней цепи;
 r – внутреннее сопротивление цепи (сопротивление источников тока).

Напряжением на участке цепи называется величина равная отношению суммарной работы сторонних и кулоновских сил $A_{\text{сторонних}} + A_{\text{кулоновских}}$, по перемещению положительного заряда q на данном участке цепи, к величине этого заряда:

$$U = \frac{A_{\text{сторонних}} + A_{\text{кулоновских}}}{q}$$

работа постоянного тока на участке цепи $A = qU = IUt$ или $A = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$

мощность постоянного тока на участке цепи $P = IU$ или $P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$

закон Джоуля – Ленца $Q = IUt$ или $Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$

напряжение на клеммах источника тока $U_{\text{ист}} = \mathcal{E} - Ir = IR$

полезная работа источника постоянного тока $A_{\text{полезная}} = qU_{\text{ист}} = IU_{\text{ист}}t$

затраченная (полная) работа источника постоянного тока $A_{\text{затраченная}} = q\mathcal{E} = I\mathcal{E}t$

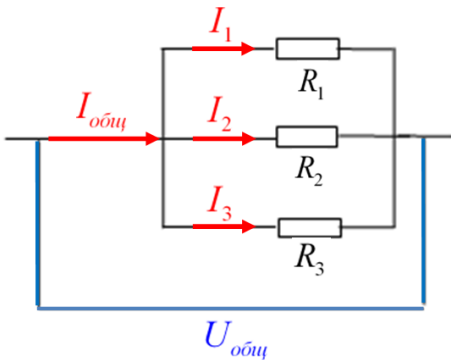
или $A_{\text{затраченная}} = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r} = I^2 (R+r)$

полезная мощность источника постоянного тока $P_{\text{полезная}} = \frac{A_{\text{полезная}}}{t} = IU_{\text{ист}}$

затраченная (полная) мощность источника постоянного тока $P_{\text{затраченная}} = \frac{A_{\text{затраченная}}}{t} = I\mathcal{E}$

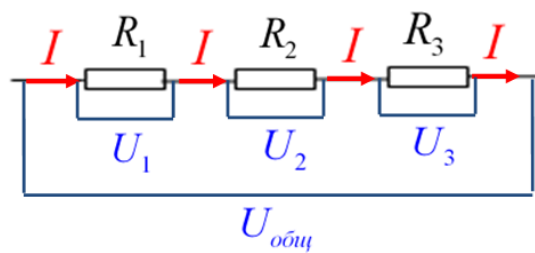
КПД источника тока $\eta = \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{затраченная}}} = \frac{P_{\text{полезная}}}{P_{\text{затраченная}}}$

Параллельное соединение проводников



$$\begin{cases} \frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \\ U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \\ I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n \\ I_i = \frac{U_i}{R_i} \quad I_{\text{общ}} = \frac{U_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{cases}$$

Последовательное соединение проводников



$$\begin{cases} R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \\ U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \\ I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \\ I_i = \frac{U_i}{R_i} \quad I_{\text{общ}} = \frac{U_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{cases}$$

Правила Кирхгофа для расчёта разветвлённых цепей постоянного тока

Первое правило Кирхгофа

Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю, т.е.

$$\sum I_i = 0$$

Второе правило Кирхгофа

В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма падений напряжений (произведений сил токов I_i на сопротивление R_i) на отдельных участках цепи этого контура, равна алгебраической сумме ЭДС \mathcal{E} , встречающихся в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k$$

Применяя законы Кирхгофа необходимо:

1. Определить число электрических узлов и независимых контуров в схеме

Узел называется место соединения трех и более проводников.

Контур – это любая замкнутая цепь.

Ветвь – участок цепи от узла до узла

2. Перед составлением уравнений произвольно выбрать и указать стрелками на чертеже:

а) направление токов (если они не задана по условию задачи) во всех сопротивлениях, входящих в цепь, учитывая, что от узла до узла течёт один и тот же ток;

б) направление обхода контура.

3. При составлении уравнений по первому закону Кирхгофа считать токи, подходящие к узлу, положительными, а токи, отходящие от узла - отрицательными.

Число уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, должно быть на единицу меньше числа узлов, содержащихся в цепи.

4. При составлении уравнений по второму правилу Кирхгофа следует считать:

а) падение напряжения на участке цепи (т.е. произведение $I_i R_i$) входит в уравнение со знаком плюс, если направление тока в данном участке совпадает с выбранным направлением обхода контура; в противном случае произведение $I_i R_i$ входит в уравнение со знаком минус;

б) ЭДС \mathcal{E} входит в уравнение со знаком плюс, если оно повышает потенциал в направлении обхода контура: т.е. если при обходе контура внутри источника тока приходится идти от минуса к плюсу, в противном случае ЭДС \mathcal{E} входит в уравнение со знаком минус.

Число независимых уравнений, которые могут быть составлены по второму закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров, имеющих в цепи.

Независимый контур – это контур, содержащий хотя бы одну новую ветвь, которая не была задействована ранее при составлении второго правила Кирхгофа.

Для составления уравнений первый контур можно выбрать произвольно. Все следующие контуры следует выбирать таким образом, чтобы в каждый новый контур входила хотя бы одна ветвь цепи, не участвовавшая ни в одном из ранее использованных контуров. Произвольно выбранное направление обхода по контурам не изменяется до конца решения задачи.

Если при решении уравнений, составленных вышеуказанным способом, получены отрицательные значения силы тока или напряжения, то это означает, что ток через данное сопротивление в действительности течет в направлении, противоположном выбранному.