

ЛАБОРАТОРНАЯ 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

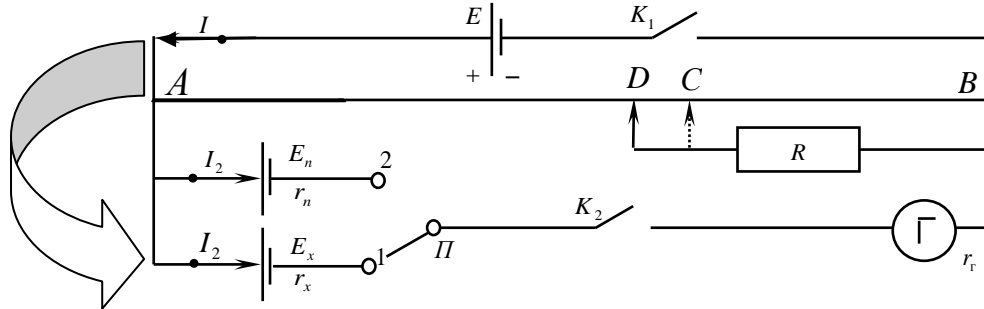


Рис. 1

где  $E$  - источник питания цепи,  $E_x$  - исследуемый источник тока,  $E_n$  - нормальный элемент Вестона.

**Электродвижущей силой  $\mathcal{E}$**  называется величина численно равная работе, которую совершают сторонние силы  $A_{\text{сторон}}$  при перемещении по данному участку цепи единичного положительного заряда  $q$ .

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

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  $\mathcal{E} = U$ .

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

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

### Выполнение работы

1. Поставьте подвижной контакт  $C$  посередине реохорда и замкните ключ  $K_1$ .
2. Установите переключатель  $\Pi$  в положение  $E_x$  (значение задается преподавателем).
3. Включите тумблер <Сеть>.
4. Замкнув ключ  $K_2$ , передвигая подвижной контакт  $C$  (вправо или влево), добейтесь отсутствия тока в цепи гальванометра (стрелка на гальванометре будет показывать ноль). Запишите длину  $L_1$ .
5. Установите переключатель  $\Pi$  в положение  $E_n$  и снова добейтесь отсутствия тока в цепи гальванометра. Запишите длину  $L_2$ .
6. Проведите измерения 3 раза. Результаты измерений занесите в таблицу 1.
7. В качестве абсолютной погрешности в измерении величин  $\Delta L_1$  и  $\Delta L_2$  возьмите приборную погрешность (она равна половине единицы цены деления шкалы прибора).
8. В качестве абсолютной погрешности в измерении величины  $\Delta E_n$  возьмите погрешность округления (она равна половине единицы последнего разряда округлённой величины)

9. Вычислите неизвестную ЭДС  $\mathcal{E}_x$  по формуле
 
$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n \frac{L_1}{L_2}.$$

10. Рассчитайте среднее значение ЭДС неизвестного элемента:  $\langle \mathcal{E}_x \rangle = \frac{\sum \mathcal{E}_{xi}}{n}$ ,

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

где  $n$  - число измерений.

12. Рассчитайте относительную погрешность измерений по формуле  $\frac{S_{\langle \varepsilon_x \rangle}}{\langle \varepsilon_x \rangle}$ .

13. Окончательный ответ запишите в виде  $\varepsilon_x = \langle \varepsilon_x \rangle \pm t_{p,k} S_{\langle \varepsilon_x \rangle}$ , где  $t_{p,k} = 4.3$  для вероятности доверительного интервала  $p = 95\%$ .

Таблица 1

$N$ опыта	$L_1$	$\Delta L_1$	$L_2$	$\Delta L_2$	$\varepsilon_n$	$\Delta \varepsilon_n$	$\varepsilon_x$	$S_{\langle \varepsilon_x \rangle}$	$\frac{S_{\langle \varepsilon_x \rangle}}{\langle \varepsilon_x \rangle}$
1									
2									
3									

### Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1. Электрический ток, основные характеристики постоянного тока: сила тока и плотность тока.
2. Дайте определение ЭДС и 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 законы и определения

**Электрическим током** называется упорядоченное движение заряженных частиц или макроскопических тел. За направление тока приняты направление движения положительных зарядов.

**Постоянным** называется ток, величина и направление которого с течением времени не изменяется.

#### Основные характеристики постоянного тока

1. **Сила тока** – это скалярная величина, равная отношению заряда  $\Delta q$ , протекающего через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$ , к величине этого промежутка.

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

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

$\Delta q$  - заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время  $\Delta t$ , Кл,

2. **Плотность постоянного тока** - это векторная величина, совпадающая по направлению с током в данной точке проводника, и определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, расположенную перпендикулярно направлению тока.

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

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

#### Электродвижущая сила (ЭДС). Напряжение.

Для поддержания в цепи электрического тока необходим источник тока, внутри которого на носители тока действуют силы не электрической природы, называемые **сторонними силами**. Под действием сторонних сил заряды внутри источника тока движутся против сил электрического поля, благодаря чему на концах проводника поддерживается разность потенциалов и в цепи течёт ток. Таким образом, сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов. Величиной этой работы удобно характеризовать сторонние силы.

**Электродвижущей силой** называется величина численно равная работе, которую совершают сторонние силы при перемещении по замкнутой цепи единичного положительного заряда.

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

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 определённую ЭДС.

**Напряжением** на участке цепи называется величина равная работе, которую совершают электрические и сторонние силы при перемещении единичного заряда по данному участку цепи.

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

#### Закон Ома для однородного участка цепи

**Однородным** называется участок электрической цепи, не содержащий ЭДС.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R},$$

где  $U = \varphi_1 - \varphi_2$  - напряжение на участке цепи,  $B$  (Вольт);

$\varphi_1 - \varphi_2$  - разность потенциалов,  $B$ ;  $I$  - сила тока,  $A$  (Ампер);  $R$  - сопротивление участка цепи,  $Om$  (Ом).

**Сопротивлением** участка электрической цепи  $R$  называется скалярная величина, определяющая силу тока в проводнике при заданном напряжении.

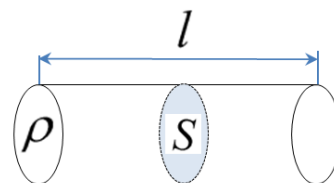
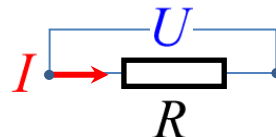
Сопротивление металлического проводника зависит от его геометрических размеров:

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

где  $\rho$  - удельное сопротивление проводника,  $Om \cdot m$ ,  $l$  - длина проводника,  $m$ ,

$S$  - площадь поперечного сечения проводника,  $m^2$

Лучше всего проводят ток: **Серебро**  $\rho = 1.6 \cdot 10^{-8} Om \cdot m$  и **медь**  $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} Om \cdot m$ .



Опыт показывает, что сопротивление и удельное сопротивление металлического проводника зависит от температуры по закону:

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

где  $R_0$  и  $\rho_0$  - сопротивление  $Om$  и удельное сопротивление  $Om \cdot m$  при температуре  $t = 0$  C,

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t)$$

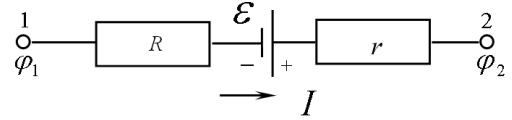
$R_t$  и  $\rho_t$  - сопротивление  $Om$  и удельное сопротивление  $Om \cdot m$  при температуре  $t$ .

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

### Закон Ома для неоднородного участка цепи

**Неоднородным** называется участок электрической цепи, содержащий ЭДС.

$$I = \frac{U}{R+r} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \mathcal{E}}{R+r}$$



где  $\mathcal{E}$  - электродвижущая сила, В;  $\varphi_1 - \varphi_2$  - разность потенциалов на данном участке, В;  $I$  - сила тока, А;

$R$  - сопротивление участка цепи, Ом;  $r$  - внутреннее сопротивление цепи, Ом (то есть сопротивление источников тока).

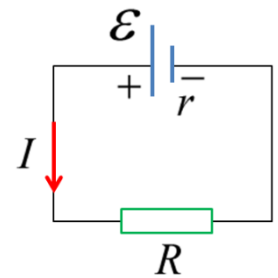
$\mathcal{E} > 0$ , если ток  $I$  направлен от (-) к (+).

### Закон Ома для замкнутой цепи

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

где  $\mathcal{E}$  - электродвижущая сила;  $I$  - сила тока;  $R$  - сопротивление внешней цепи;

$r$  - внутреннее сопротивление цепи.



### Работа и мощность постоянного тока

Работу постоянного тока на участке электрической цепи можно определить по формуле:

$$A = qU = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

где  $A$  - работа тока, Дж;  $U$  - напряжение на данном участке цепи, В;  $I$  - сила тока, А;

$t$  - время протекания тока на данном участке цепи, с

а мощность тока по формуле:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

где  $P$  (Вт) - мощность тока, Вт (Ватт);  $U$  (В) - напряжение на данном участке цепи, В;  $I$  (А) - сила тока, А.

### Закон Джоуля - Ленца

(позволяет определить количество теплоты, выделяющееся в проводнике при прохождении по нему электрического тока)

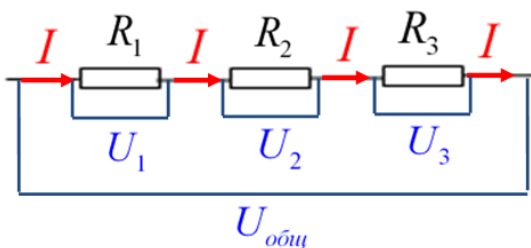
$$Q = qU = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

где  $Q$  (кДж) - количество теплоты, выделившейся на участке цепи, Дж;  $U$  (В) - напряжение на данном участке цепи, В;

$I$  (А) - сила тока, А;  $t$  (с) - время протекания тока на данном участке цепи, с

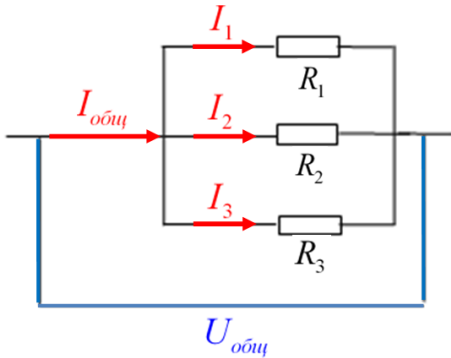
### Виды соединения проводников

#### Последовательное соединение проводников



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

### Параллельное соединение проводников



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

### Правила Кирхгофа для расчёта разветвлённых цепей постоянного электрического тока

Обычно разветвлённые электрические цепи рассчитывать с помощью законов Ома оказывается затруднительно. В этом случае используют законы Кирхгофа.

#### Первый закон Кирхгофа

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

$$\sum_{i=1}^k I_i = 0$$

**Узлом** называется место соединения трех и более проводников.

#### Второй закон Кирхгофа

В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма падений напряжений (то есть произведений сил токов  $I$  на сопротивление  $R$ ) на отдельных участках цепи этого контура

равна алгебраической сумме ЭДС  $\sum_{i=1}^m \mathcal{E}_k$ , встречающихся в этом контуре:  $\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_k$

### Применяя законы Кирхгофа необходимо придерживаться следующих правил:

1. Определить число электрических узлов и независимых контуров в схеме.

**Контуром** называется любой замкнутый участок электрической цепи.

**Независимый контуром** называется контур, содержащий хотя бы одну новую ветвь, которую ещё не использовали при составлении уравнений Кирхгофа.

**Ветвью** называется участок цепи, соединяющий два любых узла.

2. Перед составлением уравнений произвольно выбирают и указывают стрелками на чертеже:

а) направления токов (если они не заданы по условию задачи) во всех участках цепи, учитывая, что от узла до узла течёт один и тот же ток;

б) направление обхода контура.

3. При составлении уравнений по первому закону Кирхгофа токи, подходящие к узлу, считаются 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  $I_i R_i$ ) в уравнении брать со знаком плюс, если направление тока на данном участке цепи совпадает с выбранным направлением обхода контура; в противном случае произведение  $I_i R_i$  в уравнении брать со знаком минус;

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

Число независимых уравнений, которые могут быть составлены по второму закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров, имеющихся в цепи. 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 течёт в направлении, противоположном выбранному.