

## Лабораторная работа №4

### Определение электродвижущей силы источника ЭДС и исследование режимов работы электрической цепи

**Цель работы:** ознакомиться с компенсационным методом измерения ЭДС, исследовать зависимость полной и полезной мощности в электрической цепи и коэффициента полезного действия источника от величины тока.

**Приборы и принадлежности:**



неизвестный источник



гальванометр



эталонный источник



вольтметр M2004



амперметр M2015



реостат РПШ-2  
100 Ом 2А



источник ВС 4-12



соединительные  
проводы



переключатель  
двоихполюсный – 2шт



переключатель  
однополюсный (ключ)



реохорд

## Теоретическое введение

### I. Определение электродвижущей силы источника ЭДС

Наиболее точным методом определения ЭДС источника является метод компенсации, так как при измерении ток через источник не протекает. Этот метод особенно актуален, когда отсутствует высокоомный вольтметр. На представленной схеме:

- $ADB$  – реохорд с общим сопротивлением  $R_{AB}$ ;
- $R$  – реостат;
- $\varepsilon_0$  – компенсирующий источник;
- $\varepsilon$  – источник, ЭДС которого следует определить;
- $\Gamma$  – гальванометр.

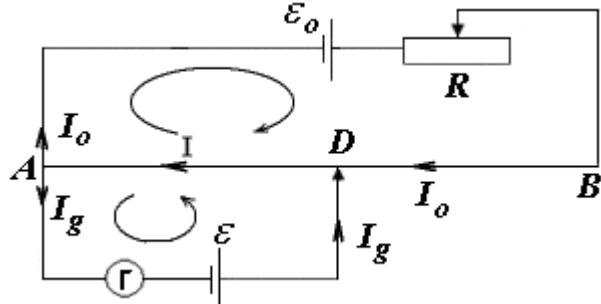


Рис.4.1.1. Схема 1

В этой схеме, изменяя величину сопротивления реостата  $R$  и передвигая вдоль реохорда подвижный контакт  $D$ , можно найти такое положение контакта, при котором ток через гальванометр будет равен нулю. Это оказывается возможным благодаря тому, что источники  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon$  включены в контур  $A\varepsilon_0RBD\varepsilon A$  навстречу друг другу и при определённых параметрах в цепи токи, создаваемые источниками через гальванометр  $\Gamma$ , будут равны и противоположны по знаку.

Используем правила Кирхгофа для контура  $A\varepsilon_0RBD\varepsilon A$  (обход по часовой стрелке), контура  $A\Gamma\varepsilon DA$  (обход против часовой стрелки) и узла  $A$

$$\begin{aligned} I_0R + I_0R_{DB} + IR_{AD} &= \varepsilon_0, \\ IR_{AD} &= \varepsilon, \\ I &= I_0 + I_g. \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

При этом принято, что внутренние сопротивления источников и гальванометра равны нулю.

Полагая, что  $I_g = 0$ , получаем

$$\begin{aligned} I(R + R_{DB} + R_{AD}) &= \varepsilon_0, \\ IR_{AD} &= \varepsilon, \\ I &= I_0. \end{aligned} \quad (4.1.2)$$

откуда

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{R_{AD}}{R + (R_{DB} + R_{AD})} = \frac{R_{AD}}{R + R_{AB}}. \quad (4.1.3)$$

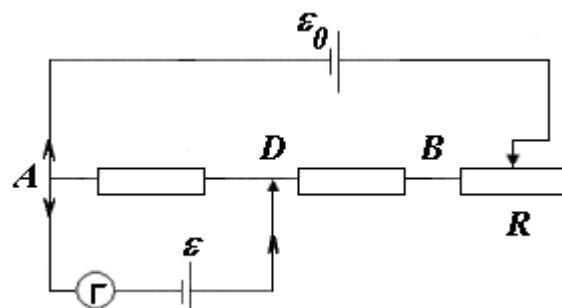


Рис.4.1.2. Схема 2

Это же выражение легко получить, перерисовав схему 1 так, как показано на схеме 2. Ток через гальванометр не потечет, если ЭДС будет скомпенсирована напряжением на участке  $AD$ , которое легко определяется по свойствам пропорции.

Использование (4.1.3) требует знания не только  $\varepsilon_0$ , но и данных о реостате и удельном сопротивлении материала реохорда. Однако задачу можно упростить, если воспользоваться не абсолютным методом измерения ЭДС, а относительным.

Включим в схему эталонный источник ЭДС и подбором параметров добьёмся её компенсации

$$\frac{\varepsilon_{\mathcal{E}}}{\varepsilon_0} = \frac{R_{AD\mathcal{E}}}{R_{\mathcal{E}} + R_{AB}}. \quad (4.1.4)$$

Включим в схему исследуемый источник, и, не меняя положение ползунка реостата, опять добьёмся компенсации, перемещая контакт реохорда

$$\frac{\varepsilon_X}{\varepsilon_0} = \frac{R_{ADX}}{R_{\mathcal{E}} + R_{AB}}. \quad (4.1.5)$$

Сравнивая, получаем

$$\frac{\varepsilon_X}{\varepsilon_{\mathcal{E}}} = \frac{R_{ADX}}{R_{AD\mathcal{E}}}. \quad (4.1.6)$$

Сопротивление проволоки реохорда можно определить по формуле  $R = \rho \frac{l}{S}$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление,  $l$  – длина проволоки,  $S$  – площадь поперечного сечения. Тогда

$$\frac{\varepsilon_X}{\varepsilon_{\mathcal{E}}} = \frac{l_X}{l_{\mathcal{E}}} \quad \text{или} \quad \varepsilon_X = \varepsilon_{\mathcal{E}} \frac{l_X}{l_{\mathcal{E}}}, \quad (4.1.8)$$

где  $l$  – длина участка  $AD$  при компенсации.

Относительная ошибка определения ЭДС

$$\delta\varepsilon_X = \sqrt{\left(\frac{\Delta\varepsilon_{\mathcal{E}}}{\varepsilon_{\mathcal{E}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_X}{l_X}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_{\mathcal{E}}}{l_{\mathcal{E}}}\right)^2}.$$

Для получения удовлетворительной точности необходимо, чтобы каждая из измеряемых величин была значительно больше, чем абсолютная ошибка их измерения. Этот факт накладывает ограничения на интервал значений измеряемой ЭДС по сравнению с эталонной.

В частности, если добиться компенсации при  $l = \frac{L}{2}$ , где  $L$  – общая длина реохорда, то  $l_X$  может принимать значения от нуля до  $L$ , что соответствует интервалу измеряемых ЭДС от 0 до  $2\varepsilon_{\mathcal{E}}$ .

**Примечание:**

В настоящее время более доступным для практического применения является использование высокоомного вольтметра. Большинство мультиметров имеют внутреннее сопротивление превышающее 10 МОм и поэтому позволяют определять ЭДС с высокой точностью.

## II. Исследование режимов работы электрической цепи

Источник ЭДС характеризуется двумя основными величинами – ЭДС и внутренним сопротивлением. Электродвижущая сила является мерой действия сторонних сил в источнике. Она определяется работой сторонних сил в замкнутой цепи при прохождении через сечение проводника единицы заряда.

При подключении к источнику ЭДС внешнего сопротивления  $R$  ток  $I$  в цепи определяется законом Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (4.2.1)$$

При этом источник за интервал времени  $\Delta t$  совершаает работу

$$A_0 = I \varepsilon \Delta t.$$

Выделяемая источником мощность (полная мощность)

$$P_0 = \frac{A_0}{\Delta t} = I \varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R + r}. \quad (4.2.3)$$

Часть работы источника, а, следовательно, и его мощности выделяется на внешнем участке цепи (полезная мощность)

$$P_B = UI = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}, \quad (4.2.4)$$

где  $U$  – напряжение на внешнем участке цепи.

Оставшаяся часть мощности выделяется внутри источника. При этом энергия электрического тока переходит во внутреннюю энергию источника (происходит нагрев). Коэффициент полезного действия источника

$$\eta = \frac{P_B}{P_0} = \frac{UI}{I\varepsilon} = \frac{U}{\varepsilon}, \quad (4.2.5)$$

с другой стороны, с учётом (4.2.4) и (4.2.3)

$$\eta = \frac{R}{R + r}. \quad (4.2.6)$$

Как следует из выражений (4.2.3), (4.2.4) и (4.2.6), все три величины зависят от внешнего и внутреннего сопротивлений цепи и, следовательно, от величины тока.

Полная мощность в электрической цепи линейно растёт с увеличением тока.

Мощность, выделяемая на внешнем участке цепи, при определённых условиях принимает максимальное значение. Эти условия для цепи с заданной ЭДС и внутренним сопротивлением можно определить, исследуя (4.2.4) на экстремум

$$\frac{dP_B}{dR} = \varepsilon^2 \frac{r - R}{(r + R)^3} = 0,$$

откуда  $R = r$ . Таким образом, максимальная мощность во внешней цепи выделяется при равенстве сопротивлений внешней и внутренней части цепи.

Зависимость мощности на внешнем участке цепи от силы тока можно получить из (4.2.4), выразив внешнее сопротивление из (4.2.1)

$$P_B = I^2 \left( \frac{\mathcal{E}}{I} - r \right) = \mathcal{E}I - I^2 r.$$

Следовательно, мощность на внешнем сопротивлении цепи меняется в зависимости от тока по параболическому закону. Она обращается в нуль при токах  $I_1 = 0$  и  $I_2 = \frac{\mathcal{E}}{r}$ . Первому току соответствует разомкнутая цепь ( $R = \infty$ ), а второму – режим короткого замыкания  $R = 0$ . Вершина параболы соответствует условию  $R = r$ , или величине тока  $I = \frac{\mathcal{E}}{2r}$ , что составляет половину тока короткого замыкания.

Зависимость КПД от силы тока из (4.2.5) имеет вид

$$\eta = \frac{IR}{\mathcal{E}} = \frac{I}{\mathcal{E}} \left( \frac{\mathcal{E}}{I} - r \right) = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}} I, \quad (4.2.9)$$

то есть от 1 при разомкнутой цепи до нуля в режиме короткого замыкания. Из (4.2.6) следует, что максимальной мощности на внешнем участке цепи соответствует значение  $\eta = 0,5$ . Поэтому условия получения максимальной мощности на потребителе и максимального коэффициента полезного действия источника оказываются несовместимыми.



*Рис.4.2.3.*  
Общий вид установки

**Лабораторная работа №4**  
**Определение электродвижущей силы источника ЭДС**  
**и исследование режимов работы электрической цепи**

Выполнил студент \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_

Проверил \_\_\_\_\_

Показания сняты \_\_\_\_\_

Зачтено \_\_\_\_\_

**Методика выполнения работы**

**I. Измерение ЭДС источника методом компенсации**

Собрать цепь для измерения ЭДС методом компенсации по схеме 3.

Здесь:

$\varepsilon_x$  – исследуемый источник тока,

$\varepsilon_\vartheta$  – эталонный источник тока

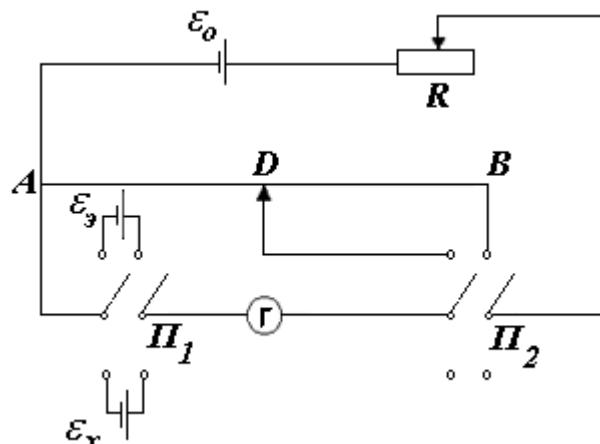
$$\varepsilon_\vartheta = (1,018 \pm 0,0002) \text{ В,}$$

$\Gamma$  – гальванометр,

$\Pi_1$  – двухполюсный переключатель,

$\Pi_2$  – однополюсный переключатель (двуихполюсный с двумя свободными клеммами),

$R$  – реостат,  $ADB$  – реохорд.



*Рис 4.I.1. Схема 3*

**ВНИМАНИЕ!  $\varepsilon_0$  – компенсирующий источник (выпрямитель ВС 4-12 в положении переключателя «4»).**

1. Включить в схему эталонный источник, установить подвижный контакт реохорда посередине ( $l_\vartheta = L/2$ ) и с помощью реостата  $R$  добиться компенсации  $\varepsilon_\vartheta$ .

2. Переключить  $\Pi_1$  на  $\varepsilon_x$  и, не меняя положения реостата, с помощью подвижного контакта реохорда вновь добиться компенсации. Зафиксировать  $l_x$ .

3. По формуле (4.1.8) рассчитать  $\varepsilon_x$ . Рассчитать погрешности эксперимента. Заполнить 1 строку таблицы.

	$l_\vartheta$ , см	$l_x$ , см	$\varepsilon_x$ , В	$\Delta\varepsilon_x$ , В	$\delta\varepsilon_x$ , %
1 опыт	50				
2 опыт					
Прямое измерение					

4. Изменить  $l_\vartheta$  и повторить процесс. Заполнить 2 строку таблицы.

5. Измерить  $\varepsilon_x$  непосредственно с помощью вольтметра. Заполнить третью строку таблицы. Сравнить результаты.

## II. Исследование режимов работы электрической цепи

1. Собрать цепь для изучения режима работы электрической цепи по схеме 4.

Здесь:

$R$  – реостат,  $V$  – вольтметр,  
 $A$  – амперметр,  $K$  – ключ.

**ВНИМАНИЕ!**  $\varepsilon$  – исследуемый источник  
 (выпрямитель ВС 4-12 в положении переключателя «12»).

2. При разомкнутом ключе измерить значение ЭДС исследуемого источника

$$\varepsilon = \quad \pm \quad \text{В}, \quad \delta\varepsilon = \quad \text{%.}$$

3. Изменяя сопротивление реостата от нуля до максимального значения так, чтобы ток менялся через  $\approx 0,05$  А, снять зависимость напряжения на внешнем участке цепи от силы тока (не менее десяти точек). Результаты измерений записать в таблицу.

$\text{№}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$P_0, \text{ Вт}$	$P_B, \text{ Вт}$	$\eta$	$R, \text{ Ом}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
...						

4. Построить график зависимости  $U(I)$ . Определить по графику ЭДС и внутреннее сопротивление. Проверить совпадение с пунктом 2.

$$\varepsilon = \quad \text{В}, \quad r = \quad \text{Ом}.$$

5. По полученной ЭДС, напряжению и току, воспользовавшись формулами теоретического введения, рассчитать полную мощность, мощность на внешнем участке цепи и КПД.

Результаты внести в таблицу и представить на графиках зависимостей  $P_0(I)$ ,  $P_B(I)$ ,  $\eta(I)$ .

6. Воспользовавшись графиками, определить ток короткого замыкания источника и его внутреннее сопротивление.

$$I_{\text{кз}} = \quad \text{А}, \quad r = \quad \text{Ом}.$$

7. Сделать выводы о справедливости представленных в теоретическом введении заключений о характере изменения указанных величин.

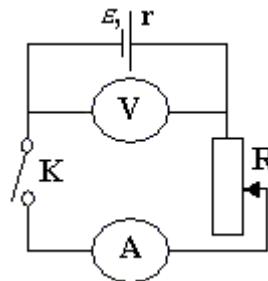


Рис 4.И.1.  
Схема 4

## **Контрольные вопросы**

1. Что называется электродвижущей силой?
2. В чем отличие разности потенциалов и напряжения?
3. В чем состоит компенсационный метод измерения ЭДС?
4. Каким образом можно экспериментально определить ЭДС источника?
5. Каково должно быть соотношение между  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_0$  и компенсирующей их ЭДС  $\varepsilon_0$ ?
6. Как связаны между собой максимальные полная и полезная мощности для данного источника тока?
7. При каком условии полезная мощность в электрической цепи максимальна? Чему при этом равен КПД источника тока?

## **Литература**

(см. основной список литературы)

Приложение:  
масштабно-координатная бумага для построения графиков

