

## Лабораторна робота № 2-2

# ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦІЇ

**Мета роботи:** ознайомитися з компенсаційним методом вимірювання електрорушійної сили (напруги).

**Прилади та пристрої:** нормальний елемент Вестона, елемент із невідомою електрорушійною силою (ЕРС) типу Лекланше, джерело сталого струму УИП-2, реохорд, обмежувальний опір, гальванометр типу М314 або М2031, перемикач.

Нижче представлені

1. Теоретичні відомості
2. Опис експериментальної установки
3. Порядок виконання роботи
4. Контрольні запитання
5. Література

### Теоретичні відомості

Робота кулонівських (інакше – електростатичних) сил при переміщенні заряду по замкнутому контуру дорівнює нулю. Тому електростатичне поле не може підтримувати сталий струм у колі. Енергія носіїв струму розсіюється (відбувається нагрівання провідника), її втрати треба компенсувати. Для цієї мети використовується довільне джерело сил неелектростатичного походження або, як кажуть, джерело сторонніх сил.

Якщо  $E^{ct}$  – напруженість поля сторонніх сил, то робота переміщення заряду  $q$  по усьому колу  $A = q \oint E^{ct} dl \neq 0$ . Відношення работ до величини перенесеного заряду, тобто робота, яка *чисельно* дорівнює роботі переміщенню одиничного заряду по замкнутому контуру, або ж на ділянці електричного кола від точки 1 до точки 2, називається **електрорушійною силою джерела (ЕРС)**:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} = \oint E^{ct} dl.$$

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} = \int_1^2 E^{ct} dl.$$

ЕРС джерела вимірюють у тих самих одиницях, що і різницю потенціалів. У міжнародній системі одиниць (СІ) цією одиницею є вольт (В).

Створювати ЕРС можуть дифузія іонів в електролітах, зміна магнітного поля, що пронизує контур (електромагнітна індукція) тощо. Ділянка кола, яка включає джерело сторонніх сил, називається **неоднорідною**. Для такої ділянки має місце узагальнений закон Ома (див. п.15.6):

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}. \quad (2.1)$$

тут  $I$  – сила струму, що тече в напрямку від точки 1 до точки 2 (див. рис. 2.1),  $\mathcal{E}_{12}$  – ЕРС джерела,  $R$  – загальний опір ділянки,  $\varphi_1, \varphi_2$  – потенціали точок 1 і 2. Як  $I$ , так і  $\mathcal{E}_{12}$  – величини алгебраїчні. Якщо ЕРС сприяє рухові додатних зарядів у вибраному напрямі (1→2 на рис.2.1), то  $\mathcal{E}_{12} > 0$ , якщо ж протидіє, то  $\mathcal{E}_{12} < 0$ .

Сума різниці потенціалів на кінцях ділянки та ЕРС, що діє на цій ділянці, називається **напругою**:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}. \quad (2.1)$$

З формули (2.1) для електрорушійної сили матимемо:

1. Якщо коло розімкнуте ( $I = 0$ ), то

$$\mathcal{E}_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (2.2)$$

тобто ЕРС джерела дорівнює різниці потенціалів на клеммах ненавантаженого джерела.

2. Для замкнутого кола  $\varphi_1 = \varphi_2$  (точки 1 і 2 співпадають), маємо

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}. \quad (2.3)$$

Урахувавши, що загальний опір кола  $R$  складається із зовнішнього опору  $r_e$  та внутрішнього опору  $r_i$  джерела струму:  $R = r_e + r_i$ , вираз (2.3) перепишемо так:

$$\mathcal{E} = Ir_e + Ir_i \Rightarrow U = Ir_e = \mathcal{E} - Ir_i. \quad (2.4)$$

Звідси видно, що напруга  $U = Ir_e$  на зовнішній ділянці кола менша за ЕРС на величину падіння напруги на внутрішньому опорі джерела струму  $- Ir_i$ . Тому виміряти ЕРС безпосередньо вольтметром неможливо. Однак, якщо опір вольтметра дуже великий у порівнянні з опором кола (формально можна вважати, що опір вольтметра прямує до нескінченності і в такому разі кажуть, що вольтметр є ідеальним), то струм у колі дорівнює нулю ( $I = 0$ ), і тоді з (2.4) маємо:  $U = \mathcal{E}$ .

Суть методу, який застосовується для визначення ЕРС, можна пояснити за допомогою схеми, зображеної на рис. 2.1. Два джерела з ЕРС  $\mathcal{E}$  та  $\mathcal{E}_1$  (при цьому  $\mathcal{E} > \mathcal{E}_1$ ) вмикаються назустріч один одному. Опори  $r_1$  та  $r_1'$  є змінними, однак під час досліду **повинна виконуватись умова:**

$$r_1 + r_1' = \text{const}. \quad (2.5)$$

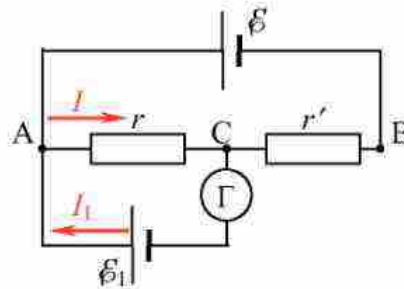


Рис. 2.1

Змінюючи опори  $r_1$  та  $r_1'$  можна відрегулювати різницю потенціалів точок А і В так, щоб вона дорівнювала ЕРС джерела  $\mathcal{E}_1$ . При цьому сила струму  $I_1 = 0$ . Це означає, що

$$\mathcal{E}_1 = Ir_1. \quad (2.6)$$

Із сказаного зрозуміло, чому метод має назву метода компенсації: **відсутність струму у колі елемента  $\mathcal{E}_1$  обумовлена компенсацією ЕРС цього елемента падінням напруг на ділянці АС.**

Якщо джерело  $\mathcal{E}_1$  замінити на джерело, ЕРС якого дорівнює  $\mathcal{E}_2$ , то підбравши відповідним чином опір  $r_2$  ділянки АС, отримаємо

$$\mathcal{E}_2 = Ir_2. \quad (2.7)$$

Пам'ятаймо, що при цьому має змінитися і опір  $r_1'$  (позначимо його  $r_2'$ ), бо повинна виконуватись умова (2.5):

$$r_1 + r_1' = r_2 + r_2' = r = \text{const}.$$

Поділивши почленно (2.6) на (2.7), отримаємо

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (2.8)$$

Пропорція (2.8) є робочою формулою, яку використовують для визначення невідомої електрорушійної сили, якщо є джерело з відомою ЕРС. Тому цей метод має ще назву метода порівняння.

За звичай у якості джерела з відомою ЕРС використовують так званий нормальний елемент, або елемент Вестона, ЕРС якого  $\mathcal{E}_N$  відома з великою точністю. Електродами нормального елемента служать кадмій і ртуть, а електролітом – розчин сірчанокислового кадмію. Електрорушійна сила  $\mathcal{E}_N$  задається до четвертого знаку після коми, також у паспорті наведено температурну поправку.

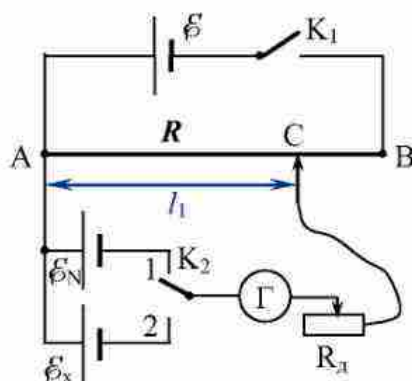


Рис. 2.2

Якщо у формулі (2.8) замінити  $\mathcal{E}_2$  на  $\mathcal{E}_N$ , а  $\mathcal{E}_1$  – на  $\mathcal{E}_x$ , то отримаємо робочу формулу для визначення невідомої електрорушійної сили елемента  $\mathcal{E}_x$ :

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \cdot \frac{r_1}{r_2}. \quad (2.9)$$

На практиці (див. рис.2.2) ділянка  $AB$  – це однорідна струна, яку називають **реохордом**. Опір ділянки  $AC$ , позначений тут  $R$ , еквівалентний  $r_1$  (або  $r_2$ ), а опір ділянки  $CB$  –  $r_1'$  ( $r_2'$ ), при цьому вимога (2.5) виконується автоматично.

Опір  $R$  частини реохорда  $AC$ , падіння напруги на якому компенсує відому ЕРС джерела  $\mathcal{E}_N$ , пропорційне довжині  $l_1$  цієї частини реохорда (на рис. 2.2 ключ  $K_2$  знаходиться в позиції 1).

Якщо ми замінимо в електричному колі  $\mathcal{E}_N$  на  $\mathcal{E}_x$  – на схемі (рис. 2.3) ключ  $K_2$  переключимо в позиції 2, то повинно змінитись і значення падіння напруги на ділянці  $AC$ , яке має скомпенсувати тепер вже іншу, невідому електрорушійну силу  $\mathcal{E}_x$ . Опір ділянки  $AC$  і, відповідно, падіння напруги на цій ділянці змінюють, зміщуючи точку  $C$  на реохорді. Позначимо нову довжину  $AC$  цієї частини реохорда  $l_1'$ . У такому разі відношення опорів ( $r_1/r_2$ ) у (2.13) можна замінити на відношення відповідних довжин:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_1'}$$

Тепер розрахункова формула набере вигляду:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \cdot \frac{l_1'}{l_1}. \quad (2.10)$$

## Опис експериментальної установки

Для вимірювання ЕРС джерела струму використовується установка, електрична схема якої зображена на рис. 2.2.

Як джерело струму з невідомою ЕРС використовується сухий елемент. Живлення схеми здійснюється від стабілізованого виходу "3-9 В" (джерело з ЕРС  $\mathcal{E}$  на схемі) універсального джерела живлення УИП-2. Роль джерела струму з відомою ЕРС  $\mathcal{E}_N$  виконує нормальний елемент Вестона, ЕРС якого дорівнює 1,0183 В. Електрорушійні сили елементів  $\mathcal{E}_N$  і  $\mathcal{E}_x$  компенсуються падінням напруги на ділянці  $AC$  реохорда  $AB$ . Перемикач  $K_2$  служить для замикання кола гальванометра  $\Gamma$  на елемент з невідомою ЕРС  $\mathcal{E}_x$  (поз.2) або на нормальний елемент  $\mathcal{E}_N$  (поз.1). Для обмеження струму, який протікає через гальванометр у некомпенсованій схемі, в коло гальванометра введено додатковий обмежувальний опір  $R_d$ .

## Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за схемою, зображеною на рис. 2.2.
2. Поставити перемикач  $K_2$  у нейтральну позицію і встановити повзунок реохорда  $C$ , приблизно, посередині.
3. Повністю ввести опір  $R_d$  і замкнути вимикач  $K_1$ .
4. Замкнути за допомогою перемикача  $K_2$  гальванічний елемент з відомою ЕРС  $\mathcal{E}_N$  і переміщенням повзуна реохорда домогтися відсутності струму в колі гальванометра  $\Gamma$ .
5. Вимкнути гальванічний елемент  $\mathcal{E}_N$  і зменшити опір  $R_d$ . Увімкнути елемент  $\mathcal{E}_x$  і, зменшуючи опір  $R_d$  до нуля і одночасно уточнюючи положення повзуна на реохорді, знову встановити стрілку гальванометра на нуль. Визначити довжину ділянки реохорда  $AC = l_1$ , яка забезпечує відсутність струму, і занести її значення до табл. 2.1. Повторити дослід 3-5 разів.
6. Виконати операції, описані в пп. 2 – 5, увівши в коло за допомогою перемикача  $K_2$  досліджуваний елемент  $\mathcal{E}_x$  замість  $\mathcal{E}_N$ . Занести до табл.2.1 значення довжини плеча реохорда  $l_1'$ .

Таблиця 2.1

Довжина плеча реохорда, см			Еталонна ЕРС $\mathcal{E}_N$	Невідома ЕРС $\mathcal{E}_x$	
$n$	$l_1$	$l_1'$		$n$	
1			$\mathcal{E}_N = 1,0183 \text{ В}$	1	
2				2	
3				3	
4				4	
5				5	

7. Обчислити середнє значення ЕРС невідомого елемента:

$$\langle \mathcal{E}_x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^5 \mathcal{E}_{xi}}{5} =$$

8. Розрахувати середню стандартну похибку вимірювань (див. Теорію похибок, лаб. робота №1-1).
9. Записати кінцевий результат у вигляді

"шукана величина = середнє значення  $\mathcal{E}_x \pm$  середня стандартна похибка":

## Контрольні запитання

1. Що називається ЕРС джерела струму?
2. Яка роль сил неелектростатичного походження (сторонніх сил) в електричних колах?
3. Що являє собою неоднорідна ділянка електричного кола? Як записати закон Ома для такої ділянки?
4. У чому полягає метод компенсації?
5. Чому ЕРС  $\mathcal{E}$  повинна бути більшою від ЕРС  $\mathcal{E}_N$  і  $\mathcal{E}_x$ ?
5. Які переваги методу компенсації у порівнянні з безпосереднім вимірюванням ЕРС за допомогою вольтметра?
6. Яка будова нормального елемента?
7. Чому елементи  $\mathcal{E}$ ,  $\mathcal{E}_N$  і  $\mathcal{E}_x$  слід з'єднувати однойменними полюсами?
8. Яке призначення опору  $R_d$  у колі гальванометра?

## Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.2. – К.: "Техніка", 2001.
2. Савельєв І.В. Курс общей фізики. Т.3. –М.: Наука, 1989.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3. –М.: Наука, 1977.
4. Черкашин В.П. Физика. Электричество и магнетизм. §2 – К.: Вища школа, 1986.