

### Лабораторна робота 3.3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### 1 МЕТА РОБОТИ

Експериментально визначити ЕРС та внутрішній опір джерела струму методом компенсації.

### 2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

#### 2.1 Постійний струм. Основні поняття

**Електричний струм** – це впорядкований рух зарядів. Для його існування в середовищі повинні виконуватися дві умови: 1) наявність вільних заряджених частинок – тобто частинок, які можуть переміщуватись під дією будь-якої сили; 2) наявність різниці потенціалів  $\varphi_2 - \varphi_1 = U$  між ділянками середовища. Матеріали, які містять вільні заряди, називаються **провідниками**. Кількісною мірою електричного струму є **сила струму**

$$I = \dot{q} = \frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

яка чисельно дорівнює заряду  $q$ , що проходить за одиницю часу через переріз провідника.

Властивість провідників перешкоджати впорядкованому руху зарядів називається **електричним опором**. Одночасно опором називають кількісну міру цієї властивості і позначають її літерою  $R$ . Для металевого провідника довжиною  $l$  та сталою площею поперечного перерізу  $S$  у досить широкому температурному діапазоні опір знаходиться із виразу

$$R = \rho l / S, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питомий опір, який залежить від матеріалу провідника. Сила струму в таких провідниках визначається **законом Ома для ділянки кола**

$$I = U/R. \quad (3)$$

Рух заряджених частинок, зумовлений певною різницею потенціалів  $\Delta\varphi = U$ , завжди призводить до перерозподілу заряду в провіднику. Внаслідок потенціал провідника стає однаковим в усьому об'ємі. Таким чином, струм, зумовлений електростатичними силами, буде усувати одну з причин свого існування, і згасати. Тому такі сили не можуть забезпечити постійний рух зарядів у колі. Сталу різницю потенціалів на окремих ділянках кола (відповідно, і силу струму в колі) можна створювати за рахунок так званих сторонніх сил. **Сторонні сили** – це сили будь-якого походження, крім електростатичного, які здатні розділяти позитивні та негативні заряди та переміщувати їх проти електростатичного поля. Відношення роботи сторонніх сил з переміщення заряду вздовж замкнутого контуру до величини цього заряду  $q$  називається **електрорушійною силою** або **ЕРС** джерела струму

$$\varepsilon = A/q. \quad (4)$$

Як і напруга, ЕРС вимірюється у вольтах:  $[\varepsilon] = \text{В}$ .

Важливою характеристикою для джерела струму є також його **внутрішній опір**  $r$ . Він впливає на струм у колі так само, як і зовнішній відносно джерела опір  $R$ . Сила струму у колі, що містить джерело ЕРС, визначається законом **Ома для повного кола**

$$I = \varepsilon / (R + r) \quad (5)$$

#### 2.2 Суть методу компенсації

Будь-яке електричне вимірювання вимагає певних затрат енергії на роботу вимірювального приладу. Наприклад, у випадку вимірювання величини ЕРС  $\varepsilon_x$  вольтметром (див. рисунок 1а) через нього буде протікати струм, що визначається формулою (5). Відповідно, показання вольтметра будуть

$$U = \varepsilon_x - IR_V = \varepsilon_x - \varepsilon_x R_V / (R_V + r_x) \quad (6)$$

де  $R_V$  – опір вольтметра,  $r_x$  – внутрішній опір джерела. Тобто, протікання струму через джерело призводить до похибки вимірювання його ЕРС. Позбавитись цієї похибки можна, якщо струм у колі  $I = 0$ . Остання умова буде виконуватись, коли ЕРС джерела **компенсована** падінням напруги на опорі, підключеному паралельно до джерела. На цьому принципі і базується **метод компенсації**.

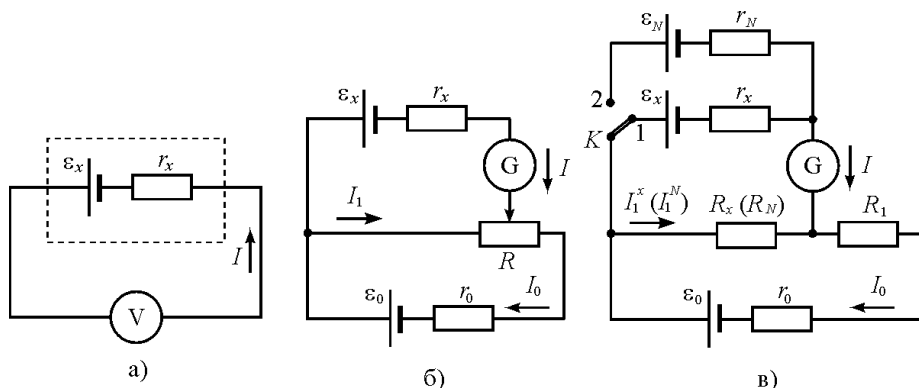


Рисунок 1 – а) Схема прямого вимірювання величини ЕРС вольтметром; б) схема компенсації ЕРС, що вимірюється, за рахунок зовнішнього джерела; в) схема для порівняння ЕРС невідомого джерела  $\varepsilon_x$  з ЕРС еталонного  $\varepsilon_N$ . Значення в дужках відповідають положенню 2 ключа  $K$ .

Розглянемо даний метод докладніше. Нехай струм від допоміжного джерела  $\varepsilon_0$  ( $\varepsilon_0 > \varepsilon_x$ ) проходить через потенціометр  $R$  (див. рисунок 1б). Струми  $I$  та  $I_1$  будуть приймати довільні значення, обмежені умовою  $I_1 + I = I_0$  внаслідок закону збереження заряду. Шляхом зміни положення бігунка потенціометра можна досягти ситуації, коли струм  $I$  буде відсутнім. При цьому ЕРС  $\varepsilon_x$  буде скомпенсована падінням напруги на опорі  $R_x$  тієї частини потенціометра, що знаходиться ліворуч від бігунка (див. рисунок 1в)

$$\varepsilon_x = I_1^x R_x = I_0 R_x. \quad (7)$$

Визначати невідомі величини  $I_0$  та  $R_x$  не буде потреби, якщо повторити всі наведені операції для **еталонного джерела** струму  $\varepsilon_N$ , а потім порівняти одержані результати. Звичайно, ЕРС еталонного джерела відома з великою точністю. Схема, за допомогою якої реалізується зазначена ідея, наведена на рисунку 1в. Шляхом перемикавання ключа  $K$  в положення 2 та рухом бігунка потенціометра можна компенсувати ЕРС еталонного джерела

$$\varepsilon_N = I_1^N R_N = I_0 R_N. \quad (8)$$

При цьому струм  $I_0$  у виразах (7) та (8) однаковий, оскільки в обох випадках він визначається сумарним опором потенціометра та внутрішнім опором зовнішнього джерела.

У якості потенціометра зручно використовувати реохорд, який являє собою тонкий провідник зі сталим перерізом, розміщений вздовж проградуєваної в міліметрах шкали. Тоді, згідно з виразом (2), опори  $R_x$  та  $R_N$  будуть визначатися відповідними довжинами провідників  $l_x$  та  $l_N$ , а коефіцієнти пропорційності будуть однакові. Поділимо вираз (7) на (8) і з урахуванням останньої обставини одержимо вираз для знаходження ЕРС  $\varepsilon_x$  через ЕРС еталонного джерела  $\varepsilon_N$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_N \frac{l_x}{l_N}. \quad (9)$$

### 3 КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

- 1 Невідоме джерело ЕРС.
- 2 Еталонне джерело ЕРС.
- 3 Джерело ЕРС, за допомогою якого відбувається компенсація.
- 4 Реохорд.
- 5 Гальванометр.
- 6 Магазин опорів.

#### 4 ОПИСАННЯ УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Принципові схеми лабораторної роботи для визначення ЕРС та внутрішнього опору джерела зображена на рисунку 2а та б, а загальний вигляд лабораторної установки наведено на рисунку 3. За допомогою ключа  $K_1$  (6) до джерела живлення (3) підключаються через реохорд  $R_1$  (4) по чергово невідоме джерело  $\varepsilon_x$  (1) та еталонне джерело  $\varepsilon_N$  (2). Для обмеження струмів у гілках схеми за допомогою магазину опорів (8) виставляються опори  $R$  та  $R_0$ . Гальванометр  $G$  (5) фіксує проходження або відсутність струму в гілці скомпенсованого джерела. Для попередження проходження струмів, які перевищують діапазон вимірювання гальванометра, послідовно з ним ввімкнено ключ  $K_2$  (7). Під час підбору потрібного положення бігунка реохорда, ключ  $K_2$  має бути розімкнений.

Для визначення внутрішнього опору  $r_x$  (див. рисунок 2б) Невідоме джерело підключається за допомогою тумблера (9) послідовно в гілку зовнішнього джерела  $\varepsilon_0$ . Методика визначення  $r_x$  наступна. Для схеми, наведеної на рисунку 2б, еталонне джерело компенсується для двох значень баластного опору  $R_0$ : 1)  $R_0 = R_{00} = 0$  та 2)  $R_0 = R_{01} = 0,5$  Ом. При цьому положення бігунка реохорда будуть мати значення відповідно  $l_0$  та  $l_1$ . Струми в обох випадках будуть визначатися як

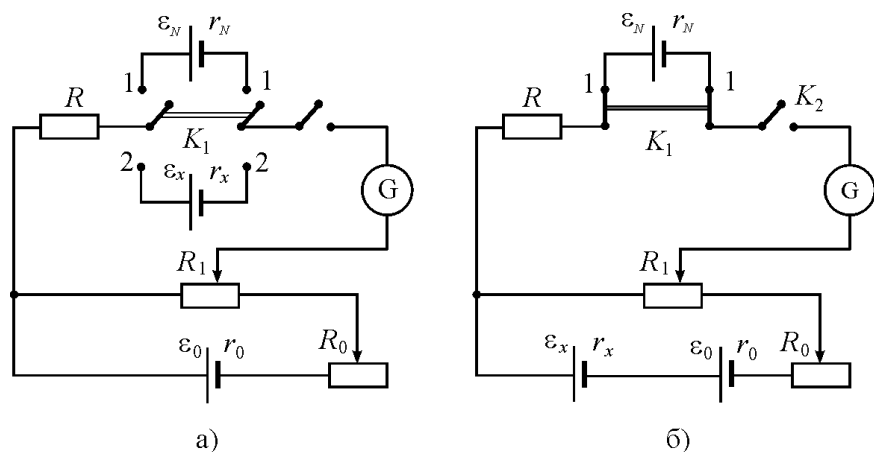


Рисунок 2 – а) Принципова схема установки для визначення ЕРС джерела; б) схема для визначення внутрішнього опору джерела

$$I_0 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_0}{r_x + r_0 + R_1 + R_{00}}, \quad I_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_0}{r_x + r_0 + R_1 + R_{01}}, \quad (10)$$

де  $R_1$  – загальний опір реохорда. Користуючись співвідношенням (10), виразимо ЕРС еталонного джерела через струми  $I_0$  та  $I_1$  і порівняємо одержані результати

$$\varepsilon_N = \frac{I_0 \rho l_0}{S} = \frac{I_1 \rho l_1}{S} \Rightarrow \frac{l_0}{r_x + r_0 + R_1} = \frac{l_1}{r_x + r_0 + R_1 + R_{01}}. \quad (11)$$

Вираз, аналогічний (11), можна отримати для схеми, зображеної на рисунку 2а, якщо ключ  $K_1$  буде в положенні 1:

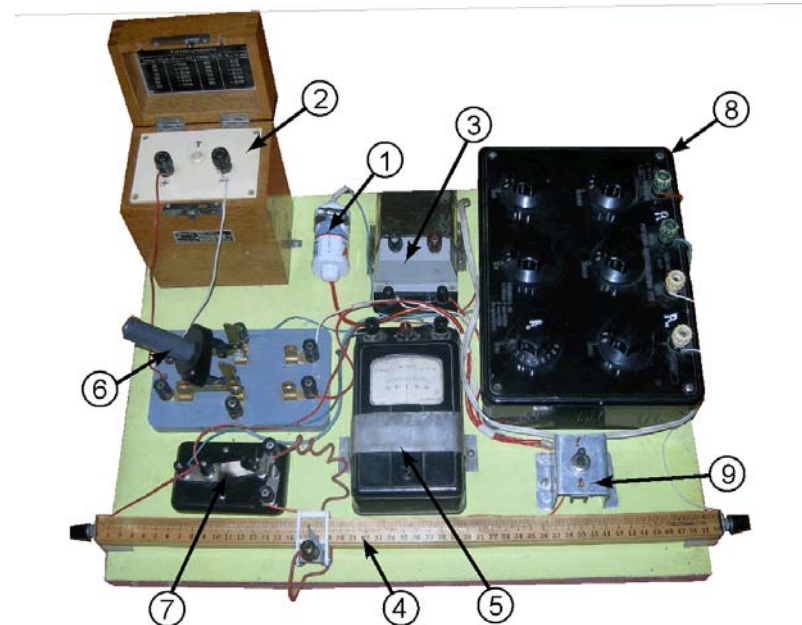


Рисунок 3 – Лабораторна установка: 1 – невідоме джерело  $\varepsilon_x$ ; 2 – еталонне джерело  $\varepsilon_N$ ; 3 – зовнішнє джерело  $\varepsilon_0$ ; 4 – реохорд; 5 – гальванометр; 6 – ключ перемикаччя невідомого та еталонного джерел  $K_1$ ; 7 – ключ  $K_2$ ; 8 – магазин опорів; 9 – тумблер підключення  $\varepsilon_x$  послідовно з  $\varepsilon_0$ .

$$\frac{l_{N0}}{r_0 + R_1} = \frac{l_{N1}}{r_0 + R_1 + R_{01}}, \quad (12)$$

де  $l_{N0}$ ,  $l_{N1}$  – відповідно положення бігунка реохорда для значень баластного опору 1)  $R_0 = R_{00} = 0$  та 2)  $R_0 = R_{01} = 0,5$  Ом. Порівнявши вирази (11) та (12) одержимо

$$r_x = \frac{R_{01}(l_{N0}l_1 - l_{N1}l_0)}{(l_{N1} - l_{N0})(l_1 - l_0)}. \quad (13)$$

## 5 ХІД РОБОТИ

- 1 Уважно ознайомтесь з установкою та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
- 2 Запишіть у зошит значення еталонної ЕРС  $\varepsilon_N$  (2) на рисунку 3 та похибку її визначення  $\Delta\varepsilon_N$ .
- 3 Переведіть тумблер (9) у верхнє положення.
- 4 Встановіть на магазині опорів (8) опір  $R_0 = 0$ .
- 5 За допомогою ключа  $K_1$  (6) підключіть невідоме джерело  $\varepsilon_x$  (1).
- 6 Виставте бігунки реохорда так, щоб струм через гальванометр був відсутній. За положенням бігунка визначіть  $l_x$  і занесіть його до таблиці 1.

*Щоб запобігти виходу з ладу гальванометра в розрив гілки поставлено ключ  $K_2$ . В процесі компенсації слід замикати гілку гальванометра шляхом короточасних натискань на даний ключ.*

- 7 За допомогою ключа  $K_1$  підключіть еталонне джерело  $\varepsilon_N$  (2), аналогічним чином визначте  $l_N$  та занесіть його значення до таблиці 1.

Таблиця 1 До визначення ЕРС  $\varepsilon_x$ .

№ досліду	$l_x$ , мм	$ \Delta l_x $ , мм	$l_N$ , мм	$ \Delta l_N $ , мм	$\Delta l$ , мм
1					
...					
середнє <..>					
	$\Delta l_x = \langle  \Delta l_x  \rangle + \Delta l =$		$\Delta l_N = \langle  \Delta l_N  \rangle + \Delta l =$		

$\Delta l$  – інструментальна похибка.

- 8 Повторіть всі вищенаведені операції ще чотири рази та заповніть таблицю 1.
- 9 Встановіть на магазині опорів (8) опір  $R_0 = 0,1$  Ом та визначте  $l_x$  і  $l_N$ . Результати занесіть до таблиці 2. ЕРС  $\varepsilon_x$  для кожного досліду визначити з співвідношення (9)

Таблиця 2 – Демонстрація незалежності результатів від  $R_0$ .

№ досліду	$R_0$ , Ом	$l_x$ , мм	$l_N$ , мм	$\varepsilon_x$ , В
	0,1			
	0,2			
	0,3			
	0,4			

- 10 Повторіть п.9 ходу роботи ще 3 рази для  $R_0 = 0,2; 0,3; 0,4$  Ом.

*Внаслідок цього експерименту ви маєте пересвідчитись, що результати не залежать від величини баластного опору  $R_0$ .*

- 11 Підключіть еталонне джерело  $\varepsilon_N$ . Для значення  $R_0 = 0,5$  Ом скомпенсуйте його та визначте за положенням бігунка  $l_{N1}$ . Повторіть це ще чотири рази. Результати занесіть до таблиці 3.

Таблиця 3 – До визначення внутрішнього опору  $r_x$ .

$R_0$ , Ом	№ досліду	$l_0$ мм	$ \Delta l_0 $ , мм	$l_1$ мм	$ \Delta l_1 $ , мм	$\Delta l$ , мм
0	1					
	...					
	середнє <..>					
		$\Delta l_0 = \langle  \Delta l_0  \rangle + \Delta l =$		$\Delta l_1 = \langle  \Delta l_1  \rangle + \Delta l =$		
$R_0$ , Ом	№ досліду	$l_{N0}$ , мм	$ \Delta l_{N0} $ , мм	$l_{N1}$ , мм	$ \Delta l_{N1} $ , мм	$\Delta l$ , мм
0,5	1					
	...					
	середнє <..>					
	...	$\Delta l_{N0} = \langle  \Delta l_{N0}  \rangle + \Delta l =$		$\Delta l_{N1} = \langle  \Delta l_{N1}  \rangle + \Delta l =$		

- 12 Заповніть колонку  $l_{N0}$  таблиці 3 користуючись аналогічними даними таблиці 1 (колонка  $l_N$ ).
- 13 Переведіть тумблер (9) в нижнє положення.
- 14 Аналогічно до п.11 визначіть величини  $l_0$  та  $l_1$  відповідно для  $R_0 = 0$  та  $R_0 = 0,5$  Ом. Результати занесіть до таблиці 3.
- 15 Визначте середні значення  $l_x$  та  $l_N$  та зробіть усі необхідні для заповнення таблиць обчислення.

- 16 Обчисліть  $\varepsilon_x$  за допомогою формули (9) та даними таблиці 1.  
 17 Обчисліть абсолютну похибку визначення ЕРС за формулою

$$\Delta\varepsilon_x = \varepsilon_x \left( \frac{\Delta\varepsilon_N}{\varepsilon_N} + \frac{\Delta l_N}{l_N} + \frac{\Delta l_x}{l_x} \right) \quad (14)$$

- 18 Обчисліть внутрішній опір  $r_x$  джерела за допомогою виразу (13) та даними таблиці 3.  
 19 Обчисліть абсолютну похибку визначення внутрішнього опору як

$$\Delta r_x = r_x \left( \frac{\Delta R_{01}}{R_{01}} + \frac{\Delta l_0 + \Delta l_1}{l_{N1} - l_{N0}} + \frac{l_{N1}\Delta l_0 + l_0\Delta l_{N1} + l_{N0}\Delta l_1 + l_1\Delta l_{N0}}{l_0l_{N1} - l_1l_{N0}} \right). \quad (15)$$

## 6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

### На оцінку “задовільно”

- Що називають електричним струмом? Умови його існування.
- Дайте означення сили струму.
- Сформулюйте закон Ома в інтегральній формі для повного кола та для ділянки кола.
- Яка перевага методу компенсації над прямими вимірюваннями ЕРС?
- Викладіть послідовність виконання роботи.

### На оцінку “добре”

- Розкрийте поняття “сторонні сили” та “електрорушійна сила”.
- Розкрийте поняття “електричний опір”.
- Запишіть закон Ома в диференціальній формі для ділянки кола та для повного кола. Покажіть зв’язок між диференціальною та інтегральною формами запису.
- Викладіть сутність вимірювання ЕРС методом компенсації.
- Нарисуйте принципову схему лабораторної установки. Поясніть призначення всіх її елементів.

### На оцінку “відмінно”

- Одержіть розрахункову формулу для визначення ЕРС невідомого джерела  $\varepsilon_x$  методом компенсації.
- Розкрийте принцип визначення внутрішнього опору джерела за допомогою методу компенсації. Виведіть розрахункову формулу.
- Виведіть формулу для знаходження похибки визначення ЕРС  $\varepsilon_x$ .
- Запишіть правила Кірхгофа та поясніть їх застосування на прикладі.
- Запишіть закон Джоуля-Ленца в диференціальній та інтегральній формах. Покажіть взаємозв’язок між ними.

## 7 СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.
- Савельев И.В. Курс физики. Том 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика.
- Трофимова Т.И. Курс физики.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество.
- Калашников С.Г. Электричество.
- Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма.
- Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 2. Электричество и магнетизм.
- Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики. Том 2. Электричество и магнетизм.