Лабораторна робота 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. МЕТА РОБОТИ

Експериментально визначити ЕРС джерела струму методом компенсації.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Постійний струм. Основні поняття

Електричний струм – це впорядкований рух зарядів. Тут і в подальшому будемо розглядати лише так званий ***струм провідності***, або рух зарядів у провідниках. Для існування струму провідності повинні виконуватися дві умови: 1) наявність вільних заряджених частинок – тобто частинок, які можуть переміщатися 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**

$$I = \dot{q} = \frac{dq}{dt}, \tag{1}$$

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

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

$$R = \rho l / S, \tag{2}$$

де ρ – питомий опір, який залежить від матеріалу провідника і температури зовнішнього середовища. Сила струму в таких провідниках визначається за **законом Ома для ділянки кола**

$$I = U/R\,. \qquad (3)$$

Рух заряджених частинок, зумовлений чинниками електростатичного походження, не може існувати необмежено довго. Припустимо, певний об'єм провідника заряджений нерівномірно. У цьому випадку між ділянками провідника існуватиме різниця потенціалів $\Delta\varphi = U$, яка зумовить проходження струму. Однак струм приведе до вирівнювання густини заряду в провіднику, внаслідок чого його потенціал стане однаковим в усьому об'ємі. Таким чином, струм, зумовлений електростатичними силами, буде усувати одну із 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 переміщати заряди проти електростатичного поля. Відношення роботи A сторонніх сил з переміщення заряду вздовж замкненого контуру до величини цього заряду q називається **електрорушійною силою**, або **ЕРС** джерела струму

$$\mathcal{E} = A/q\,. \qquad (4)$$

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

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

$$I = \mathcal{E}/(R + r)\,. \qquad (5)$$

2.2. Суть методу компенсації

Будь-яке електричне вимірювання вимагає певних затрат енергії на роботу вимірювального приладу. Наприклад, у випадку вимірювання величини ЕРС $\mathcal{E}_x$ вольтметром (див. рис. 1а) через нього буде проходити струм, що визначається за формулою (5). Відповідно показання вольтметра будуть

$$U = \mathcal{E}_x - Ir_x = \mathcal{E}_x - \mathcal{E}_x r_x \big/ \left(R_V + r_x\right), \qquad (6)$$

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

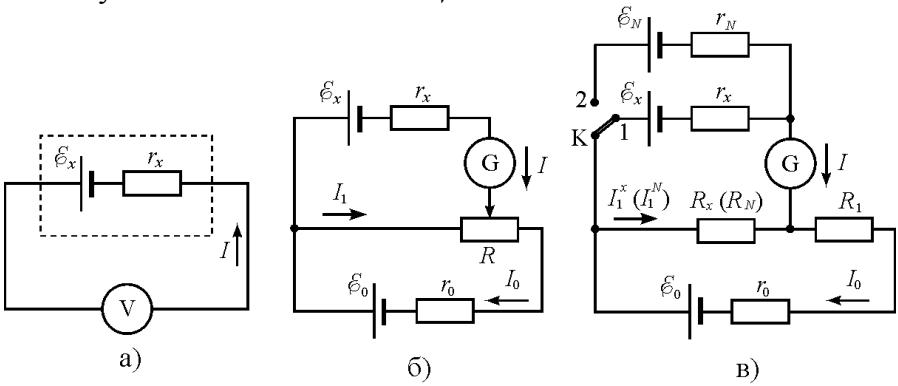

Рисунок 1 – Схема прямого вимірювання величини ЕРС вольтметром (а); схема компенсації ЕРС, що вимірюється, за рахунок зовнішнього джерела (б); схема для порівняння ЕРС невідомого джерела $\mathcal{E}_x$ з ЕРС еталонного $\mathcal{E}_N$ (в). Значення в дужках відповідають положенню 2 ключа *K*

Розглянемо даний метод докладніше. Нехай струм від допоміжного джерела $\mathcal{E}_0$ ($\mathcal{E}_0 > \mathcal{E}_x$) проходить через потенціометр R (див. рис. 1б). Струми I та I_1 будуть набувати довільних значень, обмежених умовою $I_1 + I = I_0$ внаслідок закону збереження заряду. Шляхом зміни положення бігунка змінного опору R можна досягти ситуації, коли струм I буде відсутнім. При цьому ЕРС $\mathcal{E}_x$ буде скомпенсована падінням напруги на опорі R_x тієї частини потенціометра, що знаходиться ліворуч від бігунка (див. рис. 1в)

$$\mathcal{E}_x = I_1^x R_x = I_0 R_x . \qquad (7)$$

Підкреслимо, падіння напруги I_0R_x створюється за рахунок енергії додаткового джерела $\mathcal{E}_0$.

Визначати невідомі величини I_0 та R_x не буде потреби, якщо повторити усі наведені операції для ***еталонного джерела*** струму $\mathcal{E}_N$, а потім порівняти одержані результати. ЕРС еталонного джерела відома з великою точністю. Схема, за допомогою якої реалізується зазначена ідея, наведена на рисунку 1в. Шляхом перемикання ключа *К* в положення 2 та переміщенням бігунка змінного опору можна компенсувати ЕРС еталонного джерела

$$\mathcal{E}_N = I_1^N R_N = I_0 R_N . \qquad (8)$$

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.

Як потенціометр зручно використовувати реохорд, який являє собою тонкий провідник зі сталим перерізом, розміщений вздовж проградуйованої 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 співвідношення (7) на (8) і з урахуванням останньої обставини одержимо вираз для знаходження ЕРС $\mathcal{E}_x$ через ЕРС еталонного джерела $\mathcal{E}_N$

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \frac{l_x}{l_N} . \qquad (9)$$

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Невідоме джерело ЕРС ($\mathcal{E}_x$).
2. Еталонне джерело ЕРС ($\mathcal{E}_N$).
3. Джерело ЕРС, за допомогою якого відбувається компенсація ($\mathcal{E}_0$).
4. Реохорд.
5. Гальванометр.
6. Магазин опорів.
7. Ключ.
8. Перемикач.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Принципова схема лабораторної роботи для визначення ЕРС та внутрішнього опору джерела зображена на рисунку 2, а загальний вигляд лабораторної установки наведено на рисунку 3. За допомогою перемикача K_1 6 до джерела живлення 3 підключаються через реохорд R_1 4 почергово невідоме джерело $\mathcal{E}_x$ 1 та еталонне джерело $\mathcal{E}_N$ 2. Тут і далі літерне позначення відповідає схемі рисунка 2, а цифрове – рисунка 3. 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.

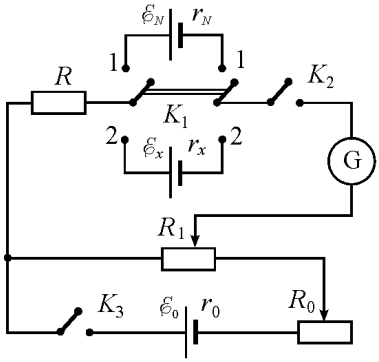

Рисунок 2 – Принципова схема установки для визначення ЕРС джерела

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтесь з установкою та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Запишіть у таблицю 1 значення ЕРС еталонного джерела $\mathcal{E}_N$ 2 та залежну від температури поправку $\Delta'\mathcal{E}_N$, що зазначені на кришці джерела.

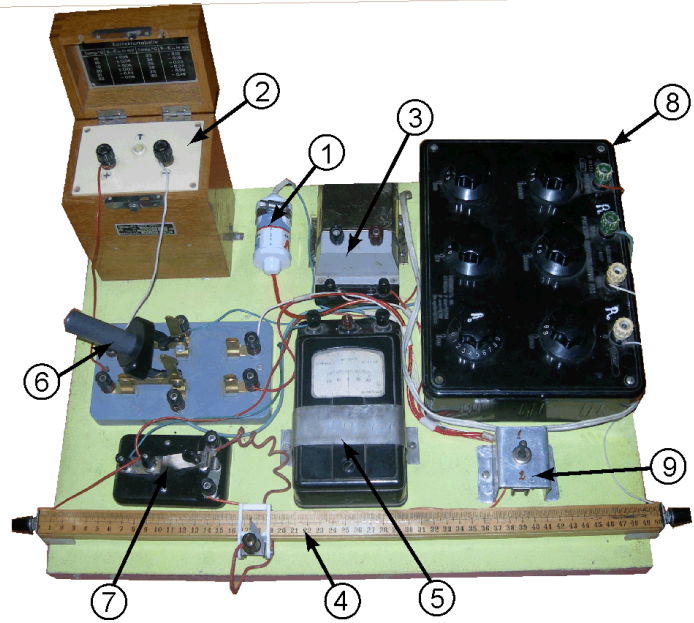

Рисунок 3 – Лабораторна установка: 1 – невідоме джерело $\mathcal{E}_x$; 2 – еталонне джерело $\mathcal{E}_N$; 3 – зовнішнє джерело $\mathcal{E}_0$; 4 – реохорд; 5 – гальванометр; 6 – перемикач для перемикання невідомого та еталонного джерел K_1; 7 – ключ K_2; 8 – магазин опорів; 9 – тумблер підключення $\mathcal{E}_x$ послідовно з $\mathcal{E}_0$

3. Запишіть у таблицю 1 інструментальну похибку $\Delta_1 l$ визначення довжини дроту реохорда.
4. Встановіть на магазині опорів 8 опір $R_0 = 0$.
5. За допомогою перемикача K_1 6 підключіть невідоме джерело $\mathcal{E}_x$ 1.
6. Виставте бігунок реохорда так, щоб струм через гальванометр був відсутній. Занесіть значення l_x до таблиці 1.

Увага! *Щоб запобігти виходу з ладу гальванометра, для розриву вітки поставлено ключ K_2. У процесі компенсації слід замикати вітку гальванометра шляхом короткочасних натискань на даний ключ.*

7. За допомогою перемикача K_1 підключіть еталонне джерело $\mathcal{E}_N$ 2, аналогічним чином визначте l_N та занесіть його значення до таблиці 1.

   Увага! *Щоб запобігти виходу з ладу еталонного джерела ЕРС, не слід тримати його включеним тривалий час. Тому виміри потрібно виконувати якнайшвидше, після чого треба відключати еталонне джерело перемикачем K_1.*

Таблиця 1 – До визначення ЕРС $\mathcal{E}_x$

№ досліду	l_{xi}, мм	$\lvert\langle l_x\rangle - l_{xi}\rvert$, мм	l_{Ni}, мм	$\lvert\langle l_N\rangle - l_{Ni}\rvert$, мм
1				
2				
…				
$N-1$				
N				
середнє $\langle ... \rangle$		—		—

$\mathcal{E}_N = \mathcal{E}_N\,(20°\text{C}) + \Delta'\mathcal{E}_N =$, В	$\Delta_1 l =$, мм	$\Delta_2 l_x =$, мм	$\Delta_2 l_N =$, мм

8. Повторіть усі вищенаведені операції ще чотири рази та заповніть таблицю 1.
9. У перший рядок таблиці 2 запишіть дані останнього вимірювання з таблиці 1.
10. Встановіть на магазині опорів 8 опір $R_0 = 0{,}1$ Ом та визначте l_x та l_N. Результати занесіть до таблиці 2. ЕРС $\mathcal{E}_x$ для кожного досліду визначити із співвідношення (9).
11. Повторіть п.10 ходу роботи ще 3 рази для $R_0 = 0{,}2$; 0,3; 0,4 Ом.

    Унаслідок цього експерименту ви повинні пересвідчитись, що результати не залежать від величини опору R_0.

Таблиця 2 – Демонстрація незалежності результатів від R_0

№ досліду	R_0, Ом	l_{xi}, мм	l_{Ni}, мм	$\mathcal{E}_{xi}$, В
	0			
	0,1			
	0,2			
	0,3			
	0,4			

12. Визначте середні значення $\langle l_x \rangle$ та $\langle l_N \rangle$ та величини $\langle l_x \rangle - l_{xi}$ та $\langle l_N \rangle - l_{Ni}$. Результати запишіть до відповідних колонок таблиці 1.
13. Обчисліть $\mathcal{E}_x$ за допомогою формули (9) та даних таблиці 1. Тут як l_x та l_N слід брати обчислені за даними таблиці 1 середні значення $\langle l_x \rangle$ та $\langle l_N \rangle$.
14. За допомогою даних таблиці 1 обчисліть абсолютну похибку визначення ЕРС за формулою

$$\Delta\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_x \sqrt{\left(\frac{\Delta\mathcal{E}_N}{\mathcal{E}_N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_N}{\langle l_N \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_x}{\langle l_x \rangle}\right)^2}\,, \qquad (10)$$

де як $\Delta\mathcal{E}_N$ потрібно брати одиницю найменшого розряду величини $\mathcal{E}_N$,

$$\Delta l_N = \sqrt{(\Delta_1 l)^2 + (\Delta_2 l_N)^2}\,, \qquad (11)$$

$$\Delta_2 l_N = 3\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\langle l_N \rangle - l_{Ni})^2} \quad (N = 5)\,. \qquad (12)$$

Абсолютну похибку Δl_x слід визначати аналогічно до виразів (11) та (12) зміною індексу «N» на «x».
15. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “*задовільно*”

1. Що називають електричним струмом? Умови його існування.
2. Дати визначення сили струму.
3. Сформулювати закон Ома в інтегральній формі для повного кола та для ділянки кола.
4. Яка перевага методу компенсації над прямими вимірюваннями ЕРС?
5. Викласти послідовність виконання роботи.

На оцінку “*добре*”

6. Розкрити поняття “сторонні сили” та “електрорушійна сила”.
7. Розкрити поняття “електричний опір”.
8. Записати закон Ома в диференціальній формі для ділянки кола та для повного кола. Показати зв’язок між диференціальною та інтегральною формами запису.
9. Викласти сутність вимірювання ЕРС методом компенсації.
10. Накреслити принципову схему лабораторної установки. Пояснити призначення всіх її елементів.

На оцінку “*відмінно*”

11. Одержати розрахункову формулу (9) для визначення ЕРС $\mathcal{E}_x$ невідомого джерела методом компенсації.
12. Вивести формулу для знаходження похибки визначення ЕРС $\mathcal{E}_x$.
13. Записати закон Джоуля-Ленца в диференціальній та інтегральній формах. Показати взаємозв’язок між ними.
14. Записати правила Кірхгофа та пояснити їх застосування на прикладі.
15. Знайти струми у кожній вітці електричної схеми, заданої викладачем, за правилами Кірхгофа.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 2. Електрика. Магнетизм. Електромагнітні коливання та хвилі. Оптика. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2003.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество. – М.: Наука, 1980.