

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Лабораторна робота № 2-2

**ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ МЕТОДОМ
КОМПЕНСАЦІЇ**

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи

1. Вивчити компенсаційний метод вимірювання електрорушійної сили (далі е.р.с.) і виміряти значення невідомої е.р.с. цим методом.

2. Оцінити невизначеність значення визначеної невідомої е.р.с. та записати кінцевий результат вимірювання.

3. Зробити висновки по роботі.

Теоретична частина

Електрорушійна сила і закони Ома

Для того, щоб в провіднику існував струм необхідно підтримувати в ньому електричне поле, тобто підтримувати різницю потенціалів $\phi_1 - \phi_2$. Якщо цього не робити, то електрони, рухаючись до торця 1 (рис.1), будуть понижувати його потенціал ϕ_1 , підвищувати потенціал торця 2 і з часом різниця $\phi_1 - \phi_2$ стане рівна нулю, а поле всередині провідника зникне і струм перестане існувати. Щоб підтримувати сталою різницю потенціалів $\phi_1 - \phi_2 \neq 0$, електрони необхідно переміщувати від позитивних заря-

дів (з торця 1) до негативних (до торця 2), тобто виконувати роботу переміщення проти сил електростатичного поля, витрачаючи при цьому енергію. Таке переміщення можна здійснювати тільки за допомогою сил неелектричної природи - *сторонніх сил*.

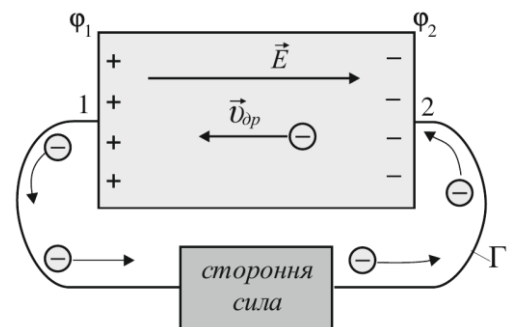


Рис.1. Роль е.р.с. у електричному колі

Ці сили можуть бути обумовлені хімічними процесами в гальванічних елементах і акумуляторах; дифузією носіїв струму в неоднорідному середовищі; електричними полями, які створюються магнітними полями, що змінюються з часом; тощо. Сторонні сили не можуть бути кулонівськими силами. Під дією кулонівських сил заряди можуть тільки перерозподілятися поверхнею

провідника, яка одразу ж стає екіпотенційною. Отже, на певних ділянках кола (ділянка 1-2 на рис.1) сили, що діють з боку електричного поля $\vec{E}$ на носії заряду, не є єдиною причиною струму.

Сторонні сили, які діють на заряди, разом із силами поля $\vec{E}$ зумовлюють постійний струм. Щоб врахувати дію сторонніх сил, вводять поняття вектора *напруженості поля сторонніх сил* $\vec{E}_{ct}$, який за визначенням чисельно дорівнює силі, яка діє на одиничний позитивний заряд. Сторонні сили, переміщуючи електричні заряди, виконують роботу. Тому фізична величина, що чисельно дорівнює роботі, яка виконується сторонніми силами під час переміщення одиничного позитивного заряду, називається *електрорушійною силою* (е.р.с), що діє в колі:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ct}}{q}, \quad (1)$$

де A_{ct} - робота сторонніх сил по переміщенні заряду q в колі.

Стороння сила $\vec{F}_{ct}$, що діє на заряд q , дорівнює

$$\vec{F}_{ct} = q\vec{E}_{ct}.$$

Схематичне зображення сторонніх сил у електричних колах показано на рис.2 та рис.3.

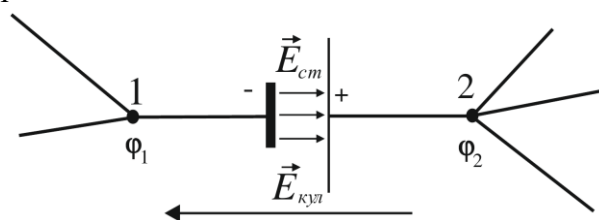


Рис.2. Сторонні сили. Напруженість поля сторонніх сил $\vec{E}_{ct}$ діє в межах пристрою (джерела струму) і направлена від "мінуса" до "плюса".

Робота сторонніх сил по переміщенню в напрямі струму заряду q вздовж усього замкнутого кола Γ (рис.1) дорівнює

$$A_o = \oint_{\Gamma} \vec{F}_{ct} d\vec{l} = q \oint_{\Gamma} \vec{E}_{ct} d\vec{l}.$$

Тоді

$$\mathcal{E} = \frac{A_o}{q} = \oint_{\Gamma} \vec{E}_{ct} d\vec{l}. \quad (2)$$

Е.р.с., що діє в замкнутому колі, визначається циркуляцією вектора напруженості сторонніх сил $\vec{E}_{ct}$.

Е.р.с., яка діє на якійсь ділянці кола 1-2 (рис.2), дорівнює

$$\mathcal{E} = \int_1^2 \vec{E}_{ct} d\vec{l}. \quad (3)$$

Результуюча сила, що діє в колі на заряд:

$$\vec{F} = \vec{F}_{ct} + \vec{F}_{кул} = q(\vec{E}_{ct} + \vec{E}_{кул}). \quad (4)$$

Робота, яка виконується результуючою силою над зарядом q на ділянці кола 1-2 (рис.3) дорівнює:

$$A_{12} = q\mathcal{E} + q(\phi_1 - \phi_2). \quad (5)$$

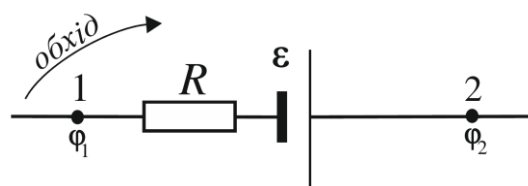


Рис.3.

Ця робота проявляється у виділенні тепла на цій ділянці кола. Згідно закону збереження енергії вираз (1.5) можемо переписати так:

$$A_{12} = Q_{12} = I^2 R_{12} \Delta t =$$

$$qIR_{12} = qU_{12} = q\mathcal{E} + q(\phi_1 - \phi_2). \quad (6)$$

При цьому враховано, що $q = I\Delta t$. R_{12} – опір ділянки кола 1 – 2.

Напругою U_{12} на ділянці кола 1-2 (рис.3) називається фізична величина, що визначається роботою, яка виконується сумарним полем електростатичних і сторонніх сил при переміщенні одиничного позитивного заряду на даній ділянці кола. Отже із (6) отримаємо, що

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \phi_1 - \phi_2 + \mathcal{E}. \quad (7)$$

Поняття напруги є узагальненим поняттям різниці потенціалів: напруга на кінцях ділянки кола дорівнює різниці потенціалів в тому випадку, якщо на цій ділянці не прикладена е.р.с.

Ділянка кола, на якій на носії струму діють сторонні сили, називається *неоднорі-*

дною. Ділянка кола, на якій не діють сторонні сили, називається *однорідною*. Для однорідної ділянки кола $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ і тоді, враховуючи, що із (6) витікає співвідношення $IR_{12} = U_{12}$, струм на однорідній ділянці кола буде визначатись за формулою

$$I = \frac{U_{12}}{R_{12}} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_{12}}. \quad (8)$$

Формула (8) це є **закон Ома для однорідної ділянки кола**.

Враховуючи співвідношення (6), рівняння (1.7) перепишемо так:

$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}, \quad (9)$$

де через $\mathcal{E}_{12}$ позначено сумарну е.р.с., яка діє на ділянці кола 1–2.

Поділивши (1.9) на R_{12} отримаємо математичний вираз **закону Ома для неоднорідної ділянки кола**:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R_{12}}. \quad (10)$$

При використанні закону (10) необхідно користуватись певними *правилами*:

1. Вибрати довільно обхід на ділянці кола 1–2 (рис.3).
2. Вибрати довільно напрям струму на цій ділянці. Якщо напрямок струму і напрям обходу співпадають, то силу струму треба приймати, як позитивну величину ($I > 0$). Якщо напрям струму і напрям обходу на ділянці 1-2 протилежні, то ($I < 0$).

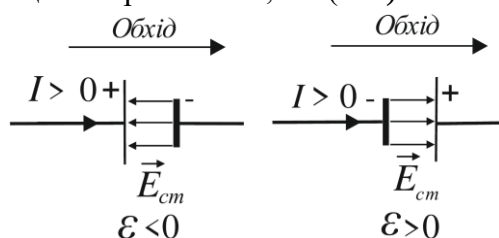


Рис.4.

3. Е.р.с. $\mathcal{E}$ є теж величина алгебраїчна. Вважається, що дія $\mathcal{E}$ має напрям, що співпадає з напрямком поля $\vec{E}_{cm}$ (рис.4.). Якщо напрям $\vec{E}_{cm}$ співпадає із напрямком обходу на ділянці 1–2, то $\mathcal{E} > 0$. Якщо напрям поля $\vec{E}_{cm}$ і напрям обходу протилежні, то $\mathcal{E} < 0$ (рис. 4.). Закон Ома (10) для першого випадку запишеться так:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 - \mathcal{E}}{R_{12}},$$

а для другого випадку

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}}{R_{12}}.$$

Якщо електричне коло замкнуте, то точки 1 і 2 ділянки кола (рис. 3) співпадають. Це означає, що $\varphi_1 = \varphi_2$ і $R_{12} = R$, де R – загальний опір кола. Тому **закон Ома для замкнутого кола** має такий вигляд:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}, \quad (11)$$

де $\mathcal{E}$ – алгебраїчна сума всіх е.р.с., які діють у цьому колі.

Нагадаємо ще правила Кірхгофа.

Перше правило Кірхгофа можна сформулювати так: *алгебраїчна сума усіх сил струмів, що сходяться в будь-якому вузлі розгалуженого кола, дорівнює нулю*:

$$\sum_{i=1}^m I_i = 0. \quad (12)$$

Друге правило Кірхгофа: *у будь-якому простому замкнутому контурі, довільно обраному у розгалуженому електричному колі, алгебраїчна сума добутків сил струмів на опори відповідних ділянок цього контуру дорівнює алгебраїчній сумі е.р.с., що діють у контурі*:

$$\sum IR + \sum I_r = \sum \mathcal{E}. \quad (13)$$

Визначення невідомої е.р.с. методом компенсації

Електрорушійна сила (е.р.с.) гальванічного елемента чисельно дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиничного позитивного заряду на ділянці дії цих сил. При розімкнутому колі е.р.с. гальванічного елемента дорівнює різниці потенціалів, яка виникає на його полюсах.

Якщо різниця потенціалів U вимірюється при наявності струму, то вона завжди є меншою за е.р.с. $\mathcal{E}$ через падіння напруги на внутрішньому опорі елемента r , тобто

$$U = \mathcal{E} - I \cdot r, \quad (14)$$

де I – струм через елемент, r внутрішній опір елемента. Тому звичайні вольтметри, дія яких пов'язана з протіканням електричного струму через рамку приладу, не застосовуються для точного вимірювання е.р.с., особливо малих значень е.р.с. Визначення е.р.с. елементів виконується шляхом порівняння з е.р.с. еталонного, так званого «нормального» елемента, який має відоме і стабільне значення е.р.с. протягом значного проміжку часу ($\mathcal{E}_n = 1,01860$ В). Це робиться за допомогою компенсаційної схеми з реохордом АС, яка представлена на рис.5.

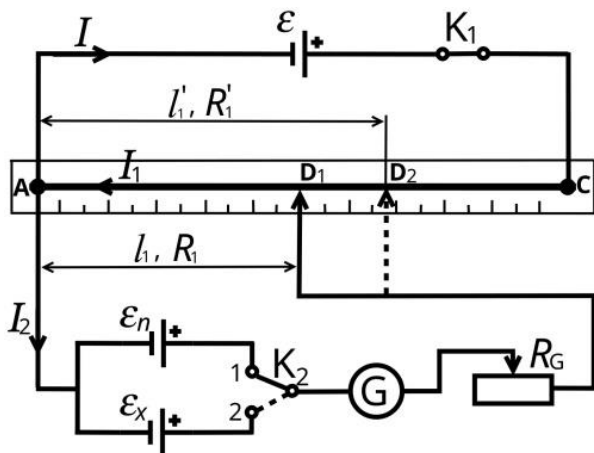


Рис.5 Компенсаційна схема для вимірювання невідомої ЕРС. Тут $\mathcal{E}_n$ – «нормальний» елемент Вестона, $\mathcal{E}_x$ – джерело живлення з невідомою ЕРС, $\mathcal{E}$ – джерело сталого струму, R_G – додатковий опір для обмеження струму через гальванометр G при відсутності компенсації.

На схемі G – нуль-гальванометр; AC – реохорд з рухомим контактом D; K_1 – ключ для увімкнення допоміжної батареї $\mathcal{E}$; K_2 – ключ для почергового увімкнення в коло «нормального» елемента $\mathcal{E}_n$ і елемента з невідомою е.р.с. $\mathcal{E}_x$; R_G – додатковий опір для обмеження струму через гальванометр. «Нормальний» елемент $\mathcal{E}_n$, невідома е.р.с. $\mathcal{E}_x$ і додаткова батарея $\mathcal{E}$ вмикається в коло в точці A однойменними полюсами.

Гальванометр G показує силу струму, який протікає через «нормальний» елемент $\mathcal{E}_n$ або невідоме джерело е.р.с. $\mathcal{E}_x$, в залежності від положення ключа K_2 .

Знайдемо робочу формулу для даного лабораторного завдання. Якщо джерело невідомої е.р.с. не ввімкнуте в схему (ключ K_2 в положенні (1)), то згідно з першим правилом Кірхгофа (12) для вузла A можемо записати, що

$$I = I_1 + I_2, \quad (15)$$

де I , I_1 , I_2 – струми, протікання яких показано на рис.5. За другим правилом Кірхгофа (13) для контура $AD_1R_GE_nA$ отримаємо рівняння:

$$I_2 R_G - I_1 R_1 = -\mathcal{E}_n, \quad (16)$$

де R_G – опір ділянки кола з гальванометром.

Переміщуючи контакт D, можна добитись, щоб струм I_2 дорівнював нулю, що фіксується по відсутності відхилення стрілки гальванометра G (положення контакту D_1). При $I_2 = 0$, $I = I_1$ із рівнянь (15) і (16) отримаємо:

$$I_1 R_1 = \mathcal{E}_n. \quad (17)$$

Таким чином спад напруги $I_1 R_1$ на ділянці кола AD_1 за величиною дорівнює е.р.с. «нормального» елемента $\mathcal{E}_n$. Вони компенсують одне одного так, що струм через нормальний елемент дорівнює нулю. Далі замість «нормального» елемента $\mathcal{E}_n$ за допомогою ключа K_2 (положення (2)) вмикаємо елемент з невідомою е.р.с. $\mathcal{E}_x$. Переміщуючи рухомий контакт D, знову добиваємось, щоб

струм через гальванометр не протікав. При цьому положення контакту D буде іншим (положення D_2 на рис.5), ніж у випадку з «нормальним» елементом і опір ділянки AD_2 , буде мати інше значення. Позначимо цей опір R'_1 . Однак і в цьому випадку за відсутності струму через гальванометр, тобто $I_2 = 0$ повинна виконуватися умова, аналогічна до попередньої (17), тобто

$$I_1 R'_1 = \mathcal{E}_x. \quad (18)$$

Із співвідношень (17) і (18) отримуємо

$$\frac{R_1}{R'_1} = \frac{\mathcal{E}_n}{\mathcal{E}_x}, \quad (19)$$

або

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n \frac{R'_1}{R_1}. \quad (20)$$

Таким чином, якщо відома е.р.с. $\mathcal{E}_n$ “нормального” елемента і відношення $\frac{R'_1}{R_1}$, то за формулою (20) знаходимо невідому е.р.с. $\mathcal{E}_x$. Компенсаційний метод вимірювання невідомої е.р.с. не вимагає знання самих значень опорів R_1 і R'_1 , а лише їх відношення, яке може бути встановлене за допомогою рухомого контакту D . Для однорідного проводу, з якого виготовлений реохорд AC , опори окремих його ділянок відносяться між собою як їхні довжини. Тому відношення опорів в рівнянні (20) можна замінити відношенням довжин ділянок реохорда AD_2 і AD_1 , тобто

$$\frac{AD_2}{AD_1} = \frac{R'_1}{R_1} = \frac{l'_1}{l_1}.$$

Тоді робоча формула для визначення невідомої е.р.с. буде мати вигляд:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n \frac{l'_1}{l_1}. \quad (21)$$

Переваги методу компенсації для вимірювання е.р.с.

1. Сила струму, що протікає через елементи, електрорушійні сили яких порівнюються між собою, близька до нуля. Тому спад напруги всередині елемента, який знижує значення різниці потенціалів на полюсах елемента, практично відсутній.

2. При компенсаційному методі вимірювання гальванометр працює як нульовий прилад (його кількісні покази в результат вимірювання не входять).

3. Величина е.р.с. допоміжної батареї $\mathcal{E}$ теж не входять в формулу (30). Необхідно тільки, щоб її значення під час вимірювання було сталим. Таку роль може з успіхом виконувати батарея акумуляторів або інше джерело е.р.с.

Зауваження. Для компенсації необхідно, щоб $\mathcal{E}$ була більшою за $\mathcal{E}_n$ і $\mathcal{E}_x$.

Експериментальна частина

Прилади та пристрої

1. Нормальний елемент Вестона.
2. Елемент з невідомою е.р.с.
3. Джерело сталого струму УИП-2
4. Нуль-гальванометр G.
5. Реохорд.
6. Обмежувальний опір.
7. Ключі.
8. З'єднувальні проводи.
9. Лінійка.

Установка

Схема установки для вимірювання електрорушійної сили е.р.с. джерела струму методом компенсації зображена на рис.5, а лабораторна установка на рис.6.

Як джерело $\mathcal{E}$ сталого струму використано стабілізоване електронне джерело на 3-9 В (універсальне джерело УИП-2). За еталонне джерело струму $\mathcal{E}_n$ з відомою е.р.с. використовується нормальний елемент Вестона. Електрорушійні сили $\mathcal{E}_n$ та $\mathcal{E}_x$ компенсуються падінням напруги на ділянці AD реохорда AC . Ключ K_2 використовується для замикання кола гальванометра G на нормальний елемент $\mathcal{E}_n$ (позиція 1) або елемент з невідомою е.р.с. $\mathcal{E}_x$ (позиція 2).

Щоб уникнути протікання великого струму через чутливий гальванометр G за відсутності компенсації в коло введено

обмежувальний опір R_G .

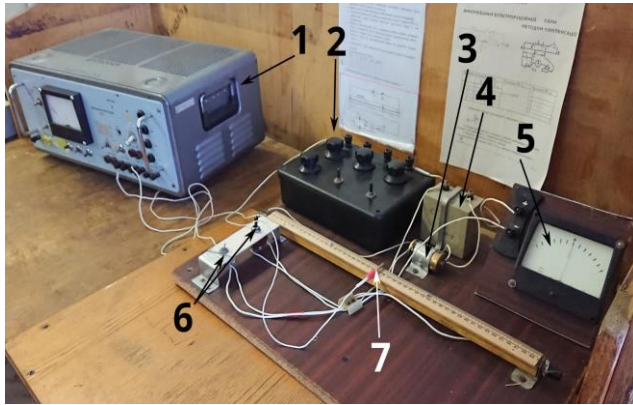


Рис. 6. Лабораторна установка. Тут 1 - джерело сталого струму УИП-2, 2 - додатковий опір R_G , 3 - джерело живлення з невідомою е.р.с ($\mathcal{E}_x$), 4 - нормальний елемент Вестона ($\mathcal{E}_n$), 5 - гальванометр G , 6 - ключі для підключення е.р.с $\mathcal{E}_x$ та $\mathcal{E}_n$, 7 - повзунок реохорда D .

Порядок виконання роботи

1. Поставити ключ K_2 у нейтральне положення.
2. Встановити повзунок реохорда D приблизно посередині.
3. Ввести обмежувальний додатковий опір R_d і замкнути ключ K_1 .
4. Поставити ключ K_2 у положення 1 (замкнути у коло гальванічний елемент $\mathcal{E}_n$ з відомою е.р.с.). Переміщуючи повзунок реохорда D знайти таке його положення, при якому струм у колі гальванометра буде дорівнювати нулю.
5. Поставити ключ K_2 у нейтральне положення і зменшити опір R_G до нуля. Потім поставити K_2 у положення 1 і переміщенням повзунка D реохорда AC остаточно встановити стрілку гальванометра на нуль. Визначити довжину ділянки реохорда $AD_1 = l_1$ та записати її в таблицю 3. Повторити вимірювання 5 разів та занести результати в таблицю.
6. Поставити ключ K_2 у положення 2 (замкнути у коло елемент $\mathcal{E}_x$ з е.р.с., яку потрібно визначити). Провести вимірювання аналогічні пунктам 4 та 5 і визначити довжину ділянки реохорда $AD_2 = l'_1$. Повторити вимірювання 5 разів

та записати отримані дані у таблицю 1.

Обробка результатів вимірювань

1. За формулою (21) знайти невідому електрорушійну силу $\mathcal{E}_x$.
2. За формулою $\langle \mathcal{E}_x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_{xi}}{n}$ знайти середнє значення е.р.с. невідомого елемента.
3. Розрахувати сумарну стандартну невизначеність типу А за формулою

$$U_{CA}(\mathcal{E}_x) =$$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial l_1} U_A(l_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial l'_1} U_A(l'_1)\right)^2},$$

де стандартні невизначеності типу А довжин l_1 та l'_1 знаходяться за формулами

$$U_A(l_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{1i} - \langle l_1 \rangle)^2}{n(n-1)}},$$

$$U_A(l'_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l'_{1i} - \langle l'_1 \rangle)^2}{n(n-1)}}.$$

4. Розрахувати сумарну стандартну невизначеність типу В за формулою

$$U_{CB}(\mathcal{E}_x) = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial \mathcal{E}_n} U_B(\mathcal{E}_n)\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial l'_1} U_B(\mathcal{E}_n)\right)^2} = \left| \frac{l'_1}{l_1} U_B(\mathcal{E}_n) \right|,$$

де $U_B(\mathcal{E}_n) = \frac{q}{2\sqrt{3}}$, а q - одиниця найменшого розряду числового значення константи $\mathcal{E}_n$.

5. Порахувати розширену невизначеність за формулою

$$U = k U_C(\mathcal{E}_x),$$

де $U_C(\mathcal{E}_x) = \sqrt{U_{CA}^2(\mathcal{E}_x) + U_{CB}^2(\mathcal{E}_x)}$ - сумарна невизначеність, а k - коефіцієнт охоплення (або коефіцієнт Стюдента) див. Додаток 3 інструкції до даної роботи.

6. Занести всі отримані дані розрахунків в таблицю 1.
7. Зробити висновок про те, які фактори мали більш суттєвий вплив на точність вимірів і про точність методу вимірювання е.р.с. методом компенсації.

Таблиця 1

n	$l_1, \text{см}$	$l'_1, \text{см}$	$\varepsilon_x, \text{В}$
1			
2			
3			
4			
5			
$\varepsilon_n = 1,0186 \text{ В}$ Невизначеності: $U_{CA}(\varepsilon_x) =$ $U_{CB}(\varepsilon_x) =$ $U(\varepsilon_x) =$			$\langle \varepsilon_x \rangle =$ $\delta =$

Висновки

Приклади обчислень

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома для однорідної ділянки кола.
2. Сформулюйте закони Ома для неоднорідної ділянки кола та повного кола.
3. Сформулюйте правила Кірхгофа.
4. Що називається е.р.с. джерела струму та яке її призначення?
5. Яка роль сторонніх сил у електричному колі? Чому ці сили називають сторонніми?
6. З якою метою всі елементи е.р.с. в компенсаційній схемі лабораторної роботи з'єднуються одноіменними полюсами?
7. Навіщо у коло гальванометра G на схемі рис.5 підключається додатковий опір R_G ?
8. Яка роль нормального елементу Вестона у даній роботі?
9. Які переваги компенсаційного методу вимірювання невідомої е.р.с. у порівнянні з безпосереднім її вимірюванням вольтметром? Відповідь пояснити.
10. Вивести робочу формулу (21).

ЛІТЕРАТУРА

1. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.- 513с. - Назва з екрану. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>
2. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. [Електронний ресурс]: навч. посіб./ КПІ ім. Ігоря Сікорського. -2018.- 88с.-Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>
3. Лопатинський Е.С., Зачек І. Р., Ільчук Г. А., Романишин Б.М.. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2009.-386с.
4. Кучерук І.М., Горбачук І.І., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Електрика й магнетизм.- К: Техніка, 2001р.
5. Скіцько І.Ф., Корнієнко Є.Г. Вивчення законів постійного струму на прикладах містка Уїтстона та компенсаційної схеми: Інструкція до лабораторних робіт [Електронний ресурс] : навч. посіб. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,34 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 60 с. Доступ. - <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48715>.

ЗАТВЕРДЖЕНО

на засіданні кафедри загальної фізики
Протокол № 3 від 23.02. 2022р.
Протокол до лабораторної роботи
підготували доцент І.Ф. Скіцько
та ст. викладач Є.Г. Корнієнко