

## Лабораторна робота № 2-1

### Вимірювання опору за допомогою містка постійного струму

Виконав \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_

#### Мета роботи

1. Вивчити метод вимірювання опору за допомогою мостової схеми і навчитися вимірювати опір містком постійного струму.

2. Оцінити невизначеність значення визначеного невідомого опору та записати кінцевий результат вимірювання.

#### Теоретична частина

##### Закони Ома

Напругою  $U_{12}$  на ділянці кола 1-2 (рис.1) називається фізична величина, що визначається роботою, яка

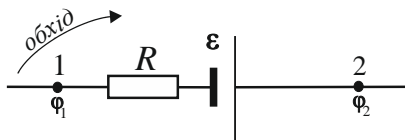


Рис.1.

виконується сумарним полем електростатичних і сторонніх сил при переміщенні одиничного позитивного заряду на даній ділянці кола. Отже

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}. \quad (1)$$

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 неоднорідною. Ділянка кола, на якій не діють сторонні сили, називається однорідною. Для однорідної ділянки кола

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2)$$

Враховуючи, що  $U_{12} = IR_{12}$ , де  $R_{12}$  – загальний опір ділянки кола 1-2 (рис.1), струм на однорідній ділянці кола буде визначатись за формулою

$$I = \frac{U_{12}}{R_{12}} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_{12}}. \quad (3)$$

Формула (3) це є **закон Ома для однорідної ділянки кола**.

Перепишемо (1) так:

$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}, \quad (4)$$

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

Поділивши (4) на  $R_{12}$  отримаємо математичний вираз **закону Ома для неоднорідної ділянки кола**:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R_{12}}. \quad (5)$$

При користуванні законом (5) необхідно користуватись певними *правилами*:

1. Вибрати довільно обхід на ділянці кола 1–2 (рис.1).

2. Вибрати довільно напрям струму на цій ділянці. Якщо напрям струму і напрям обходу співпадають, то алгебраїчну величину струму треба приймати, як позитивну величину ( $I > 0$ ). Якщо напрям струму і напрям обходу на ділянці 1-2 протилежні, то ( $I < 0$ ) (див. рис.2).

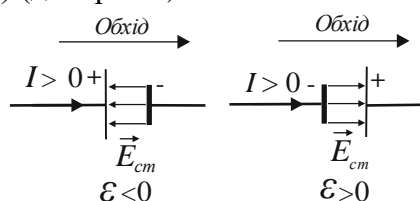


Рис.2.

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. 2.). Закон Ома (5) 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 и 2 ділянки кола (рис.1) 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:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}, \quad (6)$$

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

## Розрахунок розгалужених електричних кіл за допомогою правил Кірхгофа

За допомогою закону збереження заряду і закону Ома (5) для неоднорідної ділянки кола можна розрахувати будь-яке складне електричне коло. Такий розрахунок значно полегшується, якщо застосувати два правила Кірхгофа.

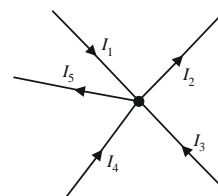


Рис.3.

**Перше правило Кірхгофа** встановлює взаємозв'язок між струмами в провідниках, що сходяться у вузлі. **Вузлом** розгалуженого кола називають точку, в якій сходяться три і більше провідників (рис.3). Нехай постійні струми  $I_1, I_3, I_4$  входять у вузол, а струми  $I_2, I_5$  виходять із нього. Так як у вузлах заряди не накопичуються, то кількість заряду, що приносять струми  $I_1, I_3, I_4$  до вузла дорівнює кількості заряду, що виносять струми  $I_2, I_5$  з вузла. Тому на основі **закону збереження заряду** можна записати, що

$$I_1 + I_3 + I_4 - I_2 - I_5 = 0, \quad (7)$$

або

$$-I_1 - I_3 - I_4 + I_2 + I_5 = 0, \quad (8)$$

Рівняння (7) або (8) виражають перше правило Кірхгофа. Для зручності користування цими рівняннями струмам, що входять у вузол, надають один знак, а струмам, що виходять – протилежний. Так, якщо вважати струм, що входить у вузол, додатним, а струм, що виходить із вузла, – від'ємним, то перше правило Кірхгофа можна сформулювати так: **алгебраїчна сума усіх сил струмів, що сходяться в будь-**

якому вузлі розгалуженого кола, дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^m I_i = 0. \quad (9)$$

**Друге правило Кірхгофа.** Виділимо в розгалуженому колі простий замкнутий контур, наприклад  $ABCD$  (рис.4).

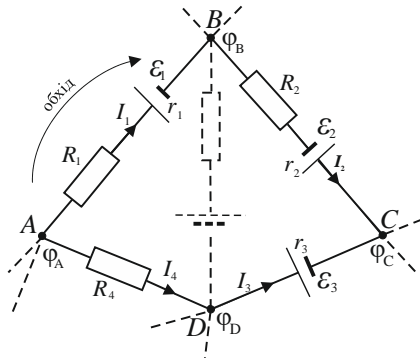


Рис.4.

Застосуємо закон Ома (5) до кожної ділянки кола цього контуру, виконуючи правила для використання закону Ома (5). Тоді згідно рис.4 запишемо такі рівняння:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + I_1 r_1 &= \varphi_A - \varphi_B - \mathcal{E}_1; \\ I_2 R_2 + I_2 r_2 &= \varphi_B - \varphi_C + \mathcal{E}_2; \\ -I_3 r_3 &= \varphi_C - \varphi_D + \mathcal{E}_3; \\ -I_4 R_4 &= \varphi_D - \varphi_A. \end{aligned}$$

Додамо почленно ліві і праві частини цих рівностей. Тоді отримаємо, що

$$I_1 R_1 + I_1 r_1 + I_2 R_2 + I_2 r_2 - I_3 r_3 - I_4 R_4 = -\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3. \quad (10)$$

Аналогічні співвідношення отримуються для будь-якого простого замкнутого контуру. Узагальнюючі співвідношення (1.15), запишемо, що

$$\sum IR + \sum Ir = \sum \mathcal{E}. \quad (10)$$

Співвідношення (10) виражає **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.**

У сумі (10) знаки струмів і е.р.с.  $\mathcal{E}$  (див.правила на стор.2) беруть згідно вибраного обходу по контуру (рис.4). Обхід для всіх замкнутих контурів розгалуженого кола треба здійснювати в одному напрямку. Найчастіше обхід контура вибирають за стрілкою годинника.

### Правила при використанні правил Кірхгофа до розрахунку розгалужених електричних кіл:

- 1) визначити вузли та замкнуті контури електричних кіл;
- 2) вибрати (довільно) напрямки струмів на всіх ділянках замкнутого контуру позначивши їх стрілочками;
- 3) записати перше правило Кірхгофа (9) для всіх незалежних вузлів. Вважати струми, що входять у вузол – додатніми, а струми, що виходять із вузла, – від'ємними. Число незалежних рівнянь складених за (9) на одиницю менше числа вузлів;
- 4) вибрати напрям обходу замкнутого контуру (за годинниковою стрілкою чи проти);
- 5) при складанні рівнянь за другим правилом Кірхгофа (10) знаки струмів і е.р.с. на ділянках замкнутого контуру вибирати згідно правил користування законом Ома для неоднорідної ділянки кола (стор. 2);
- 6) щоб усі рівняння, які складені на основі другого правила Кірхгофа, були незалежними, необхідно кожен раз розглянути контури, що містять хоча б одну ділянку кола, що не входила у вже розглянуті контури;
- 7) якщо деякі розв'язки складених рівнянь на основі правил Кірхгофа є від'ємними, то це означає, що напрямки

струмів на ділянках кола, або полярність включення цих е.р.с. треба змінити на протилежні.

Якщо при розв'язуванні системи рівнянь, складених на основі (9) і (10), сили струмів виявились додатними, то це означає, що напрямок їх обрано правильно. У противному разі дійсний напрямок струму протилежний до обраного нами.

### Вимірювання опору за допомогою містка постійного струму

Мостовим називають електричне коло, в якому можна виділити два розгалуження опорів, значення опору між якими дорівнює нескінченності при відповідному співвідношенні параметрів елементів кола, і скінченному значенню опору, якщо це співвідношення не виконується.

Класичним методом вимірювання опору є метод містка постійного струму (міст Уїтстона). **Вимірювальний міст Уїтстона** - пристрій для вимірювання електричного опору, запропонований в 1833 році Самуелем Хантером Крісті, а в 1843 році удосконалене Чарльзом Уїтстоном. Електричний аналог важільних аптекарських ваг. Принцип виміру заснований на взаємній компенсації опорів двох ланок, одне з яких включає опір, який вимірюється. Як індикатор зазвичай використовується чутливий гальванометр, показання якого мають дорівнювати нулю в момент рівноваги моста.

Класична схема містка постійного струму (міст Уїтстона), яка представлена на рис.5, складається з відомих опорів  $R_m, R_1, R_2$ , невідомого опору  $R_x$ , нуль-гальванометра  $G$  і джерела е.р.с.  $\mathcal{E}$ . Опори  $R_x, R_m, R_1, R_2$  складають так звані плечі містка.  $R_m$  - це магазин опорів.

В найпростішому виконанні частина схеми  $AC$  є натягнутий однорідний провід

(реохорд) із контактом  $D$ , який може ковзати вздовж реохорда  $AC$ , змінюючи таким чином співвідношення між опорами  $R_1, R_2$  ділянок проводу  $AD$  і  $DC$ . До точки з'єднання двох опорів  $R_x$  і  $R_m$  (точка  $B$  на рис.5) і до рухомого контакту  $D$  під'єднується гальванометр  $G$ , а до точок схеми  $A$  і  $C$  вмикається джерело е.р.с.  $\mathcal{E}$ .

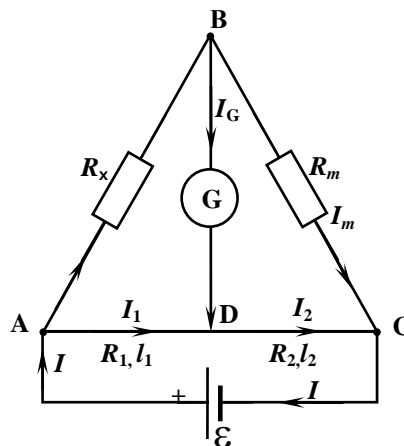


Рис.5. Схема містка постійного струму (міст Уїтстона)

При довільному співвідношенні опорів, які складають місткову схему через гальванометр протікає струм, тому що між точками  $B$  і  $D$  є різниця потенціалів і струм через гальванометр буде:

$$I_G = \frac{\varphi_B - \varphi_D}{R_G},$$

де  $R_G$  – опір гальванометра.

Однак, переміщуючи контакт  $D$ , можна зробити так, щоб сила струму через гальванометр дорівнювала нулю. Це буде відповідати тому, що  $\varphi_B - \varphi_D = 0$ , або опір між точками  $B$  і  $D$  **нескінченно великий**.

Тоді між опорами  $R_x, R_m, R_1, R_2$  має місце співвідношення:

$$\frac{R_x}{R_m} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (11)$$

Дійсно, коли струм через гальванометр не протікає, то потенціали точок  $B$  і  $D$  однакові. А це означає, що згідно другого правила Кірхгофа (10) для кола  $A-B-D-A$

$$I_x R_x - I_1 R_1 = 0,$$

або

$$I_x R_x = I_1 R_1. \quad (12)$$

Так само для кола В-С-D-В

$$I_m R_m - I_2 R_2 = 0,$$

тобто

$$I_m R_m = I_2 R_2. \quad (13)$$

Розділивши ліві і праві частини співвідношень (12) і (13), отримаємо

$$\frac{I_x R_x}{I_m R_m} = \frac{I_1 R_1}{I_2 R_2}. \quad (14)$$

Якщо струм через гальванометр не протікає, то  $I_x = I_m$ ,  $I_1 = I_2$  і тоді

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_m. \quad (15)$$

Сам процес вимірювання невідомого опору  $R_x$  за допомогою місткової схеми полягає в тому, що на магазині опорів виставляється опір  $R_m$  по можливості близький за значенням до невідомого опору. Потім за допомогою рухомого контакту D знаходимо на реохорді положення, при якому сила струму через гальванометр дорівнює нулю (така операція знаходження положення рухомого контакту називається врівноваженням містка).

Добившись рівноваги містка, за співвідношенням (15) визначаємо величину невідомого опору  $R_x$ , якщо відомі три інші опори.

Оскільки для однорідного проводу опори окремих ділянок реохорда відносяться один до одного як їхні довжини, то відношення  $\frac{R_1}{R_2}$  у формулі (15) можна замінити відношенням довжин  $\frac{l_1}{l_2}$ , де  $l_1$ ,  $l_2$  – відповідно довжини ділянок AD і DC (рис.5). Отже, формулу (15) можна переписати як

$$R_x = R_m \frac{l_1}{l_2}. \quad (16)$$

Відзначимо, що точність  $R_x$  буде тим кращою, чим ближчим до одиниці буде співвідношення  $l_1/l_2$  (див. додаток 1 інструкції до роботи). Тому при вимірюванні за допомогою містка Уїгстона невідомого опору  $R_x$  бажано, щоб опір  $R_m$  не дуже

відрізнявся від  $R_x$ . У зв'язку з цим порядок знаходження  $R_x$ , може бути наступним: встановити контакт D посередині реохорда ( $l_1 = l_2$ ) і за допомогою магазину опорів підібрати  $R_m$  так щоб струм через гальванометр не протікав. Тоді згідно з (16)  $R_x = R_m$ .

## Лабораторна робота 2-1

### Визначення опору провідника за допомогою моста сталого струму (містка Уїгстона)

#### Прилади і пристрої

1. Відомі опори  $R_1$ ,  $R_2$ .
2. Магазин опорів  $R_m$ .
3. Невідомі опори  $R_x$  (5 штук).
4. Нуль-гальванометр G.
5. Джерело живлення сталого струму на 6 В.
6. Ключ.
7. З'єднувальні проводи.

#### Установка

Принципова схема методу моста Уїгстона в лабораторній роботі зображена на рис.6. Опори  $R_x$ ,  $R_m$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  утворюють собою плечі моста з'єднані так, щоб утворити замкнутий чотирикутник ABCD, а гальванометр з нульовою точкою посередині шкали під'єднаний у його діагональ. Опір  $R_x$  - це невідомий опір, його потрібно визначити. Опором  $R_m$  служить магазин опорів, який підбирається таким чином, щоб струм через гальванометр G був відсутній.

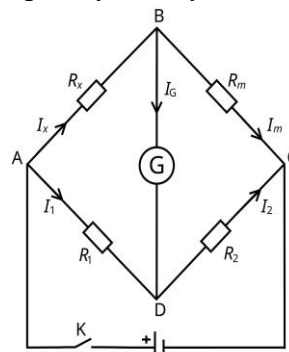


Рис.6. Електрична схема моста сталого струму.

Тоді за формулою (15) розрахуємо невідомий опір  $R_x$ :

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_m.$$

Для того, щоб при вимірюваннях отримати достовірні дані для невідомих опорів, потрібно ключ  $K$  замикати на короткий час і тільки під час зняття вимірів. Це пов'язане з тим, що під час протікання струму по провідниках вони нагріваються, а їхній опір збільшується. Недоліком методу містка Уінстона є те, що до опорів зображених на схемі додається ще опір з'єднувальних проводів, що зменшує точність вимірів.

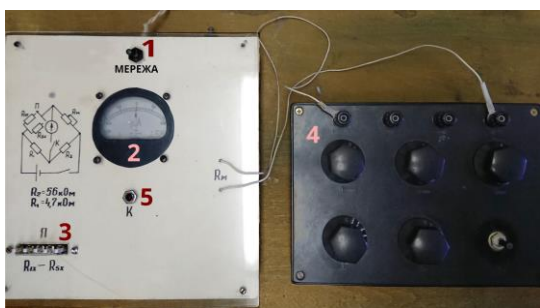


Рис.7. Лабораторна установка. Тут 1- підключення до мережі, 2 - гальванометр, 3 - вмикання в схему невідомих опорів  $R_x$ , 4 - магазин опорів  $R_m$ , 5 - ключ  $K$ .

### Порядок виконання

В установку по черзі вмикаються 5 невідомих опорів  $R_x$ . Потрібно їх визначити, користуючись методом містка Уінстона.

Порядок зняття вимірів:

1. Увімкнути джерело живлення постійного струму (6 В).
2. Перемикачем на установці увімкнути у електричне коло перший невідомий опір  $R_x$ .
3. На магазині опорів виставити довільне значення опору  $R_m$  і на короткий час замкнути ключ  $K$  (див. рис.6, 7). Змінюючи  $R_m$  домогтися, щоб при замиканні ключа  $K$  стрілка гальванометра залишалася на нулі. Це свідчитиме про те, що плечі моста врівноважені.

4. Записати значення опору  $R_m$  у таблицю 1.
5. Увімкнути у коло наступний невідомий опір і повторити вимірювання пунктів 3 і 4.
6. Повторити вимірювання для всіх невідомих опорів  $R_x$ .
7. Переписати з установки значення відомих опорів  $R_1$ ,  $R_2$  та клас точності  $K$  магазину опорів. **Увага!** Позначення опорів на схемі у різних лабораторіях можуть відрізнятися, тому переписуючи значення опорів звіряйте правильність позначення за їхнім розташуванням у схемі лабораторної установки.

### Обробка результатів вимірювань

1. За формулою (15) розрахувати значення невідомих опорів  $R_x$  та занести до таблиці 1.
2. Ознайомитися з теорією обробки результатів фізичних вимірювань в додатку 3 (інструкція до роботи) або в посібнику [2]. Для одного з знайдених опорів порахувати сумарну невизначеність типу В. За формулою (3.41) додатку 3:

$$U_B(R_x) = \sqrt{\sum_{i=1,2,m} \left( \frac{\partial R_x}{\partial R_i} U_B(R_i) \right)^2}$$

Вважаючи відносну похибку стандартних заводських опорів  $\delta_R = 5\%$ , знайти невизначеності опорів  $R_1$  і  $R_2$ . За формулою (3.38) додатку 3

$$U_B(R_1) = \frac{\delta_R R_1}{\sqrt{3}} = \frac{0,05 R_1}{\sqrt{3}} \text{ Ом та}$$

$$U_B(R_2) = \frac{\delta_R R_2}{\sqrt{3}} = \frac{0,05 R_2}{\sqrt{3}} \text{ Ом.}$$

Невизначеність опору  $R_m$  з магазину опорів визначити за формулою (3.38) додатку 3:

$$U_B(R_m) = \frac{K_m R_N}{100\sqrt{3}},$$

де  $K_m$  – клас точності магазину опорів,

$R_N = R_{m \max}$  – нормуюча величина (визначається максимальним опором, який можна виставити тими ж ручками на

магазині опорів, які застосовувались для підбору опору  $R_m$ ). Записати отриману невизначеність у таблицю 2.

3. Знайти розширену невизначеність за формулою (3.43) додатку 3:

$$U(R_x) = kU_B(R_x),$$

де коефіцієнт охоплення  $k$  прийняти рівним 2, що відповідає рівню довіри  $P = 0,95$ . Записати кінцевий результат у таблицю 2. Див. приклад 1 обробки даних вимірювань в інструкції до цієї роботи.

4. Написати висновок по роботі.

**Таблиця 1**

$R_1 =$					
$R_2 =$					
$R_m$					
$R_x$					

**Таблиця 2**

$R_x =$	Клас точності магазину опорів $K_m =$ Нормуюча величина $R_N =$ Сумарна невизначеність типу В $U_B(R_x) =$
Відповідь: $R = R_x \pm U(R_x) =$ $\delta = \frac{U(R_x)}{R_x} \cdot 100\% =$	

**Приклади розрахунків**

### Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома для однорідної ділянки кола, неоднорідної ділянки кола та повного кола.
2. Сформулюйте правила Кірхгофа.
3. Що називається вузлом в електричному колі?
4. У чому полягає мостовий метод вимірювання опору?
5. За яких умов плечі мостової схеми (містка Уїтстона) врівноважені?
6. Виведіть робочу формулу (15).
7. Що впливає на точність методу вимірювання невідомого опору за допомогою містка сталого струму? Проаналізуйте відповідь.

### 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 даної лабораторної роботи підготували доцент І.Ф.Скіцько та канд.фіз.-мат. наук, ст. викладач Є.Г. Корнієнко.