

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ім. О. С. ПОПОВА

Кафедра фізики оптичного зв'язку

ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

ФІЗИКА

МОДУЛЬ 1

**Частина 3. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНОГО
ПРАКТИКУМУ З ФІЗИКИ ДЛЯ РОБІТ**

№ 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 3-1, 3-2, 3-3, 3-4

**для студентів денної та заочної форм навчання
всіх спеціальностей за напрямом 6.050903 – “Телекомунікації”**

ЗАТВЕРДЖЕНО

**вченою радою науково-
навчального інституту
“КТ А та Л”**

**Протокол № 7
від 28 березня 2013 р.**

ОДЕСА 2013

Укладачі: Марколенко П.Ю., Горбачов В.Е., Ірха В.І., Коробіцин Б.В.

Методичні вказівки є стосовним до розділу “Електромагнетизм” курсу фізики для студентів технічного ВНЗ. На прикладі вісьмох лабораторних робіт вивчаються способи вимірювання основних характеристик електричного та магнітного полів за допомогою спеціальних технічних пристроїв, опрацювання прямих і непрямих вимірювань, обчислення довірчих інтервалів. Наведено достатній теоретичний матеріал, який включає опис конструкції та методів застосування таких пристроїв, як лабораторна модель електричного поля, міст Уітстона, компенсаційна схема електричних вимірювань, потенціометр, тангенс-бусоль, двоелектродна електронна лампа, електронно-променева трубка, балістичний гальванометр, високочастотний трансформатор.

Використано матеріали методичних вказівок попередніх років видання.

Вказівки призначено студентам усіх спеціальностей за напрямом “Телекомунікації”.

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри
фізики оптичного зв'язку
й рекомендовано до друку.

Протокол № 5
від 19.12.2012 р.

СТРУКТУРА МОДУЛЯ № 1:
„Електричний струм та магнітне поле струмів”

Змістовий модуль	Лекції (год.)	Заняття		Самостійна робота
		практичні	лабораторні	
1. Електрика	10	4	12	16
2. Електромагнетизм	6	4	4	16

Зміст змістових модулів (лекційних годин)

№	Тема	Год
1	1. ЕЛЕКТРИКА. Електричні заряди та їх взаємодія. Напруженість електричного поля. Електричне поле точкового заряду. Електричне поле системи зарядів	2
2	Різниця потенціалів та її розрахунок. Зв'язок між потенціалом і напруженістю поля. Провідники в електричному полі. Робота в електричному полі	2
3	Електроємність. З'єднання конденсаторів. Діелектрики в електричному полі	2
4	Постійний електричний струм. Закон Ома. З'єднання опорів	2
5	Електрорушійна сила. Потужність струму. Закон Джоуля-Ленца	2
6	2. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. Магнітне поле та магнітна індукція. Напруженість магнітного поля. Лінії індукції магнітного поля. Магнітна напруженість	2
7	Магнітні сили. Рух заряджених частин в електричному і магнітному полях	2
8	Магнітний потік. Електромагнітна індукція. Правило Ленца. Самоіндукція. Індуктивність	2

Теми лабораторних занять

№	Тема	Год.
1	2-1. Дослідження характеристик електричного поля	2
2	2-2, а. Вимірювання опору за допомогою моста Уітстона, 2-2, б. Застосування теорії похибок для оброблення результатів вимірювань	4
3	2-3, а. Знаходження ЕРС джерела компенсаційним методом, 2-3, б. Знаходження ЕРС джерела прямим методом	4
4	2-4. Потужність кола постійного струму	2
5	3-1. Дослідження магнітного поля за допомогою тангенс-бусолі	2
6	3-2, а. Визначення питомого заряду електрона за допомогою двоелектродної електронної лампи, 3-2, б. Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки	4
7	3-3. Дослідження магнітного поля балістичним методом	2
8	3-4. Дослідження магнітного поля в феромагнетиках	2

ВСТУП

Метою лабораторного практикуму з фізики за розділом “Електромагнетизм” є практичне освоєння основних характеристик електричного та магнітного полів, які надалі необхідні для розуміння реальних електромагнітних систем.

Лабораторні роботи виконуються за допомогою спеціальних технічних пристроїв, таких як лабораторна модель електричного поля, міст Уітстона, компенсаційна схема електричних вимірювань, потенціометр, тангенс-бусоль, двоелектродна електронна лампа, електронно-променева трубка, балістичний гальванометр, високочастотний трансформатор.

Лабораторні роботи проводяться фронтальним методом, коли вся студентська група виконує одну й ту саму роботу.

Виконанню роботи в лабораторії обов'язково передує домашня підготовка з теорії та методики виконання роботи, а також підготовка протоколу, що включає креслення схеми пристрою, таблиць приладів та прямих вимірювань, написання і розшифровку робочих формул. За попередньою вказівкою викладача студент відповідає на певні контрольні питання письмово.

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які виконали домашню роботу і мали позитивний результат експрес-опитування в лабораторії.

Зміст протоколів усіх робіт повинен бути таким:

- 1 Номер і тема лабораторної роботи.
- 2 Мета роботи.
- 3 Схема пристрою, перелік її елементів.
- 4 Таблиця вимірювальних приладів.
- 5 Робочі формули з поясненнями величин.
- 6 Таблиця прямих вимірювань у стандартному вигляді для кожної вимірювальної величини (безпосередньо після її заповнення подається на підпис викладачеві).
- 7 Оброблення результатів вимірювань (за багаторазових однотипних обчислень наводиться одна підстановка).
- 8 Зведення результатів у стандартній формі (у вигляді довірчого інтервалу і відносної похибки або у графічному вигляді).
- 9 Висновок.
- 10 Дата виконання роботи й прізвище студента.

При підготовці до виконання лабораторних робіт, крім даних вказівок потрібно користуватися рекомендованою вкінці літературою.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2-1

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

1 Мета роботи:

1. Дослідження розподілення еквіпотенціальних ліній електростатичного поля.
2. Визначити напруженість електростатичного поля у заданих точках за допомогою розподілення еквіпотенціальних ліній.

2 Ключові положення

2.1 Електричне поле. Напруженість електричного поля. Силкові лінії

Електричні заряди взаємодіють між собою, перебуваючи на відстані один від одного. Ця взаємодія здійснюється за допомогою електричного поля, яке існує навколо кожного заряду. Електричне поле – це особливий вид матерії. Його основна властивість в тому, що на будь-який заряд розташований в цьому полі, діє сила. Поле нерухомих зарядів називається електростатичним.

Основним законом електростатики є **закон Кулона**: *сила взаємодії двох точкових зарядів прямо пропорційна добутку модулів їх величин q_1 та q_2 і обернено пропорційна квадрату відстані r між ними*:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon r^2}, \quad (1)$$

де ε – відносна діелектрична проникність середовища, яка показує у скільки разів сила взаємодії зарядів у середовищі менше, ніж у вакуумі (ε – величина безрозмірна). Коефіцієнт пропорційності k залежить від вибору системи одиниць вимірювання. У системі СІ

$$k = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0},$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ О/і}$ – діелектрична проникність вакууму чи електрична постійна.

У системі СІ закон Кулона записується так

$$F = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r^2}, \quad (2)$$

де ε – абсолютна діелектрична проникність речовини.

Сила взаємодії точкових зарядів спрямована по прямій лінії, яка з'єднує ці заряди. Точкові заряди – це заряджені тіла, розмірами яких можна знехтувати порівняно з відстанями r між ними.

Досліджується електростатичне поле зазвичай за допомогою пробного заряду q' , тобто такого заряду, внесення якого не змінює досліджуваного поля. Якщо вносити в одну і ту ж точку поля різні за величиною пробні заряди, то на них будуть діяти різні за величиною сили, але відношення сили до заряду для даної точки залишається величиною постійною. Це відношення є силовою характеристикою поля і називається його напруженістю $\vec{E}$.

Напруженість електричного поля в даній точці – це векторна величина,

яка чисельно дорівнює силі $\vec{F}_{+1\hat{E}\ddot{e}}$, з якою поле діє на одиничний позитивний пробний заряд $q' = +1\hat{E}\ddot{e}$, внесений в цю точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} = \vec{F}_{+1\hat{E}\ddot{e}}, \quad [E] = \frac{\hat{A}}{\hat{I}}. \quad (3)$$

Вектор $\vec{E}$ спрямований в сторону дії цієї сили.

Якщо поле створено позитивним точковим зарядом q_1 (рис.1, а), то в точках A і B вектори напруженості спрямовані по лінії, яка з'єднує заряд з точками A і B , в бік від заряду q_1 . На рис.

1, б, зображені вектори $\vec{E}_3$ і $\vec{E}_4$ в точках C і D поля негативного заряду q_2 . Обидва вектори спрямовані до заряду q_2 . У системі СІ напруженість вимірюється в таких одиницях: $\hat{A}/\hat{I}$ (вольт поділений на метр). З формули (3) можна побачити, що ця одиниця виміру дорівнює $\hat{I}/\hat{E}\ddot{e}$ (ньютон поділений на кулон).

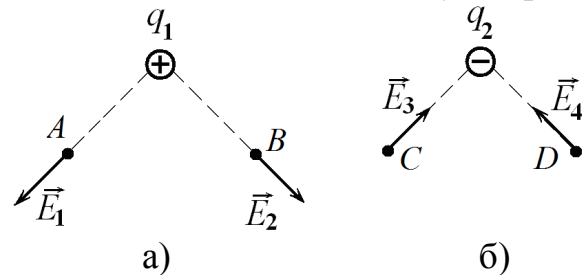


Рис. 1. Напруженість електричного поля: а) позитивного та б) негативного зарядів

Напруженість поля точкового заряду q_1 на відстані r від нього у системі СІ розраховується за формулою

$$E = \frac{q_1}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r^2}. \quad (4)$$

Ця формула одержана із формул (3) і (2).

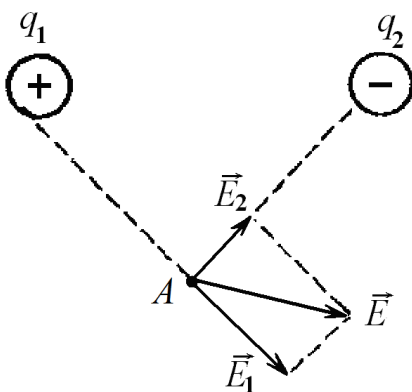


Рис. 2. Напруженість електричного поля системи двох зарядів

Якщо поле здійснено двома зарядами, то згідно з **принципом суперпозиції полів** поле кожного заряду не залежить від наявності полів інших зарядів. Тоді вектор напруженості результуючого поля $\vec{E}$ визначається як векторна сума векторів напруженості полів, здійснених кожним зарядом окремо. Наприклад, на рис. 2 в точці A накладаються поля зарядів q_1 (позитивного) і q_2 (негативного).

Вектор напруженості $\vec{E}_1$ спрямований від заряду q_1 , як у випадку відсутності заряду q_2 . Аналогічно, як у випадку відсутності заряду q_1 ,

вектор напруженості $\vec{E}_2$ спрямований до заряду q_2 . Напрямок вектора напруженості результуючого поля $\vec{E}$ визначається за правилом паралелограма, а його модуль – за теоремою косинусів:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\angle E_1, E_2)}. \quad (5)$$

Сила, з якою електричне поле діє на точковий заряд q_1 визначається за формулою

$$F = q_1 E. \quad (6)$$

2.2 Робота сил електростатичного поля

Отримаємо формулу розрахунку роботи, яка здійснюється силами поля при переміщенні заряду. Нехай пробний заряд q' переміщується в полі точкового заряду q з точки 1 в точку 2 (рис. 3). Тому що сила, діюча на заряд, на різних ділянках траєкторії набуває різних значень, то увесь шлях потрібно розбити на такі малі (елементарні) ділянки dl , в межах яких силу можна вважати постійною. Тоді роботу dA на елементарній ділянці можна визначити за формулою

$$dA = Fdl \cos(\vec{F}, \wedge d\vec{l}). \quad (7)$$

Робота на всьому шляху 1 – 2 дорівнює алгебраїчній сумі роботи на усіх елементарних ділянках dl :

$$A = \int_1^2 dA = \int_{r_1}^{r_2} Fdl \cos(\vec{F}, \wedge d\vec{l}).$$

Величина $dr = dl \cos(\vec{F}, \wedge d\vec{l})$ – є проекція елементарної ділянки dl на силову лінію (рис. 3). Використовуючи формулу (2), отримаємо

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} dr = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2}.$$

З вищої математики відомо, що

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}.$$

Тому

$$A = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \text{ або}$$

$$A = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1} - \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_2}. \quad (8)$$

З формули (8) випливає, що робота сил електростатичного поля при переміщенні заряду не залежить від довжини і форми шляху, а залежить від початкового та кінцевого положення заряду. Робота на замкнутому шляху ($r_1 = r_2$) дорівнює нулю. Сили, що мають такі властивості, і їхні поля називають потенціальними.

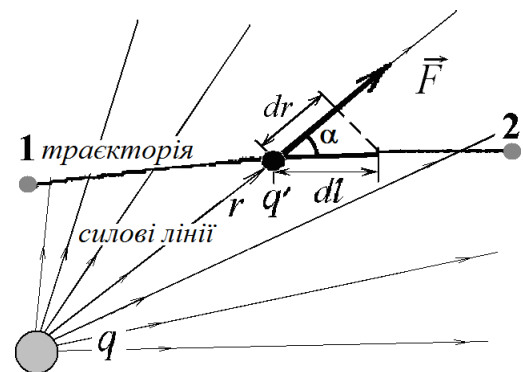


Рис. 3. Сила, що діє на пробний заряд q' в полі заряду q

2.3 Потенціал поля. Різниця потенціалів

Заряджене тіло, що внесене в потенціальне електростатичне поле, має потенціальну енергію. Сили поля будуть переміщувати заряд так, щоб його потенціальна енергія зменшилась. Робота цих сил дорівнює зменшенню потенціальної енергії.

$$A = -(W_2 - W_1) = W_1 - W_2. \quad (9)$$

Порівнюючи формули (8) і (9), бачимо, що потенціальна енергія заряду q'

в полі точкового заряду q дорівнює

$$W = \frac{q \cdot q'}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r}. \quad (10)$$

Різні пробні заряди в одній і тій самій точці поля мають різні енергії, але відношення потенціальної енергії до величини заряду залишається постійним. Це відношення є енергетичною характеристикою поля і називається потенціалом φ поля в даній точці

$$\varphi = \frac{W}{q'}. \quad (11)$$

Потенціал φ в точці електричного поля – це потенціальна енергія $W_{+1\text{Ев}}$, яку має одиничний позитивний пробний заряд $q' = +1\text{Ев}$ в точці поля

$$\varphi = \frac{W}{q'} = W_{+1\text{Ев}}; \quad [\varphi] = \hat{A}.$$

Потенціал поля точкового заряду q на відстані r від нього визначається за формулою

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r}. \quad (12)$$

Очевидно, формулу роботи сил електростатичного поля при переміщенні заряду q' можна записати у вигляді

$$A = q'(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (13)$$

Звідки різниця потенціалів $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ між двома точками 1 і 2 поля показує, яку роботу здійснюють сили електростатичного поля $A_{+1\text{Ев}}$ при переміщенні одиничного позитивного пробного заряду $q' = +1\text{Ев}$ з однієї точки поля в іншу

$$\Delta\varphi = \frac{A}{q'} = A_{+1\text{Ев}}; \quad [\Delta\varphi] = \hat{A}. \quad (14)$$

Потенціал, як і потенціальна енергія, визначається з точністю до адитивної постійної, тобто є величиною відносною. Тому в будь-якій точці поля потенціал може бути прийнятим, що дорівнює нулю. Звичайно за нуль приймають потенціал нескінченно віддалених точок, а в практичних вимірюваннях – потенціал землі.

Якщо перемішувати заряд q' з даної точки поля в точку, в якій потенціал прийнятий, що дорівнює нулю, то формула роботи буде мати вигляд:

$$A = q'\varphi.$$

Потенціал поля в точці дорівнює роботі, яку здійснюють сили при переміщенні одиничного позитивного пробного заряду із даної точки поля в точку, де потенціал прийнятий, що дорівнює нулю.

$$\varphi = A_{0,+1\text{Ев}}; \quad [\varphi] = \hat{A}.$$

У системі СІ потенціал і різниця потенціалів вимірюється у вольтах. Якщо при переміщенні заряду в 1 кулон сили поля (рис. 3) здійснюють роботу в 1 джоуль, то різниця потенціалів між цими точками дорівнює 1 вольту.

Потенціал – величина скалярна. В полі позитивного заряду потенціал позитивний, а в полі негативного – негативний.

Якщо поле здійснено системою зарядів, то потенціал результуючого поля в досліджуваній точці дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів кожного заряду в цій точці.

2.4 Графічне зображення електричного поля. Силові лінії та екіпотенціальні поверхні

Графічно електростатичне поле зображується за допомогою ліній вектора напруженості, які називаються силовими.

Силовою лінією називається така лінія, в кожній точці якої вектор напруженості спрямований по дотичній до цієї лінії. Силова лінія має такий самий напрям, як і вектор напруженості в кожній точці. Силові лінії проводяться такою густотою, щоб одиницю площі поверхні, що перпендикулярна полю, пронизувало число силових ліній, що дорівнює значенню напруженості в даному місці поля.

Тому в тих місцях, де напруженість більша, силові лінії розміщені густіше. Картина силових ліній полів точкових зарядів зображена на рис. 4.

Силові лінії електростатичного поля не перетинаються між собою, і не замкнуті. Лінії поля позитивного заряду починаються на заряді і закінчуються в нескінченності, лінії поля негативного заряду починаються в нескінченності і закінчуються на заряді (див. рис. 4).

Однорідним зветься поле, в усіх точках якого напруженість однакова і за величиною і за напрямом. Силові лінії однорідного поля паралельні між собою і однаково відстають одна від одної.

В електростатичному полі будь-якого заряду можна виділити таку поверхню, в усіх точках якої потенціали однакові. Такі поверхні називають **еквіпотенціальними**, або поверхнями однакового потенціалу. З формули (12) випливає, що в точках, рівновіддалених від точкового заряду, потенціали однакові. Отже, екіпотенціальні поверхні поля точкового заряду мають вид концентричних сфер, центри яких збігаються з положенням заряду q (рис. 5). Слід зазначити, що на площині екіпотенціальні поверхні зображуються у вигляді ліній рівного потенціалу.

Силові лінії електростатичного поля завжди перпендикулярні до екіпотенціальних поверхонь. Це

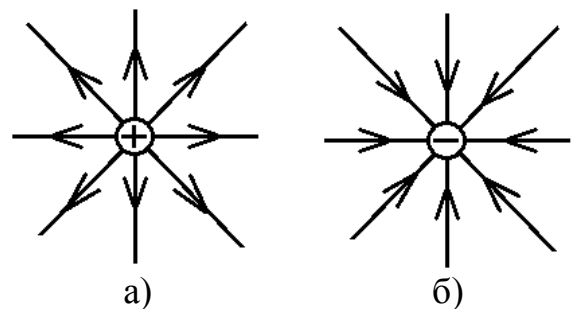


Рис. 4. Силові лінії електричного поля: а) позитивного і б) негативного зарядів

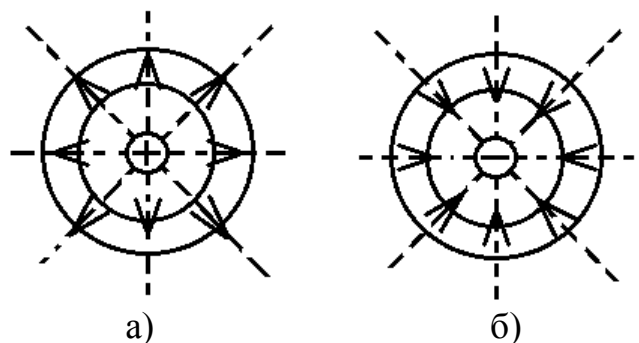


Рис. 5. Екіпотенціальні поверхні електричного поля: а) позитивного і б) негативного зарядів однакової

впливає з того, що робота сил поля при переміщенні заряду q' між будь-якими двома точками екіпотенціальної поверхні дорівнює нулю:

$$A = q'(\varphi_1 - \varphi_2) = 0, \text{ отже } \varphi_1 = \varphi_2.$$

З іншого боку,

$$dA = Fdl \cos(\vec{F}, \vec{dl}) = Edl \cos(\vec{E}, \vec{dl}).$$

Тому що $E \neq 0$ і $dl \neq 0$, то $\cos(\vec{E}, \vec{dl}) = 0$, отже $\vec{E} \perp \vec{dl}$. Оскільки вектор напруженості спрямований по дотичній до силовій лінії, а dl лежить на екіпотенціальній поверхні, силові лінії перпендикулярні до екіпотенціальних поверхонь.

2.5 Зв'язок напруженості і потенціалу

Елементарна робота сил електростатичного поля при переміщенні заряду вздовж елементарного відрізка силовій лінії dr визначається, з одного боку, за формулою

$$dA = q' E dr,$$

а, з іншого – як зменшення потенціальної енергії

$$dA = -dW = -q' d\varphi.$$

З порівняння обох формул одержимо

$$E dr = -d\varphi,$$

чи

$$E = -d\varphi / dr, \quad (15)$$

де dr – відрізок силовій лінії (він перпендикулярний до екіпотенціальної поверхні).

Похідна потенціалу за довжиною вздовж силовій лінії (15) має назву градієнта потенціалу. **Градієнт потенціалу** – це вектор, спрямований в бік найбільшого зростання потенціалу. З формули (15):

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad} \varphi}, \quad (16)$$

Тобто вектор напруженості чисельно дорівнює градієнту потенціалу і спрямований в бік спаду потенціалу.

Якщо поле однорідне, то в будь-якій його точці $\vec{E} = \text{const}$. Наприклад на рис. 6 зображено поле нескінченної рівномірно зарядженої площини. Екіпотенціальні поверхні мають вигляд площин, які паралельні зарядженій площині. Виділимо в полі дві екіпотенціальні поверхні з потенціалами φ_1 і φ_2 . Очевидно, $\varphi_1 > \varphi_2$.

Для однорідного поля зв'язок напруженості і потенціалу можна записати у вигляді

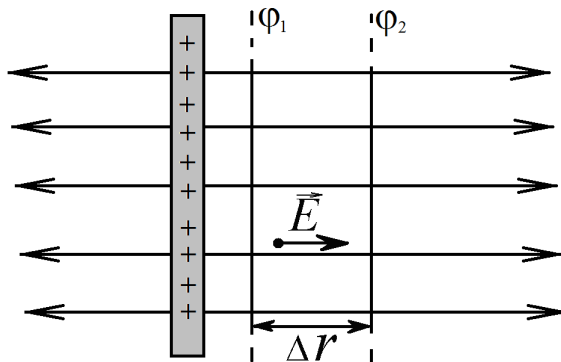


Рис. 6. Знаходження напруженості електричного поля в точці між двома екіпотенціальними поверхнями

$$E = - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta r} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta r}. \quad (17)$$

В однорідному полі напруженість чисельно дорівнює різниці потенціалів, що припадають на одиницю довжини силової лінії. З формул (15) і (17) випливає, що у системі СІ напруженість вимірюється в одиницях В/м . Якщо побудувати еквіпотенціальні поверхні так, щоб різниці потенціалів між будь-якими сусідніми поверхнями були однакові, то в неоднорідному полі ці поверхні будуть неоднаково відставати одна від одної. В тих місцях, де еквіпотенціальні поверхні розміщені ближче одна до одної, напруженість поля більша.

2.6 Вектор електричного зміщення

Напруженість електричного поля залежить від діелектричної проникливості середовища. На рис. 7 зображено поле нескінченної площини в різних діелектриках ($\epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1$). Напруженість поля $\vec{E}$ на межі діелектриків стрибком змінює своє значення.

Величиною, яка не залежить від властивостей середовища є вектор електричного зміщення $\vec{D}$, що пов'язаний з вектором напруженості для ізотропного середовища співвідношенням

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \cdot \vec{E}. \quad (18)$$

Тоді, для поля, що утворюється точковим зарядом q_1 на відстані r від нього, з формули (4) отримаємо

$$D = \frac{q_1}{4\pi r^2}.$$

Звідки видно, що вектор електричного зміщення залежить лише від величини заряду, що утворює поле, та відстані до досліджуваної точки.

На рис. 8 зображена картина вектора зміщення поля нескінченної площини в різних діелектриках ($\epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1$). На межах діелектриків лінії вектора зміщення не перериваються. Вектор електричного зміщення вводиться формально і є допоміжною величиною.

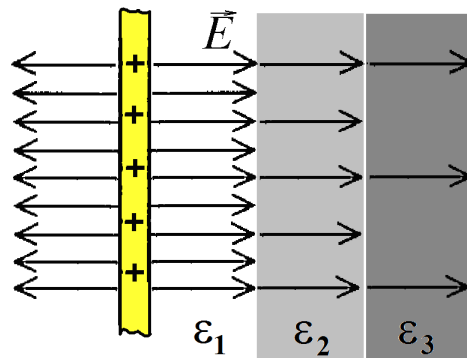


Рис. 7. Лінії напруженості електричного поля в різних середовищах

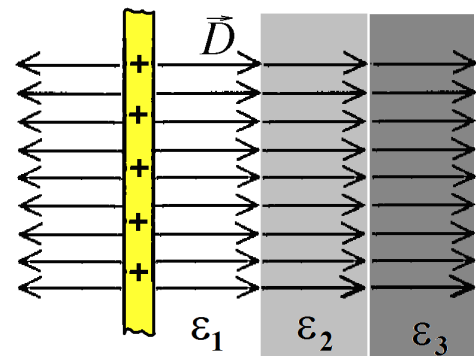


Рис. 8. Лінії електричного зміщення в різних середовищах

3 Опис установки і методики вимірювань

Прилади та приладдя: джерело напруги $\mathcal{E}$, потенціометр P , вольтметр V , мікроамперметр μA , набір електродів A і B , кювета з електролітом та провідний папір $a-b-c-d$, щуп C .

Дослідження електростатичного поля полягає в знаходженні величини і напрямку напруженості в будь-якій точці. Таким чином, задача зводиться до побудови силових ліній поля. Визначити напрям силових ліній експериментально важко. Легше знайти розподіл потенціалів і визначити положення і форму екіпотенціальних поверхонь.

Для вивчення розподілу потенціалів в електростатичному полі застосовують зонд, який являє собою електрод, що вводиться в досліджувану точку поля. Зонд з'єднують з вольтметром, що вимірює різницю потенціалів між зондом і точкою поля, в якій потенціал прийнятий, що дорівнює нулю. Необхідно щоб зонд своєю присутністю не порушував досліджуваного поля і приймав потенціал тієї точки, в яку він розміщений.

Вивчення електростатичного поля важко здійснити, тому що в непровідному середовищі не може відбуватися автоматичне вирівнювання потенціалів точки поля і зонда. Щоб це вирівнювання відбулося, необхідно забезпечити стікання зарядів із зонда. Крім того, для вимірювання різниці потенціалів між точками електричного поля необхідно застосувати електричні прилади (електрометри). Тому вивчення електростатичного поля замінюють вивченням поля постійного струму. Метод вивчення електростатичного поля шляхом вивчення іншого, еквівалентного йому поля називається моделюванням.

Для отримання електричного поля і його дослідження збираємо схему, яка зображена на рис. 9, на якій: A і B – електроди, які утворюють досліджуване

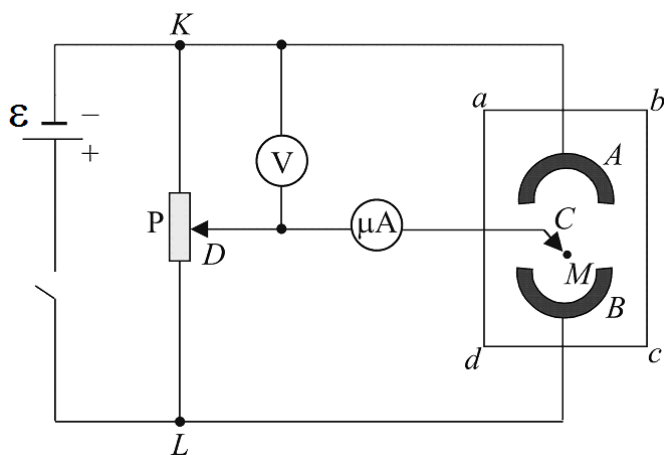


Рис. 9. Схема установки для виміру потенціалу точок модельного електричного поля

поле; C – зонд електрода, який вводиться в точку яку досліджуємо, модельного поля; P – потенціометр для встановлювання заданої напруги точки D ; V – вольтметр, за допомогою якого вимірюється значення потенціалу точки D ; μA – мікроамперметр, який використовується як нуль-індикатор, для зрівнювання потенціалів між точкою D та точкою C модельного поля.

На папері $avcd$, змоченому слабким розчином електроліту, ставляться електроди A і B , з'єднані з полюсами джерела.

Тому що питома електропровідність цього паперу в багато разів менше, ніж питома електропровідність електродів, то поле електричного струму між електродами A і B еквівалентно електростатичному полю. В роботі знаходимо лінії перетинання екіпотенціальних поверхонь з площиною $avcd$.

Нехай потенціали електродів відповідно дорівнюють ϕ_A і ϕ_B , причому як видно з рис. 9, $\phi_A < \phi_B$ (тому електрод B підключений до плюсової клема джерела). Прийmemo потенціал електрода A , з'єданого з мінусовою клемою, що дорівнює нулю ($\phi_A = 0$).

Для побудови екіпотенціальної лінії з потенціалом φ_1 за допомогою потенціометра P встановлюємо на вольтметрі різницю потенціалів, яка дорівнює φ_1 . Вольтметр вимірює різницю потенціалів між двома точками D і K , оскільки потенціал $\varphi_K = \varphi_A = 0$, тому $\varphi_D - \varphi_K = \varphi_D = \varphi_1$. Тобто вольтметр показує значення потенціалу в точці D . Видно, що $\varphi_B > \varphi_D > \varphi_A$. Якщо доторкнутися зондом до електроду A , то оскільки $\varphi_D > \varphi_A$, струм крізь мікроамперметр потече від точки D до точки A . Якщо доторкнутися зондом до електроду B , то оскільки $\varphi_B > \varphi_D$, струм крізь мікроамперметр потече в зворотній бік – від точки B до точки D .

Тому між електродами завжди можна знайти таку точку M , в якій потенціал буде дорівнювати $\varphi_M = \varphi_D = \varphi_1$. Якщо поставимо зонд в цю точку M , то струм через мікроамперметр не потече, тому що $\varphi_D = \varphi_M$. Не змінюючи покази вольтметра, знаходимо 8-10 точок, в яких потенціал дорівнює φ_1 , добиваючись відсутності струму в мікроамперметрі. З'єднавши знайдені точки лінією, одержимо екіпотенціальну лінію з потенціалом φ_1 . Для знаходження екіпотенціальної лінії з потенціалом φ_2 за допомогою потенціометра P встановлюємо на вольтметрі різницю потенціалів, що дорівнює φ_2 і вищепоказаним методом знаходимо точки з потенціалом φ_2 .

Екіпотенціальні лінії будуються так, щоб різниці потенціалів між ними були однакові. Наприклад, для побудови п'яти екіпотенціальних ліній треба різницю потенціалів U між електродами A і B розбити на 6 рівних частин. Встановивши на вольтметрі $\varphi_1 = U/6$, можна знайти лінію з таким потенціалом. Друга лінія повинна мати потенціал $\varphi_2 = 2\varphi_1$, третя лінія – $\varphi_3 = 3\varphi_1$, четверта – $\varphi_4 = 4\varphi_1$, п'ята – $\varphi_5 = 5\varphi_1$, а поверхня електроду B буде мати потенціал $\varphi_6 = U$. Поверхня електроду A буде мати потенціал $\varphi_0 = 0$.

Силкові лінії проводяться перпендикулярно до екіпотенціальних ліній, в тому числі і до електродів. Починаються силкові лінії на плюсовому електроді, закінчуються на мінусовому. Силкові лінії потрібно проводити так, щоб їх густина була пропорційною напруженості поля.

Якщо виміряти потенціали φ_1 та φ_2 в двох точках, які лежать на одній силковій лінії на невеликій відстані Δr одна від одної, то за формулою (17) можна визначити напруженість електричного поля в точці, що знаходиться посередині між ними.

Для вимірювання потенціалу φ_1 слід поставити зонд у вибрану на силковій лінії точку 1 та переміщенням повзунка потенціометра P добитися відсутності струму в мікроамперметрі. При цьому покази вольтметра будуть дорівнювати значенню потенціалу цієї точки φ_1 . Потім зонд слід поставити у вибрану на тій самій силковій лінії точку 2 і переміщенням повзунком потенціометра P добитися відсутності струму в мікроамперметрі. При цьому покази вольтметра будуть дорівнювати значенню потенціалу цієї точки φ_2 . Вимірявши відстань між цими точкам Δr , за формулою $E = (\varphi_2 - \varphi_1) / \Delta r$ можна обчислити модуль

вектора напруженості електричного поля. Напрямок вектора напруженості електричного поля визначається за напрямом силової лінії.

Якщо точки 1 і 2 збігаються з перетинами силової лінії з двома сусідніми екіпотенціальними лініями, то $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ відповідатиме різниці потенціалів між сусідніми екіпотенціальними лініями $\Delta\varphi = \varphi_1$. При цьому, для розрахунку абсолютної величини напруженості електричного поля необхідно вимірити тільки відстань Δr між точками 1 і 2 (відстань між сусідніми екіпотенціальними лініями).

4 Оброблення результатів вимірювань

Результати цієї роботи представляють в графічному вигляді – це розподіл силових і екіпотенціальних ліній електростатичного поля, зображення векторів напруженості електричного поля в трьох точках. Графічне подання результатів вимірів зазвичай припускає якісну оцінку, і тому не вимагає статистичного оброблення.

5 Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему рис. 9.
2. За допомогою вольтметра виміряти різницю потенціалів U між електродами A і B , повернувши ручку потенціометра на максимум.
3. Для побудови n екіпотенціальних ліній поділити U на $n+1$, прийняти n не менше 5.
4. Окреслити олівцем на папері поверхні електродів, які представляють собою нульову $\varphi_0 = 0$ і останню $\varphi_n = U$ екіпотенціальні поверхні.
5. Встановити на вольтметрі напругу $\varphi_1 = U/(n+1)$.
6. Переміщенням зонда C по поверхні паперу добитися відсутності струму в мікроамперметрі і відмітити 8-10 точок з потенціалом φ_1 .
7. З'єднати відмічені точки лінією і записати значення потенціалу біля отриманої екіпотенціальної лінії.
8. Встановити на вольтметрі наступне значення потенціалу $\varphi_2 = 2\varphi_1$, та виконати пункти 6 та 7.
9. Подібно побудувати інші екіпотенціальної лінії.
10. Розрахувати напруженість електричного поля в декількох точках, вказаних викладачем. Для цього для кожної точки за допомогою лінійки зміряти найкоротшу відстань між найближчими екіпотенціальними лініями. За формулою $E = \Delta\varphi / \Delta r$ розрахувати абсолютне значення напруженості електричного поля. Тут $\Delta\varphi = \varphi_1$ – різниця потенціалів між сусідніми екіпотенціальними лініями.
11. Побудувати силові лінії поля. При цьому на тих ділянках, де абсолютне значення одержаної в п. 10 напруженості більше, силові лінії повинні розташовуватися густіше. Вказати напрям силових ліній.
12. По отриманим в п. 10 абсолютним значенням побудувати вектори напруженості електричного поля у відповідному масштабі. Напрямок векторів

вибирається вздовж дотичних до силових ліній. Позначити одержані вектори.

13. Зробити висновок про те, які величини були визначені за одержаним розподілом потенціалу.

6 Контрольні запитання

1. Що називають напруженістю поля? Як спрямований вектор напруженості?
2. Як розраховується напруженість поля точкового заряду, нескінченної рівномірно зарядженої площини, нескінченної рівномірно зарядженої нитки.
3. Що називається силовою лінією? Намалювати картину силових ліній полів плюсового і мінусового точкових зарядів, площини, нитки.
4. Що називається потенціалом поля в даній його точці? В яких одиницях вимірюється потенціал?
5. Як визначається робота сил поля через різницю потенціалів?
6. Що називається екіпотенціальною поверхнею?
7. Довести, що силові лінії перпендикулярні до екіпотенціальних поверхонь.
8. Намалювати екіпотенціальні поверхні поля точкового заряду, площини, нитки.
9. Який зв'язок між напруженістю і потенціалом?
10. Як в роботі експериментально знаходяться положення екіпотенціальних поверхонь? Намалювати схему.
11. Як розрахувати напруженість поля між двома екіпотенціальними поверхнями?
12. Як слід проводити силові лінії відносно екіпотенціальних? Де силові лінії густіші?

7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 2-1

I. Домашнє завдання.

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 2-1.

- 1) Тема: Дослідження електростатичного поля.
- 2) Мета роботи: Отримати розподіл екіпотенціальних ліній електростатичного поля. Визначити напруженість електричного поля в заданих точках за розподілом екіпотенціальних ліній.

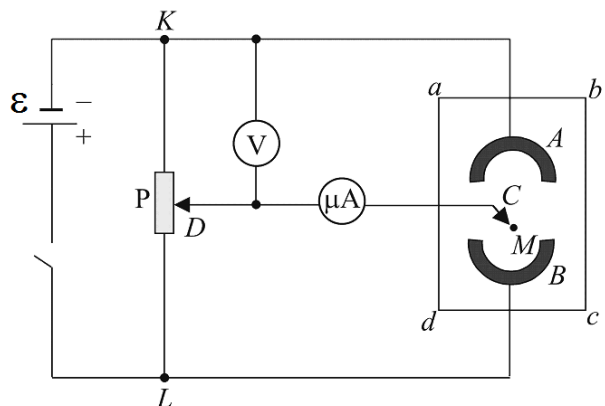
3) Схема установки:

A та B – електроди;

C – зонд; P – потенціометр;

V – вольтметр; μA – мікроамперметр;

$abcd$ – папір, змочений слабким розчином електроліту.



4) Таблиця приладів

№ з/п	Найменування	Тип	Заводський номер	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка (клас точності)
1	Вольтметр	М-906				
2	Мікроамперметр	М-906				
3	Лінійка міліметрова					

5) Формули розрахунку величин:

$\varphi_1 = \frac{U}{n+1}$, де φ_1 – крок для отримання n екіпотенціальних ліній;
 U – різниця потенціалів між електродами.

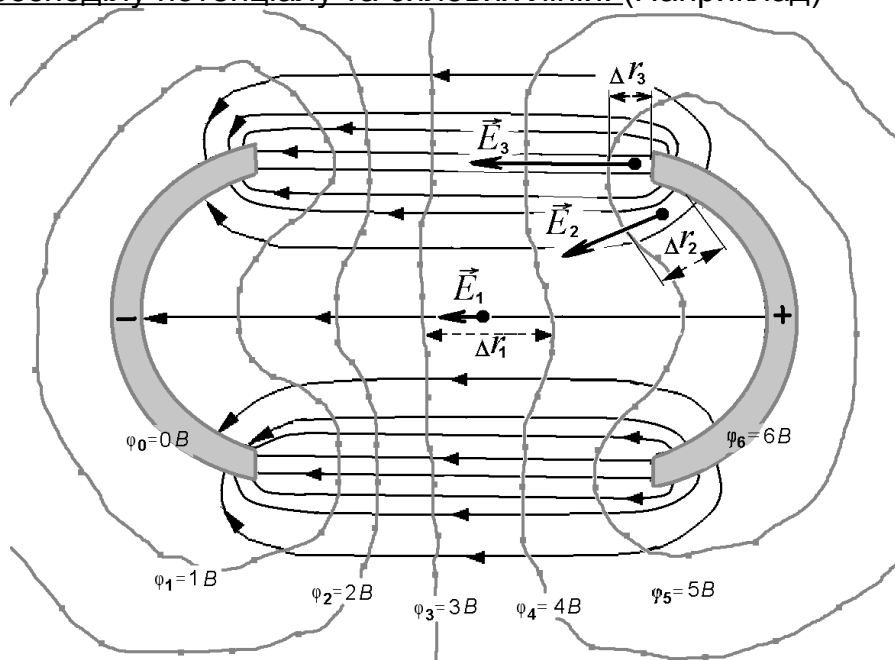
$E = \frac{\Delta \varphi}{\Delta r}$, де E – абсолютне значення напруженості електричного поля;
 $\Delta \varphi = \varphi_1$ – різниця потенціалів між сусідніми екіпотенціальними лініями;
 Δr – відстань між сусідніми екіпотенціальними лініями, між якими знаходиться значення напруженості електричного поля.

6) Таблиця результатів прямих вимірювань

№ точки	$\Delta \varphi, \hat{A}$	$\Delta r, i$	$E, \hat{A}/i$
1			
2			
3			

7) Обчислення модуля напруженості електричного поля

8) Діаграма розподілу потенціалу та силових ліній. (Наприклад)



В текст лабораторної роботи вклеїти лист с діаграмою або його ксерокопію.

9) Висновок. В даній лабораторній роботі по вимірюваному розподілу потенціалу ми отримали ...

10) Роботу виконав(ла): _____ (прізвище розбірливо).

Роботу перевірив:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2-2

ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ЗА ДОПОМОГОЮ МОСТА УІТСТОНА

1 Мета роботи:

1. Вивчити методику вимірювання опору за допомогою моста Уітстона.
2. Навчитися визначати статистичну та приладову похибки вимірів.

2 Ключові положення

2.1 Закон Ома

Електричним струмом називається впорядкований рух електричних зарядів. Розрізняють струми провідності, конвекційні струми, струми зміщення та струми у вакуумі. В даному розділі будемо розглядати тільки струм провідності.

Струм провідності – це спрямований рух вільних електронів та іонів. В металах спрямований рух здійснюють вільні електрони, в електролітах – іони.

За напрям струму прийнято напрям руху позитивних зарядів. Тому напрям струму в металах протилежний руху негативно заряджених електронів.

Основною характеристикою струму є сила струму.

Сила струму (I або i) – це скалярна величина, яка чисельно дорівнює заряду, який переноситься через поперечний переріз провідника за одиницю часу.

Для постійного струму

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}; \quad [I] = \text{А}, \quad (19)$$

де Δq – заряд, який переноситься через поперечний переріз провідника за інтервал часу Δt .

Для змінного струму (19) перетворюється в

$$i = \frac{dq}{dt},$$

де dq – нескінченно малий заряд, який переноситься через поперечний переріз провідника за нескінченно малий проміжок часу dt .

В системі СІ сила струму вимірюється в амперах.

Для того, щоб по провіднику протікав електричний струм, необхідно в ньому створити електричне поле, а значить, на кінцях провідника повинна існувати різниця потенціалів.

Німецький фізик Ом дослідним шляхом установив, що сила струму, яка протікає по провіднику, прямо пропорційна різниці потенціалів на кінцях провідника і обернено пропорційна опору R цього провідника

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}. \quad (20)$$

Опір – це характеристика провідника, яка визначається питомим опором металу ρ та залежить від довжини l провідника и його площини поперечного перерізу S :

$$R = \rho \frac{l}{S}; \quad [R] = \hat{\Omega} \quad (21)$$

Опір провідника вимірюється в омах.

Загальний еквівалентний опір двох послідовно з'єднаних резисторів з опором R_1 та R_2 збільшується

$$R_{\text{заг}}^{\text{посл}} = R_1 + R_2,$$

а при паралельному з'єднанні зменшується й визначається з формули

$$\frac{1}{R_{\text{заг}}^{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

при цьому виходить, що

$$R_{\text{заг}}^{\text{пар}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

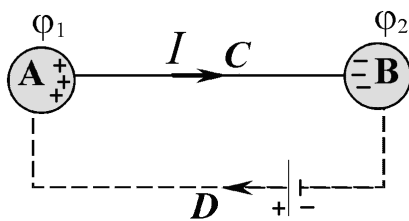


Рис. 10. Механізм виникнення постійного струму

З'ясуємо, за якої умови по провіднику буде протікати постійний струм. Якщо два тіла A і B (рис. 10), заряджені до потенціалів φ_1 та φ_2 (нехай $\varphi_1 > \varphi_2$), сполучити провідником C , то вільні електрони провідника під дією сил електричного поля почнуть рухатись в одному напрямку (спрямовано). По провіднику C потече струм I , в результаті чого потенціал тіла A буде

зменшуватися, а тіла B – збільшуватися до тих пір, поки потенціали обох не стануть рівними. Після чого поле всередині провідника C зникне, струму не стане. Отже, за допомогою заряджених тіл можна одержати тільки короткочасний струм, якщо не вжити спеціальних заходів щодо підтримки електричного поля в провіднику. Для того, щоб в провіднику C протікав постійний струм, необхідно створити такі умови, щоб потенціал тіла A не зменшувався, а тіла B – не збільшувався. Для цього потрібно заряди, що перейшли з тіла A в тіло B , повертати знову на тіло A по шляху D (див. рис. 10). Але на шляху D заряди треба зміщувати проти сили електростатичного поля. Таку роботу можуть здійснювати сили не електростатичного походження, наприклад, механічні, магнітні, хімічні та інші. Ці сили називають сторонніми.

Величина, яка дорівнює роботі, яку здійснюють сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду всередині джерела проти сил електростатичного поля, називається **електрорушійною силою** (ЕРС) джерела

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{пòд}}}{q}. \quad (22)$$

2.2 Правила Кірхгофа

Для розрахунку розгалужених кіл існують правила Кірхгофа, які є алгоритмом для складання рівнянь, що пов'язують струми, падіння напруги та величини ЕРС на різних ділянках розгалужених кіл.

Для застосування правил Кірхгофа в розгалуженому колі, наприклад, мостової схеми з'єднання опорів (рис. 11), виділяють три топологічні елементи кола:

Вузол – точка з'єднання трьох і більше провідників. На рис. 11 вузли позначені буквами A, B, C і D .

Гілка – шлях від одного вузла у сусідній вузол зі своїми елементами. В кожній гілці розгалуженого кола тече свій струм, тому номер гілки звичайно збігається з номером струму в колі. На рис. 11, наприклад, в гілці AD протікає струм I_1 , в гілці DC протікає струм I_2 , в гілці BC протікає струм I_3 , в гілці AB

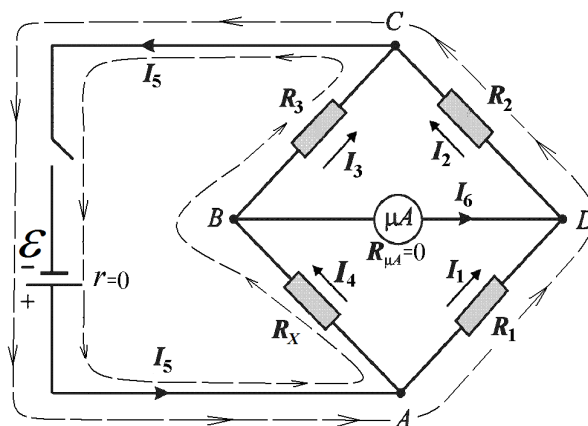


Рис. 11. Мостове розгалужене коло

протікає струм I_4 , в гілці CA протікає струм I_5 , в гілці BD протікає струм I_6 . Якщо напрям струму не заданий, то його слід вибрати довільно і зафіксувати на схемі.

Замкнутий контур – шлях від вузла в цей самий вузол зі своїми елементами. Для кожного даного замкнутого кола необхідно відразу вибрати напрям обходу (або за годинниковою стрілкою, або проти) та зафіксувати на схемі. На рис. 11, наприклад, напрям обходу контурів $ADCA$ і $ABCA$ вибраний проти годинникової стрілки.

Перше правило Кірхгофа застосовується для **вузлів** кола, де алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю (струми, які входять в вузол, додатні, що виходять з вузла – від'ємні):

$$\sum I_i = 0. \quad (23)$$

Друге правило Кірхгофа застосовується для **замкнутих контурів** кіл, де вздовж замкнутого контуру, алгебраїчна сума падінь напруги дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС джерел цього контуру:

$$\sum I_i R_i + \sum I_i r_i = \sum \mathcal{E}_i. \quad (24)$$

При використанні другого правила необхідно дотримуватись умов знаків:

- 1) падіння напруги IR та Ir беруться зі знаком “**плюс**”, коли напрям сили струму збігається з напрямом обходу контуру;
- 2) величина ЕРС джерела $\mathcal{E}$ береться зі знаком “**плюс**”, коли при обході контуру це джерело ми проходимо від негативного полюса до позитивного (від – до +).

3 Опис установки і методики вимірювань

Прилади та приладдя: (див. рис. 11). Невідомий опір R_X , джерело напруги $\mathcal{E}$, мікроамперметр μA (нуль індикатор із нулем у середині шкали), резистор с відомим опором R_1 , однодекадний магазин опорів R_2 , тридекадний магазин опорів R_3 .

Мостова схема вимірів опорів є самим точним методом виміру опорів.

Мостом Уїтстона називається коло, зображене на рис. 11, складене із чотирьох ділянок з опорами R_X , R_1 , R_2 , R_3 . Ці ділянки називаються плечима моста. В плече AB увімкнено невідомий опір R_X , який вимірюється у цій роботі. В плечі DC і BC увімкнено магазини R_2 та R_3 , величину опорів яких можна змінювати. Опір R_1 плеча AD постійний. Таким чином, опори R_1 , R_2 , R_3 відомі. В діагональ AC увімкнено джерело струму, в діагональ BD увімкнено мікроамперметр, який відіграє роль нуль-індикатора. Коли замкнуті ключ, то по ділянках AB , AD , BC і DC потечуть струми у напрямках, вказаних на рис. 12. У діагоналі BD через мікроамперметр струм потече від B до D , коли потенціал точки B більше потенціалу точки D ($\varphi_B > \varphi_D$), і від D до B , коли $\varphi_D > \varphi_B$.

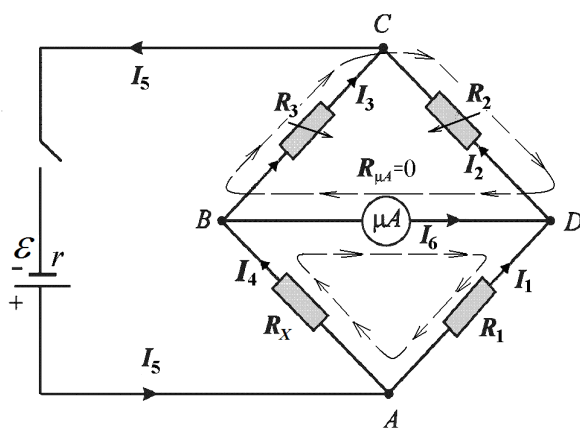


Рис. 12. Схема установки для виміру невідомого опору R_X

Точки B і D лежать між точками A і C , тому їх потенціал завжди знаходиться між φ_A і φ_C ($\varphi_A > \varphi_C$), тому що точка A підключена до позитивного полюса джерела. Отже, шляхом змінювання опорів R_3 та R_2 завжди можна одержати рівність потенціалів точок B і D ($\varphi_B = \varphi_D$). У цьому випадку струму в діагоналі BD не буде ($I_6 = 0$). Такий стан моста, за якого струм у мікроамперметрі дорівнює нулю, називається рівновагою моста.

3.1 Умова рівноваги моста за законом Ома

Для однорідного плеча AB запишемо:

$$I_4 = \frac{\varphi_A - \varphi_B}{R_X}, \text{ звідси } I_4 R_X = \varphi_A - \varphi_B. \quad (25)$$

Аналогічно для однорідного плеча AD

$$I_1 = \frac{\varphi_A - \varphi_D}{R_1}, \text{ звідси } I_1 R_1 = \varphi_A - \varphi_D. \quad (26)$$

Тому що в момент рівноваги $\varphi_B = \varphi_D$, то праві і ліві частини рівнянь (25) та (26) рівні між собою:

$$I_4 R_X = I_1 R_1. \quad (27)$$

Аналогічно для плечей BC і DC одержимо

$$I_3 R_3 = I_2 R_2. \quad (28)$$

В момент рівноваги струм через мікроамперметр не тече, отже у точці B струм I_4 не розгалужується, а повністю тече крізь опір R_3 , тобто $I_4 = I_3$. У точці D струм I_1 також повністю переходить в ділянку DC , тобто $I_1 = I_2$. Тоді рівняння (28) можна переписати у вигляді

$$I_4 R_3 = I_1 R_2. \quad (29)$$

Розділивши рівняння (27) на (29), отримаємо умову рівноваги моста

$$\frac{R_X}{R_3} = \frac{R_1}{R_2} \quad (30)$$

3.2 Умова рівноваги моста за правилами Кірхгофа

Будемо використовувати обрані в п. 2.2 позначення (див. рис.12).

Перед складанням рівнянь необхідно перевірити:

- а) напрям струмів обрано та зазначено (див. рис.12);
- б) напрям обходу контурів $ABDA$ та $BCDB$ зазначено.

При складанні рівнянь за першим правилом Кірхгофа необхідно врахувати, що струм, який входить до вузла, входить у рівняння зі знаком плюс, а струм, що виходить із вузла – зі знаком мінус.

За першим правилом Кірхгофа для вузла B

$$I_4 - I_3 - I_6 = 0. \quad (31)$$

За першим правилом Кірхгофа для вузла D

$$I_1 - I_2 + I_6 = 0. \quad (32)$$

Ще два рівняння одержимо, виходячи з другого правила Кірхгофа. При цьому необхідно дотримуватись наступних правил знаків: а) падіння напруги (добуток IR чи Ir) входить у рівняння зі знаком плюс, якщо напрям струму збігається з напрямом обходу контуру, в іншому випадку – зі знаком мінус; б) ЕРС входить у рівняння зі знаком плюс, якщо обхід контуру збігається з напрямом роботи сторонніх сил (перехід джерела відбувається від мінуса до плюса), в іншому випадку – зі знаком мінус.

Нам необхідно знайти співвідношення між опорами плечей моста, тому для складання рівнянь виберемо замкнуті контури, що складаються тільки з цих плечей.

За другим правилом Кірхгофа для контуру $ABDA$

$$I_4 R_{\delta} + I_6 R_{\mu A} - I_1 R_1 = 0, \quad (33)$$

і для контуру $BCDB$

$$I_3 R_3 - I_2 R_2 - I_6 R_{\mu A} = 0. \quad (34)$$

З урахуванням умови рівноваги $I_6 = 0$, та використовуючи (33) та (34) отримаємо

$$\begin{aligned} I_3 R_3 &= I_2 R_2; \\ I_4 R_{\delta} &= I_1 R_1, \end{aligned} \quad (35)$$

а з (31) та (32)

$$\begin{aligned} I_4 &= I_3; \\ I_1 &= I_2. \end{aligned} \quad (36)$$

Після підстановки (36) у (35) отримаємо:

$$I_3 R_3 = I_2 R_2, \quad (37)$$

$$I_3 R_{\delta} = I_2 R_1. \quad (38)$$

Поділивши рівняння (38) на (37), отримаємо умови рівноваги моста

$$\frac{R_X}{R_3} = \frac{R_1}{R_2} \quad (39)$$

Звідки невідомий опір

$$R_{\bar{O}} = R_3 \frac{R_1}{R_2} \quad (40)$$

Таким чином, опір невідомого провідника R_X можна визначати за формулою (40) тільки за умови рівноваги моста (тільки коли струм через мікроамперметр $I_6 = 0$).

4 Оброблення результатів вимірювань

Для отримання результату **прямих вимірювань** величини x необхідне:

1) Експериментально визначити значення вимірюваної величини n разів ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) і записати результат цих вимірювань в другому стовпчику таблиці вимірювань (див. приклад оформлення протоколу наприкінці кожної роботи). У першому стовпчику таблиці вимірювань записується порядкове число вимірювання.

2) Обчислити **середнє значення** вимірюваної величини:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (41)$$

3) Знайти **відхилення** Δx_i одержаних величин від середнього значення вимірюваної величини і записати результати в третьому стовпчику таблиці вимірювань:

$$\Delta x_1 = \langle x \rangle - x_1; \quad \Delta x_2 = \langle x \rangle - x_2; \quad \dots; \quad \Delta x_n = \langle x \rangle - x_n \quad (42)$$

4) Звести кожне відхилення в квадрат, і записати в четвертому стовпчику таблиці вимірювань. Потім підсумувати ці квадрати:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2 \quad (43)$$

5) Знайти абсолютну **статистичну похибку** результатів вимірювання $\Delta x_{\text{СТ}}$ за допомогою формули Стюдента:

$$\Delta x_{\text{СТ}} = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (44)$$

де α – довірна ймовірність; n – число вимірювань; $t_{\alpha, n}$ – коефіцієнт Стюдента.

6) Записати **абсолютну похибку приладу вимірювання** $\Delta x_{\text{ПР}}$, яка вказується на приладі. Якщо на приладі не вказана його **абсолютна похибка** $\Delta x_{\text{ПР}}$, то її можна визначити знаючи клас точності приладу $\beta\%$, який може бути вказаний на шкалі будь-якого електровимірювального приладу замість абсолютної похибки, використовуючи рівняння:

$$\Delta x_{\text{ПР}} = \frac{\beta\% \cdot x_{\text{max}}}{100} \quad (45)$$

де x_{max} – межа шкали приладу.

7) Знайти **повну абсолютну похибку** вимірювань

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{НД}})^2 + (\Delta x_{\text{ІД}})^2}. \quad (46)$$

Якщо у вимірюваннях було використано декілька приладів, то при розрахунку повної похибки в (46) під коренем треба додати квадрати абсолютних похибок усіх приладів вимірювання.

8) Обчислити **відносну похибку** вимірювань:

$$\delta = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}. \quad (47)$$

9) Записати **кінцевий результат** у вигляді **довірчого інтервалу** і **відносної похибки** у відсотках:

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta x)_a = (\dots \pm \dots)_{0,95}; \quad \delta_x \% = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\% = \dots\%. \quad (48)$$

Для отримання результату **непрямого вимірювання** величини у необхідно:

1) Обчислити **середнє значення** вимірюваної величини $\langle y \rangle$ за формулою, підставляючи в неї середні значення виміряних величин $\langle a \rangle$, $\langle b \rangle$, $\langle c \rangle$, наприклад:

$$\langle y \rangle = \frac{8 \langle a \rangle^4 \cdot \sqrt[3]{\langle b \rangle^2}}{7 \langle c \rangle^5}. \quad (49)$$

2) Обчислити **відносну похибку** вимірюваної величини δ_y як суму квадратів відносних похибок виміряних величин δ_a , δ_b , δ_c за формулою, яка заздалегідь повинна бути одержана. Для нашого прикладу:

$$\delta_y = \sqrt{(4\delta_a)^2 + \left(\frac{2}{3}\delta_b\right)^2 + (5\delta_c)^2} = \sqrt{\left(4\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\frac{\Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(5\frac{\Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2}, \quad (50)$$

де Δa , Δb , Δc – абсолютні похибки виміряних величин; $\langle a \rangle$, $\langle b \rangle$, $\langle c \rangle$ – їх середні значення.

3) Знайти **абсолютну похибку** вимірюваної величини

$$\Delta y = \langle y \rangle \cdot \delta_y. \quad (51)$$

4) Записати **кінцевий результат** у вигляді **довірчого інтервалу** і **відносної похибки** у відсотках:

$$y = (\langle y \rangle \pm \Delta y)_a = (\dots \pm \dots)_{0,95}; \quad \delta_y \% = \delta_y \cdot 100\% = \dots\%. \quad (52)$$

5 Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему рис. 12, увімкнувши у плече AB невідомий опір R_x .
2. У плечі DC за допомогою однодекадного магазину опору R_2 встановити значення опору, що дорівнює R_1 , так щоб відношення було $R_1/R_2 = 1$.
3. Змінюючи опір тридекадного магазину R_3 , добитися рівноваги моста $I_6 = 0$.
4. Записати значення R_1 , R_2 , R_3 у раніше підготовлену таблицю вимірів.
5. Змінюючи опір однодекадного магазину R_2 , зробити ще чотири вимірювання для інших значень відношення R_1/R_2 , наприклад, що дорівнюють $1/3$; $1/5$; $1/7$; $1/9$.
6. За формулою (40) розрахувати $n = 5$ разів значення невідомого опору при

- різних значеннях R_2 і R_3 . Записати п'ять одержаних значень R_{Xi} в таблицю.
7. Розрахувати середнє значення $\langle R_X \rangle$ за формулою (41), відхилення ΔR_{Xi} кожного значення вимірюваної величини R_{Xi} від середнього значення $\langle R_X \rangle$ за формулою (42), а також суму квадратів відхилень від середнього $\sum_{i=1}^n (\Delta R_{Xi})^2$ за формулою (43).
8. Знаючи суму квадратів відхилень від середнього $\sum_{i=1}^n (\Delta R_{Xi})^2$, за формулою Стюдента (44), визначити абсолютну статистичну похибку $\Delta R_X^{\text{НД}}$ з урахуванням того, що для довірчої ймовірності $\alpha = 0,95$ та $n = 5$ вимірів, коефіцієнт Стюдента $t_{0,95;5} = 2,77$.
9. Оскільки невідомий опір розраховувався за формулою (40) за показниками трьох вимірювальних приладів R_1, R_2, R_3 , то похибку приладу вимірювання $\Delta R_X^{\text{ІД}}$ можна визначити як похибку непрямих вимірів за формулою (51). Як середнє значення взяти розраховане в п. 7 середнє значення $\langle R_X \rangle$, а як відносну похибку – суму квадратів (50) зменшених в 100 разів класів точності всіх трьох приладів $\beta_{R_1} \%$, $\beta_{R_2} \%$ та $\beta_{R_3} \%$.

$$\Delta R_X^{\text{ІД}} = \langle R_X \rangle \cdot \delta_{\text{ІД}} = \langle R_X \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{\beta_{R_1} \%}{100}\right)^2 + \left(\frac{\beta_{R_2} \%}{100}\right)^2 + \left(\frac{\beta_{R_3} \%}{100}\right)^2},$$

тут, на відміну від (50) всі коефіцієнти за відносних похибок дорівнюють одиниці, оскільки в робочу формулу (40) всі величини R_1, R_2, R_3 входять у першому ступені.

10. Визначити повну абсолютну похибку вимірів опору ΔR_X за формулою (46).
11. Обчислити відносну похибку δ_{R_X} за формулою (47).
12. Записати кінцевий результат у вигляді довірчого інтервалу і відносної похибки у відсотках (48).
13. Зробити висновок про те, яка із компонент похибки (статистична або приладова) робить основний вклад у повну похибку вимірів.

6 Контрольні запитання

- В яких одиницях вимірюється опір у системі СІ?
- Від чого залежить опір провідника?
- Як визначити спільний опір провідників при послідовному і паралельному з'єднаннях?
- Накреслити схему моста Уїтстона.
- У чому полягає метод вимірювання опорів за допомогою моста Уїтстона?
- Виведіть співвідношення між опорами плечей моста за умови його рівноваги:
 - за допомогою закону Ома;
 - за допомогою правил Кірхгофа.

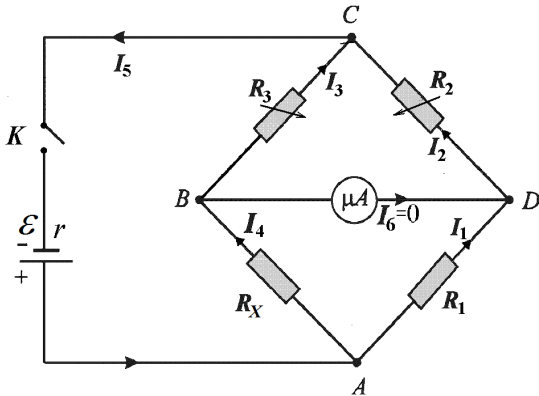
7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 2-2

I. Домашнє завдання.

II. Протокол виконання лабораторної роботи №2-2.

- 1) Тема: Вимірювання опору за допомогою моста Уїтстона.
- 2) Мета роботи: Вивчити методику вимірювання опору провідника за допомогою моста Уїтстона.
- 3) Схема установки:



R_X – невідомий опір;
 R_2 – однокілово-омний магазин опорів;
 R_3 – трикілово-омний магазин опорів;
 R_1 – резистор з відомим опором;
 ε, r – джерело ЕРС;
 μA – мікроамперметр;
 K – ключ.

4) Таблиця приладів

№ з/п	Найменування	Тип	Заводський номер	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка (клас точності)
1	Зразковий резистор R_1	МЛТ	-	10 кОм	-	1
2	Магазин опорів R_2	Р33	-	90 кОм	10 кОм	0,2
3	Магазин опорів R_3	Р333	-	9999 Ом	1 Ом	0,2
4	Мікроамперметр (нуль-індикатор)	М 906		50 мкА	2 мкА	1,5

5) Формули розрахунку величин

5.1) Невідомий опір за умови рівноваги моста $I_6 = 0$

$$R_X = R_3 \frac{R_1}{R_2}.$$

5.2) Абсолютна статистична похибка вимірювання опору

$$\Delta R_{\bar{O}}^{\text{НО}} = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta R_{\bar{O}i})^2}{n(n-1)}},$$

де $\alpha = 0,95$ – довірна ймовірність; $n = 5$ – число вимірювань; $t_{0,95; 5} = 2,77$ – коефіцієнт Стюдента.

5.3) Абсолютна похибка приладу при вимірюванні опору

$$\Delta R_{\bar{O}}^{\text{ІД}} = \langle R_X \rangle \cdot \delta_{\text{ІД}} = \langle R_X \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{\beta_{R_1} \%}{100} \right)^2 + \left(\frac{\beta_{R_2} \%}{100} \right)^2 + \left(\frac{\beta_{R_3} \%}{100} \right)^2},$$

де $\beta_{R_1} \%$, $\beta_{R_2} \%$ та $\beta_{R_3} \%$ – класи точності резистора з відомим опором R_1 ,

однодекадного магазина опорів R_2 і тридекадного магазина опорів R_3 .

5.4) Повна абсолютна похибка вимірювання опору

$$\Delta R_X = \sqrt{(\Delta R_{\tilde{O}}^{\tilde{N}\tilde{O}})^2 + (\Delta R_{\tilde{O}}^{\tilde{I}\tilde{D}})^2}.$$

5.5) Відносна похибка вимірювання опору у відсотках

$$\delta_{R_X} = \frac{\Delta R_X}{\langle R_X \rangle} \cdot 100\%.$$

6) Таблиця результатів вимірювань:

$$R_1 = 10 \text{ кОм} = 10000 \text{ Ом};$$

№	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_{Xi}, \text{ Ом}$	$\Delta R_{Xi}, \text{ Ом}$	$(\Delta R_{Xi})^2, \text{ Ом}^2$
1	10000				
2					
3					
4					
5					
			$\langle R_X \rangle =$		$\sum_{i=1}^n (\Delta R_{Xi})^2 =$

7) Розрахунки основних фізичних величин:

7.1) Розрахунок невідомого опору

$$R_{\tilde{O}1} = \dots \frac{1000}{1000} = \dots \text{ Ом}; \quad R_{\tilde{O}2} = \dots \frac{1000}{\dots} = \dots \text{ Ом}; \quad R_{\tilde{O}3} = \dots \frac{1000}{\dots} = \dots \text{ Ом};$$

$$R_{\tilde{O}4} = \dots \frac{1000}{\dots} = \dots \text{ Ом}; \quad R_{\tilde{O}5} = \dots \frac{1000}{\dots} = \dots \text{ Ом}.$$

7.2) Абсолютна статистична похибка вимірювання опору:

$$\Delta R_{\tilde{O}}^{\tilde{N}\tilde{O}} = 2,77 \sqrt{\frac{\dots}{5(5-1)}} = \dots \text{ Ом}.$$

7.3) Абсолютна похибка приладу при вимірюванні опору:

$$\Delta R_{\tilde{O}}^{\tilde{I}\tilde{D}} = \dots \cdot \sqrt{\left(\frac{\dots}{100}\right)^2 + \left(\frac{\dots}{100}\right)^2 + \left(\frac{\dots}{100}\right)^2} = \dots \text{ Ом}.$$

7.4) Абсолютна та відносна похибки вимірювання опору:

$$\Delta R_{\tilde{O}} = \sqrt{(\dots)^2 + (\dots)^2} = \dots \text{ Ом}; \quad \delta_{R_X} = \frac{\dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots\%.$$

8) Кінцеві результати:

$$R_X = (\langle R_X \rangle \pm \Delta R_X)_{0,95} \text{ Ом} = (\dots \pm \dots)_{0,95} \text{ Ом}; \quad \delta_{R_X} = \dots\%.$$

9) Висновок: При вимірюванні невідомого опору за допомогою моста Уїтстона основний внесок в абсолютну похибку зробила ...

10) Роботу виконав(ла): _____ (прізвище розбірливо).

Роботу перевірив:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2-3 ЗНАХОДЖЕННЯ ЕРС ДЖЕРЕЛА

1 Мета роботи:

1. Вивчити характер розподілу потенціалів вздовж замкнутого кола.
2. Вивчити методи вимірювань величини ЕРС модельних джерел:
 - а) метод компенсації;
 - б) метод прямого вимірювання (метод відомого опору) та визначити область застосування цього методу.

2 Ключові положення

В пункті 2 *Ключові положення* лабораторної роботи № 2-1 були дані визначення *потенціалу* (11) і *різниці потенціалів* (14) як одних із основних характеристик електростатичного поля. Нижче будуть надані визначення *величини ЕРС джерела, падіння напруги та напруги*.

2.1 Розподіл потенціалу вздовж неоднорідної ділянки кола

Неоднорідною ділянкою кола називається частина електричного кола, що містить джерело ЕРС. Визначимо, як в результаті роботи сторонніх сил змінюється потенціал на різних ділянках електричного кола.

Спочатку розглянемо ділянку електричного кола 1–2, що складається тільки з одного джерела ЕРС (рис. 13).

У режимі холостого ходу струм через джерело не тече, тоді вся робота сторонніх сил $A_{\text{нòîð}}$ витрачається тільки на розподіл зарядів усередині джерела. При цьому напруга холостого ходу дорівнює максимально можливій різниці потенціалів на клеммах джерела (штрихова лінія на рис. 13):

$$U_{\text{õõ}} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{A_{\text{нòîð}}}{q} = \mathcal{E}, \quad [\mathcal{E}] = \hat{A}. \quad (53)$$

Таким чином, *величина ЕРС джерела $\mathcal{E}$* – це максимально можлива напруга на клеммах джерела в режимі холостого ходу, чисельно дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню зарядів у середині джерела. Величина ЕРС джерела вимірюється у вольтах.

Коли через джерело $\mathcal{E}$ протікає струм I , то частина роботи сторонніх сил $A_{\text{нòîð}}$ витрачатиметься на подолання внутрішнього опору джерела r . Ця частина роботи за законом Джоуля-Ленца дорівнює

$$A_{\text{îîð}} = I^2 r \Delta t = q \cdot Ir.$$

Тоді напруга на клеммах джерела буде меншою, ніж в режимі холостого

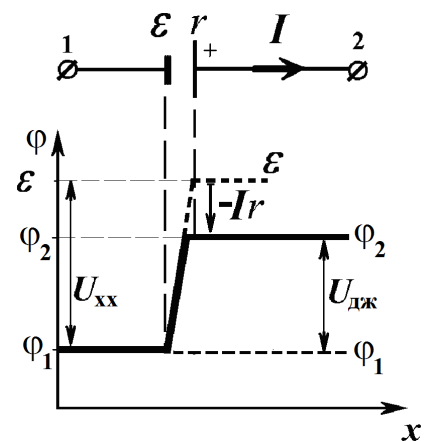


Рис. 13. Розподіл потенціалу на клеммах джерела ЕРС

ходу (53) на величину **падіння напруги** Ir на **внутрішньому опорі джерела**:

$$U_{\text{аа}} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{A_{\text{поіо}} - A_{\text{мдо}}}{q} = \mathcal{E} - Ir. \quad (54)$$

На рис. 13 це падіння напруги Ir на внутрішньому опорі джерела r зображене стрілкою вниз.

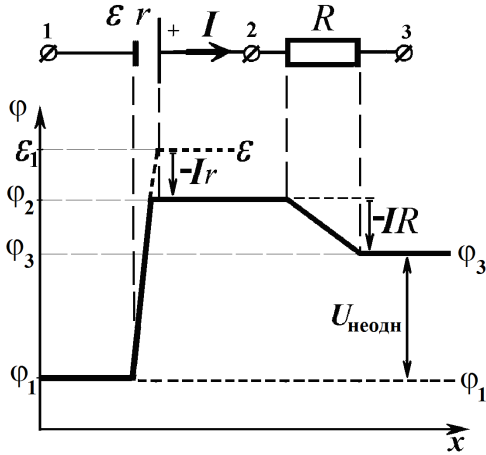


Рис. 14. Розподіл потенціалу вздовж неоднорідної ділянки кола

Розглянемо тепер ділянку електричного кола 1–3 (рис. 14), яка окрім джерела $\mathcal{E}$, містить зовнішній опір R . Тоді частина роботи сторонніх сил $A_{\text{поіо}}$ витрачається на подолання внутрішнього опору джерела r та зовнішнього опору R . Оскільки ця частина роботи виділяється на опорах r та R в вигляді тепла, то за законом Джоуля-Ленца вона буде дорівнювати

$$A_{\text{мдо}} = I^2(r + R)\Delta t = q \cdot I(r + R).$$

Тоді напруга на клемх неоднорідної ділянки кола 1–3 в порівнянні з (54) зменшиться ще і на величину **падіння напруги**

IR на зовнішньому опорі:

$$U_{\text{іаіа}} = \varphi_3 - \varphi_1 = \frac{A_{\text{поіо}} - A_{\text{мдо}}}{q} = \mathcal{E} - I(r + R). \quad (55)$$

На рис. 14 обидва падіння напруги Ir і IR зображені стрілками вниз.

Розглянемо тепер ділянку електричного кола 1–4, що містить одне

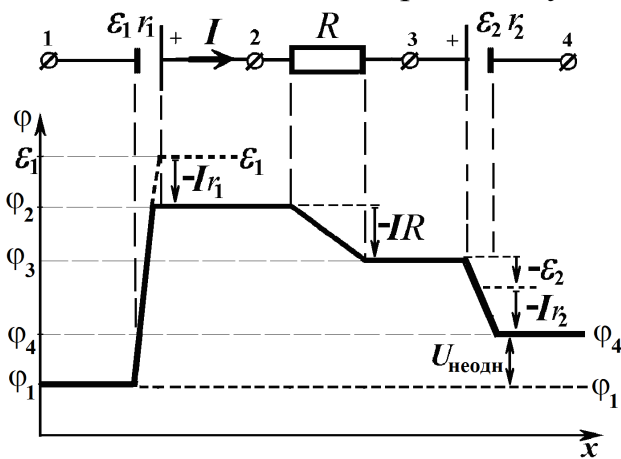


Рис. 15. Розподіл потенціалу вздовж неоднорідної ділянки кола, що має зустрічне включення джерела ЕРС

джерело ЕРС $\mathcal{E}_1$, робота сторонніх сил якого співпадає з напрямом струму, і друге джерело ЕРС $\mathcal{E}_2$, робота сторонніх сил якого не збігається з напрямом струму (рис. 15). В цьому випадку $\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}_1$, а це означає, що джерело $\mathcal{E}_2$ буде заряджатись струмом, що створюється джерелом $\mathcal{E}_1$.

Тоді частина роботи сторонніх сил $A_{\text{поіо}}$, що створюється джерелом $\mathcal{E}_1$ витрачатиметься, як і раніше, на подолання внутрішнього опору першого джерела r_1 , зовнішнього опору R , та крім

того, на подолання внутрішнього опору другого джерела r_2

$$A_{\text{мдо}} = I^2(r + R)\Delta t = q \cdot I(r_1 + R + r_2),$$

і на зарядку другого джерела $\mathcal{E}_2$

$$A_{\text{сао}} = \mathcal{E}q.$$

Тоді напруга на клеммах такої неоднорідної ділянки кола буде

$$U_{\text{іаіаі}} = \varphi_4 - \varphi_1 = \frac{A_{\text{нòіð}} - A_{\text{мò}} - A_{\text{çàð}}}{q} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 - I(r_1 + R + r_2). \quad (56)$$

З (56) видно, що при цьому від більшої ЕРС $\mathcal{E}_1$, робота сторонніх сил якої збігається зі струмом в колі, буде відніматися і ЕРС джерела $\mathcal{E}_2$, робота сторонніх сил якого не збігається з напрямом струму, і падіння напруги на всіх опорах ділянки кола (див. рис. 15).

Якщо кінці неоднорідної ділянки кола 1–3 на рис. 14 замкнуті провідником, то потенціали точок 1 та 3 зрівнюються $\varphi_1 = \varphi_3$, і ми одержимо найпростіший варіант повного кола постійного струму (рис. 16). В цьому випадку вся робота сторонніх сил $A_{\text{нòіð}}$ витрачається на подолання внутрішнього опору джерела r і зовнішнього опору R :

$$A_{\text{нòіð}} = A_{\text{мò}}.$$

Тому що $\varphi_3 - \varphi_1 = 0$, то з (55) одержуємо, що вся ЕРС $\mathcal{E}$, яка створюється сторонніми силами джерела падає на внутрішньому опорі джерела r та на зовнішньому опорі R :

$$\mathcal{E} = I(r + R). \quad (57)$$

На рис. 16 обидва падіння напруги Ir та IR зображені стрілками вниз.

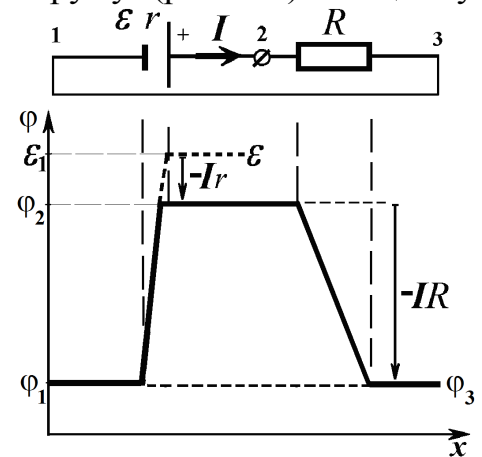


Рис. 16. Розподіл потенціалу вздовж повного кола

З формул (53)...(56) видно, що **напруга** U — це різниця потенціалів на клеммах ділянки кола. Проте, слід зазначити, що **напруга** $U_{\text{аа}}$ на клеммах джерела ЕРС (54) буде позитивною, та визначається як робота сторонніх (внутрішніх) сил по переміщенню одиничного позитивного заряду. При цьому з рис.14 видно, що вона дорівнює $U_{\text{аа}} = \varphi_2 - \varphi_1$ різниці кінцевого потенціалу φ_2 (більшого), і початкового потенціалу φ_1 (меншого). Аналогічно визначається напруга на будь-якій неоднорідній ділянці кола (53)... (56).

Якщо ж визначати **напругу** $U_{\text{іаі}}$ на клеммах однорідної ділянки 2–3, що не містить джерела ЕРС (рис. 14), то для того, щоб вона була позитивною її необхідно розглядати як роботу сил поля (зовнішніх) по переміщенню одиничного позитивного заряду. При цьому з рис.14 видно, що вона дорівнює $U_{\text{іаі}} = \varphi_2 - \varphi_3$ різниці початкового потенціалу φ_2 (більшого), і кінцевого потенціалу φ_3 (меншого):

$$U_{\text{іаі}} = \varphi_2 - \varphi_3 = \frac{A_{\text{мò}}}{q} = IR. \quad (58)$$

Тому для однорідної ділянки кола на рис. 10 закон Ома записується в вигляді формули (20).

2.2 Закон Ома для різних ділянок кола

З (54), (55), (57) і (58) неважко записати закон Ома для ділянки кола 1–2,

що складається тільки з одного джерела ЕРС (див. рис. 13):

$$I = \frac{\mathcal{E} - U_{\text{вв}}}{r}; \quad (59)$$

закон Ома для неоднорідної ділянки кола 1–3 (див. рис. 14):

$$I = \frac{\mathcal{E} - U_{\text{вв}}}{r + R}; \quad (60)$$

закон Ома для повного кола (рис. 16):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R}; \quad (61)$$

закон Ома для однорідної ділянки кола 1–2 (див. рис. 15):

$$I = \frac{U_{\text{вв}}}{R}. \quad (62)$$

За допомогою закону Ома можна розраховувати тільки нерозгалужені ділянки кола або нерозгалужене повне коло.

3 Опис установки і методики вимірювань

Прилади та приладдя (рис. 17): Два джерела ЕРС $\mathcal{E}_1$ та $\mathcal{E}_2$, вольтметр V , мікроамперметр μA (нуль індикатор із нулем у середині шкали), потенціометр P , однодекадний магазин опор R_2 , ключі K_1 та K_2 .

Як модельне джерело ЕРС з невідомою величиною ЕРС вибираємо джерело $\mathcal{E}_1$. Послідовно з ним з'єднаємо додатково однодекадний магазин опор R_2 , який буде моделювати внутрішній опір джерела. Таким чином ми отримуємо модельне джерело ЕРС зі змінним внутрішнім опором:

$$\mathcal{E}_X = \mathcal{E}_1; \quad r_X = r_1 + R_2. \quad (63)$$

3.1 Вимірювання ЕРС джерела методом компенсації

Якщо безпосередньо до клем модельного джерела ЕРС $\mathcal{E}_X$ підключити вольтметр V (рис. 18), то показання вольтметра не буде дорівнювати ЕРС джерела. Вольтметр показує різницю потенціалів, тобто напругу між точками A і B , до яких він увімкнений, яка згідно з (54) дорівнює

$$\varphi_B - \varphi_A = \mathcal{E}_X - Ir_X. \quad (64)$$

Метод компенсації заснований на тому, що різниця потенціалів на полюсах модельного джерела $\mathcal{E}_X$ дорівнює ЕРС, якщо струм в джерелі відсутній. Добитися цього можна якщо назустріч першому джерелу $\mathcal{E}_1$ увімкнути допоміжне джерело $\mathcal{E}_2$ як показано на рис. 17, а.

Для повної компенсації струму необхідно, щоб виконувалась умова $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$. Якщо з початку замкнути ключ K_2 при розімкненому ключі K_1 , то струм потече по контуру $K_2MDC\mathcal{E}_2K_2$. На ділянці $K_1A\mathcal{E}_1BCDLK_1$ струм відсутній. Потенціали точок B і C однакові $\varphi_B = \varphi_C$. Згідно з (53) потенціал точки A більше потенціалу точки B на величину $\mathcal{E}_X$: $\varphi_A - \varphi_B = \mathcal{E}_X$. Якщо $\varphi_M - \varphi_C > \mathcal{E}_X$, то $\varphi_M > \varphi_A > \varphi_C$, тому на потенціометрі завжди можна знайти таку точку F ,

потенціал якої дорівнює потенціалу точки A ($\varphi_F = \varphi_A$). Якщо движок потенціометра поставити в таку точку F і замкнути ключ K_1 , струм по ділянці AD не потече, тому що $\varphi_A - \varphi_B = \varphi_A - \varphi_D = 0$. Не потече струм і по ділянках AB і BC , послідовно з'єднаними з ділянкою AD . Ми говоримо, що в цей момент ЕРС $\mathcal{E}_X$ скомпенсована напругою допоміжного джерела $\mathcal{E}_2$. Показник мікроамперметра дорівнює нулю $I_1 = 0$.

По аналогії з (55) запишемо напругу на ділянці $CBAL$ (рис. 17, а):

$$\varphi_F - \varphi_C = \mathcal{E}_X - I_1 \cdot (r_X + R_{\mu A}). \quad (65)$$

Оскільки $I_1 = 0$, то

$$\varphi_F - \varphi_C = \mathcal{E}_X.$$

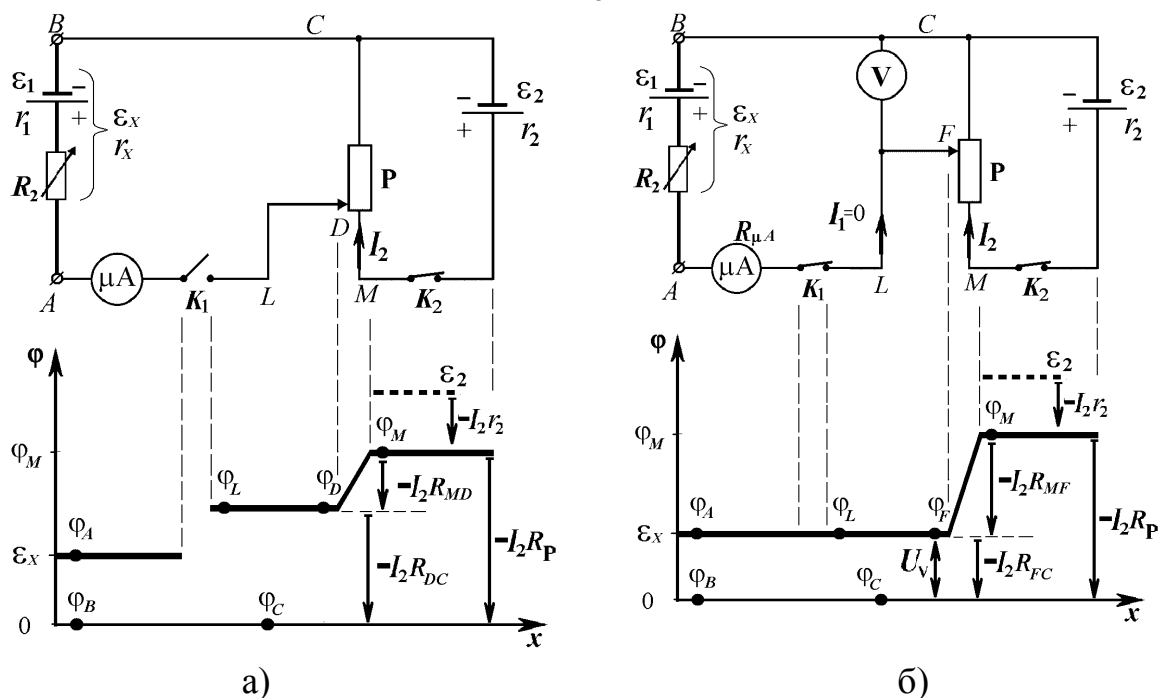


Рис. 17. Схема вимірювання ЕРС джерела методом компенсації:
а) ключ K_1 розімкнуто; б) ключ K_1 замкнуто

Для вимірювання цієї напруги між точками C і F вмикають вольтметр V , (рис. 17, б). Величина внутрішнього опору вольтметра не впливає на показники, оскільки з (65) видно, якщо $I_1 = 0$, то $U_V = \varphi_F - \varphi_C = \mathcal{E}_X$.

В цьому разі похибка вимірювань дорівнює похибці вольтметра.

3.2 Вимірювання ЕРС джерела прямим методом (метод відомого опору)

При безпосередньому вимірюванні напруги на клеммах джерела AB (рис. 18) різниця потенціалів, яку показує вольтметр (64), менше ЕРС на величину спаду напруги на внутрішньому опорі джерела.

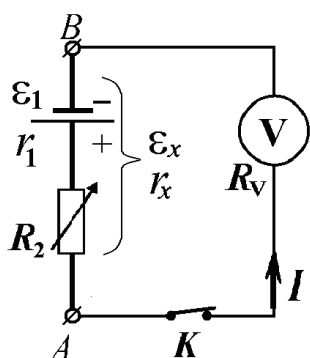


Рис. 18. Схема вимірювання ЕРС джерела прямим методом

Якщо $I r_X$ менше похибки вольметра, то значення ЕРС джерела можна прийняти рівним показнику вольметра, а похибку вимірювання взяти рівною похибці вольметра. Якщо спад напруги всередині джерела більший за похибки вольметра ЕРС, показники вольметра не будуть відповідати реальному значенню ЕРС джерела.

Сила струму в такому колі визначається згідно з законом Ома для повного кола (61)

$$I = \frac{\mathcal{E}_X}{r_X + R_V},$$

де R_V – опір вольметра, а $\mathcal{E}_X$ і r_X визначається згідно з (64).

Підставимо цей вираз для сили струму в (64) та отримаємо показники вольметра

$$U_V = \mathcal{E}_X - \frac{\mathcal{E}_X \cdot r_X}{r_X + R_V} = \mathcal{E}_X \left(1 - \frac{1}{1 + R_V/r_X} \right). \quad (66)$$

Можна побачити, що показник вольметра U_V відрізняється від $\mathcal{E}_X$, якщо опір вольметра R_V буде порівняний з внутрішнім опором джерела ЕРС r_X . Наприклад, якщо $R_V = r_X$, то $U_V = 0,5 \cdot \mathcal{E}_X$.

Відносна похибка прямих вимірювань ЕРС джерела у відсотках з урахуванням (66)

$$\beta_{\text{відв}} \% = \frac{\mathcal{E}_X - U_V}{\mathcal{E}_X} 100\% = \frac{r_X}{r_X + R_V} 100\% = \frac{100\%}{1 + R_V/r_X}, \quad (67)$$

також залежить від співвідношення R_V/r_X .

Таким чином, щоб вимірювати ЕРС джерела спочатку треба визначити діапазон значень внутрішніх опорів за яких можна зважати вимірювання коректними.

4 Оброблення результатів вимірювань (див. п. 4 лабораторної роботи № 2-2).

5 Порядок виконання роботи

5.1 Вимірювання ЕРС джерела методом компенсації

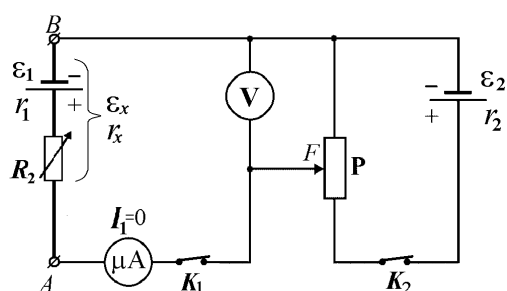


Рис. 19. Схема вимірювання ЕРС джерела методом компенсації

1. Зібрати схему рис. 19. В якості досліджуваного увімкнути джерело ЕРС $\mathcal{E}_1$, яке знаходиться ліворуч на лабораторній панелі, а як допоміжне джерело – праве джерело ЕРС $\mathcal{E}_2$.
2. Встановити значення опору однодекадного магазину опору $R_2 = 0$, таким чином, одержуємо $r_X = r_1$.

3. Повзунок потенціометра розмістити посередині. Замкнути ключ K_2 , потім K_1 .
4. Переміщенням повзунка потенціометра добитися відсутності струму крізь мікроамперметр.
5. В момент компенсації записати показники вольтметра $\mathcal{E}_{Xi}$ в таблицю. Вимкнути ключі K_1 та K_2 .
6. Встановлювати послідовно значення опору однодекадного магазину R_2 , що дорівнює $30\ \Omega$, $50\ \Omega$, $70\ \Omega$, $90\ \Omega$, тобто $r_X = r_1 + R_2$. Виконати пункти 3, 4 та 5.
7. Розрахувати **середнє значення** ЕРС $\langle \mathcal{E}_X \rangle$ за формулою (41), відхилення $\Delta \mathcal{E}_{Xi}$ кожного значення вимірюваної величини $\mathcal{E}_{Xi}$ від середнього значення $\langle \mathcal{E}_X \rangle$ за формулою (42), а також суму квадратів відхилень від середнього $\sum_{i=1}^n (\Delta \mathcal{E}_{Xi})^2$ за формулою (43).
8. Знаючи суму квадратів відхилень від середнього $\sum_{i=1}^n (\Delta \mathcal{E}_{Xi})^2$, за формулою Стюдента (44) визначити **абсолютну статистичну похибку** $\Delta \mathcal{E}_X^{\text{ст}}$ з урахуванням того, що для довірчої вірогідності $\alpha = 0,95$ та $n = 5$ вимірів, коефіцієнт Стюдента $t_{0,95; 5} = 2,77$.
9. **Абсолютну похибку приладу** вимірювання $\Delta \mathcal{E}_X^{\text{пр}}$ розрахувати за формулою (45)

$$\Delta \mathcal{E}_X^{\text{пр}} = \frac{\beta\% \cdot U_{\max}}{100},$$
 де $\beta\%$ – клас точності вольтметра; $U_{\max}$ – межа шкали вольтметра.
10. Визначити повну абсолютну похибку вимірів опору $\Delta \mathcal{E}_X$ за формулою (46). Обчислити середню відносну похибку $\delta \mathcal{E}_X$ за формулою (47).
11. Записати кінцевий результат вимірювання ЕРС джерела методом компенсації у вигляді довірчого інтервалу і відносної похибки у відсотках (48).
12. Зробити висновок про те, яка із компонент похибки (статистична або приладова) робить основний вклад у повну похибку вимірів.

5.2 Вимірювання ЕРС джерела прямим методом (метод відомого опору)

1. Зібрати схему рис. 18. В якості досліджуваного увімкнути джерело ЕРС $\mathcal{E}_1$, яке знаходиться ліворуч на лабораторній панелі.
2. Встановити значення опору однодекадного магазину опору $R_2 = 0$, таким чином, отримуємо $r_X = r_1$.
3. Записати показання вольтметра U_{Vi} в таблицю.
4. Установлювати послідовно значення опору однодекадного магазину R_2 , що

дорівнює 10% , 30% , 50% , 70% , 90% , тобто $r_X = r_1 + R_2$.
Виконати п. 3.

5. За формулою (67) розрахувати відносну похибку прямих вимірів ЕРС джерела у відсотках для всіх шести значень U_{Vi} :

$$\beta_{\text{відв}}(i) \% = \frac{\mathcal{E}_X - U_{Vi}}{\mathcal{E}_X} 100\% .$$

6. Представити кінцевий результат **вимірювання ЕРС джерела прямим методом** у вигляді графіка залежності відносної похибки прямих вимірів ЕРС у відсотках $\beta_{\text{відв}}(i) \%$ від відношення r_{Xi}/R_V .
7. Зробити висновок про те, в якій області відношення r_{Xi}/R_V виміри можна вважати коректними.

6 Контрольні запитання

1. Що називається потенціалом, різницею потенціалів?
2. Що називається ЕРС джерела, спаданням напруги, напругою?
3. Як записується закон Ома для однорідної ділянки кола, для неоднорідної ділянки кола, для усього кола?
4. За яких умов різниця потенціалів на полюсах джерела дорівнює його ЕРС?
5. Як розрахувати потенціали окремих точок кола, якщо відомі ЕРС всіх джерел та опори усіх ділянок кола?
6. Що компенсується при користуванні компенсаційним методом вимірювання ЕРС джерел? Намалювати схему.

7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 2-3

I. Домашнє завдання.

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 2-3.

1) Тема: Визначення ЕРС джерела.

2) Мета роботи:

2.1) Вивчити методи вимірювання ЕРС: а) метод компенсації; б) метод прямого вимірювання (метод відомого опору);

2.2) Визначити область застосування прямого методу вимірювань ЕРС.

3) Схема установки:

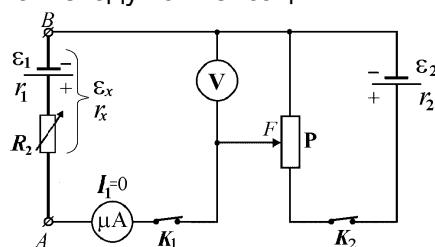
3.1) Схема методу компенсації

$\mathcal{E}_1$, r_1 – досліджуване джерело ЕРС;

R_2 – однодекадний магазин опорів;

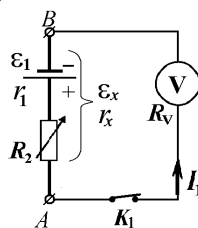
$\mathcal{E}_X$, r_X – модельне джерело ЕРС;

$\mathcal{E}_2$, r_2 – допоміжне джерело ЕРС;



P – потенціометр;
 V – вольтметр;
 μA – мікроамперметр (нуль-індикатор);
 K_1, K_2 – ключі.

3.2) Схема методу прямих вимірювань



3) Таблиця приладів

№ з/п	Найменування	Тип	Заводський номер	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка (клас точності)
1	Магазин опорів R_2	P33	-			
2	Вольтметр	M-906				
3	Мікроамперметр (нуль-індикатор)	M 906				

5) Формули розрахунку величин:

5.1) Абсолютна статистична похибка вимірювання ЕРС джерела за методом компенсації:

$$\Delta \varepsilon_X^{\text{НО}} = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{Xi})^2}{n(n-1)}},$$

де $\alpha = 0,95$ – довірна ймовірність, $n = 5$ – число вимірів, $t_{0,95; 5} = 2,77$ – коефіцієнт Стюдента.

5.2) Абсолютна похибка приладу при вимірюванні ЕРС джерела за методом компенсації:

$$\Delta \varepsilon_X^{\text{ІД}} = \frac{\beta\% \cdot U_{\max}}{100},$$

де $\beta\%$ – клас точності вольтметра; $U_{\max}$ – межа шкали вольтметра.

5.3) Повна абсолютна похибка вимірювання ЕРС джерела за методом компенсації:

$$\Delta \varepsilon_X = \sqrt{(\Delta \varepsilon_X^{\text{НО}})^2 + (\Delta \varepsilon_X^{\text{ІД}})^2}.$$

5.4) Відносна похибка вимірювання ЕРС джерела за методом компенсації у відсотках:

$$\delta \varepsilon_X = \frac{\Delta \varepsilon_X}{\langle \varepsilon_X \rangle} 100\%.$$

5.5) Відносна похибка прямих вимірювань ЕРС джерела у відсотках:

$$\beta_{\text{вд}} \% = \frac{\langle \varepsilon_X \rangle - U_V}{\langle \varepsilon_X \rangle} 100\%,$$

де U_V – показники вольтметра; $\langle \varepsilon_X \rangle$ – середнє значення вимірювання ЕРС джерела за методом компенсації.

6) Таблиця результатів прямих вимірювань:

$$R_V = 2 \cdot 10^5 \hat{\Omega}, r_1 = \dots \hat{\Omega}.$$

6.1) Метод компенсації					6.2) Метод прямих вимірювань		
№	$r_X, \hat{\varepsilon}_i$	$\varepsilon_X, \hat{A}$	$\Delta \varepsilon_X, \hat{A}$	$(\Delta \varepsilon_X)^2, \hat{A}^2$	U, B	$\beta_{\text{відв}}(i), \%$	r_{Xi} / R_V
1	$r_1 + 0$						
2	$r_1 + 10$						
3	$r_1 + 30$						
4	$r_1 + 50$						
5	$r_1 + 70$						
6	$r_1 + 90$						
		$\langle \varepsilon_X \rangle =$	$\sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{Xi})^2 =$				

7) Розрахунки фізичних величин:

7.1) Метод компенсації

Абсолютна статистична похибка вимірювання ЕРС джерела за методом компенсації:

$$\Delta \varepsilon_X^{\text{НО}} = 2,77 \sqrt{\frac{\dots}{5(5-1)}} = \dots \hat{A}.$$

Абсолютна похибка приладу при вимірюванні ЕРС джерела за методом компенсації:

$$\Delta \varepsilon_X^{\text{ІД}} = \frac{\dots \cdot \dots}{100} = \dots \hat{A}.$$

Абсолютна та відносна похибки вимірювання ЕРС джерела за методом компенсації:

$$\Delta \varepsilon_X = \sqrt{(\dots)^2 + (\dots)^2} = \dots \hat{A}, \quad \delta_{\varepsilon_X} = \frac{\dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%.$$

7.2) Метод прямих вимірювань:

Відносна похибка прямих вимірювань ЕРС джерела у відсотках:

$$\beta_{\text{відв}(1)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%; \quad \beta_{\text{відв}(4)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%;$$

$$\beta_{\text{відв}(2)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%; \quad \beta_{\text{відв}(5)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%;$$

$$\beta_{\text{відв}(3)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%; \quad \beta_{\text{відв}(6)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%.$$

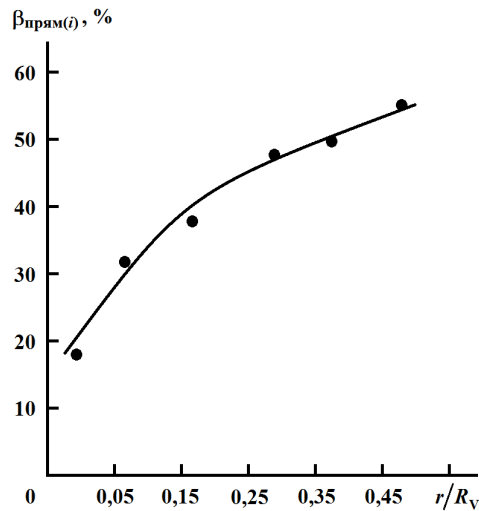
8) Кінцеві результати:

8.1) Метод компенсації:

$$\varepsilon_X = (\langle \varepsilon_X \rangle \pm \Delta \varepsilon_X)_{\alpha} \hat{A} = (\dots \pm \dots)_{0,95} \hat{A}; \quad \delta_{\varepsilon_X} = \dots \%.$$

8.2) Метод прямих вимірювань:

Графік залежності відносної похибки прямих вимірів ЕРС у відсотках $\beta_{\text{прям}}(i), \%$ від відношення r_{Xi}/R_V . Наприклад.



9) Висновки:

9.1) При вимірюванні ЕРС джерела за методом компенсації основний внесок в абсолютну похибку зробила...

9.2) При визначенні ЕРС джерела методом прямих вимірювань показники вольтметра можна вважати коректними, коли...

10) Роботу виконав(ла): _____ (прізвище розбірливо).

Роботу перевірів:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2-4 ПОТУЖНІСТЬ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1 Мета роботи:

1. Дослідити залежність корисної потужності, загальної потужності та ККД джерела струму від зовнішнього опору кола.
2. Експериментально знайти умови, за яких корисна потужність буде максимальною.

2 Ключові положення

2.1 Потужність в колі постійного струму

Для того, щоб у колі протікав постійний струм, необхідна наявність джерела ЕРС, в якому діють сторонні сили. Робота сторонніх сил з переміщення заряду Δq між полюсами джерела, як видно з (53), дорівнює

$$A_{\text{поід}} = \mathcal{E} \cdot \Delta q, \quad (68)$$

де $\mathcal{E}$ – ЕРС джерела.

У результаті здійснення цієї роботи, заряд Δq , перенесений сторонніми силами на позитивний полюс, одержує потенціальну енергію $\mathcal{E} \cdot \Delta q$. Якщо замкнути коло, то по зовнішньому навантажувальному опору R та внутрішньому опору джерела r потече струм. При цьому потенціальна енергія переходить в кінетичну енергію руху зарядів. Остання переходить в тепло, в механічну роботу в електромоторах, у енергію світла та інше. За законом збереження енергії ця загальна енергія, яка виділяється по всьому колу за час Δt дорівнює роботі сторонніх сил, здійсненою за цей час, тобто $W_{\text{с}} = A_{\text{поід}}$.

Таким чином, **загальна потужність** джерела струму чисельно дорівнює роботі, яку здійснюють сторонні сили джерела за одиницю часу:

$$P_{\text{с}} = \frac{W_{\text{с}}}{\Delta t} = \frac{A_{\text{поід}}}{\Delta t}. \quad (69)$$

З урахуванням (68) та визначення сили струму (19) одержуємо:

$$P_{\text{с}} = \frac{\mathcal{E} \cdot \Delta q}{\Delta t} = \mathcal{E} \cdot I. \quad (70)$$

Корисна потужність виділяється тільки на зовнішньому навантажувальному опорі R (тепло, механічна робота, світло та інше)

$$P_{\text{Е}} = IU_R = I^2 \cdot R, \quad (71)$$

де $U_R = I \cdot R$ – різниця потенціалів на навантажувальному опорі R .

На внутрішньому опорі r безкорисно виділяється у вигляді тепла потужність

$$P_{\text{А}} = IU_r = I^2 \cdot r, \quad (72)$$

де $U_r = I \cdot r$ – різниця потенціалів на внутрішній ділянці кола.

Цілеспрямованість витрат енергії джерела струму характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД). ККД джерела називається величина, яка чисельно дорівнює відношенню корисної потужності $P_{\text{Е}}$ до загальної потужності $P_{\text{с}}$:

$$\eta = \frac{P_{\text{Е}}}{P_{\text{С}}} . \quad (73)$$

Враховуючи рівняння (70) та (71), можна записати

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} . \quad (74)$$

2.2 Залежність загальної потужності, корисної потужності та ККД джерела ЕРС від навантажувального опору

Виведемо формули залежності $P_{\text{С}}$, $P_{\text{Е}}$, η від навантажувального опору R , кола постійного струму, в якому ЕРС джерела $\mathcal{E}$ та внутрішній опір r постійні.

2.2.1 Загальна потужність. Враховуючи закон Ома для повного кола (61) можна одержати залежність загальної потужності (70) від опору

$$P_{\text{С}} = \mathcal{E} \cdot I = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r} . \quad (75)$$

Звідси видно, що:

- в режимі короткого замикання $R = 0$, загальна потужність досягає найбільшого значення, коли знаменник мінімальний $P_{\text{С}}^{\text{max}} = \mathcal{E}^2 / r$;
- в режимі холостого ходу $R = \infty$, загальна потужність $P_{\text{С}} = 0$.

Графік залежності загальної потужності $P_{\text{С}}$ від зовнішнього опору R зображений на рис. 20.

2.2.2 Корисна потужність. Враховуючи закон Ома для повного кола (61) можна одержати залежність корисної потужності (71) від опору

$$P_{\text{Е}} = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2} . \quad (76)$$

Графік залежності корисної потужності $P_{\text{Е}}$ від зовнішнього опору R зображений на рис. 20. З формули (76), та за графіком видно, що:

- в режимі короткого замикання $R = 0$, корисна потужність $P_{\text{Е}} = 0$;
- в режимі холостого ходу $R = \infty$, корисна потужність $P_{\text{Е}} = 0$.

Зрозуміло, що при деякому проміжному значенні R корисна потужність повинна бути максимальною. Для того, щоб знайти це значення R , необхідно рівняння (76) диференціювати по R і першу похідну прирівняти з нулем:

$$\frac{dP_{\text{Е}}}{dR} = \frac{\mathcal{E}^2}{(R + r)^2} - \frac{2\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^3} = \frac{\mathcal{E}^2 (R + r - 2R)}{(R + r)^3} = \frac{\mathcal{E}^2 (r - R)}{(R + r)^3} = 0 . \quad (77)$$

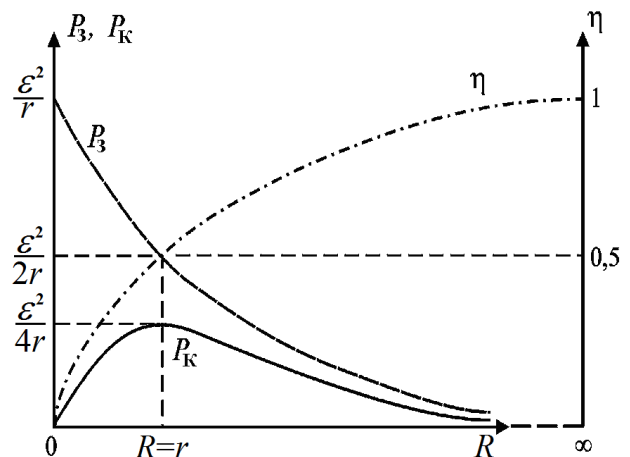


Рис. 20. Залежність загальної потужності, корисної потужності та ККД джерела ЕРС від навантажувального опору

Одержаний вираз перетворюється в нуль при $R - r = 0$. Отже, одержуємо умову узгодження навантажувального опору та опору джерела: корисна потужність досягає максимуму, коли зовнішній опір дорівнює внутрішньому:

$$R = r. \quad (78)$$

Всі елементи радіоелектронної апаратури (транзистори, мікросхеми, підсилювальні каскади, динаміки, прийомні та передавальні антени і т.п.) конструюються обов'язково з дотриманням цієї умови, за якою корисна потужність досягає свого максимального значення.

У випадку холостого ходу, коли в (77) $R = \infty$, тоді теж $dP_{\text{Е}}/dR = 0$, але за цієї умови $P_{\text{Е}} = 0$, тобто корисну потужність струму ми не отримуємо.

2.2.3 ККД джерела ЕРС. Враховуючи закон Ома для повного кола (61) можна отримати залежність ККД (74) від опору

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R + r} = \frac{1}{1 + r/R}. \quad (79)$$

З формули видно:

- в режимі короткого замикання $R = 0$, тобто $r/R = \infty$, тому одержимо, що ККД $\eta = 0$. В цьому випадку загальна потужність $P_{\text{С}}$ максимальна, але вся вона безкорисно витрачається на нагрівання джерела;
- за умови узгодження, коли $R = r$, отримуємо $\eta = 1/2 = 50\%$, в цьому випадку $P_{\text{Е}} = P_{\text{С}}/2$;
- в режимі холостого ходу $R = \infty$, отримуємо ККД $\eta = 1 = 100\%$. В цьому випадку корисну потужність струму не отримуємо, оскільки корисна потужність дорівнює загальній потужності, але кожна із них дорівнює нулю $P_{\text{Е}} = P_{\text{С}} = 0$.

Графік залежності ККД від R зображений на рис. 20.

2.3 Залежність загальної потужності, корисної потужності та ККД джерела від сили струму в колі

Виведемо формули залежності $P_{\text{С}}$, $P_{\text{Е}}$ та η від сили струму I в колі, в якому ЕРС джерела $\mathcal{E}$ та внутрішній опір r постійні.

2.3.1 Загальна потужність джерела прямо пропорційна струму (70):

$$P_{\text{С}} = I \cdot \mathcal{E}. \quad (80)$$

Графік залежності загальної потужності $P_{\text{С}}$ від струму в колі I – пряма, зображена на рис. 21.

В режимі короткого замикання $I_{\text{max}} = \mathcal{E}/r$, загальна потужність $P_{\text{С}}^{\text{max}} = \mathcal{E}^2/r$.

В режимі холостого ходу $I = 0$, загальна потужність $P_{\text{С}} = 0$.

2.3.2 Корисна потужність (71) з урахуванням того, що $U = \mathcal{E} - Ir$:

$$P_{\text{Е}} = I \cdot \mathcal{E} - I^2 r = I(\mathcal{E} - Ir). \quad (81)$$

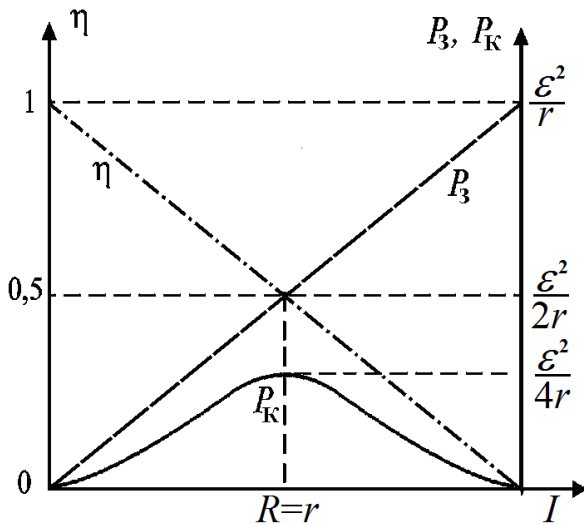


Рис. 21. Залежність загальної потужності, корисної потужності та ККД джерела ЕРС від струму в колі

Графік залежності корисної потужності $P_{\text{Е}}$ від струму в колі I – перевернена парабола, зображена на рис. 21.

В режимі короткого замикання $(\mathcal{E} - I_{\text{max}}r) = 0$, корисна потужність $P_{\text{Е}} = 0$.

В режимі холостого ходу $I = 0$, корисна потужність $P_{\text{Е}} = 0$.

Зрозуміло, що при деякому проміжному значенні I корисна потужність повинна бути максимальною. Щоб знайти це значення струму, треба диференціювати вираз (81) по струму I , та першу похідну

прирівняти з нулем:

$$\frac{dP_{\text{Е}}}{dI} = \mathcal{E} - 2Ir = 0, \quad \text{звідки} \quad I = \frac{\mathcal{E}}{2r}. \quad (82)$$

При порівнянні (82) та (61) видно, що такий струм отримується тільки коли $R = r$.

Ми отримали такий самий результат, що і при дослідженні залежності корисної потужності від опору.

2.3.3 ККД джерела (74) з урахуванням того, що $U = \mathcal{E} - Ir$:

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{\mathcal{E} - Ir}{\mathcal{E}} = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}} I. \quad (83)$$

Графік залежності ККД джерела η від сили струму в колі I – пряма з негативним коефіцієнтом нахилу, зображена на рис. 21.

В режимі короткого замикання $I_{\text{max}} = \mathcal{E}/r$, маємо ККД $\eta = 0$.

За умови узгодження, коли $I = \mathcal{E}/2r$, отримуємо $\eta = 1/2 = 50\%$, в цьому випадку $P_{\text{Е}} = P_{\text{С}}/2$.

У режимі холостого ходу $I = 0$, маємо ККД $\eta = 1$.

3 Опис установки і методики вимірювань

Прилади та приладдя (рис. 22): джерело ЕРС $\mathcal{E}$, вольтметр V , міліамперметр mA , тридекадний магазин опорів R_3 .

Для дослідження залежності загальної та корисної потужностей і ККД джерела від зовнішнього опору кола складаємо схему, зображену на рис. 22.

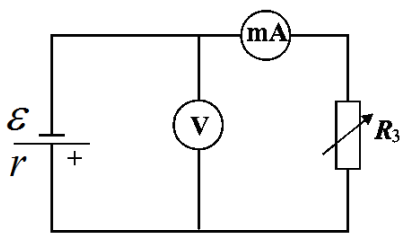


Рис. 22. Схема вимірювання залежності потужності від зовнішнього опору

В якості зовнішнього опору використаємо тридекадний магазин опорів R_3 . Змінюючи опір магазину, змінюємо струм в колі. Для побудови графіка зручно вибирати цілі значення опору R_3 , наприклад: $0\ \Omega$, $30\ \Omega$, $60\ \Omega$, $90\ \Omega$, $120\ \Omega$ і т.п.

Для декількох значень струму та опору потрібно розрахувати значення загальної потужності (70), корисної потужності (71) і ККД джерела (73). За отриманими даними будуюмо графіки залежності загальної та корисної потужностей і ККД джерела від зовнішнього опору кола.

4 Оброблення результатів вимірювань

Результати цієї роботи надають у графічному вигляді: це графіки залежності загальної та корисної потужностей і ККД джерела від зовнішнього опору кола. Графічне подання результатів вимірів зазвичай припускає якісну оцінку і тому не вимагає статистичного оброблення.

5 Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему рис. 22. В якості зовнішнього опору увімкнути тридекадний магазин опорів R_3 .
2. Поступово збільшуючи опір тридекадного магазину R_3 , домогтися максимального показу вольтметра. Записати отримане значення ЕРС джерела $\mathcal{E} = U_V^{\max}$ безпосередньо перед таблицею вимірів. Показання міліамперметра при цьому повинні бути нульові.
3. Визначити струм короткого замикання. Розділивши на 10 значення цього струму отримати крок виміру сили струму:

$$\Delta I = \frac{I_{\text{ЕЦ}}}{10}.$$

4. Починаючи з $I_1 = I_{\text{ЕЦ}}$ провести вимірювання значень зовнішнього опору R_i , що відповідають 11 значенням струму

$$I_2 = I_{\text{ЕЦ}} - \Delta I, I_3 = I_{\text{ЕЦ}} - 2\Delta I, I_4 = I_{\text{ЕЦ}} - 3\Delta I, \dots, I_{11} = I_{\text{ЕЦ}} - 10\Delta I.$$

Результати вимірювань записати в таблицю.

5. Особливо точно зробити вимірювання R_{12} та сили струму I_{12} при $U_V = \mathcal{E}/2$.
6. Розрахувати загальну та корисну потужності і ККД джерела. Результати розрахунків записати в таблицю.
7. Побудувати графік залежності загальної та корисної потужностей і ККД джерела від зовнішнього опору кола. Вісь потужності розташувати ліворуч, а вісь ККД праворуч від графіка.
8. З графіка визначити значення внутрішнього опору джерела.
9. Зробити висновок про те, коли корисна потужність максимальна.

6 Контрольні запитання

1. Що зветься загальною потужністю, корисною потужністю і ККД джерела ЕРС?
2. Запишіть закони залежності загальної та корисної потужностей і ККД джерела від сили струму. За яких значень сили струму ці величини дорівнюють нулю, максимальні?
3. Виведіть, за якого значення струму корисна потужність максимальна.
4. Запишіть закони залежності повної та корисної потужностей і ККД джерела зовнішнього опору кола. За яких значень зовнішнього опору ці величини дорівнюють нулю, максимальні?
5. Виведіть, за якого значення зовнішнього опору корисна потужність максимальна.

7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 2-4.

I. Домашнє завдання.

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 2-4.

1) Тема: Визначення потужності в колі постійного струму.

2) Мета роботи:

2.1) Дослідити залежність повної потужності, корисної потужності та ККД джерела струму від зовнішнього опору кола.

2.2) Визначити внутрішній опір джерела ЕРС.

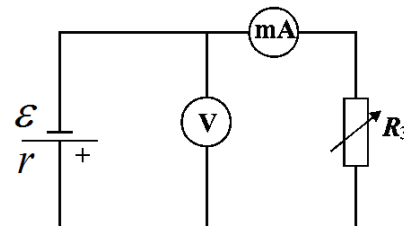
3) Схема установки:

$\mathcal{E}$, r – джерело ЕРС;

R_3 – тридекадний магазин опорів;

mA – міліамперметр;

V – вольтметр.



4) Таблиця приладів

№ з/п	Найменування	Тип	Заводський номер	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка (клас точності)
1	Магазин опорів R_3	P33	-			
2	Вольтметр	M-906				
3	Міліамперметр	M 906				

5) Формули розрахунку величин

5.1) Загальна потужність

$$P_{\text{г}} = I \cdot \mathcal{E},$$

де I – сила струму в колі; $\mathcal{E}$ – ЕРС джерела.

5.2) Корисна потужність

$$P_{\text{к}} = I^2 \cdot R,$$

де I – сила струму в колі; R – зовнішній опір (навантаження) кола.

5.3) ККД джерела ЕРС

$$\eta [\%] = (P_{\text{к}} / P_{\text{г}}) \cdot 100\%,$$

де $P_{\text{к}}$ – корисна потужність; $P_{\text{г}}$ – загальна потужність кола.

6) Таблиця результатів прямих вимірювань

$\varepsilon = \dots \hat{A}$

№	$I, \hat{A}$	$R, \hat{\Omega}$	$P_{\zeta}, \hat{A}^0$	$P_{\hat{E}}, \hat{A}^0$	$\eta, \%$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11	$I_{\max}$	0			
$\varepsilon/2$					

7) Розрахунки фізичних величин:

7.1) Загальна потужність

$$P_{\zeta 1} = \dots \hat{A} \cdot \dots \hat{A} = \dots \hat{A}^0 ; P_{\zeta 2} = \dots \hat{A} \cdot \dots \hat{A} = \dots \hat{A}^0 ; \dots$$

7.2) Корисна потужність

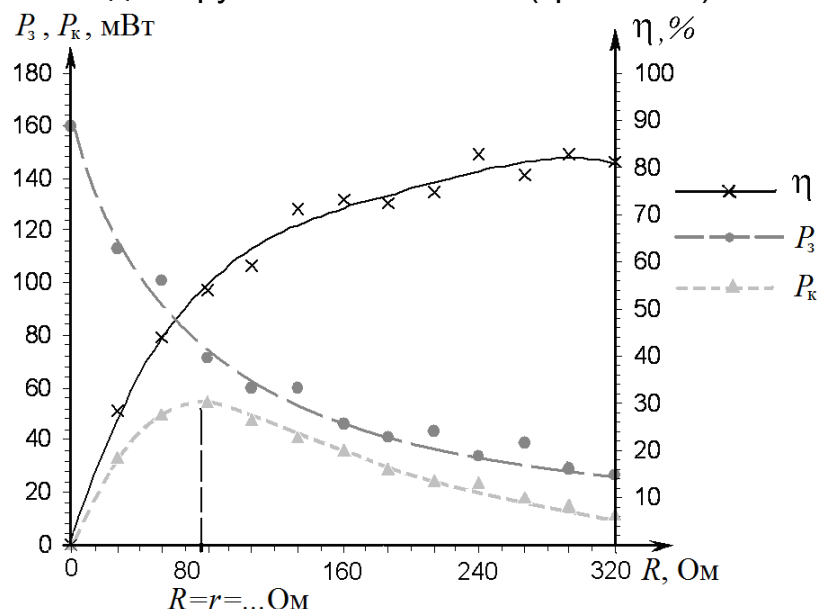
$$P_{\hat{E}1} = \dots (\hat{A})^2 \cdot \dots \hat{\Omega} \cdot 10^3 = \dots \hat{A}^0 ; P_{\hat{E}2} = \dots (\hat{A})^2 \cdot \dots \hat{\Omega} \cdot 10^3 = \dots \hat{A}^0 ; \dots$$

7.3) ККД джерела ЕРС

$$\eta_1 \% = (\dots \hat{A}^0 / \dots \hat{A}^0) \cdot 100\% = \dots \% ; \eta_2 \% = (\dots \hat{A}^0 / \dots \hat{A}^0) \cdot 100\% = \dots \% ; \dots$$

8) Кінцеві результати:

Графік залежності загальної потужності P_{ζ} , корисної потужності $P_{\hat{E}}$ ККД джерела ЕРС η від опору навантаження R (зразковий)



9) Висновок: Залежно від опору, навантаження, корисна потужність ...

10) Роботу виконав(ла): _____ (прізвище розбірливо).

Роботу перевірів:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3-1 ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ТАНГЕНС-БУСОЛІ

1 Мета роботи:

1. Навчитися визначати напруженість досліджуваного магнітного поля використовуючи принцип суперпозиції полів.
2. Визначити горизонтальну складову напруженості магнітного поля в лабораторії за допомогою тангенс-бусолі.

2 Ключові положення

2.1 Магнітне поле струму. Індукція і напруженість магнітного поля

Навколо будь-якого електричного рухомого заряду існує магнітне поле, основна властивість якого полягає в тім, що в ньому на інші рухомі заряди діють сили. Відомо, наприклад, що провідники з рівнобіжними струмами притягаються, а з протибіжними – відштовхуються. Це спричинюється тим, що магнітне поле рухомих зарядів одного провідника діє на рухомі заряди іншого провідника. На нерухомі електричні заряди постійне магнітне поле не діє. Утворення магнітного поля поблизу постійних магнітів зумовлено орієнтуванням в одному напрямку мікрострумів усередині речовини, які являють собою спрямований по колу рух електронів в атомах.

Розглянемо магнітне поле струмів, що течуть по провідникам різної конфігурації.

Добуток сили струму I на нескінченно малий відрізок довжини провідника dl називається **елементом струму** Idl . Елемент струму – це вектор, напрям якого збігається з напрямом струму. Елемент струму Idl при дослідженні магнітних полів відіграє роль, подібну пробному електричному заряду при дослідженні електричних полів. На елемент струму, який перебуває в магнітному полі, відповідно до експериментального **закону Ампера**, діє сила

$$d\vec{F} = I \cdot [d\vec{l} \times \vec{B}] , \text{ чи у скалярній формі } dF = B \cdot Idl \sin(d\vec{l} \wedge \vec{B}). \quad (84)$$

Величина $\vec{B}$ називається **вектором магнітної індукції**. За напрям вектора магнітної індукції прийнято напрям сили, з якою магнітне поле діє на північний полюс магнітної стрілки. З рівняння (84) випливає фізична сутність вектора $\vec{B}$:

$$B = dF / Idl \sin(d\vec{l} \wedge \vec{B}). \quad (85)$$

Вектор магнітної індукції чисельно дорівнює силі, з якою магнітне поле діє на одиничний елемент струму ($Idl = 1 \text{ А} \cdot \text{і}$), розташований перпендикулярно до вектора магнітної індукції ($\sin(d\vec{l} \wedge \vec{B}) = 1$).

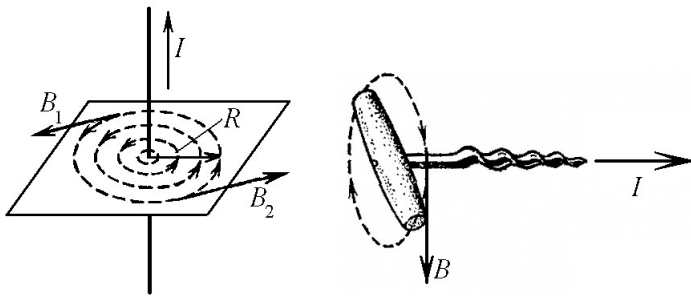


Рис. 23. Визначення напрямку вектора напруженості магнітного поля за допомогою правила свердлика

Напрямок вектора магнітної індукції визначається за допомогою **правила “свердлика”** (правого гвинта): якщо угвинчувати свердлик за напрямом струму (поступовий рух), то напрям руху його рукоятки покаже напрям силових ліній магнітного поля, а вектор магнітної індукції спрямований по дотичній до них (рис. 23).

Слід відзначити, що сила Ампера dF не збігається за напрямом з вектором магнітної індукції. Напрямок цієї сили визначається за правилом векторного добутку, чи за спрощеним **правилом “лівої руки”**: якщо ліву руку розташувати в такий спосіб, щоб вектор $\vec{B}$ входив у розкриту долоню, а чотири пальці спрямувати за струмом, то відігнутий великий палець вкаже напрям сили. Сила, що діє на елемент струму, завжди є перпендикулярною до вектора магнітної індукції та елемента струму (рис. 24).

У системі СІ магнітна індукція вимірюється в теслах.

Тесла (Тл) – це індукція такого магнітного поля, що на елемент струму, дорівнює $1 \text{ A} \cdot \text{m}$, розташований перпендикулярно до вектора $\vec{B}$, діє із силою в 1 N :

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N} / 1 \text{ A} \cdot \text{m}.$$

Графічно магнітне поле зображується за допомогою магнітних силових ліній. Магнітна силова лінія – це така лінія, у кожній точці якої вектор $\vec{B}$ спрямований по дотичній до неї (рис. 23).

Кожен елемент струму провідника створює в навколишньому просторі магнітне поле, індукція якого визначається за законом Біо-Савара-Лапласа:

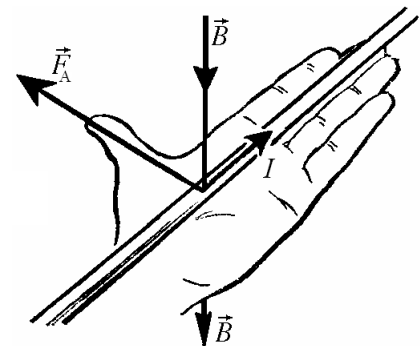


Рис. 24. Визначення напрямку сили Ампера за допомогою правила “лівої руки”

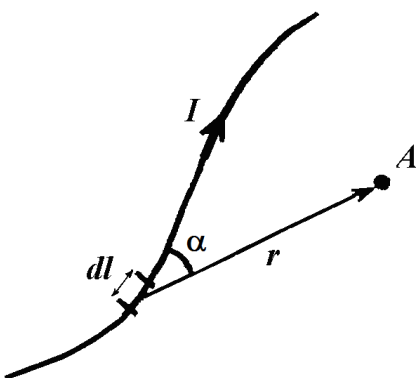


Рис. 25. Елемент струму

$$d\vec{B} = \frac{\mu \mu_0 I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3}, \text{ чи у скалярній формі}$$

$$dB = \frac{\mu \mu_0 \cdot Idl \cdot \sin(\angle d\vec{l} \wedge \vec{r})}{4\pi r^2}, \quad (86)$$

де r – відстань від елемента струму Idl до точки A , в якій визначається індукція dB (рис. 25);

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{m} / \text{A}$ – магнітна стала; μ – відносна

магнітна проникність середовища, що показує, у скільки разів індукція магнітного поля в даному середовищі відрізняється від магнітної індукції у

вакуумі.

Величина B залежить від типу середовища, тому що речовина, поміщена в магнітне поле, намагнічується, створюючи своє власне магнітне поле.

Якщо вираз (86) поділити на μ_0 , то отримаємо вираз для величини, яка не залежить від типу середовища:

$$dH = \frac{Idl \sin(\vec{dl} \wedge \vec{r})}{4\pi r^2}. \quad (87)$$

Формула (87) виражає закон Біо-Савара-Лапласа для напруженості магнітного поля dH , створеного елементом струму Idl . Величина H називається **напруженістю магнітного поля**. Зв'язок між індукцією $\vec{B}$ та напруженістю $\vec{H}$ виражається співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}. \quad (88)$$

В ізотропному однорідному середовищі напрями векторів $\vec{B}$ і $\vec{H}$ збігаються.

У системі СІ напруженість вимірюється в амперах на метр (А/м), як випливає з формули (87).

Лінії вектора напруженості проводяться так, щоб у кожній точці вектор напруженості був спрямований по дотичній до цієї лінії. Напруженість магнітного поля – це величина, яка характеризує магнітне поле макрострумів. Магнітна індукція характеризує сумарне поле макрострумів та мікрострумів речовини.

Провідники зі струмом зазвичай мають кінцеву довжину. Їх можна розглядати як сукупність значної кількості елементів струму Idl . Напруженість та індукція магнітного поля провідника в будь-якій точці визначаються як геометрична сума напруженостей $d\vec{H}$ та індукцій $d\vec{B}$ полів окремих елементів струму:

$$\vec{H} = \sum d\vec{H}; \quad \vec{B} = \sum d\vec{B}.$$

Цей **принцип суперпозиції** дозволяє визначити напруженість та індукцію полів, створюваних провідниками будь-якої форми. Однак, у загальному випадку, для провідників довільної форми, ця операція є складною.

Розглянемо кілька окремих випадків.

Прямий провідник кінцевої довжини (рис. 26).

$$H = \frac{I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (89)$$

де r – найкоротша відстань від точки A , яку розглядаємо, до лінії струму.

Вектори напруженості $\vec{H}$ та індукції $\vec{B}$ є перпендикулярними до площини, що проходить крізь відрізок провідника BC та точку A .

Лінії напруженості, як і лінії вектора індукції, являють собою концентричні кола, що лежать у площинах, перпендикулярних до провідника, а їхні центри лежать на провіднику. Напрямок ліній напруженості визначається за

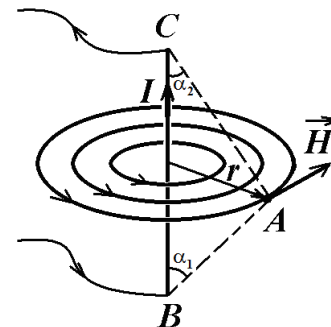


Рис. 26. Визначення напруженості магнітного поля прямого провідника кінцевої довжини

правилом свердлика (див. вище).

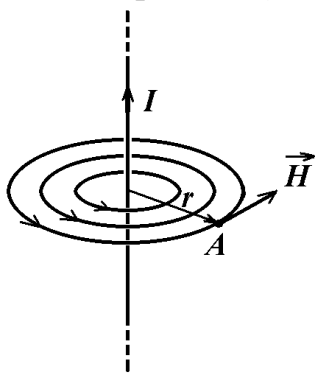


Рис. 27. Визначення напруженості магнітного поля нескінченно довгого прямого провідника

Нескінченно довгий прямий провідник (рис. 27). Якщо провідник на рис. 26 подовжувати, то кути α_1 і α_2 будуть зменшуватися, і для нескінченно довгого провідника α_1 і α_2 будуть дорівнювати нулю. З огляду на те, що $\cos 0^\circ = 1$, отримаємо

$$H_A = I/2\pi r \quad (90)$$

Напрями вектора H і ліній напруженості є такі ж самі, як і для кінцевого прямого провідника.

Коловий провідник (рис. 28). У центрі колового провідника напруженість магнітного поля визначається за формулою

$$H = I/2R, \quad (91)$$

де R – радіус обвитка. Для усіх точок, що лежать у площині обвитка, вектор H спрямований перпендикулярно до цієї площини. Це випливає з розгляду сукупності магнітних полів, створюваних кожним елементом провідника dl окремо.

Для визначення напрямку вектора $\vec{H}$ в цих точках і на осі обвитка використовується **зворотне правило свердлика**: якщо обертати ручку свердлика за струмом, то поступальний рух покаже напрям вектора $\vec{H}$.

У точках, що лежать на осі обвитка, напруженість розраховується за формулою

$$H = \frac{IR^2}{2(R+h)^{3/2}}, \quad (92)$$

де h – відстань від розглянутої точки до центра обвитка (рис. 29).

Соленоїд (рис. 30) – циліндрична котушка з щільно намотаними обвитками, в якій довжина є значно більше за діаметр. У середині соленоїда поле є однорідним, а його напруженість визначається за формулою

$$H = I \cdot N/l = I \cdot n, \quad (93)$$

де N – кількість обвитків у соленоїді; l – довжина соленоїда; n – кількість витків, яка припадає на одиницю довжини соленоїда (щільність витків). У кінців соленоїда однорідність поля порушується. Зовні поле є надто слабе порівняно з полем усередині соленоїда. Напрям ліній вектора H усередині соленоїда визначається так само, як і у

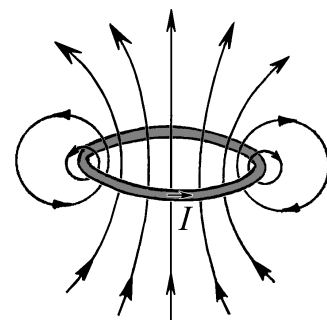


Рис. 28. Силкові лінії магнітного поля колового струму

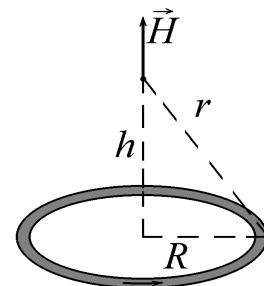


Рис. 29. Визначення напруженості магнітного поля на осі колового струму

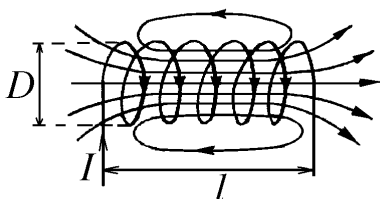


Рис. 30. Силкові лінії магнітного поля соленоїда

випадку колового струму.

Тороїд (рис. 31) являє собою замкнуту котушку, намотану на каркас, що має форму тора. У тороїда відсутній крайовий ефект. Усе магнітне поле зосереджено усередині тороїда, і лінії вектора H являють собою концентричні кола. Якщо діаметр витків D є значно менше за довжину кільця, то напруженість усередині тороїда визначається за формулою

$$H = I \cdot N / l = I \cdot n ,$$

де l – довжина середньої лінії тороїда.

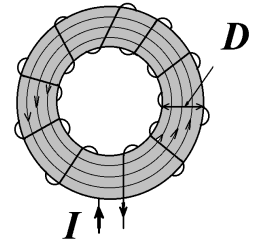


Рис. 31. Тороїд

2.2 Вихровий характер магнітного поля. Циркуляція вектора напруженості. Закон повного струму

З усіх наведених вище прикладів зрозуміло, що лінії векторів напруженості та індукції магнітного поля є завжди замкнуті. Таке поле називається вихровим. У цьому полягає істотна відмінність магнітного поля від електростатичного. В електростатичному полі силові лінії є завжди розімкнуті, вони розпочинаються на позитивних зарядах чи у нескінченності і закінчуються на негативних зарядах чи у нескінченності. Магнітні силові лінії не мають а ні початку, а ні кінця. Це означає, що в природі немає “магнітних” зарядів.

Циркуляцією вектора напруженості магнітного поля вздовж довільно обраному замкнутому контуру L називається інтеграл вигляду:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_L H dl \cos(\vec{H}^\wedge d\vec{l}) = \oint_L H_l dl , \quad (94)$$

де dl – нескінченно малий відрізок контуру L ; $H_l = H \cos(\vec{H}^\wedge d\vec{l})$ – проекція вектора $\vec{H}$ на напрям відрізка dl .

За **законом повного струму**: циркуляція вектора напруженості магнітного поля за будь-яким замкнутим контуром дорівнює алгебраїчній сумі струмів, охоплених цим контуром:

$$\oint_L H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i . \quad (95)$$

Щоб записати закон повного струму (95) треба обрати напрям обходу контуру L (рис. 32). Для визначення знака, з яким потрібно взяти струм у рівнянні (95), користуються правилом свердлика. Якщо обертати свердлики у напрям обходу контуру, то ті струми, напрями яких збігаються з напрямом поступального руху свердлика, у рівнянні (95) записуються зі знаком плюс, зворотні струми записуються зі знаком мінус. Якщо контур не охоплює струму, то циркуляція вектора $\vec{H}$ по цьому контуру дорівнює нулю. Циркуляція вектора $\vec{H}$ вздовж контуру L ,

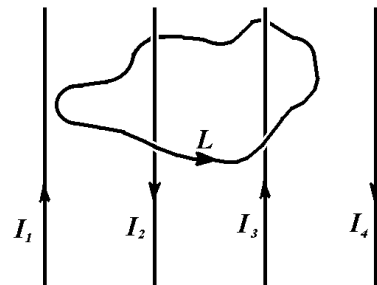


Рис. 32. Обхід контуру для закону повного струму

зображеного на рис. 32, дорівнює

$$\oint_L H_l dl = I_3 - I_2.$$

Формула (95) виражає найважливішу властивість магнітного поля. Відмінність від нуля циркуляції вектора $\vec{H}$ свідчить про замкнутість силових ліній поля, тобто про вихровий характер магнітного поля. Той факт, що в правій частині фігурує струм, говорить про те, що магнітне поле породжується струмом, тобто рухомими зарядами.

Циркуляція вектора $\vec{E}$ в електростатичному полі по будь-якому замкнутому контуру дорівнює нулю:

$$\oint_L E dl \cos(\vec{E} \wedge d\vec{l}) = 0,$$

що свідчить про невихровий, потенційний характер електростатичного поля.

2.3 Потік вектора магнітної індукції

Умовилися лінії вектора магнітної індукції $\vec{B}$ проводити так, щоб кількість ліній, які пронизують одиничну площадку, перпендикулярну до вектора $\vec{B}$, була пропорційна чисельному значенню вектора $\vec{B}$.

Потік Φ вектора магнітної індукції, або просто магнітний потік, через будь-яку поверхню S є пропорційним кількості магнітних силових ліній, що пронизують цю поверхню. Якщо плоску поверхню площею S поміщено в однорідне магнітне поле з індукцією $\vec{B}$, то, як видно з рис. 33,

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot S = BS \cos(\vec{B} \wedge \vec{n}) = B_n \cdot S, \quad (96)$$

де $\vec{n}$ – вектор одиничної нормалі до поверхні S ;

$B_n = B \cos(\vec{B} \wedge \vec{n})$ – проекція вектора $\vec{B}$ на нормаль.

Якщо поле є неоднорідне і поверхня, крізь яку розраховується потік, не є плоскою, то цю поверхню потрібно розбити на нескінченно малі ділянки dS у межах яких поле можна вважати однорідним, а самі ділянки плоскими. Повний потік крізь поверхню

$$\hat{O} = \iint_S d\hat{O} = \iint_S B_n \cdot dS,$$

де $d\hat{O} = B_n \cdot dS$ – елементарний магнітний потік крізь елементарну ділянку dS .

Магнітний потік крізь будь-яку замкнену поверхню дорівнює нулю. Це впливає з того, що силові лінії магнітного поля є завжди замкнуті, отже кількість ліній магнітної індукції, що увійшли в замкнуту поверхню, дорівнює кількості ліній, що вийшли із неї:

$$\oiint_S B_n \cdot dS = 0.$$

Згадаємо, що потік вектора електричного зміщення поля через будь-яку замкнуту поверхню дорівнює алгебраїчній сумі електричних зарядів, що

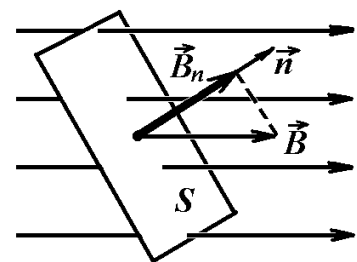


Рис. 33. Плоска поверхня в магнітному полі пронизуюче

знаходяться всередині цієї поверхні:

$$\oiint_S \vec{D}_n \cdot d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_i.$$

Це свідчить про те, що лінії вектора $\vec{D}$ розпочинаються й завершуються на електричних зарядах.

Магнітний потік у системі СІ вимірюється у веберах:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ А}^2.$$

Напрямок обходу контуру L (відповідно до якого визначається знак проекції H_l) разом з вектором одиничної нормалі $\vec{n}$ (щодо якого задається позитивний напрям сили струму) становлять електромагнітну систему координат. Напрямок обходу контуру і напрям вектора одиничної нормалі завжди пов'язані правилом свердлика.

2.4 Магнітне поле Землі

Земля являє собою природний магніт. Магнітна стрілка, укріплена в такий спосіб, що вона може обертатися навколо вертикальної й горизонтальної осей, у різних точках Землі встановлюється під різними кутами до її поверхні. Це говорить про те, що силові лінії поля, а отже, і вектор напруженості в різних точках Землі утворюють різні кути з її поверхнею (рис. 34). Ті місця, де силові лінії є перпендикулярні до поверхні Землі, називаються **магнітними полюсами**. Магнітна стрілка тут установлюється вертикально. У північній півкулі, в якій розташований північний географічний полюс N_G , знаходиться південний магнітний полюс S_M . У південній півкулі знаходиться північний магнітний полюс N_M . Точні місця розташування географічних і магнітних полюсів трохи не збігаються.

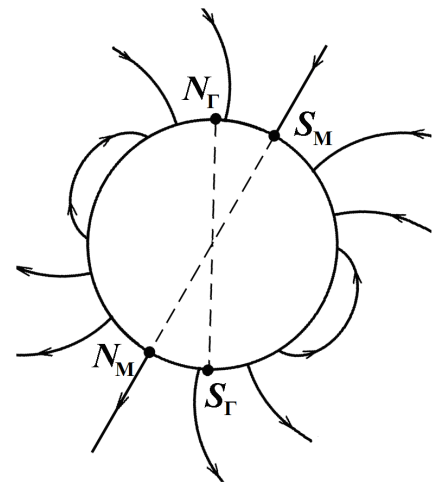


Рис. 34. Силові лінії магнітного поля Землі

З рис. 34 видно, що силові лінії в південній півкулі виходять із Землі, в північній – входять в неї. Вертикальна площина, проведена через магнітну стрілку, називається **площиною магнітного меридіана**. Лінія перетинання цієї площини з поверхнею Землі називається **магнітним меридіаном**. Магнітні меридіани проходять через магнітні полюси. Внаслідок розбіжності географічних і магнітних полюсів географічні і магнітні меридіани теж не збігаються. Кут поміж географічним і магнітним меридіанами називається **магнітним схиленням** ϕ . Кут поміж напрямом вектора напруженості в даній точці Землі і горизонтальною площиною називається **магнітним нахиленням** i .

На рис. 35 зображена невелика ділянка поверхні Землі північної півкулі, де магнітне нахилення дорівнює i . Вектор напруженості можна розкласти на дві складові: горизонтальну $\vec{H}_A$ і вертикальну $\vec{H}_\Delta$. Магнітна стрілка, насаджена на

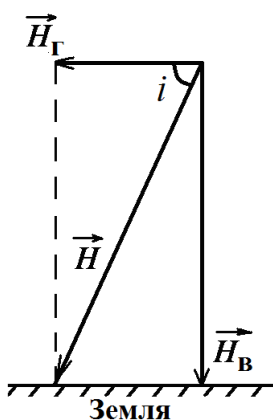


Рис. 35. Напруженість магнітного поля Землі

вертикальне вістря, може вільно обертатися в горизонтальній площині. Під дією магнітного поля Землі вона встановлюється в положенні, що указує своїм північним полюсом напрям горизонтальної складової $\vec{H}_A$. Магнітне схилення, магнітне нахилення і чисельне значення горизонтальної складової напруженості цілковито характеризують поле Землі.

Значення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі можна визначити за допомогою тангенс-бусолі. Однак на стенді лабораторного столу укріплено вимірювальні прилади, що містять постійні магніти. Внаслідок накладення їхніх магнітних полів на магнітне поле Землі утворюється певне результуюче поле,

яке пропонується студентам дослідити.

В даній роботі за допомогою тангенс-бусолі визначаються напрям і величина горизонтальної складової напруженості $\vec{H}_A$ магнітного поля в різних точках лабораторного столу.

3 Опис установки і методики вимірювань

Прилади і приладдя: тангенс-бусоль, джерело постійного струму, потенціометр, міліамперметр, перемикач.

Тангенс-бусоль являє собою тонку котушку, яка складається з N витків, розташованих у вертикальній площині близько один до одного в такий спосіб, що для розрахунку напруженості магнітного поля в центрі котушки можна застосувати формулу

$$H_E = I \cdot N / 2R = I \cdot N / D, \quad (97)$$

де R – радіус котушки, D – діаметр котушки.

У центрі тангенс-бусолі на вертикальному вістрі розташована магнітна стрілка зі шкалою (компас).

Для виконання роботи треба зібрати схему, зображену на рис. 36, де: T – тангенс-бусоль; Π – перемикач; mA – міліамперметр; P – потенціометр для регулювання струму.

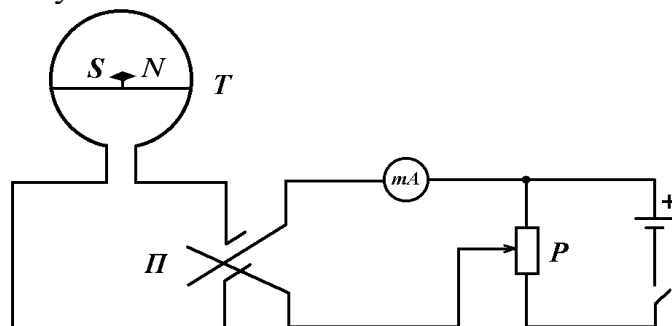


Рис. 36. Схема вимірювання напруженості магнітного поля Землі в даній точці

Метод вимірювання поля-гає в наступному. Коли струм у котушці відсутній, магнітна стрілка встановлюється в такий спосіб, що своїм північним полюсом вона вказує напрям горизонтальної складової напруженості досліджуваного магнітного поля $\vec{H}_A$. Якщо котушкою пустити струм, виникне магнітне поле струму з напруженістю $\vec{H}_E$, спрямовану перпендикулярно до площини обвитків

котушки. Отже, у горизонтальній площині накладаються два магнітних поля: досліджуване поле з напруженістю $\vec{H}_{\bar{A}}$ і поле котушки з напруженістю $\vec{H}_{\bar{E}}$. Магнітна стрілка встановлюється в напрямку напруженості результуючого поля.

Для проведення вимірювань зручно, щоб вектори $\vec{H}_{\bar{A}}$ та $\vec{H}_{\bar{E}}$ були взаємно перпендикулярні. Для цього за відсутності струму котушку треба розташувати в такий спосіб, щоби магнітна стрілка опинилася в площині обвитків котушки 1, рис. 37. Очевидно, у цій самій площині буде розташовано і вектор $\vec{H}_{\bar{A}}$ (рис. 37). Вектор $\vec{H}_{\bar{E}}$ є перпендикулярний до площини обвитків котушки. Отже, $\vec{H}_{\bar{A}}$ є перпендикулярний до $\vec{H}_{\bar{E}}$. У цьому разі паралелограм, побудований на векторах $\vec{H}_{\bar{E}}$ та $\vec{H}_{\bar{A}}$, являє собою прямокутник. Вектор $\vec{H}_{\bar{D}}$ результуючого поля спрямований по діагоналі прямокутника. З рис. 37 випливає

$$H_{\bar{E}}/H_{\bar{A}} = \operatorname{tg} \alpha ,$$

звідси $H_{\bar{A}} = H_{\bar{E}}/\operatorname{tg} \alpha$.

З огляду на формулу (97), отримуємо

$$H_{\bar{A}} = \frac{I \cdot N}{D \cdot \operatorname{tg} \alpha} . \quad (98)$$

Для вимірювання кута α у тангенс-бусолі є шкала компаса. При вірному орієнтуванні котушки за відсутності струму магнітна стрілка встановлюється проти нуля шкали, яку розміщено в площині котушки. При включенні струму стрілка повертається на кут α , вказуючи напрям напруженості результуючого магнітного поля в горизонтальній площині.

4 Оброблення результатів вимірювань

Результати цієї роботи представляють в графічному вигляді: це побудовані вектори $\vec{H}_{\bar{A}}$ з дотриманням масштабу і напрямів стосовно накресленої лінії робочого столу. Графічне подання результатів вимірів зазвичай припускає якісну оцінку і тому не вимагає статистичного оброблення.

5 Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис. 36).
2. У звіті в зменшеному масштабі зобразити лінію робочого столу, тобто посередині аркуша провести лінію (ця лінія відповідає лінії столу, проведеної паралельно до стенда). Визначити напрям лінії столу (0x).
3. Вибрати на лінії робочого столу три точки, в яких буде визначатись напрям і вимірюватись величина горизонтальної складової напруженості магнітного поля $H_{\bar{r}}$.
4. Розташувати тангенс-бусоль в такий спосіб, щоб центр магнітної стрілки

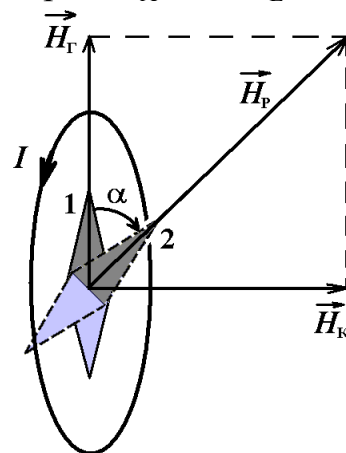


Рис. 37. Розташування тангенс-бусолі

опинився в першій з обраних точок столу.

5. Визначити напрям H_T у даній точці. Для цього розташувати котушку тангенс-бусолі в такий спосіб, щоб площина її обвитків збіглася з лінією столу. За відсутності струму виміряти кут β , який складає напрям магнітної стрілки з напрямом лінії столу (Ox), і записати його значення в таблицю.
6. Визначити чисельне значення H_T . Для цього розташувати тангенс-бусоль у даній точці в такий спосіб, щоб за відсутності струму магнітна стрілка опинилася в площині обвитків котушки.
7. Замкнути коло. Повертаючи ручку потенціометра домогтися відхилення стрілки на $30 \dots 40^\circ$.
8. Записати в таблицю значення сили струму і кута відхилення магнітної стрілки при цьому.
9. Розрахувати горизонтальну складову напруженості H_T магнітного поля в даній точці за формулою (98).
10. Аналогічним методом визначити напрям і величину H_T в інших двох точках столу, виконати пункти 4 – 9.
11. У звіті зобразити вектори $\vec{H}_A$ в зазначених точках з дотриманням масштабу і напрямів стосовно лінії столу.

6 Контрольні запитання

1. Що називається індукцією магнітного поля?
2. Що називається напруженістю магнітного поля?
3. Що називається лініями вектора напруженості?
4. Накреслити картину ліній вектора напруженості поля колового струму. Як визначити напрям вектора напруженості в центрі колового струму?
5. У чому полягає закон Біо-Савара-Лапласа?
6. Записати формули розрахунку напруженості в центрі і на осі колового струму.
7. Які особливості має магнітне поле і чим воно відрізняється від електростатичного поля?
8. Що називається циркулюванням вектора напруженості?
9. У чому полягає закон повного струму?
10. Яке є магнітне поле Землі? Що називається магнітним схиленням і магнітним нахиленням?
11. У чому полягає принцип суперпозиції полів? Як визначити напруженість результуючого поля, якщо відомі напруженості полів, що складаються?
12. Як визначити напрям і величину горизонтальної складової напруженості магнітного поля за допомогою тангенс-бусолі? Накреслити схему і вивести формулу розрахунку.

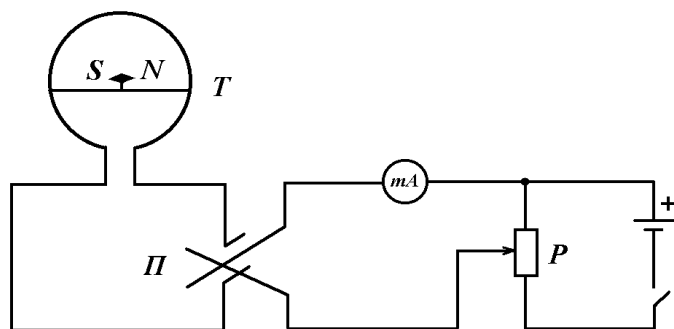
7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 3-1

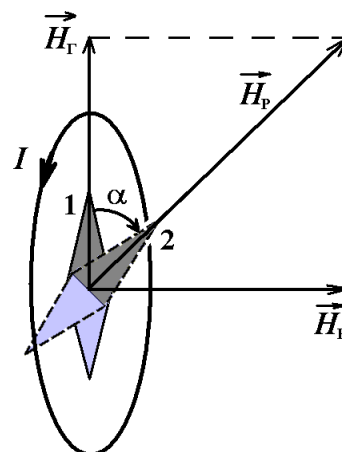
I. Домашнє завдання.

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 3-1.

- 1) Тема: Визначення магнітного поля за допомогою тангенс-бусолі.
- 2) Мета роботи: Визначити горизонтальну складову напруженості магнітного поля в лабораторії за допомогою тангенс-бусолі, використовуючи принцип суперпозиції полів.
- 3) Схема установки:



T – тангенс-бусоль;
 Π – перемикач;
 mA – міліамперметр;
 P – потенціометр.



4) Таблиця приладів

№ з/п	Найменування	Тип	Заводський номер	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка (клас точності)
1	Міліамперметр					
2	Тангенс-бусоль (транспорт)			360°		
3	Лінійка					

5) Формули розрахунку величин:

$$H_A = \frac{I \cdot N}{D \cdot \operatorname{tg} \alpha};$$

I – сила струму; $N = 100$ – число обвитків; D – зовнішній діаметр тангенс-бусолі;

6) Таблиця результатів вимірювань

№	$\beta, ^\circ$	I, mA	$\alpha, ^\circ$	$H_A, \text{A/m}$
1				
2				
3				

$$\operatorname{tg}(45^\circ) = 1; \operatorname{tg}(30^\circ) = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577.$$

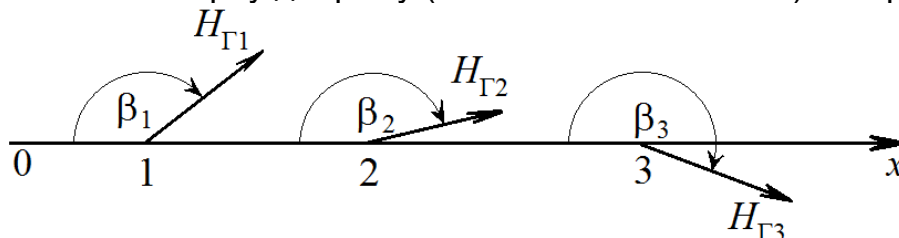
7) Розрахунки фізичних величин:

Напруженість магнітного поля в трьох точках столу

$$H_{\tilde{A}1} = \frac{... \cdot 100}{...} = ... \text{ А/м} ; H_{\tilde{A}2} = \frac{... \cdot 100}{...} = ... \text{ А/м} ; H_{\tilde{A}3} = \frac{... \cdot 100}{...} = ... \text{ А/м} .$$

8) Кінцеві результати:

Представити як векторну діаграму (масштаб: 1 см – 5 А/м). Наприклад:



9) Висновок: Напруженість магнітного поля в різних точках не однакова, оскільки ...

10) Роботу виконав(ла): _____ (прізвище розбірливо).

Роботу перевірів:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3-2 ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА

1 Мета роботи:

1. Вивчити закони руху заряджених частинок у магнітному полі.
2. Визначити відношення e/m електронів, використовуючи їхній рух в електричному і магнітному полях.

2 Ключові положення

2.1 Рух заряджених частинок у магнітному полі

На заряджену частинку із зарядом q , яка рухається в магнітному полі зі швидкістю v , діє сила Лоренца

$$\vec{F}_E = q \cdot [\vec{v} \times \vec{B}], \text{ або у скалярній формі, } F_E = qvB \sin(\vec{v} \wedge \vec{B}), \quad (99)$$

де B – індукція магнітного поля.

Сила Лоренца є перпендикулярна і до вектора швидкості, і до вектора магнітної індукції. Її напрям визначається в загальному випадку правилом векторного добутку. Для позитивно заряджених частинок напрям F_L можна визначити за **правилом лівої руки**: якщо ліву руку розташувати в такий спосіб, щоб магнітні силові лінії входили в розкриту долоню, чотири витягнутих пальці були спрямовані вздовж вектора швидкості, то відігнутий великий палець укаже напрям сили (див. рис. 24). Для негативно зарядженої частинки сила спрямована в протилежний бік. Оскільки сила Лоренца є перпендикулярна до швидкості (не виконує роботи), вона, не змінюючи величини швидкості, змінює її напрям, отже, викривляє траєкторію польоту частинки. Форма траєкторії залежить від кута між $\vec{v}$ та $\vec{B}$. Якщо $\vec{v} \parallel \vec{B}$, то $F_E = 0$ і частинка в однорідному полі рухається вздовж силової лінії рівномірно та прямолінійно.

Розглянемо випадок, коли електрон рухається в однорідному магнітному полі перпендикулярно до силових ліній (рис. 38). У цьому випадку

$\sin(\vec{v} \wedge \vec{B}) = 1$ і формула (99) набере вигляду

$$F_E = evB, \quad (100)$$

де e – заряд електрона. На рис. 38 магнітне поле зображене у вигляді точок, які вказують, що магнітні силові лінії є перпендикулярні до площини креслення і спрямовані до нас. Користуючись правилом лівої руки і з огляду на те, що заряд електрона є негативний, легко визначити напрям сили F_L . Сила F_L , перпендикулярна до швидкості, є доцентровою, тому для сили Лоренца можна записати вираз

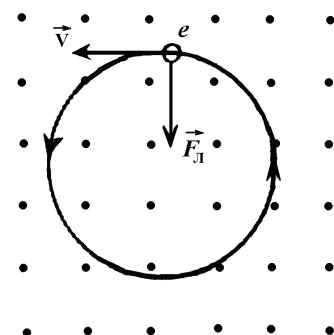


Рис. 38. Рух електрону в поперечному магнітному полі

$$evB = mv^2/R. \quad (101)$$

Звідси визначимо радіус траєкторії

$$R = \frac{mv}{eB} = \frac{v}{B \cdot e/m} \quad (102)$$

Оскільки поле є однорідним, швидкість за величиною не змінюється, то радіус R залишається постійним. Частинка буде рухатися рівномірно колом у площині, перпендикулярній до силових ліній.

Відношення заряду частинки до її маси e/m є важливою характеристикою елементарних частинок і має назву **питомий заряд частинки**.

Період обертання електрона – час одного обороту, що дорівнює відношенню довжини кола до швидкості руху:

$$T = 2\pi R/v \quad (103)$$

Використовуючи значення радіуса (103), отримуємо

$$T = \frac{2\pi m}{eB} = \frac{2\pi}{B \cdot e/m} \quad (104)$$

Формула (104) свідчить, що період обертання частинок у магнітному полі не залежить від швидкості руху, а залежить від їхнього питомого заряду й індукції поля. Якщо пучок електронів, що рухаються з різними швидкостями ($v_1 > v_2 > v_3$), влітає в однорідне магнітне поле, то електрони з різними швидкостями описують кола різних радіусів ($R_1 > R_2 > R_3$) (рис. 39), але повний оберт здійснюють одночасно. Ця властивість використовується для фокусування електронних пучків в електронній оптиці, у прискорювачах елементарних частинок – циклотронах тощо. Період T залежить від швидкості лише за надто великих швидкостей, коли маса розпочинає істотно зростати зі збільшенням швидкості.

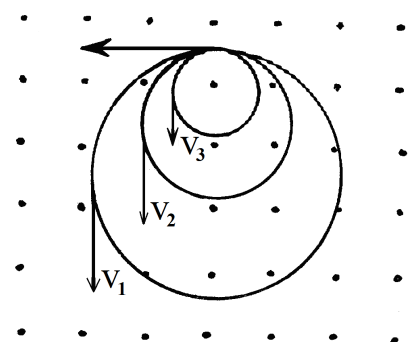


Рис. 39. Рух електронів з різними швидкостями в поперечному магнітному полі

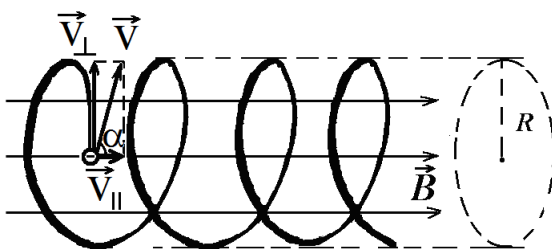


Рис. 40. Рух електрона в магнітному полі

Якщо заряджена частинка влітає в однорідне магнітне поле під кутом α до силових ліній, то вона рухається по гвинтовій лінії. На рис. 40 зображено рух електрона в магнітному полі. У цьому разі швидкість можна розкласти на дві складові – $v_{\parallel}$, паралельну до поля, та $v_{\perp}$, перпендикулярну до поля, й розглядати

рух частинки як суму двох рухів: рівномірного прямолінійного вздовж силової лінії зі швидкістю $v_{\parallel}$ й рівномірного по колу зі швидкістю $v_{\perp}$. При цьому частинка рухається по спіралі, немовби «навиваючись» на силову лінію. Проекція гвинтової лінії на площину, перпендикулярну до ліній поля, являє коло радіусом R , що залежить від кута α .

$$evB \sin \alpha = \frac{mv_{\perp}^2}{R}; \quad v_{\perp} = v \sin \alpha; \quad evB \sin \alpha = \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{R};$$

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}. \quad (105)$$

Чим менше є кут α , тим меншим є радіус кола із заданої швидкості v .

Крок гвинтової лінії h – це відстань, яку пролітає частинка вздовж силової лінії за час одного оберту T :

$$h = v_{\parallel} T = \frac{2\pi mv}{eB} \cos \alpha = \frac{2\pi mv_{\parallel}}{eB}. \quad (106)$$

Чим менше є кут α , тим більше є крок гвинтової лінії за заданої швидкості v .

У неоднорідних магнітних полях траєкторії руху частинок є більш складні.

Питомий заряд електрона в даній роботі визначається двома способами:

а) за допомогою двоелектродної електронної лампи, поміщеної в магнітне поле соленоїда; б) за допомогою електронно-променевої трубки, розташованої в магнітному полі Землі.

3 Опис установки і методики вимірювань

3.1 Спосіб а: Визначення питомого заряду електрона за допомогою двоелектродної електронної лампи

Прилади і приладдя: двоелектродна електронна лампа; соленоїд; три потенціометри; два вольтметри; мікроамперметр; міліамперметр; три джерела струму.

Для виконання роботи треба зібрати схему, зображену на рис. 41. На рисунку: L – двоелектродна електронна лампа; C – соленоїд (кружечками зображено перетини обвитків соленоїда); P_1 , P_2 , P_3 – потенціометри; V – вольтметри; μA – мікроамперметр; mA – міліамперметр.

Двоелектродна електронна лампа L являє собою відкачаний (вакуумний)

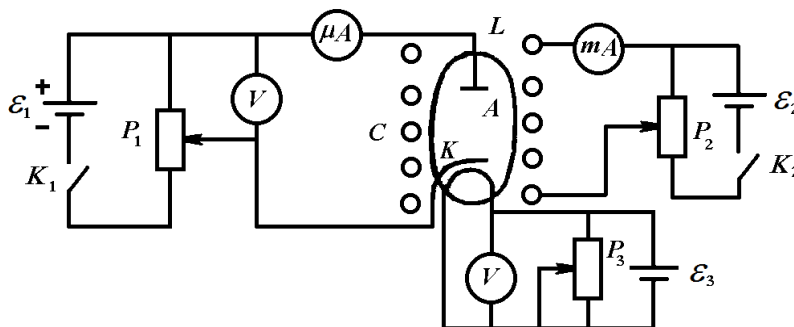


Рис. 41. Схема для визначення питомого заряду електрона за допомогою двоелектродної електронної лампи

балон, усередині якого розташовано два електроди: анод у вигляді циліндра і катод у вигляді нитки, розташованої вздовж осі анода. Катод підігрівається до високої температури. З розжареного катода внаслідок явища термоелектронної емісії вилітають електрони. Якщо анод з'єднати з позитивним полюсом джерела E_1 , а катод – з негативним, то між ними виникне електричне поле, під дією якого електрони будуть рухатися від катода до анода по радіусах (рис. 42, а). Мікроамперметр зареєструє анодний струм.

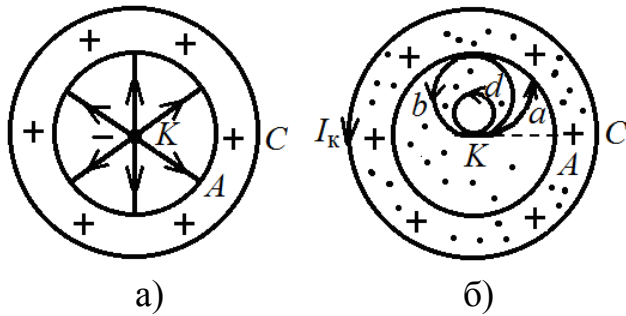


Рис. 42. Рух електрону у середині двоелектродної лампи: а) без струму в соленоїді; б) зі струмом в соленоїді

Лампа L поміщена в соленоїд C в такий спосіб, щоб вісь анода збіглася з віссю соленоїда. При замиканні ключа K_2 по соленоїду тече струм, що створює усередині соленоїда магнітне поле, однорідне в середній його частині. Магнітні силові лінії паралельні до осі соленоїда та осі анода й перпендикулярні до напрямку руху електронів. На рис. 42, б перетин соленоїда C подано у вигляді

одного обвитка, по якому тече струм проти годинникової стрілки. Магнітні силові лінії є перпендикулярні до площини рисунка і спрямовані до нас (точки на рис. 42, б). При русі електрона в магнітному полі на нього діє сила Лоренца. Оскільки швидкість електрона є перпендикулярною до силових ліній магнітного поля, то $\sin(\vec{v} \wedge \vec{B}) = 1$ і $F_{\vec{E}} = evB$.

Сила Лоренца завжди є перпендикулярною до вектора швидкості і є доцентровою силою. Під дією цієї сили траєкторії електронів будуть викривлятися.

Для отримання формули розрахунку питомого заряду e/m електрона використовуємо формулу (102). З цієї формули отримуємо

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{BR}, \quad (107)$$

де v – швидкість електрона біля анода; R – радіус траєкторії електрона; B – індукція магнітного поля.

Індукція магнітного поля соленоїда визначається за формулою

$$B = \mu \mu_0 I_{\vec{E}} n, \quad (108)$$

де n – кількість обвитків, які припадають на одиницю довжини соленоїда; $\mu = 1$, тому що усередині лампи є вакуум; $I_{\vec{E}}$ – сила струму в соленоїді, вимірюється міліамперметром.

Швидкості електрон набуває під дією електричного поля між анодом та катодом. Якщо різниця потенціалів між анодом та катодом дорівнює U , то робота сил поля при переміщенні електрона визначається за формулою

$$A = eU.$$

Внаслідок виконання цієї роботи кінетична енергія електрона зростає. Робота сил поля дорівнює зміні кінетичної енергії:

$$A = eU = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

де v_0 – швидкість електрона при вильоті з катоду; v – швидкість електрона біля аноду. Оскільки $v \gg v_0$, то

$$eU = \frac{mv^2}{2}.$$

Звідси знайдемо швидкість і підставимо її значення у формулу (107):

$$v = \sqrt{2eU/m};$$

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{BR} \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Зведемо останній вираз до квадрата й розв'яжемо отриманий вираз відносно e/m :

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{(BR)^2}, \quad (109)$$

де анодна напруга U вимірюється вольтметром.

Треба визначити радіус траєкторії R . З формули (102) видно, що за заданої швидкості радіус траєкторії є обернено пропорційний до індукції магнітного поля. При малому струмі в соленоїді індукція поля є мала, радіус траєкторії – великий (крива a на рис. 42, б). Зі збільшенням струму в соленоїді радіус траєкторії зменшується, й за певного значення струму $I_{\hat{E}}$ електрон буде рухатися по траєкторії b . У цьому разі електрон пролетить повз анод і повернеться до катода. Анодний струм стане рівним нулю. При подальшому посиленні магнітного поля радіус траєкторії буде зменшуватися, анодний струм залишиться рівним нулю. Треба виміряти струм у соленоїді $I_{\hat{E}}$ саме в той момент, коли електрони переміщуються по траєкторіях b , які назовемо критичними. У цьому разі, як видно з рис. 42, б, радіус траєкторії дорівнює половині радіуса аноду: $R = r_A/2$. Радіус аноду – величина відома.

Підставимо у формулу (109) значення B та R :

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{(\mu_0 \cdot I_{\hat{E}} \cdot n \cdot r_A)^2}. \quad (110)$$

Оскільки μ_0 , n , r_A – величини сталі, формулу можна перетворити:

$$\frac{e}{m} = A \frac{U}{I_{\hat{E}}^2}, \quad (111)$$

де $A = \frac{8}{(\mu_0 \cdot n \cdot r_A)^2}$ можна розрахувати до початку вимірювань.

При виконанні роботи треба врахувати, що швидкості теплового руху електронів в металі є неоднакові, отже, електрони вилітають із катода з різними швидкостями і з різними кінетичними енергіями $mv_0^2/2$. Початковими енергіями деяких електронів не можна нехтувати, для них отримані формули є несправедливими. Їхні швидкості біля анода теж великі. Не має потреби домагатися їхнього руху критичною траєкторією, тобто не слід домагатися щоб анодний струм дорівнював нулю. Повільно змінюючи струм у соленоїді, слід відзначити завершення різкого спаду анодного струму. У цей момент записати значення струму в соленоїді $I_{\hat{E}}$.

3.2 Спосіб б: Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки

Прилади і приладдя: електронно-променева трубка на штативі, компас, кутомір.

Електронно-променева трубка являє собою скляну колбу, відкачану до високого вакууму. У колбі знаходиться низка електродів, необхідних для отримання вузького пучка електронів (рис. 43).

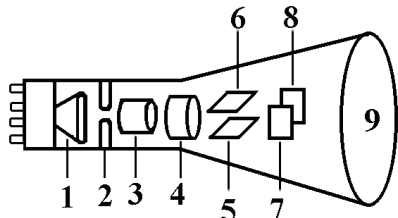


Рис. 43. Електронно-променева трубка

На рисунку: 1 – підігрівний катод, що випускає електрони; 2 – модулятор, що регулює інтенсивність електронного пучка; 3 і 4 – два аноди, що прискорюють електрони і фокусують електронний пучок на екран; 5 і 6 – пластини, що відхиляють електрони у

вертикальному напрямку, якщо на них подана напруга; 7 і 8 – пластини, що відхиляють електрони в горизонтальному напрямку; 9 – екран, що флуоресцює під дією ударів електронів. У даній роботі на пластини 5, 6 і 7, 8 напруга не подається, тому вони не впливають на рух електронів.

У роботі використовується вплив магнітного поля Землі на рух електронів усередині трубки. Якщо трубку розташувати так, щоб її вісь, а отже, і рух електронів були спрямовані вздовж вектора індукції магнітного поля Землі, то електрони будуть рухатися прямолінійно, не зазнаючи дії сили Лоренца. У центрі екрана утвориться світла пляма. Якщо трубку повернути так, щоб рух електронів при вильоті з другого аноду було спрямовано під кутом α до вектора $\vec{B}$ (рис. 44), то електрони будуть рухатися по гвинтовій лінії. Усередині трубки електрони встигнуть пройти невеликий відрізок гвинтової лінії AD , внаслідок чого світла пляма на екрані зсунеться в точку D . Позначимо зсув плями CD через d .

Якщо спроектувати відрізок гвинтової лінії AD і екран трубки на площину, перпендикулярну до вектора $\vec{B}$, то отримаємо картину, зображену на рис. 45. Проекція гвинтової лінії на площину, перпендикулярну до $\vec{B}$, являє собою коло радіуса R , що визначається за формулою (105). З цієї формули можна знайти питомий заряд електрона

$$\frac{e}{m} = \frac{v \sin \alpha}{BR}. \quad (112)$$

Проекція відрізка гвинтової лінії AD представляє дугу кола MD . З рис. 45

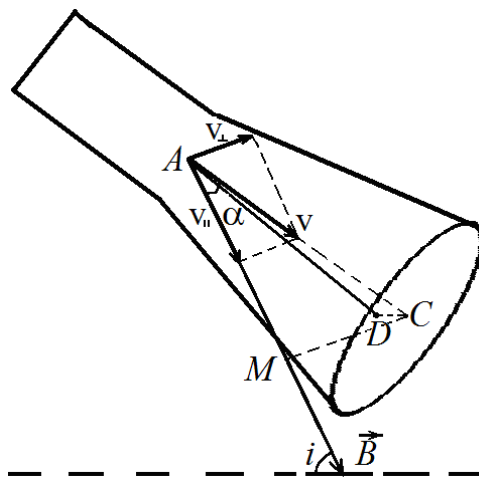


Рис. 44. Рух електронів усередині електронно-променевої трубки, якщо її вісь спрямована вздовж вектора індукції магнітного поля Землі

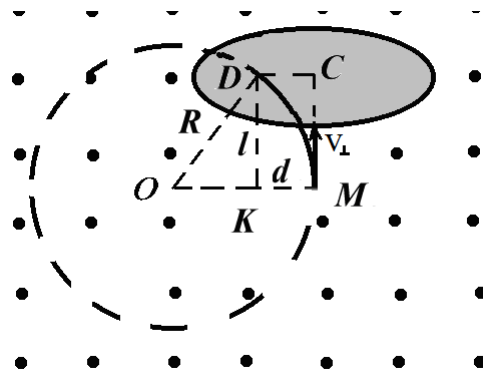


Рис. 45. Проекція руху електронів на площину, перпендикулярну до вектора магнітного поля Землі

можна визначити радіус кола R . З прямокутного трикутника KOD випливає

$$R^2 = (R - d)^2 + l^2.$$

Звідси

$$R = \frac{d^2 + l^2}{2d}.$$

З рис. 44 видно, що $l = MC = AC \cdot \sin \alpha$.

Нехай $AC = L$, тоді

$$R = \frac{d^2 + L^2 \sin^2 \alpha}{2d}. \quad (113)$$

Відстань L від другого анода до екрана відома. Швидкість v електронів при вильоті з другого анода визначається за формулою $v = \sqrt{2eU/m}$, де U – різниця потенціалів між другим анодом і катодом.

Підставивши значення швидкості у формулу (112), отримаємо

$$\frac{e}{m} = \frac{\sin \alpha}{BR} \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Після піднесення до квадрата і скорочення на e/m отримаємо

$$\frac{e}{m} = \frac{2U \sin^2 \alpha}{(BR)^2}.$$

Підставимо в цю формулу значення радіуса (113):

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B^2} \cdot \frac{d^2 \sin^2 \alpha}{(d^2 + L^2 \sin^2 \alpha)^2}. \quad (114)$$

Якщо $L^2 \sin^2 \alpha \gg d^2$, то формула набирає вигляду

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B^2 L^4} \cdot \frac{d^2}{\sin^2 \alpha}. \quad (115)$$

Індукція магнітного поля на широті Одеси $B \approx 4 \cdot 10^{-5}$ Ґе, кут нахилу вектора $\vec{B}$ до горизонтальної площини $i = 60^\circ$. Напруга U між катодом і другим анодом відома.

4 Оброблення результатів вимірювань (див. лабораторну роботу № 2-2)

5 Порядок виконання роботи

5.1 Спосіб а: Визначення питомого заряду електрона за допомогою двоелектродної електронної лампи

1. Зібрати схему вимірювання (див. рис. 41).
2. Записати сталі параметри установки і розрахувати сталу $A = 8/(\mu_0 \cdot n \cdot r_A)^2$.
3. Замкнути коло розжарення і почекати, доки катод прогріється.
4. Замкнути ключ K_1 і за допомогою потенціометра P_1 установити на вольтметрі напругу, зазначену викладачем.

5. Замкнути ключ K_2 і за допомогою потенціометра P_2 , поступово збільшуючи струм у соленоїді, зменшити анодний струм до завершення його різкого спадання.
6. Записати в таблицю значення струму в соленоїді I_E та анодну напругу U .
7. Виконати аналогічні вимірювання за двох інших значень анодної напруги.
8. Розрахувати значення питомого заряду електрона за формулою (111).
9. Розрахувати середнє значення e/m та абсолютну й відносну похибки вимірювання.

4.2 Спосіб б: Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки

1. Увімкнути джерело струму і почекати, доки нагріється катод.
2. Електронно-променеву трубку за допомогою компаса розташувати в площині магнітного меридіана в такий спосіб, щоб її вісь утворила кут 60° з горизонтальною площиною, тобто була спрямована вздовж вектора $\vec{B}$.
3. За допомогою ручок керування розташувати світлу пляму в центрі C екрана.
4. Повернути трубку у вертикальній площині на кут $\alpha = 30^\circ$ і виміряти зсув світлої плями d .
5. Виміряти зсув за кількох значень кута α .
6. Розрахувати e/m для усіх вимірювань за допомогою формули (115).
7. Розрахувати середнє значення e/m , абсолютну й відносну похибки вимірювань.

6 Контрольні запитання

1. Що називається силою Лоренца? Від чого залежить сила Лоренца?
2. Як визначається напрям сили Лоренца для позитивних і негативних зарядів?
3. Як рухається заряджена частинка в магнітному полі, якщо: а) швидкість паралельна до індукції поля; б) швидкість є перпендикулярною до індукції, в) швидкість утворює довільний кут α з індукцією поля?
4. Як визначається питомий заряд електрона за допомогою двоелектродної електронної лампи? Накреслити схему і вивести формулу розрахунку.
5. Як визначається питомий заряд електрона за допомогою електронно-променевої трубки? Накреслити схему і вивести формулу розрахунку.

7 Зміст протоколу

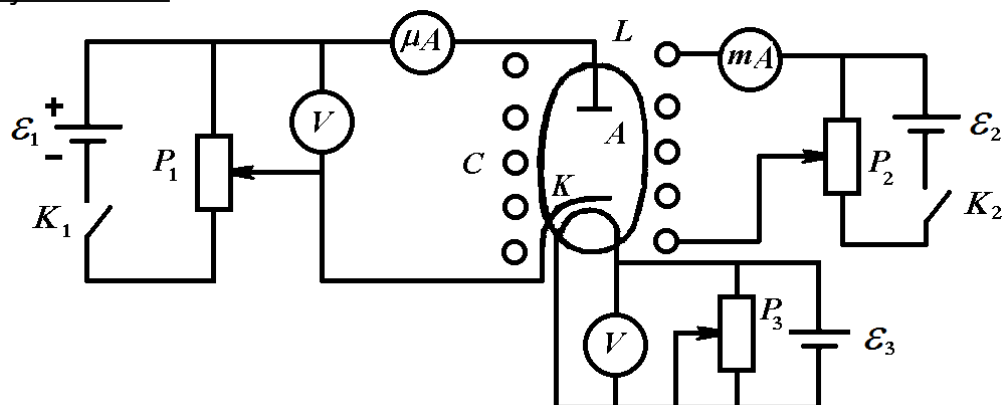
Лабораторна робота № 3-2

I. Домашнє завдання.

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 3-2. Спосіб а: Визначення питомого заряду електрона за допомогою двоелектродної електронної лампи.

- 1) Тема: Визначення питомого заряду електрона.
- 2) Мета роботи: Визначити відношення e/m електронів, використовуючи їх рух в електричному і магнітному полях.

3) Схема установки:



L – двоелектродна електронна лампа; C – соленоїд (кружечками зображено перетини обвитків соленоїда); P_1, P_2, P_3 – потенціометри; V – вольтметри; μA – мікроамперметр; mA – міліамперметр.

4) Таблиця приладів

№ з/п	Найменування	Тип	Заводський номер	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка (клас точності)
1	Міліамперметр					
2	Вольтметр					

5) Формули розрахунку величин:

5.1) Постійна

$$A = \frac{8}{(\mu_0 \cdot n \cdot r_A)^2},$$

де μ_0 – магнітна постійна; n – кількість обвитків, які припадають на одиницю довжини соленоїда; r_A – радіус аноду;

5.2) Питомий заряд електрона

$$\frac{e}{m} = A \frac{U}{I_E^2},$$

де I_E – сила струму в соленоїді; U – анодна напруга.

5.3) Абсолютна похибка вимірювання питомого заряду електрона

$$\Delta \left(\frac{e}{m} \right) = t_{\alpha; n} \cdot \sqrt{\frac{\sum \Delta (e/m)_i^2}{n(n-1)}},$$

де $\alpha = 0,95$ – довірна ймовірність; $n = 3$ – число вимірювань; $t_{0,95; 3} = 4,3$ – коефіцієнт Стюдента.

5.4) Відносна похибка вимірювання питомого заряду електрона у відсотках

$$\delta \left(\frac{e}{m} \right) = \frac{\Delta (e/m)}{\langle e/m \rangle} \cdot 100\%.$$

6) Таблиця результатів прямих вимірювань:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} ; \quad n = \dots ; \quad r_A = \dots$$

№	U	$I_{\text{Е}}, \text{А}$	$e/m, \text{Ев/Ев}$	$\Delta (e/m)_i, \text{Ев/Ев}$	$\Delta (e/m)_i^2, (\text{Ев/Ев})^2$
1					
2					
3					
			$\langle e/m \rangle =$		$\sum \Delta (e/m)_i^2 =$

7) Розрахунки фізичних величин:

7.1) Розрахунок питомого заряду електрона

$$\left(\frac{e}{m} \right)_1 = \dots \cdot \frac{\dots}{(\dots)^2} = \frac{\text{Ев}}{\text{Ев}} ; \quad \left(\frac{e}{m} \right)_2 = \dots \cdot \frac{\dots}{(\dots)^2} = \frac{\text{Ев}}{\text{Ев}} ; \quad \left(\frac{e}{m} \right)_3 = \dots \cdot \frac{\dots}{(\dots)^2} = \frac{\text{Ев}}{\text{Ев}} .$$

7.2) Абсолютна похибка вимірювання питомого заряду електрона:

$$\Delta \left(\frac{e}{m} \right) = 4,3 \cdot \sqrt{\frac{\sum \dots}{3(3-1)}} = \dots \frac{\text{Ев}}{\text{Ев}} .$$

7.3) Відносна похибка вимірювання питомого заряду електрона у відсотках:

$$\delta \left(\frac{e}{m} \right) = \frac{\dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots\% .$$

8) Кінцеві результати:

$$\frac{e}{m} = \left(\langle e/m \rangle \pm \Delta (e/m) \right)_{\alpha} \frac{\text{Ев}}{\text{Ев}} = (\dots \pm \dots)_{0,95} \frac{\text{Ев}}{\text{Ев}} ; \quad \delta \left(\frac{e}{m} \right) = \dots\% .$$

9) Висновок:

10) Роботу виконав(ла): _____ (прізвище розбірливо).

Роботу перевірив:

11) Дата.

7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 3-2

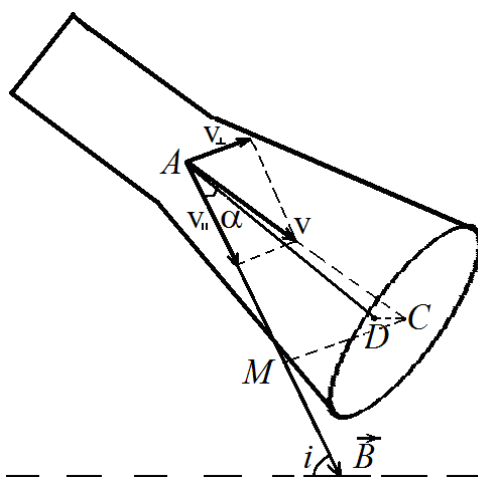
I. Домашнє завдання.

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 3-2. Спосіб б: Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки.

1) Тема: Визначення питомого заряду електрона.

2) Мета роботи: Визначити відношення e/m електронів, використовуючи їх рух в електричному і магнітному полях.

3) Схема установки:



Електронно-променева трубка

4) Таблиця приладів:

№ з/п	Найменування	Тип	Заводський номер	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка (клас точності)
1	Електронно-променева трубка					
2	Компас					
3	Транспортер					

5) Формули розрахунку величин:

5.1) Питомий заряд електрону

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B^2 L^4} \cdot \frac{d^2}{\sin^2 \alpha},$$

де B – індукція магнітного поля; U – різниця потенціалів між катодом і другим анодом відома; L – відстань від другого анода до екрана відома; d – зсув світлої плями; α – кут.

5.2) Абсолютна похибка вимірювання питомого заряду електрона

$$\Delta \left(\frac{e}{m} \right) = t_{\alpha; n} \cdot \sqrt{\frac{\sum \Delta (e/m)_i^2}{n(n-1)}},$$

де $\alpha = 0,95$ – довірна ймовірність; $n = 3$ – число вимірювань; $t_{0,95; 3} = 4,3$ – коефіцієнт Стюдента.

5.3) Відносна похибка вимірювання питомого заряду електрона у відсотках

$$\delta \left(\frac{e}{m} \right) = \frac{\Delta (e/m)}{\langle e/m \rangle} \cdot 100\%.$$

6) Таблиця результатів прямих вимірювань:

$B = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$; $L = \dots \text{ м}$; $U = \dots \text{ В}$.

№	α	$d, \text{ м}$	$e/m, \text{ Кл/кг}$	$\Delta (e/m)_i, \text{ Кл/кг}$	$\Delta (e/m)_i^2, (\text{Кл/кг})^2$
1					
2					
3					
			$\langle e/m \rangle =$	$\sum \Delta (e/m)_i^2 =$	

7) Розрахунки фізичних величин:

7.1) Розрахунок питомого заряду електрона

$$\left(\frac{e}{m}\right)_1 = \frac{8 \cdot \dots}{(\dots)^2 \cdot (\dots)^4} \cdot \frac{(\dots)^2}{\sin^2 \dots} = \frac{\hat{E}\ddot{e}}{\hat{e}\tilde{a}};$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_2 = \frac{8 \cdot \dots}{(\dots)^2 \cdot (\dots)^4} \cdot \frac{(\dots)^2}{\sin^2 \dots} = \frac{\hat{E}\ddot{e}}{\hat{e}\tilde{a}};$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_3 = \frac{8 \cdot \dots}{(\dots)^2 \cdot (\dots)^4} \cdot \frac{(\dots)^2}{\sin^2 \dots} = \frac{\hat{E}\ddot{e}}{\hat{e}\tilde{a}}.$$

7.2) Абсолютна похибка вимірювання питомого заряду електрона:

$$\Delta\left(\frac{e}{m}\right) = 4,3 \cdot \sqrt{\frac{\sum \dots}{3(3-1)}} = \dots \frac{\hat{E}\ddot{e}}{\hat{e}\tilde{a}}.$$

7.3) Відносна похибка вимірювання питомого заряду електрона у відсотках:

$$\delta\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{\dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots\%.$$

8) Кінцеві результати:

$$\frac{e}{m} = \left(\langle e/m \rangle \pm \Delta(e/m)\right)_\alpha \frac{\hat{E}\ddot{e}}{\hat{e}\tilde{a}} = (\dots \pm \dots)_{0,95} \frac{\hat{E}\ddot{e}}{\hat{e}\tilde{a}}; \quad \delta\left(\frac{e}{m}\right) = \dots\%.$$

9) Висновок:

10) Роботу виконав(ла): _____ (прізвище розбірливо).

Роботу перевірів:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3-3

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ БАЛІСТИЧНИМ МЕТОДОМ

1 Мета роботи:

1. Вивчити явище електромагнітної індукції і його закони.
2. Вивчити балістичний метод вимірювання індукції магнітного поля.
3. Дослідити магнітне поле соленоїда.

2 Ключові положення

2.1 Явище електромагнітної індукції

Явище електромагнітної індукції полягає в тому, що за кожного змінювання магнітного потоку, який пронизує площу, обмежену контуром, в останньому виникає ЕРС індукції, чисельно рівна швидкості змінювання магнітного потоку.

$$\mathcal{E}_{\text{за}} = - \frac{d\hat{\Phi}}{dt}. \quad (116)$$

Слід звернути увагу на те, що ЕРС індукції залежить не від величини магнітного потоку і не від його змінювання, а від швидкості його змінювання. Якщо контур замкнути, то по ньому тече індукційний струм. Знак (–) у рівнянні (116) виражає закон Ленца, який визначає напрям ЕРС.

ЕРС індукції має такий напрям, за якого магнітне поле індукційного струму перешкоджає такому змінюванню магнітного потоку, яке викликає цю ЕРС.

Наприклад, на рис. 46 зображено контур, який пронизується магнітним потоком, спрямованим перпендикулярно до площини рисунку до нас, що зазначено точками. Якщо цей потік збільшувати ($d\hat{\Phi}/dt > 0$), то магнітне поле

виниклого індукційного струму, за законом Ленца, повинно перешкоджати збільшенню потоку, тому воно спрямовано проти зовнішнього поля, тобто за рис. 46, а. За правилом свердлика можна визначити, в якому напрямку потече індукційний струм. Якщо поле струму спрямоване за креслення, то струм тече за годинниковою стрілкою. Якщо зовнішній магнітний потік зменшується ($d\hat{\Phi}/dt < 0$), то магнітне поле індукційного струму збігається за напрямом із зовнішнім полем, перешкоджаючи зменшенню магнітного потоку. Індукційний струм у цьому випадку тече проти годинникової стрілки (рис. 46, б). Отже, магнітне поле індукційного струму може збігатися за напрямом із зовнішнім магнітним полем і може бути

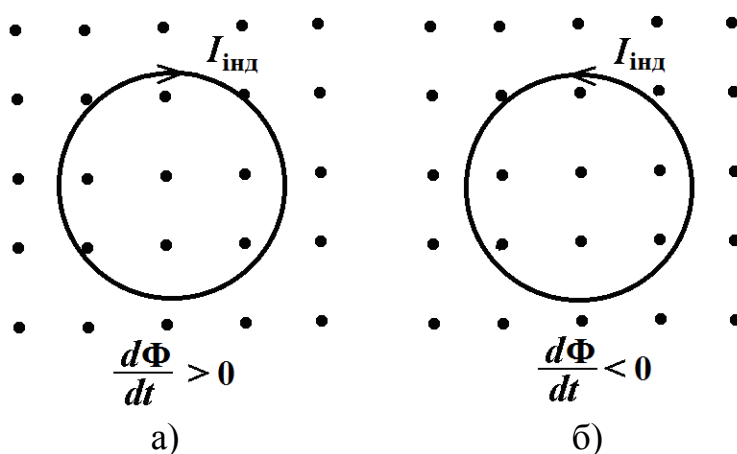


Рис. 46. Індукційний струм, що виникає в контурі:
а) при збільшенні потоку; б) при зменшенні потоку

протилежним до нього, залежно від того, зменшується чи збільшується магнітний потік, який пронизує контур.

З формули (96) видно, що змінювання магнітного потоку можна викликати або змінюванням індукції магнітного поля, залишаючи контур нерухомим, або повертанням контуру в незмінному магнітному полі, або змінюванням його площі.

У випадку, коли контур є нерухомий, а змінюється магнітне поле, виникнення ЕРС індукції пояснюється тим, що магнітне поле, яке змінюється, породжує вихрове електричне поле, під дією якого вільні заряди в провіднику починають рухатися. Це поле істотно відрізняється від електростатичного. Електростатичне поле є потенційним, його силові лінії не замкнуті, розпочинаються і закінчуються на зарядах, і циркулювання вектора $\vec{E}$ будь-яким замкнутим контуром дорівнює нулю. Індукційне електричне поле не потенційне, а є вихровим, його силові лінії замкнуті й охоплюють магнітні силові лінії, і циркулювання вектора напруженості є відмінне від нуля. Вихрове електричне поле існує незалежно від наявності провідника. За допомогою провідника ми тільки виявляємо це поле, реєструючи індукційний струм або ЕРС.

У випадку, коли незамкнутий провідник довжиною l переміщується в незмінному магнітному полі, виникнення ЕРС індукції можна пояснити дією сили Лоренца. Якщо провідник (рис. 47) переміщувати перпендикулярно до магнітного поля зі швидкістю $\vec{v}$, то вільні електрони розпочнуть зміщуватися перпендикулярно до $\vec{v}$ та $\vec{B}$ зі швидкістю $\vec{u}$. Швидкість $\vec{u}$ зазвичай є набагато менша за $\vec{v}$, тому сила Лоренца спрямована практично вздовж провідника. Щодо магнітного поля, швидкість руху електрона дорівнює векторній сумі швидкостей $\vec{v}$ та $\vec{u}$. Сила Лоренца є перпендикулярною до результуючої швидкості $\vec{v}_\delta$. Складові сили $\vec{F}_\parallel$, рівнобіжна до провідника, переміщує заряди, створюючи на одному кінці провідника надлишок електронів, на іншому – їхню нестачу. Зміщення електронів здійснюється доки сила Лоренца не зрівнюється з силою Кулона F_E , яка виникає в результаті утворення індукційного електричного поля:

$$evB \sin(\vec{v} \wedge \vec{B}) = eE_{\text{іа}}.$$

Рух електронів припиняється, а на кінцях провідника виникає різниця потенціалів

$$U = vBl \sin(\vec{v} \wedge \vec{B}). \quad (117)$$

Складові сили Лоренца $F_\perp$ перешкоджає руху провідника і компенсується зовнішньою механічною силою $F_{\text{мех}}$, що переміщує провідник.

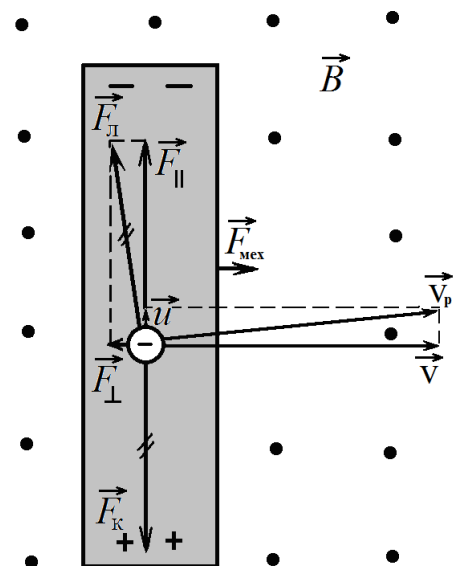


Рис. 47. Виникнення ЕРС індукції в провіднику, що рухається

Вираз (116) для ЕРС індукції є універсальним і не залежить від способу змінювання магнітного потоку. Якщо весь замкнутий контур переміщувати поступово в однорідному магнітному полі, то в ньому не завжди ЕРС індукції.

Наприклад, якщо контур $ABCD$ (рис. 48, а)

переміщувати в

однорідному магнітному

полі поступово, то на

ділянках AB і CD

виникають зустрічні ЕРС,

алгебрична сума яких

дорівнює нулю. Струм у

контурі не потече. Щоб у

цьому контурі виникла

ЕРС індукції, потрібно

його обертати (рис. 48, б).

Тоді на ділянках AB і CD виникнуть ЕРС, що діють узгоджено, а їхня алгебрична сума є відмінною від нуля.

Якщо порівняти обидва приклади, то можна помітити, що при поступальному русі контуру в однорідному полі магнітний потік, що пронизує площу $ABCD$, не змінюється і ЕРС індукції дорівнює нулю; при обертанні контуру магнітний потік змінюється і ЕРС є відмінною від нуля. Отже, і в разі руху контуру в незмінному магнітному полі необхідною умовою виникнення ЕРС індукції є змінювання магнітного потоку, який пронизує площу, охоплену контуром.

Індукційний струм, протікаючи по контуру з опором R , за час dt переносить через поперечний переріз провідника заряд dq , пов'язаний із силою струму співвідношенням

$$dq = Idt.$$

Оскільки $I = \mathcal{E}_{\text{іа}} / R$, а $\mathcal{E}_{\text{іа}} = - d\hat{\Phi} / dt$,

тоді
$$dq = - \frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt} dt = - \frac{d\Phi}{R}.$$

Після інтегрування отримаємо:

$$q = \int_0^q dq = - \frac{1}{R} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi, \quad \text{або} \quad q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}. \quad (118)$$

Індукційний заряд, що пройшов по контуру, залежить тільки від різниці початкового і кінцевого значень магнітного потоку, який пронизує контур, і від опору контуру.

3 Опис установки і методики вимірювань

Прилади і приладдя: соленоїд, міліамперметр, джерело струму, потенціометр, перемикач, вимірювальна котушка, балістичний гальванометр, додатковий опір.

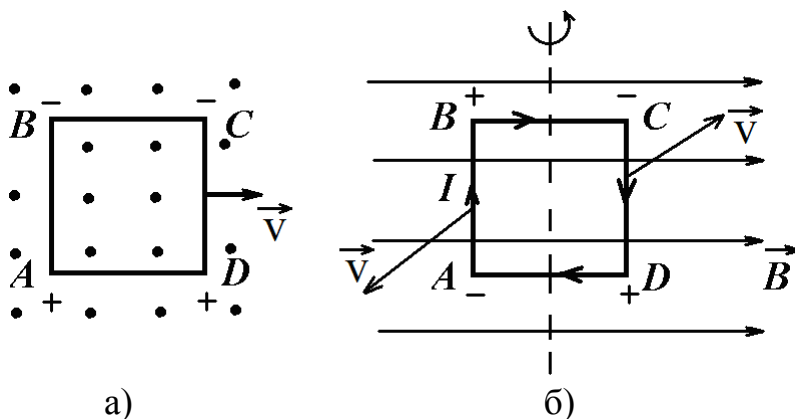


Рис. 48. Контур в магнітному полі: а) переміщення поступове; б) переміщення обертальне

В основі балістичного методу вимірювання індукції магнітного поля лежить явище електромагнітної індукції.

Для виконання роботи треба скласти схему, зображену на рис. 49. На рисунку: C – соленоїд; Π – перемикач; P – потенціометр; mA – міліамперметр; K – вимірювальна котушка; $БГ$ – балістичний гальванометр; R_1 – додатковий опір.

Вимірювальна котушка K малого діаметра і малої довжини, що містить N обвитків і є з'єднана з балістичним гальванометром $БГ$, розміщується в досліджуваному магнітному полі в такий спосіб, щоб площа обвитків була перпендикулярна до поля. При протіканні струму по соленоїду котушка буде

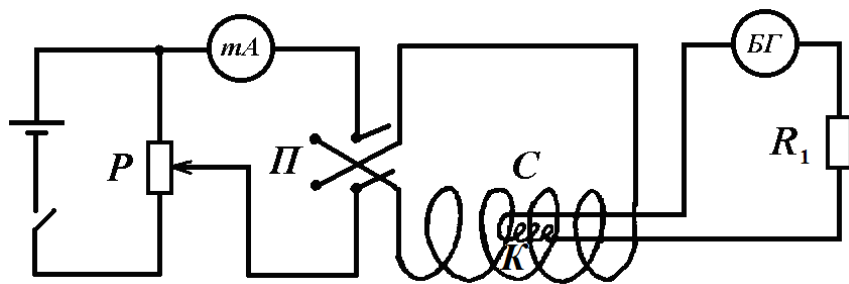


Рис. 49. Схема вимірювання індукції магнітного поля балістичним методом

пронизувати потік Φ_1 . Для виникнення в котушці ЕРС індукції треба змінити магнітний потік, який пронизує її обвитки. За допомогою перемикача Π змінюють напрям струму в соленоїді, не змінюючи

його величини. Магнітний потік теж змінить свій напрям, не змінюючи величини: $\hat{O}_2 = -\hat{O}_1$. У період зміни потоку по колу вимірювальної котушки потече індукційний струм, внаслідок чого світловий зайчик на шкалі балістичного гальванометра відхилиться на α поділок шкали.

Балістичний гальванометр – це дзеркальний гальванометр, рамка якого підвішена на тонкому підвісі і має великий момент інерції, внаслідок чого період T її власних коливань є великий (10 ... 30 с). До підвісу прикріплене дзеркало. Промінь світла від освітлювача потрапляє на дзеркало, відбивається від нього і потрапляє на шкалу. Внаслідок цього на шкалі спостерігається світловий зайчик, у центрі якого знаходиться тонка темна смужка. Рамка знаходиться в магнітному полі постійного магніту, тому при проходженні струму вона повертається в магнітному полі, внаслідок чого світловий зайчик переміщується вздовж шкали. Для того щоб відхилення зайчика було пропорційне до заряду треба щоб час проходження заряду по колу був значно менше за період власних коливань рамки гальванометра ($t = T/11$). Тоді

$$q = C \cdot \alpha, \quad (119)$$

де α – відхилення зайчика в розподілках шкали; C – балістична стала гальванометра, що показує, який заряд відхиляє зайчик на одну поділку шкали.

Балістична стала зазначається на гальванометрі. Також зазначається опір гальванометра і його критичний опір $R_{кр}$ – найбільше значення опору всього кола гальванометра, за якого рух рамки є аперіодичний (без коливань). Якщо опір кола перевищує критичний, то рамка, а отже, і світловий зайчик будуть коливатися, довго не встановлюючись на нуль. Якщо опір кола є менше за критичний, то рух рамки буде аперіодичним, але повернення на нуль після відхилення відбувається повільніше, а ніж при критичному опорі. За

допомогою додаткового опору R_1 (див. рис. 49) доводять опір кола гальванометра до критичного.

Отже, заряд, що пройшов по колу вимірювальної котушки K за швидкої зміни струму у соленоїді, вимірюється балістичним гальванометром.

Як було показано вище, індукційний заряд прямо пропорційний змінюванню магнітного потоку:

$$q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R},$$

де Φ_1 та Φ_2 – початкове і кінцеве значення магнітних потоків, що пронизує обвитки котушки K ; R – опір кола котушки. Оскільки в котушці N обвитків,

$$q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} N. \quad (120)$$

З огляду на те, що $\hat{O}_2 = -\hat{O}_1$, отримаємо

$$q = N \frac{2\hat{O}_1}{R}. \quad (121)$$

Магнітний потік пов'язано з індукцією магнітного поля співвідношенням

$$\Phi = BS \cos(\vec{n} \wedge \vec{B}),$$

але, оскільки площа обвитків котушки є перпендикулярною до силових ліній, $\cos(\vec{n} \wedge \vec{B}) = 1$, тому

$$\Phi = BS,$$

де S – площа поперечного перерізу котушки. Підставимо значення Φ у вираз для заряду

$$q = \frac{2BSN}{R}, \quad (122)$$

звідки:

$$B = \frac{Rq}{2SN}. \quad (123)$$

З огляду на (119), отримаємо

$$B = \frac{RC}{2SN} \alpha, \quad (124)$$

де α – відхилення зайчика гальванометра в поділках шкали, що виникає при швидкій зміні напрямку струму у соленоїді.

Хоча індукційний заряд не залежить від швидкості змінювання магнітного потоку (див. (118)), змінювати його треба швидко, тому що відхилення балістичного гальванометра пропорційне заряду при короткочасному протіканні струму. Щоб уникнути помилки у визначенні нульового положення зайчика на шкалі (його нульове положення є непостійне), потрібно, змінивши напрям струму у соленоїді, виміряти відхилення α_1 , потім, коли зайчик повернеться в нульове положення, знову змінити напрям струму і виміряти відхилення зайчика α_2 в інший бік. У формулу (124) підставляється середнє значення відхилень

$$\alpha_{\text{середнє}} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

Опір R у формулі (124) – це опір усього кола котушки:

$$R = R_{\text{Г}} + R_{\text{А}} + R_1, \quad (125)$$

де $R_{\text{К}}$ – опір котушки; $R_{\text{Г}}$ – опір балістичного гальванометра; R_1 – додатковий опір, що доповнює опору кола котушки до критичного значення. Отже, $R = R_{\text{ср}}$. Величини $R_{\text{Г}}$, R_1 , $R_{\text{К}}$, S , N , C є сталі і написані на установці. Тому формулу (124) можна перетворити:

$$B = A \cdot \alpha, \quad (126)$$

де

$$A = \frac{RC}{2SN}. \quad (127)$$

Сталу A можна розрахувати до початку вимірювань.

Вимірювальна котушка K може переміщуватися вздовж осі соленоїда і перпендикулярно до неї, може висуватися за межі соленоїда. Тому вимірювання індукції виконуються для різних точок поля соленоїда, щоб визначити його характер.

4 Оброблення результатів вимірювань (див. лабораторну роботу № 2-2)

5 Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему вимірювання (див. рис. 49).
2. Записати сталі величини $R_{\text{Г}}$, R_1 , $R_{\text{К}}$, S , N , C й обчислити сталу A за формулою (127).
3. Вимірювальну котушку розмістити в центрі соленоїда.
4. Замкнути коло соленоїда й за допомогою потенціометра установити в колі струм, зазначений на установці.
5. Перемикачем $П$ змінити напрям струму в соленоїді й записати в таблицю покази гальванометра α_1 .
6. Після повернення світлового зайчика на нуль знову змінити напрям струму у соленоїді і записати покази гальванометра α_2 .
7. Зсунути вимірювальну котушку на 2 см від центра вздовж осі соленоїда і зробити аналогічні вимірювання α_1 і α_2 .
8. Зсуваючи котушку щоразу на 2 см, дійти до точок, що лежать поза соленоїдом.
9. Знову помістити котушку в центр соленоїда і, переміщуючи її перпендикулярно до осі соленоїда, виміряти α_1 і α_2 у трьох-чотирьох точках.
10. Помістити котушку поза соленоїдом на його осі і зробити аналогічні вимірювання.
11. Розрахувати індукцію магнітного поля B за формулою (126) для всіх точок вимірювання.
12. Для точок, що лежать на осі соленоїда, побудувати графік залежності B від відстані r від цих точок до центра соленоїда.

6 Контрольні запитання

1. Що називається індукцією магнітного поля й в яких одиницях вона вимірюється?
2. Що називається магнітними силовими лініями?
3. Що називається магнітним потоком?
4. У чому полягає явище електромагнітної індукції?
5. Від чого залежить і як спрямована ЕРС індукції?
6. Від чого залежить індукційний заряд?
7. В чому полягає балістичний метод вимірювання індукції магнітного поля? Накреслити схему і вивести розрахункову формулу.
8. За якої умови відхилення зайчика балістичного гальванометра є пропорційне до величини заряду, що пройшов по колу?
9. Який опір називається критичним?
10. Яке є магнітне поле соленоїда?

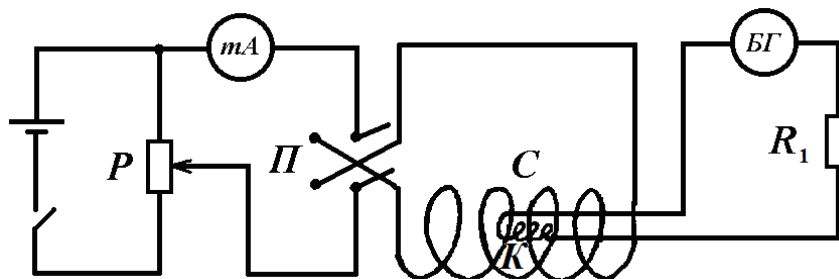
7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 3-3

I. Домашнє завдання.

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 3-3.

- 1) Тема: Дослідження магнітного поля балістичним методом.
- 2) Мета роботи: Вивчити явище електромагнітної індукції і його закони. Виміряти індукцію магнітного поля соленоїда.
- 3) Схема установки:



C – соленоїд; Π – перемикач; P – потенціометр; mA – міліамперметр; K – вимірювальна котушка; $БГ$ – балістичний гальванометр; R_1 – додатковий опір.

4) Таблиця приладів

№ з/п	Найменування	Тип	Заводський номер	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка (клас точності)
1	Міліамперметр					
2	Опір R_1					

5) Формули розрахунку величин:

5.1) Постійна

$$A = \frac{RC}{2SN}; \quad R = R_{\text{БГ}} + R_A + R_1,$$

де R_K – опір котушки; R_{Γ} – опір балістичного гальванометра; R_1 – додатковий опір, що доповнює опір кола котушки до критичного значення; C – балістична стала гальванометру; S – площа поперечного перерізу котушки; N – кількість обвитків котушки.

5.2) Індукція магнітного поля соленоїда:

$$B = A \cdot \alpha ,$$

де $\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ – середнє відхилення зайчика гальванометра в поділках шкали.

6) Таблиця результатів прямих вимірювань:

$$R_E = \dots \text{ Ом} ; R_A = \dots \text{ Ом} ; R_1 = \dots \text{ Ом} ; \tilde{N} = \dots ; S = \dots \text{ м}^2 ; N = \dots$$

№	α_1	α_2	α	$r, \text{ м}$	$B, \text{ Тл}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

7) Розрахунки фізичних величин:

7.1) Постійна:

$$A = \frac{(\dots + \dots + \dots) \cdot \dots}{2 \cdot \dots \cdot \dots} = \dots$$

7.2) Індукція магнітного поля соленоїда:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} ; \quad B_i = A \cdot \alpha_i = \dots \cdot \dots = \dots \text{ Тл}.$$

8) Кінцеві результати:

Представити у вигляді графіка залежності магнітної індукції від відстані цих точок до центра соленоїда $B(r)$.

9) Висновок:

10) Роботу виконав(ла): _____ (прізвище розбірливо).

Роботу перевірів:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3-4 ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У ФЕРОМАГНЕТИКАХ

1 Мета роботи:

1. Дослідити залежність магнітної індукції у феромагнетику від напруженості магнітного поля.
2. Дослідити залежність магнітної проникності феромагнетику від напруженості магнітного поля.

2 Ключові положення

2.1 Намагнічування речовини

Для пояснення магнітних властивостей різних речовин необхідно розглянути дію магнітного поля на електрони, що рухаються за певними орбітами у молекулах і атомах речовини.

Якщо тіло не намагнічене, в орієнтаціях електронних орбіт немає жодного порядку і результуючий магнітний момент дорівнює нулю.

З'ясуємо тепер дію магнітного поля на обертання електрона в площині, перпендикулярній до зовнішнього магнітного поля. Припустимо, що в однорідному магнітному полі електрон обертається навколо заряду q по колу радіуса R зі швидкістю v_0 .

Кулонівська сила

$$F_E = \frac{eq}{4\pi \epsilon_0 R^2},$$

є доцентровою F_{aio} , й тому за відсутності поля

$$\frac{eq}{4\pi \epsilon_0 R^2} = \frac{mv_0^2}{R}; \quad v_0 = \sqrt{\frac{eq}{4\pi \epsilon_0 R^2 \cdot m}}. \quad (128)$$

Величина магнітного моменту орбіти

$$p_0 = J \cdot S = \frac{1}{2} ev_0 R. \quad (129)$$

За наявності поля B_0 на електрон діє сила Лоренца $F_E = evB_0$. Сила Лоренца, у залежності від напрямку руху електрона по орбіті, буде спрямована або від осі (рис. 50, а), або до осі обертання (рис. 50, б). Тоді замість формул (128) та (129) слід написати:

$$\frac{eq}{4\pi \epsilon_0 R^2} = \frac{mv^2}{R} \pm evB_0; \quad p = J \cdot S = \frac{1}{2} evR. \quad (130)$$

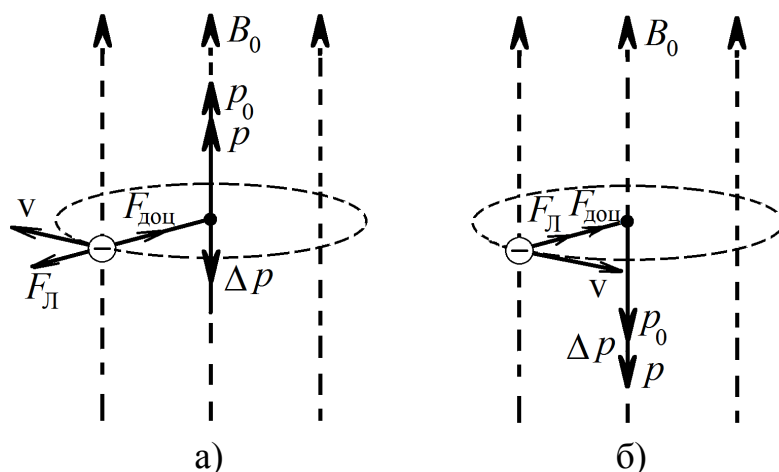


Рис. 50. Рух електрона в зовнішньому магнітному полі

Отже, швидкість v руху електрона по орбіті за наявності зовнішнього магнітного поля буде відрізнятися від швидкості v_0 за відсутності поля. Знайдемо різницю цих швидкостей з виразів (130) та (128):

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{mv_0^2}{R} \pm evB_0; \quad \frac{evB_0R}{m} = v^2 - v_0^2 \approx 2v(v - v_0); \quad v - v_0 \approx \pm \frac{eB_0R}{2m}.$$

Змінювання величини магнітного моменту орбіти:

$$\Delta p = p - p_0 = \frac{1}{2}eR(v - v_0) \approx \frac{e^2R^2B_0}{4m}.$$

За будь-якого напрямку обертання електрона вектор $\Delta \vec{p}$ спрямовано проти зовнішнього поля. Таким чином, для орбіти, зображеної на рис. 50, а, сили $F_{\text{аіо}}$ та $F_{\text{Е}}$ спрямовані в різні боки, тому швидкість обертання електрона буде меншою за швидкість за відсутності поля, тобто $v_0 > v$, й тому $p_0 > p$. Отже, вектор $\Delta \vec{p}$ спрямовано проти $\vec{p}$ та й проти $\vec{B}_0$. Для орбіти, зображеної на рис. 50, б, сила $F_{\text{Е}}$ спрямована до осі обертання, тому $v > v_0$, й отже, $p > p_0$. Вектор $\Delta \vec{p}$ спрямовано у той самий бік, куди й $\vec{p}$, тобто теж проти поля $\vec{B}_0$. Отже, для кожної орбіти змінювання магнітного моменту

$$\Delta \vec{p} = - \frac{e^2R^2}{4m} \vec{B}_0. \quad (131)$$

У діамagnetиках сумарний магнітний момент електронних орбіт кожного атома чи молекули за відсутності зовнішнього поля дорівнює нулю. Це можливо, якщо в атомах існують орбіти з протилежними напрямками обертання електронів, тобто орбіти типу а та б на рис. 50. При внесенні речовини в магнітне поле кожна орбіта незалежно від напрямку руху електрона здобуває індукований магнітний момент $\Delta \vec{p}$, завжди спрямований проти поля. Це називається **діамагнітним ефектом**.

Якщо вісь обертання електрона на орбіті була розташована під кутом до $\vec{A}_0$, то вона розпочинає описувати конічну поверхню – прецесувати, подібно до дзиги, у такому напрямку, що магнітний момент електронної орбіти в напрямку

$\vec{A}_0$ зменшується, а в протилежному напрямку – збільшується, зменшуючи результуюче поле. У розглянутому раніше випадку перпендикулярної площини орбіти до $\vec{A}_0$ прецесія виявляється тільки у вигляді збільшення чи зменшення кутової швидкості електрона.

Отже:

- 1) діамagnetизм є властивість, притаманна усім речовинам;
- 2) кожна речовина протидіє проникненню магнітного поля всередину його об'єму;
- 3) діамagnetний ефект не є пов'язаний з упорядкуванням розташування електронних орбіт;
- 4) речовини є **діамagnetиками**, тільки якщо їхні атоми і молекули не мають власного магнітного моменту; тоді діамagnetний ефект є єдиною реакцією речовини на вплив зовнішнього магнітного поля. У парамагнетиках і феромагнетиках намагніченість, зумовлена упорядкуванням розташування електронних орбіт, значно перевершує діамagnetний ефект.

Парамагнетиками є речовини, в яких атоми чи молекули за відсутності зовнішнього поля мають певний магнітний момент, наприклад, якщо вони містять непарне число електронів. Тепловий рух створює безладдя в орієнтуванні їхніх магнітних моментів, тому за відсутності зовнішнього поля сумарна проекція векторів $\vec{P}$ на будь-який напрям дорівнює нулю. За наявності поля відбувається деяке орієнтування магнітних моментів атомів, і тіло намагнічується.

За надто низьких температур, коли дезорієнтуюча дія теплового руху є надто мала, спостерігається магнітне насичення, коли всі елементарні магнітні моменти орієнтуються по полю і подальше збільшення зовнішнього поля не спричиняє збільшення намагніченості. За звичайних температур такого насичення можна набути тільки в надто потужних магнітних полях у спеціальних експериментах.

Отже, зовнішнє магнітне поле, по-перше, орієнтує магнітні моменти атомів у напрямку поля, по-друге, індукує додаткові магнітні моменти, спрямовані протилежно до зовнішнього поля. Внаслідок цих явищ у речовині виникає внутрішнє поле з індукцією $\vec{B}_{\text{внутр}}$. Індукція результуючого поля $\vec{B}$ дорівнює векторній сумі індукції поля макроструму $\vec{B}_0$ і внутрішнього поля атомів речовини $\vec{B}_{\text{внутр}}$:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{внутр}}.$$

У **діамagnetиків** (інертні гази, вода, цинк, ртуть, мідь, золото, срібло й ін.) магнітні моменти парних електронів орієнтовані в протилежні боки, так що магнітний момент атома за відсутності зовнішнього магнітного поля дорівнює нулю. При внесенні діамagnetика в магнітне поле в його атомах індукуються додаткові магнітні моменти, спрямовані проти поля. Індукція результуючого поля є менше за індукцію поля до внесення діамagnetика:

$$B < B_0, \text{ отже } \mu < 1.$$

У **парамагнетиків** (кисень, рідкоземельні елементи, лужноземельні метали) за відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти атомів є відмінні від нуля, але орієнтовані у різноманітних напрямках, тому сумарний магнітний момент всіх атомів дорівнює нулю. При внесенні парамагнетика в

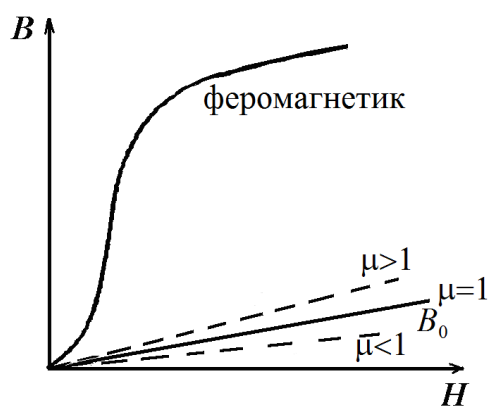


Рис. 51. Графік залежності магнітної індукції від напруженості магнітного поля для речовин з різними μ

магнітне поле магнітні моменти атомів набувають переважну орієнтацію, внаслідок чого сумарний магнітний момент стає відмінним від нуля і напрям його збігається з напрямом зовнішнього поля. Парамагнетики підсилюють поле, хоча і незначно:

$$B > B_0, \text{ отже } \mu > 1.$$

У діамагнетиків і парамагнетиків μ є стале, а B лінійно залежить від H (рис. 51). Графіки цих залежностей зображено штриховими лініями (насправді вони розташовані набагато ближче до графіка для вакууму $\mu = 1$).

Ферромагнетики (залізо, нікель,

кобальт, низка сплавів) мають особливі властивості:

- 1) у них μ може сягати надто великих значень (10^5);
- 2) вони можуть залишатися намагніченими за відсутності зовнішнього магнітного поля;
- 3) μ не є сталою величиною, а залежить від напруженості поля H ;
- 4) залежність B від H носить складний характер (див. рис. 51);
- 5) у них спостерігається явище гістерезису (рис. 52).

У ферромагнетиків при намагнічуванні визначальну роль відіграють спінові моменти електронів. За певних умов у кристалах можуть виникати сили, що змушують магнітні моменти електронів вибудовуватися паралельно один до одного. Внаслідок цього виникають області, мимовільно (спонтанно) намагнічені до насичення. Ці області називаються доменами. Їхні розміри $10^{-5} \dots 10^{-6}$ м. Кожен домен має магнітний момент, але спрямовані вони хаотично, тому сумарний магнітний момент не намагніченого тіла за відсутності зовнішнього магнітного поля дорівнює нулю. Пояснення виникнення доменів надається лише квантовою механікою.

Складний характер залежності B від H обумовлений тим, що дія зовнішнього магнітного поля на домени на різних стадіях є різною. У слабких полях домени, в яких моменти утворюють менший кут із зовнішнім полем, зростають за рахунок зменшення доменів, в яких моменти утворюють більший кут із зовнішнім полем. Границі доменів зміщуються. У більш сильних полях відбувається одночасний поворот всіх електронів у домені без порушення суворої паралельності один одному. За певного значення H ферромагнетик намагнічується до насичення. Магнітні моменти всіх доменів устанавлюються паралельно. При подальшому збільшенні H , B зростає лінійно за рахунок зростання B_0 , тому що $B_{\text{відб}} = B_{\text{іа}}$ залишається незмінним.

Якщо не намагнічений феромагнетик помістити в магнітне поле і змінювати його напруженість, то індукція поля, як зазначено вище, буде змінюватися за складною кривою OA (рис. 52). Ця крива називається **основною кривою намагнічування**. Якщо довести феромагнетик до насичення, а потім зменшувати напруженість поля, то індукція теж буде зменшуватися, але вже за кривою AD . Відставання змінювання індукції від змінювання напруженості магнітного поля називається **магнітним гістерезисом**. Внаслідок цього, коли напруженість сягне нульового значення, індукція буде відмінна від нуля і дорівнюватиме B_r . Це значення називається **залишковою індукцією** (remaining induction). Щоб розмагнітити феромагнетик, треба створити магнітне поле протилежного напрямку. Напруженість H_c , за якої індукція стає рівною нулю, називається **коерцитивною силою**. За подальшого збільшення напруженості поля зворотного напрямку феромагнетик перемагнічується й за певного значення H сягає насичення (точка A'). Якщо зменшувати напруженість до нуля, індукція буде змінюватися по кривій $A'D'$. При збільшенні напруженості в прямому напрямку індукція змінюється по кривій $D'A$. Отримана замкнута крива називається **петлею гістерезису**.

Якщо максимальні значення напруженості є такі, що намагнічування сягає насичення, то петля називається максимальною петлею гістерезису. Якщо насичення не досягається, то виходять часткові петлі гістерезису (штрихова крива на рис. 52). Усі часткові петлі лежать усередині максимальної, їхні вершини лежать на основній кривій намагнічування OA . Площа, обмежена петлею гістерезису, є пропорційна енергії, яку потрібно витратити на один цикл перемагнічування феромагнетика.

Гістерезис призводить до того, що індукція B не є однозначною функцією напруженості H , вона залежить від того, у якому магнітному полі побував феромагнетик раніш. Наприклад, для напруженості H_1 індукція може мати будь-як значення в межах від B_1 до B_2 .

Поняття магнітної проникності μ застосовується лише до основної кривої намагнічування, μ є функцією H . Залежність μ від H зображена на рис. 53. При збільшенні H , μ спочатку зростає до певного максимального значення, потім зменшується, а у потужних полях наближається до

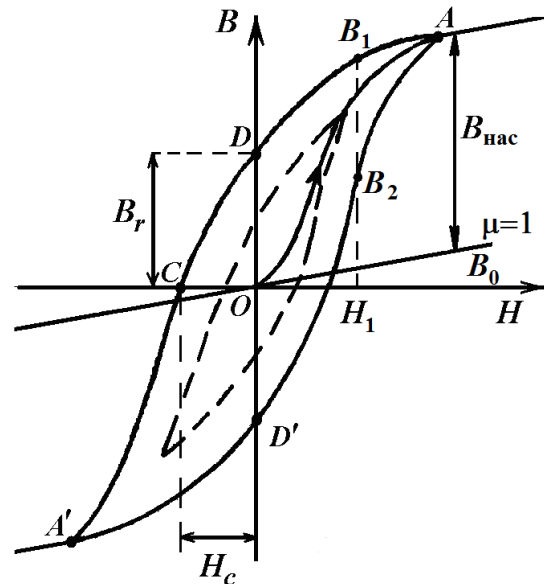


Рис. 52. Крива перемагнічування феромагнетика (магнітний гістерезис)

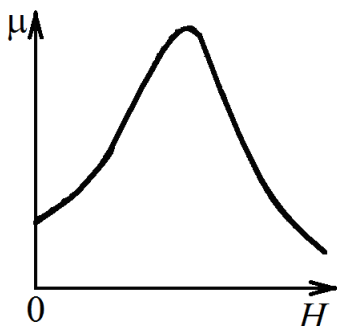


Рис. 53 – Залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля для феромагнетиків

одиниці. Величини B_r , H_c та $\mu_{\text{іаєп}}$ є основними характеристиками феромагнетика. Якщо H_c та B_r є великими, феромагнетики називаються магнітотвердими і їх використовують для виготовлення постійних магнітів. Феромагнетики з малим значенням H_c та B_r називаються магнітом'якими, і їх використовують для виготовлення осердів трансформаторів.

Для кожного феромагнетика існує певна температура T_E , називана точкою Кюрі, за якої домени розпадаються і феромагнетик стає парамагнетиком. При охолодженні феромагнетика нижче за точку Кюрі в ньому знову виникають домени.

3 Опис установки і методики вимірювань

Прилади і приладдя: тороїд з досліджуваного феромагнетика, міліамперметр, потенціометр, конденсатор, два резистори, електронно-променевий осцилограф.

У даній роботі досліджуються магнітні властивості феромагнетиків. Для цього на кільцеподібне тороїдне осердя, виготовлене з досліджуваної речовини, намотуються дві обмотки: первинна з числом обвитків N_1 і вторинна з числом обвитків N_2 , що включаються в коло, як зазначено на рис. 54.

На рисунку: Т – тороїд; N_1 – первинна обмотка; N_2 – вторинна обмотка; P – потенціометр; mA – міліамперметр; C – конденсатор; R_1 та R_2 – резистори з відомими опорами; ЕО – електронно-променевий осцилограф.

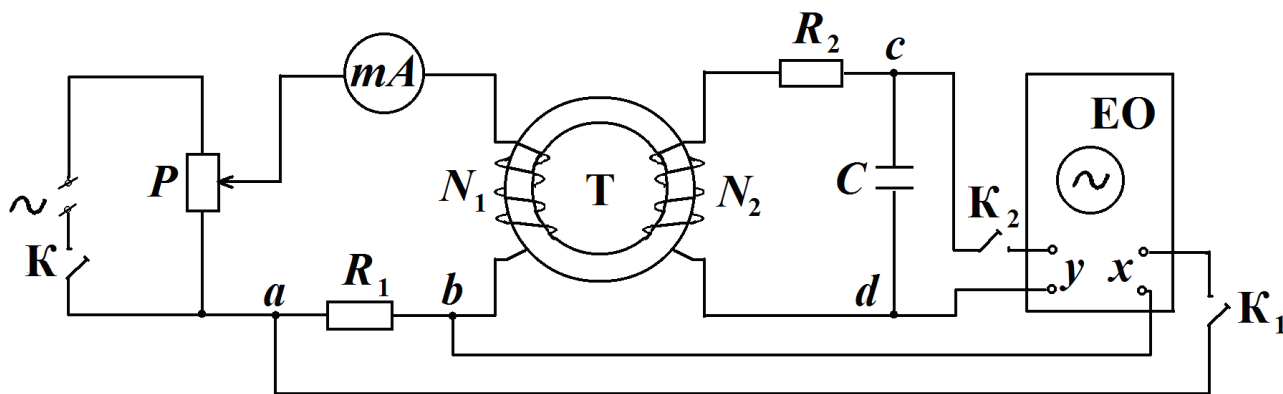


Рис. 54. Схема вимірювання залежності індукції від напруженості магнітного поля в феромагнетиках (гістерезису)

На екрані осцилографа потрібно отримати петлю гістерезису, тобто графік залежності індукції B від напруженості H у феромагнетиках. Для цього на вертикально відхиляючі пластини осцилографа (клеми y) треба подати напругу, пропорційну до індукції B , а на горизонтально відхиляючі пластини (клеми x) – напругу, пропорційну до напруженості H магнітного поля.

Доведемо, що напруга на кінцях резистора R_1 у колі первинної обмотки тороїда є пропорційна до H , а напруга на конденсаторі C в колі вторинної обмотки є пропорційна до B .

Первинною обмоткою тороїда тече змінний струм i від зовнішнього

джерела. Напруженість магнітного поля в тороїді визначається за формулою

$$H = i_1 n_1,$$

де n_1 – число обвитків, які припадають на одиницю довжини тороїда в первинній обмотці.

Напруга на опорі R_1

$$U_1 = i_1 R_1.$$

З огляду на те, що $i_1 = H/n_1$, отримаємо

$$U_x = U_1 = \frac{R_1}{n_1} H. \quad (132)$$

Ця напруга подається на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа.

Оскільки первинною обмоткою тече змінний струм, вторинну обмотку пронизує змінний магнітний потік, внаслідок чого в ній виникає ЕРС індукції

$$\mathcal{E}_{\text{іа}} = - \frac{d\Phi}{dt} N_2.$$

Магнітний потік, що пронизує поперечний переріз тороїда площею S ,

$$\hat{O} = BS.$$

Отже,

$$\mathcal{E}_{\text{іа}} = - SN_2 \frac{dB}{dt}.$$

Внаслідок виникнення ЕРС колом вторинної котушки потече струм

$$i_2 = \frac{\mathcal{E}_{\text{іа}}}{R_2} = - \frac{SN_2}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}.$$

Опір кола вторинної обмотки можна вважати рівним R_2 , тому що в коло вмикається конденсатор з ємнісним опором, малим порівняно з R_2 . Напруга на конденсаторі

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i_2 dt.$$

Підставимо значення i_2 , й отримаємо:

$$U_C = - \frac{N_2 S}{R_2 C} \int dB = - \frac{N_2 S}{R_2 C} B.$$

Напруга на конденсаторі пропорційна до індукції магнітного поля B . Вона подається на вертикально відхиляючі пластини осцилографа.

$$U_y = \frac{N_2 S}{R_2 C} B. \quad (133)$$

Отже, відхилення сліду електронного променя на екрані осцилографа по горизонталі пропорційне до H , по вертикалі – пропорційне до B . Зміна його положення на екрані повинна слідувати кривій $B = f(H)$. За один період синусоїдної зміни струму слід променя на екрані опише повну петлю гістерезису, а за кожен наступний – у точності повторить її. Оскільки частота струму в мережі дорівнює 50 Гц, електронний промінь 50 разів за секунду опише петлю гістерезису. Тому на екрані буде видно нерухому петлю

гістерезису. Змінюючи амплітуду струму i_1 у первинній обмотці, можна змінювати межі змінювання напруженості H . Як зазначено вище, якщо межі змінювання H є такі, що феромагнетик намагнічується до насичення, то петля називається максимальною. За менших значень H промінь описує часткові петлі. Вершини всіх петель лежать на основній кривій намагнічування. Отже, для побудови основної кривої намагнічування необхідно виміряти координати n_y та n_x вершин петель гістерезису. Знаючи величини напруг u_y та u_x , які спричиняють відхилення електронного променя на одну поділку шкали, розташованої на екрані осцилографа, можна визначити величини напруг U_x та U_y , подаваних на осцилограф:

$$U_x = n_x u_x; \quad U_y = n_y u_y.$$

Значення напруженості магнітного поля H визначимо з формули (132):

$$H = \frac{n_1}{R_1} U_x = \frac{n_1}{R_1} u_x n_x. \quad (134)$$

Величини n_1 та R_1 є сталими й зазначені на установці, тому останній вираз можна перетворити:

$$H = k_x n_x \quad \text{або} \quad k_x = \frac{n_1}{R_1} u_x. \quad (135)$$

Формулу розрахунку індукції поля B виведемо з виразу (133):

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y, \quad \text{чи} \quad B = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_y n_y, \quad (136)$$

$$B = k_y n_y, \quad \text{де} \quad k_y = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_y. \quad (137)$$

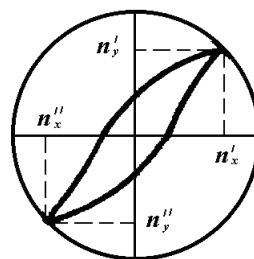
k_x та k_y обчислюються до початку вимірювання за відомими даними.

4 Оброблення результатів вимірювань (див. лабораторну роботу № 2-2).

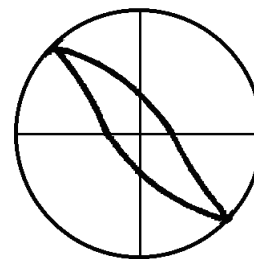
5 Порядок виконання роботи

1. Розрахувати сталі k_x та k_y за формулами (135) та (137).
2. Зібрати схему вимірювань (рис. 54).
3. Увімкнути осцилограф.
4. При розімкнутих ключах $\hat{E}_1$ та $\hat{E}_2$ установити за допомогою потенціометра P в первинній обмотці тороїда струм, зазначений викладачем.
5. Замкнути ключ $\hat{E}_2$ і за допомогою рукоятки «усил. Y» домогтися, щоб вертикальна лінія на екрані осцилографа мала задану викладачем довжину. Надалі положення рукоятки «усил. Y» не змінювати.

6. Замкнути ключ $\hat{E}_1$. Петля гістерезису на екрані осцилографа повинна мати вигляд, зазначений на рис. 55, а. Якщо петлю розташовано спосіб, зазначений на рис. 53, б, то провідники a і b треба поміняти місцями.



а)



б)

у

Рис. 55 – Вигляд петлі гістерезису на екрані електронно-променевого осцилографа

7. Виміряти координати вершин n_x та n_y . Кожну координату знайти як середнє арифметичне координат верхньої і нижньої вершин петлі:

$$n_x = \frac{n'_x + n''_x}{2} ; \quad n_y = \frac{n'_y + n''_y}{2} .$$

Для більш точного вимірювання, n_x слід вимірювати при розімкнутому ключі $\hat{E}_2$, коли на екрані осцилографа видно лише горизонтальну пряму; n_y вимірюються за розімкнутого ключа $\hat{E}_1$, коли на екрані видно лише вертикальну пряму.

8. Зменшуючи струм у первинній обмотці за допомогою потенціометра P отримати на екрані осцилографа низку (10 ... 12) часткових петель гістерезису й виміряти координати їхніх вершин n_x та n_y вищезазначеним методом. Результати вимірювання записати в таблицю.

9. Обчислити H та B для всіх точок за формулами (135) та (137).

10. Розрахувати магнітну проникність μ для всіх точок з формули (88).

11. Побудувати графіки залежності $B = f(H)$ та $\mu = f(H)$.

6 Контрольні запитання

1. Що називається індукцією і напруженістю магнітного поля?
2. Що називається відносною магнітною проникністю речовини?
3. Які речовини називаються діамагнетиками і який є механізм їхнього намагнічування?
4. Які речовини називаються парамагнетиками і який є механізм їхнього намагнічування?
5. Які речовини називаються феромагнетиками і який є механізм їхнього намагнічування?
6. У чому полягає явище магнітного гістерезису? Що називається коерцитивною силою?
7. Як визначити втрати енергії при перемагнічуванні феромагнетика?
8. У чому полягає метод дослідження залежності індукції магнітного поля від його напруженості, використовуваний у даній роботі? Накреслити схему і вивести формули розрахунку B та H .
9. Як залежить магнітна проникність феромагнетика від напруженості магнітного поля?

7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 3-4

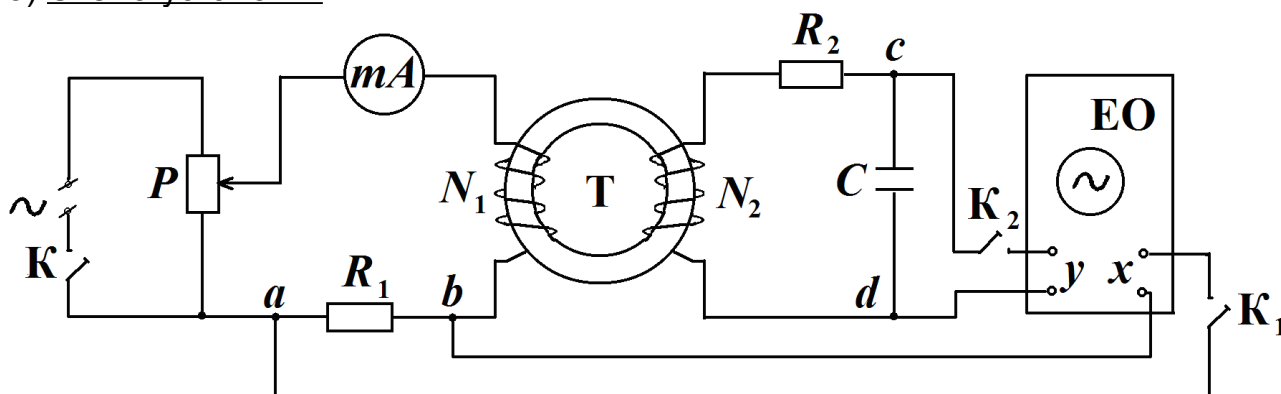
I. Домашнє завдання.

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 3-4.

1) Тема: Дослідження магнітного поля у феромагнетиках.

2) Мета роботи: Дослідити залежності магнітної індукції та магнітної проникності у феромагнетик від напруженості магнітного поля.

3) Схема установки:



T – тороїд; N_1 – первинна обмотка; N_2 – вторинна обмотка; P – потенціометр; mA – міліамперметр; C – конденсатор; R_1 та R_2 – резистори з відомими опорами; EO – електронно-променевий осцилограф; $\hat{E}$, $\hat{E}_1$ та $\hat{E}_2$ – ключі.

4) Таблиця приладів

№ з/п	Найменування	Тип	Заводський номер	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка (клас точності)
1	Осцилограф	ЭО-7				
2	Міліамперметр	М 906				

5) Формули розрахунку величин

5.1) Сталі

$$k_x = \frac{n_1}{R_1} u_x, \quad k_y = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_y,$$

де n_1 – число обвитків, які припадають на одиницю довжини тороїда в первинній обмотці; R_1 и R_2 – опори; u_x и u_y – величини напруг, які спричиняють відхилення електронного променя на одну поділку шкали; C – електроємність конденсатора; S – площа перерізу тороїда; N_2 – число обвитків у вторинній обмотці.

5.2) Напруженість магнітного поля та магнітна індукція

$$H = k_x n_x, \quad B = k_y n_y.$$

5.3) Магнітна проникливість середовища

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

6) Таблиця результатів вимірювань :

$$n_1 = 1,15 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}; R_1 = 27 \text{ Ом}; R_2 = 3000 \text{ Ом}; u_x = 6 \cdot 10^{-2} \text{ В}; u_y = 4 \cdot 10^{-2} \text{ В};$$

$$C = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}; S = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Вб/Ам}.$$

№	$n_x, \text{м}^{-1}$	$n_y, \text{м}^{-1}$	$H, \text{А/м}$	$B, \text{Тл}$	μ
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

7) Розрахунки фізичних величин:

7.1) Сталі

$$k_x = \frac{\dots \text{м}^{-1}}{\dots \text{м}} \cdot \dots \text{А/м} = \dots \frac{\text{А}}{\text{м} \cdot \text{м}}; \quad k_y = \frac{\dots \text{м} \cdot \dots \text{В}}{\dots \text{м}^2} \cdot \dots \text{А/м} = \dots \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

7.2) Напруженість магнітного поля та магнітна індукція

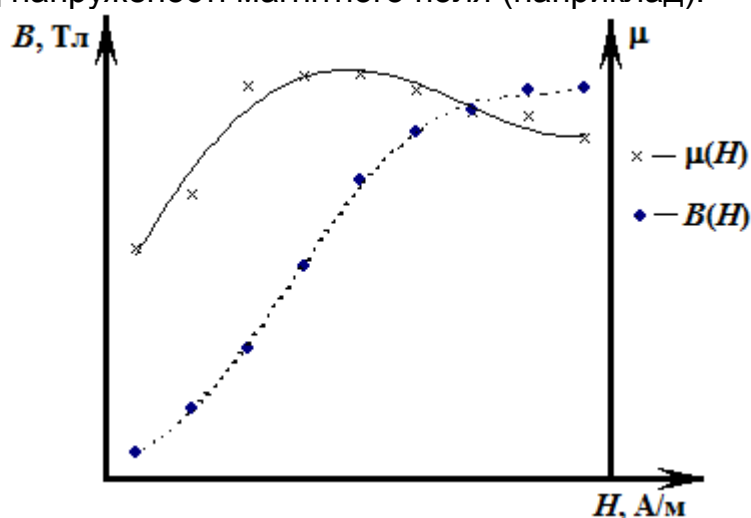
$$H = \dots \frac{\text{А}}{\text{м} \cdot \text{м}} \cdot \dots \text{м} = \dots \text{А/м}; \quad B = \dots \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot \dots \text{м} = \dots \text{В}.$$

7.3) Магнітна проникливість середовища

$$\mu = \frac{\dots \text{В}}{\dots \frac{\text{А}}{\text{м}} \cdot \dots \frac{\text{А}}{\text{м}}} = \dots.$$

8) Кінцеві результати:

Представити у вигляді графіків залежності магнітної індукції та магнітної проникливості від напруженості магнітного поля (наприклад):



9) Висновок: В лабораторній роботі були отримані залежності ...

10) Роботу виконав(ла): _____ (прізвище розбірливо).

Роботу перевірив:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1 Цель работы:

1. Изучение распределения эквипотенциальных линий электростатического поля.
2. Определить напряженность электростатического поля в заданных точках по распределению эквипотенциальных линий.

2 Ключевые положения

2.1 Электрическое поле. Напряженность электрического поля.

Силовые линии

Электрические заряды взаимодействуют между собой, находясь на некотором расстоянии друг от друга. Это взаимодействие осуществляется посредством электрического поля, которое существует вокруг каждого заряда. Электрическое поле – это особый вид материи. Его основное свойство заключается в том, что на любой заряд, расположенный в этом поле, действует сила. Поле неподвижных зарядов называется электростатическим.

Основным законом электростатики является **закон Кулона**: *сила взаимодействия двух точечных зарядов прямо пропорциональна произведению модулей их величин q_1 и q_2 , и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними*:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon r^2}, \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, которая показывает в сколько раз сила взаимодействия зарядов в среде меньше, чем в вакууме (ε – величина безразмерная). Коэффициент пропорциональности k зависит от выбора системы единиц измерения. В системе СИ

$$k = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0},$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ О/м}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума или электрическая постоянная.

В системе СИ закон Кулона записывается так

$$F = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r^2}, \quad (2)$$

где ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества.

Сила взаимодействия точечных зарядов направлена вдоль прямой их соединяющей. Точечные заряды – это заряженные тела, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстояниями r между ними.

Исследуется электростатическое поле обычно с помощью пробного заряда q' , то есть такого заряда, внесение которого не изменяет исследуемого

поля. Если вносить в одну и ту же точку поля разные по величине пробные заряды, то на них будут действовать различные по величине силы, но отношение силы к заряду для данной точки остается величиной постоянной. Это отношение является силовой характеристикой поля и называется его напряженностью $\vec{E}$.

Напряженность электрического поля $\vec{E}$ в данной точке – это векторная величина, которая численно равна силе $\vec{F}_{+1\hat{E}\hat{e}}$, с которой поле действует на единичный положительный заряд $q' = +1 \hat{E}\hat{e}$, помещенный в эту точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} = \vec{F}_{+1\hat{E}\hat{e}}, \quad [E] = \frac{\hat{A}}{\hat{I}}. \quad (3)$$

Вектор $\vec{E}$ направлен в сторону действия этой силы.

Если поле создано положительным точечным зарядом q_1 (рис.1, а), то в точках A и B векторы напряженности будут направлены вдоль линии, которая соединяет заряд с точками A и B , в сторону от заряда q_1 . На рис. 1, б изображены векторы $\vec{E}_3$ и $\vec{E}_4$ в точках C и D поля отрицательного заряда q_2 . Оба вектора направлены к заряду q_2 .

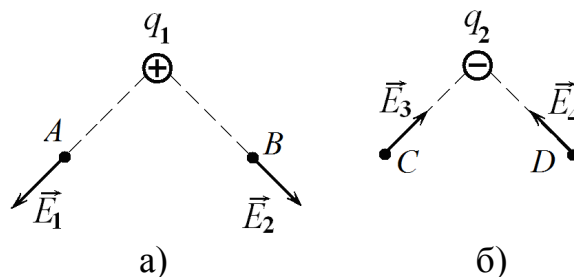


Рис. 1. Напряженность электрического поля: а) положительного и б) отрицательного зарядов

В системе СИ напряженность измеряется в единицах $\hat{A}/\hat{I}$ (вольт, деленный на метр). Из формулы (3) можно увидеть, что эта единица измерения равна $\hat{I}/\hat{E}\hat{e}$ (ньютон, деленный на кулон).

Напряженность поля точечного заряда q_1 на расстоянии r от него в системе СИ рассчитывается по формуле

$$E = \frac{q_1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}. \quad (4)$$

Эта формула получена из формул (3) и (2).

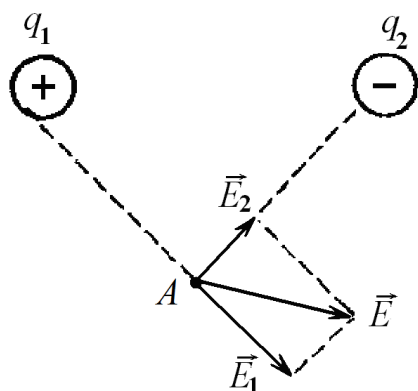


Рис. 2. Напряженность электрического поля системы двух зарядов

Если поле создано двумя или несколькими зарядами, то согласно с **принципом суперпозиции полей** поле каждого заряда не зависит от наличия полей других зарядов. Тогда вектор напряженности результирующего поля $\vec{E}$ определяется как векторная сумма векторов напряженности полей, созданных каждым зарядом отдельно. Например, на рис. 2 в точке A накладываются поля зарядов q_1 (положительного) и q_2 (отрицательного). Вектор напряженности $\vec{E}_1$ направлен от заряда q_1 , как в случае отсутствия заряда q_2 . Аналогично, как в случае отсутствия заряда q_1 , вектор напряженности $\vec{E}_2$ направлен к

заряду q_2 . Направление вектора напряженности результирующего поля $\vec{E}$ определяется по правилу параллелограмма, а его модуль – по теореме косинусов:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\angle E_1, E_2)}. \quad (5)$$

Сила, с которой электрическое поле действует на точечный заряд q_1 , определяется по формуле

$$F = q_1 E. \quad (6)$$

2.2 Работа сил электростатического поля

Выведем формулу расчета работы, которая осуществляется силами поля при перемещении заряда. Пусть пробный заряд q' перемещается в поле точечного заряда q из точки 1 в точку 2 (рис. 3). Так как сила, действующая на заряд, на разных участках траектории принимает различные значения, то весь путь нужно разбить на бесконечно малые (элементарные) участки dl , в пределах которых силу можно считать постоянной. Тогда работу dA на элементарном участке можно определить по формуле

$$dA = F dl \cos(\angle \vec{F}, dl). \quad (7)$$

Работа на всем пути 1 – 2 равняется алгебраической сумме работы на всех элементарных участках dl :

$$A = \int_1^2 dA = \int_{r_1}^{r_2} F dl \cos(\angle \vec{F}, dl).$$

Величина $dr = dl \cos(\angle \vec{F}, dl)$ – это проекция элементарного участка dl на силовую линию (рис. 3). Используя формулу (2), получим

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} dr = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2}.$$

Из высшей математики известно, что

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}.$$

Поэтому

$$A = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \text{ или} \\ A = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1} - \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_2}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что работа сил электростатического поля при перемещении заряда не зависит от длины и формы пути, а зависит от начального и конечного положения заряда. Работа на замкнутом пути ($r_1 = r_2$) равняется нулю. Силы, которые обладают такими свойствами, а также их поля называют потенциальными.

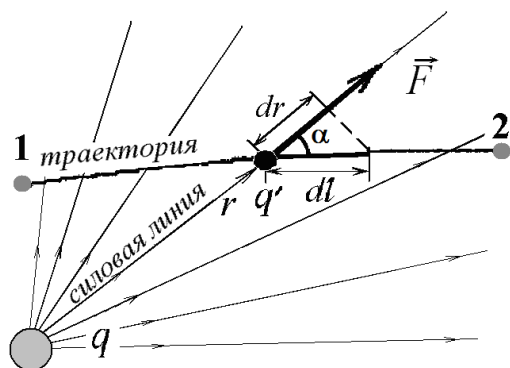


Рис. 3 – Сила, действующая на пробный заряд q' в поле заряда q

2.3 Потенциал поля. Разность потенциалов

Заряженное тело, внесенное в потенциальное электростатическое поле, обладает потенциальной энергией. Силы поля будут перемещать заряд так, чтобы его потенциальная энергия уменьшилась. Работа этих сил равна уменьшению потенциальной энергии.

$$A = -(W_2 - W_1) = W_1 - W_2. \quad (9)$$

При сравнении формул (8) и (9), видно, что потенциальная энергия заряда q' в поле точечного заряда q равна

$$W = \frac{q \cdot q'}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r}. \quad (10)$$

Разные пробные заряды в одной и той же точке поля обладают различными энергиями, но отношение потенциальной энергии к величине заряда остается постоянным. Это отношение является энергетической характеристикой поля и называется потенциалом φ поля в данной точке

$$\varphi = \frac{W}{q'}. \quad (11)$$

Потенциал φ в точке электрического поля – это потенциальная энергия $W_{+1\hat{e}\hat{e}}$, которой обладает единичный положительный пробный заряд $q' = +1\hat{e}\hat{e}$ в данной точке поля

$$\varphi = \frac{W}{q'} = W_{+1\hat{e}\hat{e}}; \quad [\varphi] = \hat{A}.$$

Потенциал поля точечного заряда q на расстоянии r от него определяется формулой

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r}. \quad (12)$$

Очевидно, что формулу работы сил электростатического поля при перемещении заряда q' можно записать в виде

$$A = q'(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (13)$$

Откуда **разность потенциалов** $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ между двумя точками 1 и 2 поля равна работе, которую осуществляют силы электростатического поля $A_{+1\hat{e}\hat{e}}$ при перемещении единичного положительного пробного заряда $q' = +1\hat{e}\hat{e}$ из одной точки поля в другую

$$\Delta\varphi = \frac{A}{q'} = A_{+1\hat{e}\hat{e}}; \quad [\Delta\varphi] = \hat{A}. \quad (14)$$

Потенциал, как и потенциальная энергия, определяется с точностью до аддитивной постоянной, то есть является величиной относительной. Потому в любой точке поля потенциал может быть принят равным нулю. Обычно за нуль принимают потенциал бесконечно отдаленных точек, а в практических измерениях – потенциал земли.

Если перемещать заряд q' из данной точки поля в точку, в которой потенциал принят равным нулю, то формула работы будет иметь вид:

$$A = q'\phi .$$

Потенциал поля в точке равен работе, которую осуществляют силы при перемещении единичного положительного пробного заряда из данной точки поля в точку, где потенциал принят равным нулю:

$$\phi = A_{0;+1\hat{e}\hat{e}}; [\phi] = \hat{A}.$$

В системе СИ потенциал и разница потенциалов измеряется в вольтах. Если при перемещении заряда в 1 кулон силы поля (рис. 3) совершают работу в 1 джоуль, то разница потенциалов между этими точками равна 1 вольт.

Потенциал – величина скалярная. Вблизи положительного заряда потенциал всегда будет положительным, а вблизи отрицательного – отрицательным.

Если поле создано системой зарядов, то потенциал результирующего поля в исследуемой точке равен алгебраической сумме потенциалов полей каждого заряда в этой точке.

2.4 Графическое изображение электрического поля. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности

Графически электростатическое поле изображается с помощью линий вектора напряженности, которые называются силовыми линиями.

Силовой линией называется такая линия, в каждой точке которой вектор напряженности направлен по касательной к этой линии. Силовая линия имеет такое же направление, как и вектор напряженности в каждой точке. Силовые линии проводятся с такой густотой, чтобы единицу площади поверхности, перпендикулярной полю, пронизывало число силовых линий, равное значению напряженности в данном месте поля.

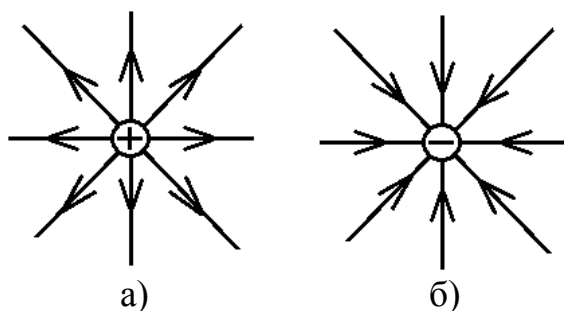


Рис. 4. Силовые линии электрического поля а) положительного и б) отрицательного зарядов

Потому в тех местах, где напряженность поля больше, силовые линии размещены гуще. Картина силовых линий полей точечных зарядов изображена на рис. 4.

Силовые линии электрического поля не пересекаются между собой и не замыкаются. Линии поля положительного заряда начинаются на заряде и заканчиваются в бесконечности.

Линии поля отрицательного заряда начинаются в бесконечности, и заканчиваются на заряде (см. рис. 4).

Однородным называется поле, во всех точках которого напряженность одинакова и по величине и по направлению. Силовые линии однородного поля параллельны между собой и одинаково отстоят друг от друга.

В электростатическом поле любого заряда можно выделить такую поверхность, во всех точках которой потенциалы одинаковы. Такие поверхности называются **эквипотенциальными**, или поверхностями равного потенциала. Из формулы (12) следует, что в точках, равноудаленных от точечного заряда, потенциалы одинаковы. Следовательно, эквипотенциальные поверхности поля точечного заряда представляют концентрические сферы, центры которых совпадают с положением заряда q (рис. 5). Следует отметить, что на плоскости эквипотенциальные поверхности изображаются в виде линий равного потенциала.

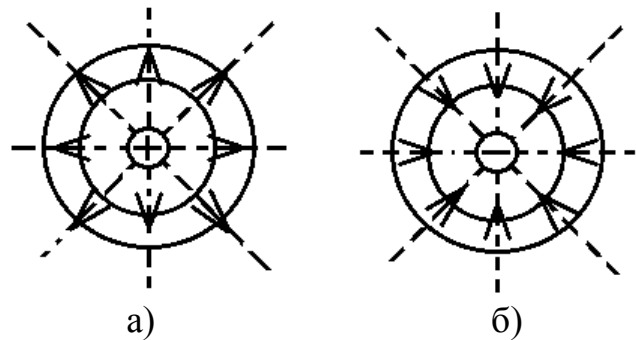


Рис. 5. Эквипотенциальные линии электрического поля: а) положительного и б) отрицательного зарядов одинаковы

Силовые линии электростатического поля всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Это вытекает из того, что работа сил поля при перемещении заряда q' между любыми двумя точками эквипотенциальной поверхности равна нулю:

$$A = q'(\varphi_1 - \varphi_2) = 0, \text{ где } \varphi_1 = \varphi_2.$$

С другой стороны

$$dA = Fdl \cos(\vec{F}, \vec{dl}) = dEdl \cos(\vec{E}, \vec{dl}).$$

Так как $E \neq 0$ и $dl \neq 0$, то $\cos(\vec{E}, \vec{dl}) = 0$, значит $\vec{E} \perp \vec{dl}$. Поскольку вектор напряженности направлен по касательной к силовой линии, а dl лежит на эквипотенциальной поверхности, силовые линии перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям.

2.5 Связь напряженности и потенциала

Элементарная работа сил электрического поля при перемещении заряда вдоль элементарного отрезка силовой линии dr определяется, с одной стороны, по формуле

$$dA = q' E dr,$$

а, с другой стороны – как спад потенциальной энергии

$$dA = -dW = -q' d\varphi.$$

Из сравнения обеих формул получим

$$E dr = -d\varphi \quad \text{или} \quad E = -d\varphi / dr, \quad (15)$$

где dr – отрезок силовой линии, который перпендикулярен к эквипотенциальной поверхности.

Производная потенциала по длине вдоль силовой линии (15) называется градиентом потенциала. **Градиент потенциала** – это вектор, направленный в сторону наибольшего роста потенциала. Из формулы (15) вытекает:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad} \varphi}, \quad (16)$$

т.е. вектор напряженности численно равен градиенту потенциала и направлен в сторону спада потенциала.

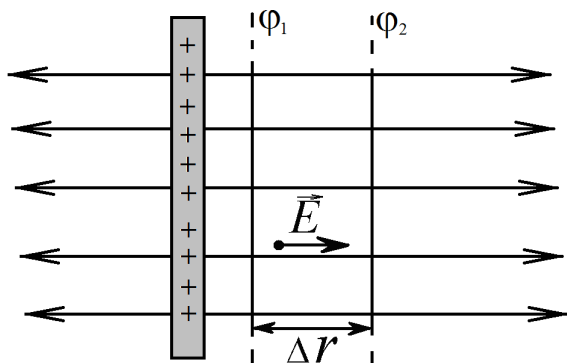


Рис. 6. Определение напряженности электрического поля в точке между двумя эквипотенциальными поверхностями

Если поле однородно, то в любой точке его $\vec{E} = \text{const}$. Например, на рис. 6 изображено поле бесконечной равномерно заряженной плоскости.

Эквипотенциальные поверхности представляют собой плоскости, параллельные заряженной плоскости. Выделим в поле две эквипотенциальные поверхности с потенциалами Φ_1 и Φ_2 . Очевидно, $\Phi_1 > \Phi_2$.

Для однородного поля связь напряженности и потенциала (15) можно записать в виде

$$E = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta r} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta r}. \quad (17)$$

В однородном поле, напряженность численно равна разнице потенциалов, которая приходится на единицу длины силовой линии. Из формул (15) и (17) следует, что в системе СИ напряженность измеряется в единицах В/м .

Если строить эквипотенциальные поверхности так, чтобы разность потенциалов между любыми соседними поверхностями была одинакова, то в неоднородном поле эти поверхности будут неодинаково отставать одна от другой. В тех местах, где эквипотенциальные поверхности размещены ближе одна к другой, напряженность поля будет больше.

2.6 Вектор электрического смещения

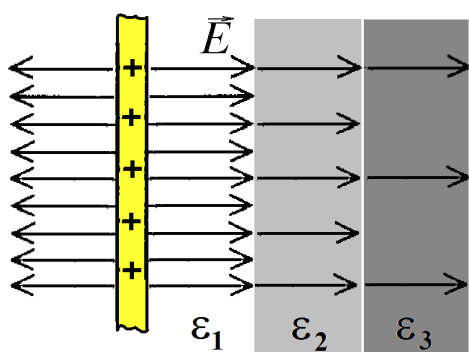


Рис. 7. Линии напряженности электрического поля в различных средах

Напряженность электрического поля зависит от диэлектрической проницаемости среды. На рис. 7 изображено поле бесконечной плоскости в различных диэлектриках ($\epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1$). Напряженность поля $\vec{E}$ на границе диэлектриков скачком изменяет свое значение.

Величиной, которая не зависит от свойств диэлектрической среды, является вектор электрического смещения $\vec{D}$, который связан с вектором напряженности электрического поля для изотропной среды соотношением

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \cdot \vec{E}. \quad (18)$$

Тогда, для поля, создаваемого точечным зарядом q_1 на расстоянии r от

него, из формулы (4) получим

$$D = \frac{q_1}{4\pi r^2}.$$

Откуда видно, что вектор электрического смещения определяется только величиной заряда создающего поле и расстоянием от него до исследуемой точки.

На рис. 8 изображен вектор электрического смещения для поля, создаваемого бесконечной плоскостью в различных диэлектриках ($\epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1$). На границах диэлектриков линии вектора смещения не прерываются и их количество одинаково в различных средах.

Вектор электрического смещения вводится формально и является вспомогательной величиной.

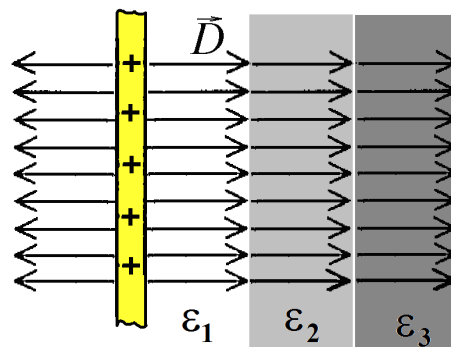


Рис. 8. Линии электрического смещения в различных средах

3 Описание установки и методики измерений

Приборы и принадлежности: источник напряжения $\mathcal{E}$; потенциометр P ; вольтметр V ; микроамперметр μA ; набор электродов A и B ; кювета с электролитом и проводящей бумагой $a-b-c-d$; щуп C .

Исследование электростатического поля заключается в определении величины и направления вектора напряженности электрического поля в каждой точке. Таким образом, задача сводится к построению силовых линий поля. Определить направление силовых линий экспериментально тяжело. Легче найти распределение потенциала и определить положение и форму эквипотенциальных линий.

Для изучения распределения потенциалов в электрическом поле применяют зонд, представляющий собой проводниковый электрод, который помещается в исследуемую точку поля. Зонд соединяют с вольтметром, измеряющим разность потенциалов между зондом и точкой поля, в которой потенциал принят равным нулю. Необходимо чтобы зонд своим присутствием не нарушал исследуемого поля и принимал потенциал той точки, в которую он размещен.

Изучение электрического поля тяжело осуществить, так как в непроводящей среде нельзя провести автоматическое выравнивание потенциалов точки поля и зонда. Чтобы это выравнивание произошло необходимо обеспечить сток зарядов из зонда. Кроме того, для измерения разности потенциалов между точками электрического поля необходимо применить электрические приборы (электрометры). Поэтому изучение электростатического поля заменяют изучением другого, эквивалентного ему поля постоянного тока. Такой метод называется моделированием.

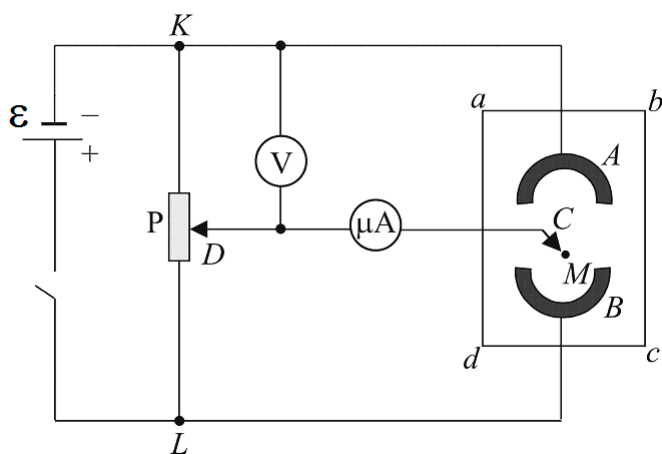


Рис. 9. Схема установки для измерения потенциала точек модельного электрического поля

значение потенциала точки D ; μA – микроамперметр, служащий нуль индикатором для выравнивания потенциалов между точкой D и исследуемой точкой C модельного поля.

На бумагу $a-b-c-d$, смоченную слабым раствором электролита, располагаются электроды A и B , соединенные с полюсами источника. Так как удельная электропроводность этой бумаги во много раз меньше, чем удельная электропроводность электродов, то поле электрического тока между электродами A и B эквивалентно электростатическому полю. В работе находим положение линий пересечения эквипотенциальных поверхностей с плоскостью $abcd$.

Пусть потенциалы электродов соответственно равняются φ_A и φ_B , как видно из рис. 9, $\varphi_A < \varphi_B$ (так как электрод B подключен к плюсовой клемме источника). Принимаем потенциал электрода A , соединенного с минусовой клеммой, равным нулю ($\varphi_A = 0$).

Для построения эквипотенциальной линии с потенциалом φ_1 , с помощью потенциометра P устанавливаем на вольтметре значение напряжения равное φ_1 . Вольтметр измеряет разность потенциалов между точками D и K , поскольку потенциал $\varphi_K = \varphi_A = 0$, поэтому $\varphi_D - \varphi_K = \varphi_D = \varphi_1$. Вольтметр показывает значение потенциала в точке D . Очевидно $\varphi_B > \varphi_D > \varphi_A$. Если прикоснуться зондом к электроду A , то поскольку $\varphi_D > \varphi_A$, то ток через микроамперметр потечет от точки D к точке A . Если прикоснуться зондом к электроду B , то поскольку $\varphi_B > \varphi_D$, то ток через микроамперметр потечет в другую сторону – от точки B к точке D .

Потому между электродами всегда можно найти такую точку M , в которой потенциал будет равным $\varphi_M = \varphi_D = \varphi_1$. Если поставить зонд в эту точку M , то ток через микроамперметр не потечет, поскольку $\varphi_D = \varphi_M$.

Не меняя показания вольтметра, находим и отмечаем на проводящей бумаге 8-10 точек, в которых потенциал равен φ_1 , каждый раз добиваясь отсутствия тока в микроамперметре. Соединив найденные точки линией, получим эквипотенциальную линию с потенциалом φ_1 . Для построения

Для создания электрического поля и его исследования собирается схема, изображённая на рис. 9. На схеме буквами обозначены: A и B – электроды, создающие исследуемое модельное поле; C – зонд электрода, который вводится в исследуемую точку модельного поля; P – потенциометр для установки заданного напряжения точки D ; V – вольтметр, с помощью которого измеряется

следующей эквипотенциальной линии с потенциалом φ_2 перемещением движка потенциометра P устанавливаем на вольтметре разницу потенциалов, равную φ_2 и вышепоказанным методом находим и отмечаем на проводящей бумаге 8-10 точек с потенциалом φ_2 .

Эквипотенциальные линии строятся так, чтобы разность потенциалов между любыми соседними линиями была одинакова. Например, для построения пяти эквипотенциальных линий нужно разность потенциалов U между электродами A и B разбить на 6 равных частей. Установив на вольтметре $\varphi_1 = U/6$, можно найти линию с таким потенциалом. Вторая линия должна иметь потенциал $\varphi_2 = 2\varphi_1$, третья линия – $\varphi_3 = 3\varphi_1$, четвертая – $\varphi_4 = 4\varphi_1$, пятая – $\varphi_5 = 5\varphi_1$, а поверхность электрода B будет иметь потенциал $\varphi_6 = U$. Поверхность электрода A будет иметь потенциал $\varphi_0 = 0$.

Силовые линии проводятся перпендикулярно к эквипотенциальным линиям, в том числе и к электродам. Начинаются силовые линии на положительном электроде, а заканчиваются на отрицательном. Силовые линии нужно проводить так, чтобы их густота была пропорциональной напряженности поля.

Если измерить потенциалы φ_1 и φ_2 в двух точках, которые лежат на одной силовой линии на небольшом расстоянии Δr одна от другой, то по формуле (17) можно определить напряженность электрического поля в точке, находящейся посередине между ними.

Для измерения потенциала φ_1 следует поставить зонд в выбранную на силовой линии точку 1 и перемещением движка потенциометра P добиться отсутствия тока в микроамперметре. При этом показания вольтметра будут равны значению потенциала этой точки φ_1 . Затем зонд следует поставить в выбранную на этой же силовой линии точку 2 и перемещением движка потенциометра P добиться отсутствия тока в микроамперметре. При этом показания вольтметра будут равны значению потенциала этой точки φ_2 . Измерив расстояние между этими точками Δr , по формуле $E = (\varphi_2 - \varphi_1) / \Delta r$ можно вычислить модуль вектора напряженности электрического поля. Направление вектора напряженности электрического поля определяется по направлению силовой линии.

Если точки 1 и 2 совпадают с пересечениями силовой линии с двумя соседними эквипотенциальными линиями, то $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ будет соответствовать разности потенциалов между соседними эквипотенциальными линиями $\Delta\varphi = \varphi_1$. При этом, для расчета абсолютной величины напряженности электрического поля необходимо измерить только расстояние Δr между точками 1 и 2 (расстояние между соседними эквипотенциальными линиями).

4 Обработка результатов измерений

Результаты этой лабораторной работы представляют в графическом виде – это распределение силовых и эквипотенциальных линий электростатического

поля, изображение векторов напряженности электрического поля в трех точках. Графическое представление результатов измерений обычно предполагает качественную оценку и поэтому не требует статистической обработки.

5 Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 9.
2. С помощью вольтметра измерить разность потенциалов U между электродами A и B , повернув ручку потенциометра на максимум.
3. Для построения n эквипотенциальных линий разделить полученное значение разности потенциалов U на $n + 1$. Принять n не менее 5.
4. Очертить карандашом на бумаге поверхности электродов, которые представляют собой нулевую $\varphi_0 = 0$ и последнюю $\varphi_n = U$ эквипотенциальные поверхности.
5. Установить на вольтметре значение напряжения $\varphi_1 = U / (n + 1)$.
6. Перемещением зонда C по поверхности бумаги добиться отсутствия тока в микроамперметре и отметить 8-10 точек с потенциалом φ_1 .
7. Соединить отмеченные точки линией и записать значение потенциала возле полученной эквипотенциальной линии.
8. Установить на вольтметре следующее значение потенциала $\varphi_2 = 2\varphi_1$ и выполнить пункты 6 и 7.
9. Аналогично построить остальные эквипотенциальные линии.
10. Рассчитать напряженность электрического поля в нескольких точках, указанных преподавателем. Для этого вблизи каждой точки с помощью линейки измерить кратчайшее расстояние между ближайшими эквипотенциальными линиями. По формуле $E = \Delta \varphi / \Delta r$ рассчитать абсолютное значение напряженности электрического поля. Здесь $\Delta \varphi = \varphi_1$ — разность потенциалов между соседними эквипотенциальными линиями.
11. Построить силовые линии поля. При этом на тех участках, где абсолютное значение полученной в пункте 10 напряженности больше, силовые линии должны располагаться гуще. Указать направление силовых линий.
12. По полученным в пункте 10 абсолютным значениям построить векторы напряженности электрического поля в масштабе. Направление векторов выбираются вдоль касательных к силовым линиям. Обозначить полученные векторы.
13. Сделать вывод о том, какие величины были определены по измеренному распределению потенциала.

6 Контрольные вопросы

1. Что называют напряженностью поля? Как направлен вектор напряженности?
2. Как рассчитывается напряженность поля точечного заряда бесконечной равномерно заряженной плоскости, бесконечной равномерно заряженной нити.
3. Что называется силовой линией? Нарисовать картину силовых линий полей

положительного и отрицательного точечных зарядов, плоскости, нити.

4. Что называется потенциалом поля в данной его точке? В каких единицах измеряется потенциал?
5. Как определяется работа сил поля через разность потенциалов?
6. Что называется эквипотенциальной поверхностью?
7. Доказать, что силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.
8. Нарисовать эквипотенциальные поверхности поля точечного заряда, плоскости, нити.
9. Какая связь между напряженностью и потенциалом?
10. Как в данной работе экспериментально находится положение эквипотенциальных поверхностей? Нарисовать схему установки.
11. Как рассчитать напряженность поля в точках электрического поля между эквипотенциальными поверхностями?
12. Как следует проводить силовые линии относительно эквипотенциальных поверхностей? Где силовые линии гуще?

7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 2-1

I. Домашнее задание.

II. Протокол выполнения лабораторной работы №2-1.

1) Тема: Исследование электростатического поля.

2) Цель работы: Получить распределение эквипотенциальных линий электростатического поля. Определить напряженность электрического поля в заданных точках по распределению эквипотенциальных линий.

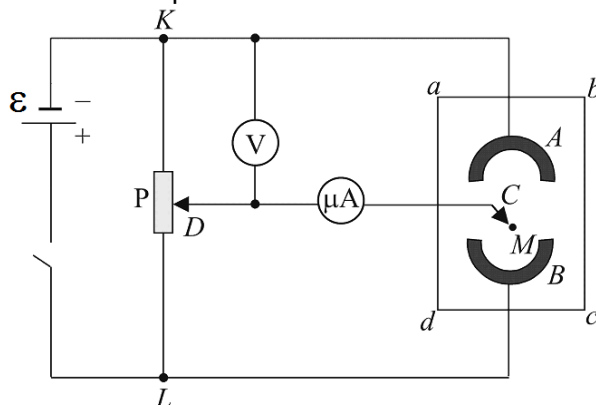
3) Схема установки:

A и B – электроды;

C – зонд; P – потенциометр;

V – вольтметр; μA – микроамперметр;

$abcd$ – бумага, смоченная слабым раствором электролита.



5) Таблица приборов

№ п/п	Наименование	Тип	Заводской номер	Граница шкалы	Цена деления	Абсолютная погрешность (класс точности)
1	Вольтметр	M-906				
2	Микроамперметр	M-906				
3	Линейка миллиметровая					

5) Формулы расчета величин

$\varphi_1 = \frac{U}{n+1}$, где φ_1 – шаг для получения n эквипотенциальных линий, U – разность потенциалов между электродами.

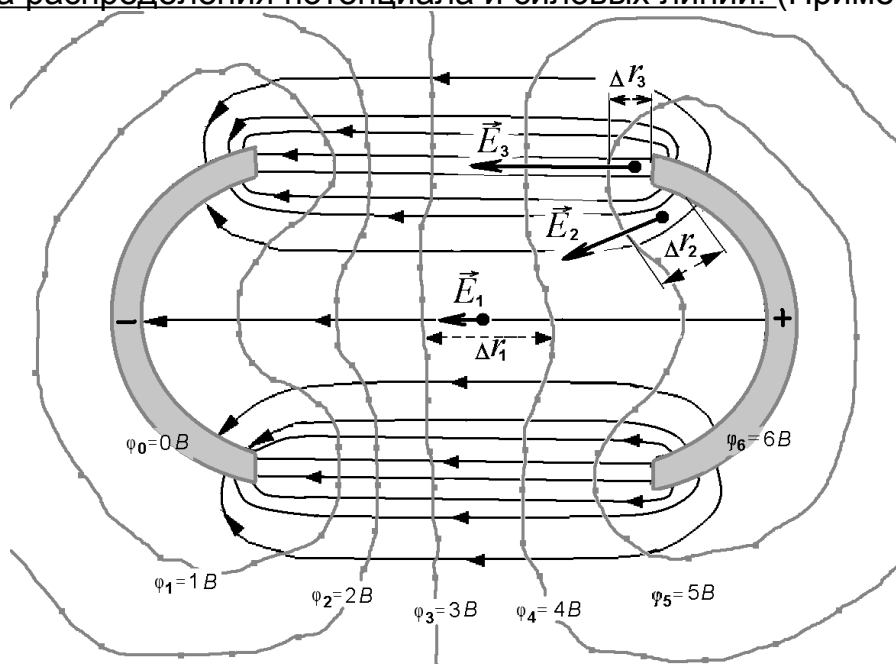
$E = \frac{\Delta \varphi}{\Delta r}$, где E – абсолютное значение напряженности электрического поля; $\Delta \varphi = \varphi_1$ – разность потенциалов между соседними эквипотенциальными линиями; Δr – расстояние между соседними эквипотенциальными линиями, между которыми определяется значение напряженности электрического поля.

6) Таблица результатов прямых измерений

№ точки	$\Delta \varphi, \hat{A}$	$\Delta r, \text{м}$	$E, \hat{A}/\text{м}$
1			
2			
3			

7) Вычисление модуля напряженности электрического поля.

8) Диаграмма распределения потенциала и силовых линий. (Примерный вид)



В текст лабораторной работы вклеить лист с диаграммой или его ксерокопию.

8) Вывод: В данной лабораторной работе по измеренному распределению потенциала мы построили ...

10) Работу выполнил(а): _____ (фамилия разборчиво).

Работу проверил:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-2

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОСТА УИТСТОНА

1 Цель работы:

1. Изучить методику измерения сопротивления с помощью моста Уитстона.
2. Научиться определять статистическую и приборную погрешности измерений.

2 Ключевые положения

2.1 Закон Ома

Электрическим током называется упорядоченное движение заряженных частиц. Различают токи проводимости, конвекционные токи, токи смещения и токи в вакууме. В данном разделе будем рассматривать только ток проводимости.

Ток проводимости – это направленное движение свободных электронов и ионов. В металлах ток образуется свободными электронами, в электролитах – ионами.

За направление тока принято направление движения положительных зарядов. Поэтому направление тока в металлах противоположно движению отрицательно заряженных электронов.

Основной характеристикой тока является сила тока.

Сила тока (I или i) – это скалярная величина, численно равная заряду, который переносится через поперечное сечение проводника за единицу времени.

Для постоянного тока

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}; \quad [I] = \text{А}, \quad (19)$$

где Δq – заряд, который переносится через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt .

Для переменного тока выражение (19) имеет вид

$$i = \frac{dq}{dt},$$

где dq – бесконечно малый заряд, который переносится через поперечное сечение проводника за бесконечно малый промежуток времени dt .

В системе СИ сила тока измеряется в амперах.

Для того чтобы в проводнике протекал электрический ток, необходимо в нем создать электрическое поле, а значит, на концах проводника должна существовать разность потенциалов.

Немецкий физик Ом экспериментальным путем установил, что сила тока, которая протекает по проводнику, прямо пропорциональна разности потенциалов на концах проводника и обратно пропорциональна сопротивлению R этого проводника

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}. \quad (20)$$

Сопротивление – это характеристика проводника, которая определяется удельным сопротивлением металла ρ , из которого изготовлен проводник, и зависит от длины l проводника и площади его поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S}; \quad [R] = \hat{\Omega} \quad (21)$$

Сопротивление проводника измеряется в Омах.

Общее эквивалентное сопротивление последовательно соединенных резисторов с сопротивлениями R_1 и R_2 увеличивается

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2,$$

а при параллельном соединении уменьшается и находится из формулы

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

при этом получается, что

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

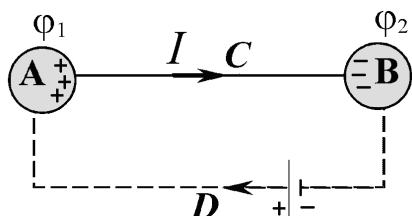


Рис. 10. Механизм возникновения постоянного тока

Выясним, при каком условии по проводнику будет протекать постоянный ток. Если два тела A и B (рис. 10), заряженные до потенциалов ϕ_1 и ϕ_2 (пусть $\phi_1 > \phi_2$), соединить проводником C , то свободные электроны проводника под действием сил электрического поля будут двигаться в одну сторону (направленно). По проводнику C потечет ток I ,

в результате чего потенциал тела A будет уменьшаться, а тела B – увеличиваться до тех пор, пока потенциалы обоих тел не станут равными. После чего поле внутри проводника C исчезнет, тока не станет. Итак, с помощью заряженных тел можно получить только кратковременный ток, если не принять специальных мер по поддержанию электрического поля в проводнике. Для того чтобы в проводнике C протекал постоянный ток, необходимо создать такие условия, чтобы потенциал тела A не уменьшался, а тела B – не увеличивался. Для этого нужно заряды, которые перешли из тела A в тело B , возвращать снова в тело A по пути D (см. рис. 10). Но на пути D заряды нужно перемещать против сил электростатического поля. Такую работу могут осуществлять силы не электростатического происхождения, например, механические, магнитные, химические и прочие. Эти силы называют сторонними.

Величина, равная работе, которую осуществляют сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда внутри источника против сил электрического поля, называется **электродвижущей силой** (ЭДС) источника:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{поид}}}{q}. \quad (22)$$

2.2 Правила Кирхгофа

Для расчета разветвленных цепей существуют правила Кирхгофа, которые являются алгоритмом для составления уравнений, связывающих токи, падения напряжения и величины ЭДС на различных участках разветвленной цепи.

Для применения правил Кирхгофа в разветвленной цепи, например, мостовой схемы соединения сопротивлений (рис. 11), выделяют три топологических элемента цепи:

Узел – точка соединения трех и более проводников. На рис. 11 узлы обозначены буквами A , B , C и D .

Ветвь – путь от одного узла в соседний узел со своими элементами.

В каждой ветви разветвленной цепи течет свой ток, поэтому номер ветви обычно совпадает с номером тока в цепи. На рис.11, например, в ветви AD протекает ток I_1 , в ветви DC протекает ток I_2 , в ветви BC протекает ток I_3 , в ветви AB протекает ток I_4 , в ветви CA протекает ток I_5 , в ветви BD протекает ток I_6 . Если направление тока не задано, то его следует выбрать произвольно и зафиксировать на схеме.

Замкнутый контур – путь от узла в этот же узел со своими элементами. Для каждого рассматриваемого замкнутого контура необходимо сразу выбрать направление обхода (либо по часовой стрелке, либо против) и зафиксировать на схеме. На рис.11, например, направление обхода контуров $ADCA$ и $ABCA$ выбрано против часовой стрелки.

Первое правило Кирхгофа применяется для **узлов** цепи, где алгебраическая сумма токов в узле равна нулю (токи, входящие в узел считаются положительными, выходящие из узла – отрицательными):

$$\sum I_i = 0. \quad (23)$$

Второе правило Кирхгофа применяется для **замкнутых контуров** цепи, где вдоль замкнутого контура, алгебраическая сумма падений напряжений равна алгебраической сумме ЭДС источников этого контура:

$$\sum I_i R_i + \sum I_i r_i = \sum \mathcal{E}_i. \quad (24)$$

При использовании второго правила необходимо придерживаться условий знаков:

1) падения напряжений IR и Ir берутся со знаком “**плюс**”, когда направление силы тока совпадает с направлением обхода контура;

2) величина ЭДС источника $\mathcal{E}$ берется со знаком “**плюс**”, когда при обходе контура этот источник мы проходим от отрицательного полюса к положительному (от – к +).

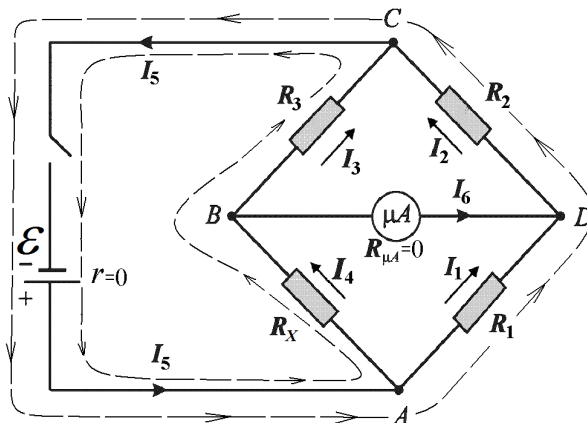


Рис. 11. Мостовая разветвленная цепь

3 Описание установки и методики измерений

Приборы и принадлежности (см. рис. 11): неизвестное сопротивление R_X , источник питания $\mathcal{E}$, микроамперметр μA (ноль-индикатор с нулем в середине шкалы), резистор с известным сопротивлением R_1 , однодекадный магазин сопротивлений R_2 , трехдекадный магазин сопротивлений R_3 .

Мостовая схема измерений сопротивления является самым точным методом измерения сопротивлений. Мостом Уитстона называется электрическая цепь, изображенная на рис. 11, составленная из четырех ветвей с сопротивлениями R_X , R_1 , R_2 , R_3 . Эти однородные участки цепи называются плечами моста. В плечо AB включено неизвестное сопротивление R_X , которое измеряется в данной работе. В плечи DC и BC включены магазины R_2 и R_3 , величину сопротивлений которых можно изменять. Сопротивление R_1 плеча AD постоянное. Таким образом, сопротивления R_1 , R_2 , R_3 известны. В диагональ AC включен источник тока, в диагональ BD включен микроамперметр, который играет роль ноль-индикатора.

Если замкнуть ключ, то по плечам AB , AD , BC и DC потекут токи в направлениях, указанных на рис. 12. В диагонали BD через микроамперметр ток потечет от B к D , когда потенциал точки B больше потенциала точки D ($\varphi_B > \varphi_D$), и от D к B , когда ($\varphi_D > \varphi_B$). Так как точки B и D лежат между

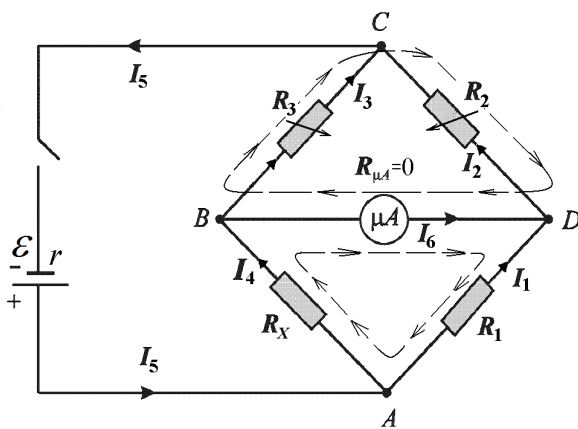


Рис. 12. Схема установки для измерения неизвестного сопротивления R_X

точками A и C , то их потенциал всегда находится между φ_A и φ_C ($\varphi_A > \varphi_C$), так как точка A подключена к положительному полюсу источника. Итак, путем изменения сопротивлений R_3 и R_2 всегда можно получить равенство потенциалов точек B и D ($\varphi_B = \varphi_D$). В этом случае тока в диагонали BD не будет ($I_6 = 0$). Такое состояние моста, при котором ток, протекающий через микроамперметр равен нулю, называется равновесием моста.

3.1 Условие равновесия моста по закону Ома

Для однородного плеча AB запишем:

$$I_4 = \frac{\varphi_A - \varphi_B}{R_X}, \text{ отсюда } I_4 R_X = \varphi_A - \varphi_B. \quad (25)$$

Аналогично для однородного плеча AD

$$I_1 = \frac{\varphi_A - \varphi_D}{R_1}, \text{ отсюда } I_1 R_1 = \varphi_A - \varphi_D. \quad (26)$$

Так как в момент равновесия $\varphi_B = \varphi_D$, то правые и левые части

уравнений (25) и (26) равны между собой:

$$I_4 R_X = I_1 R_1. \quad (27)$$

Аналогично для плеч BC и DC получим

$$I_3 R_3 = I_2 R_2. \quad (28)$$

В момент равновесия ток через микроамперметр не течет, поэтому в точке B ток I_4 не разветвляется, а полностью протекает через сопротивление R_3 , т.е. $I_4=I_3$. В точке D ток I_1 также полностью переходит в ветвь DC , т.е. $I_1=I_2$. Тогда уравнение (28) можно переписать в виде

$$I_4 R_3 = I_1 R_2. \quad (29)$$

Разделив уравнение (27) на (29), получим условие равновесия моста

$$\frac{R_X}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (30)$$

3.2 Условие равновесия моста по правилам Кирхгофа

Будем использовать выбранные в п. 2.2 обозначения (см. рис.12).

Перед составлением уравнений необходимо проверить:

- а) направления токов выбраны и указаны (см. рис.12);
- б) направление обхода контуров $ABDA$ и $BCDB$ указано.

При составлении уравнений по первому правилу Кирхгофа необходимо учесть, что ток, который входит в узел, входит в уравнение со знаком плюс, а ток, который выходит из узла – со знаком минус.

По первому правилу Кирхгофа для узла B

$$I_4 - I_3 - I_6 = 0. \quad (31)$$

По первому правилу Кирхгофа для узла D

$$I_1 - I_2 + I_6 = 0. \quad (32)$$

Еще два уравнения получим, исходя из второго правила Кирхгофа. При этом необходимо придерживаться следующих правил знаков: а) падение напряжения (произведение IR или Ir) входит уравнение со знаком плюс, если направление тока совпадает с направлением обхода контура, в противном случае – со знаком минус; б) ЭДС входит в уравнение со знаком плюс, если обход контура совпадает с направлением работы сторонних сил (переход источника происходит от минуса к плюсу), в противном случае – со знаком минус.

Нам необходимо найти соотношения между сопротивлениями плечей моста, поэтому для составления уравнений выберем замкнутые контуры, состоящие только из этих плечей.

По второму правилу Кирхгофа для контура $ABDA$

$$I_3 R_3 - I_2 R_2 - I_6 R_{\mu A} = 0, \quad (33)$$

и для контура $BCDB$

$$I_4 R_3 + I_6 R_{\mu A} - I_1 R_1 = 0. \quad (34)$$

С учетом условия равновесия $I_6=0$, и используя (33) и (34) получим

$$\begin{aligned} I_3 R_3 &= I_2 R_2; \\ I_4 R_{\bar{O}} &= I_1 R_1, \end{aligned} \quad (35)$$

а из (31) и (32)

$$\begin{aligned} I_4 &= I_3; \\ I_1 &= I_2. \end{aligned} \quad (36)$$

После подстановки (36) в (35), получим:

$$I_3 R_3 = I_2 R_2, \quad (37)$$

$$I_3 R_{\bar{O}} = I_2 R_1. \quad (38)$$

Разделив уравнение (38) на (37), получим условие равновесия моста

$$\frac{R_X}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (39)$$

Откуда найдем неизвестное сопротивление

$$R_X = R_3 \frac{R_1}{R_2}. \quad (40)$$

Таким образом, сопротивление неизвестного проводника R_X можно рассчитать по формуле (40) только при условии равновесия моста (только когда ток через микроамперметр $I_6 = 0$).

4 Обработка результатов измерений

Для получения результата *прямых измерений* величины x необходимо:

1) Экспериментально определить значение измеряемой величины n раз ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) и записать результат этих измерений во втором столбце таблицы измерений (см. пример оформления протокола в конце каждой работы). В первом столбце таблицы измерений записывается порядковое число измерения.

2) Вычислить *среднее значение* измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (41)$$

3) Найти *отклонение* Δx_i каждого значения измеряемой величины от среднего значения и записать результаты в третьем столбце таблицы измерений:

$$\Delta x_1 = \langle x \rangle - x_1; \quad \Delta x_2 = \langle x \rangle - x_2; \quad \dots; \quad \Delta x_n = \langle x \rangle - x_n. \quad (42)$$

4) Возвести каждое отклонение в квадрат, и записать в четвертом столбце таблицы измерений. Затем просуммировать эти квадраты:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2. \quad (43)$$

5) Найти абсолютную *статистическую погрешность* результатов измерения $\Delta x_{\text{ст}}$ с помощью формулы Стьюдента:

$$\Delta x_{\text{ст}} = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (44)$$

где α – доверительная вероятность; n – число измерений; $t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента.

6) Записать **абсолютную приборную погрешность** $\Delta x_{\text{пр}}$, указанную на приборе. Если на приборе не указана его абсолютная погрешность $\Delta x_{\text{пр}}$, то ее можно определить, зная класс точности прибора $\beta\%$, который указывается на шкале любого электроизмерительного прибора вместо абсолютной погрешности, используя уравнение:

$$\Delta x_{\text{пр}} = \frac{\beta\% \cdot x_{\text{max}}}{100}, \quad (45)$$

где x_{max} – предел шкалы измерительного прибора.

7) Найти **полную абсолютную погрешность** измерений

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{НО}})^2 + (\Delta x_{\text{пр}})^2}. \quad (46)$$

Если при измерениях было использовано несколько приборов, то при расчете полной погрешности в (46) под корнем надо прибавить квадраты абсолютных погрешностей всех приборов измерения.

8) Вычислить **относительную погрешность** измерений:

$$\delta = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}. \quad (47)$$

9) Записать **конечный результат** в виде **доверительного интервала** и **относительной погрешности** в процентах:

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta x)_{\alpha} = (\dots \pm \dots)_{0,95}; \quad \delta_x \% = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\% = \dots\%. \quad (48)$$

Для получения результата **косвенного измерения** величины y необходимо:

1) Вычислить **среднее значение** измеряемой величины $\langle y \rangle$ по формуле, подставляя в нее средние значения измеренных величин $\langle a \rangle$, $\langle b \rangle$, $\langle c \rangle$, например:

$$\langle y \rangle = \frac{8 \langle a \rangle^4 \cdot \sqrt[3]{\langle b \rangle^2}}{7 \langle c \rangle^5}. \quad (49)$$

2) Вычислить **относительную погрешность** измеряемой величины δ_y как сумму квадратов относительных погрешностей измеренных величин δ_a , δ_b , δ_c по формуле, которая должна быть получена заранее. Для нашего примера:

$$\delta_y = \sqrt{(4\delta_a)^2 + \left(\frac{2}{3}\delta_b\right)^2 + (5\delta_c)^2} = \sqrt{\left(4\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\frac{\Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(5\frac{\Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2}, \quad (50)$$

где Δa , Δb , Δc – абсолютные погрешности измеренных величин; $\langle a \rangle$, $\langle b \rangle$, $\langle c \rangle$ – их средние значения.

3) Найти **абсолютную погрешность** измеряемой величины

$$\Delta y = \langle y \rangle \cdot \delta_y. \quad (51)$$

4) Записать **конечный результат** в виде **доверительного интервала** и **относительной погрешности** в процентах:

$$y = (\langle y \rangle \pm \Delta y)_{\alpha} = (\dots \pm \dots)_{0,95}; \quad \delta_y \% = \delta_y \cdot 100\% = \dots\%. \quad (52)$$

5 Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис.12, включив в плечо AB неизвестное сопротивление R_X .
2. В плече DC с помощью однодекадного магазина сопротивлений R_2 установить значение сопротивления, равное R_1 , так чтобы отношение было $R_1/R_2 = 1$.
3. Изменяя сопротивление трехдекадного магазина сопротивлений R_3 , добиться равновесия моста $I_6=0$.
4. Записать значения R_1, R_2, R_3 , в заранее подготовленную таблицу измерений.
5. Изменяя сопротивление однодекадного магазина R_2 , выполнить еще четыре измерения для других значений отношения R_1/R_2 , например, равных $1/3$; $1/5$; $1/7$; $1/9$.
6. По формуле (40) рассчитать $n = 5$ раз значение неизвестного сопротивления при различных значениях R_2 и R_3 . Записать пять полученных значений R_{Xi} в таблицу.
7. Рассчитать среднее значение $\langle R_X \rangle$ по формуле (41), отклонение ΔR_{Xi} каждого значения измеряемой величины R_{Xi} от среднего значения $\langle R_X \rangle$ по формуле (42), а также сумму квадратов отклонений от среднего $\sum_{i=1}^n (\Delta R_{Xi})^2$ по формуле (43).
8. Зная сумму квадратов отклонений от среднего $\sum_{i=1}^n (\Delta R_{Xi})^2$, по формуле Стьюдента (44), определить абсолютную статистическую погрешность измерений сопротивления $\Delta R_X^{\text{НО}}$ с учетом того, что для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и $n = 5$ измерений, коэффициент Стьюдента $t_{0,95; 5} = 2,77$.
9. Поскольку неизвестное сопротивление рассчитывалось по формуле (40) по показаниям трех измерительных приборов R_1, R_2, R_3 , то абсолютную приборную погрешность $\Delta R_X^{\text{ИБ}}$ можно определить как погрешность косвенных измерений по формуле (51). В качестве среднего значения принять рассчитанное в пункте 7 среднее значение $\langle R_X \rangle$, а в качестве относительной погрешности – сумму квадратов (50) уменьшенных в 100 раз классов точности всех трех приборов $\beta_{R_1} \%$, $\beta_{R_2} \%$ и $\beta_{R_3} \%$.

$$\Delta R_X^{\text{ИБ}} = \langle R_X \rangle \cdot \delta_{\text{ИБ}} = \langle R_X \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{\beta_{R_1} \%}{100}\right)^2 + \left(\frac{\beta_{R_2} \%}{100}\right)^2 + \left(\frac{\beta_{R_3} \%}{100}\right)^2},$$

здесь, в отличие от (50) все коэффициенты при относительных погрешностях равны единице, поскольку в рабочую формулу (50) все величины R_1, R_2, R_3 входят в первой степени.

10. Определить полную абсолютную погрешность измерений сопротивления ΔR_X по формуле (46).

11. Вычислить относительную погрешность δ_{R_X} по формуле (47).
12. Записать конечный результат вычисления сопротивления в виде доверительного интервала и относительной погрешности в процентах (48).
13. Сделать вывод о том, какая из компонент погрешности (статистическая или приборная) вносит основной вклад в полную погрешность измерений.

6 Контрольные вопросы

1. В каких единицах измеряется сопротивление в системе СИ?
2. От чего зависит сопротивление проводника?
3. Как определить общее сопротивление проводников при последовательном и параллельном соединениях?
4. Начертить схему моста Уитстона.
5. В чем заключается метод измерения сопротивлений с помощью моста Уитстона?
6. Выведите соотношение между сопротивлениями плечей моста при условии его равновесия:
 - 1) с помощью закона Ома;
 - 2) с помощью правил Кирхгофа.

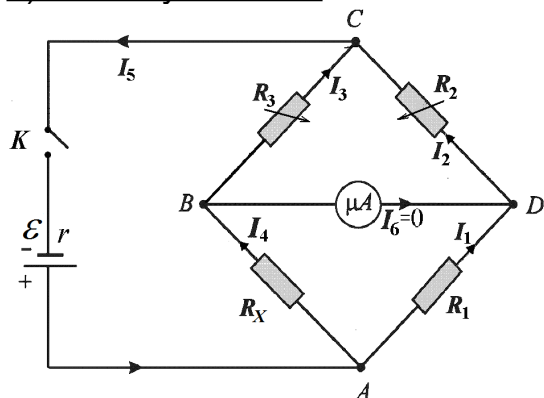
7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 2-2

I. Домашнее задание.

II. Протокол выполнения лабораторной работы № 2-2.

- 1) Тема: Измерение сопротивления при помощи моста Уитстона.
- 2) Цель работы: Изучить методику измерения сопротивления проводника при помощи моста Уитстона.
- 3) Схема установки:



R_X – неизвестное сопротивление;
 R_2 – однодекадный магазин сопротивлений;
 R_3 – трехдекадный магазин сопротивлений;
 R_1 – резистор с известным сопротивлением;
 $\mathcal{E}$, r – источник ЭДС;
 μA – микроамперметр;
 K – ключ.

4) Таблица приборов:

№ п/п	Наименование	Тип	Заводской номер	Предел шкалы	Цена деления	Класс точности $\beta\%$
1	Образцовый резистор R_1	МЛТ	-	10 кОм	-	1
2	Магазин сопротивлений R_2	РЗЗ	-	90 кОм	10 кОм	0,2

3	Магазин сопротивлений R_3	P333	-	9999 Ом	1 Ом	0,2
4	Микроамперметр (нуль-индикатор)	M 906		50 мкА	2 мкА	1,5

5) Формулы расчетов величин:

5.1) Неизвестное сопротивление при условии равновесия моста $I_6 = 0$

$$R_X = R_3 \frac{R_1}{R_2}$$

5.2) Абсолютная статистическая погрешность измерения сопротивления

$$\Delta R_{\bar{O}}^{\bar{N}} = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta R_{\bar{O}i})^2}{n(n-1)}},$$

где $\alpha = 0,95$ – доверительная вероятность; $n = 5$ – число измерений;
 $t_{0,95; 5} = 2,77$ – коэффициент Стьюдента.

5.3) Абсолютная приборная погрешность измерения сопротивления

$$\Delta R_{\bar{O}}^{\bar{ID}} = \langle R_X \rangle \cdot \delta_{\bar{ID}} = \langle R_X \rangle \cdot \sqrt{\left(\frac{\beta_{R_1} \%}{100}\right)^2 + \left(\frac{\beta_{R_2} \%}{100}\right)^2 + \left(\frac{\beta_{R_3} \%}{100}\right)^2},$$

где $\beta_{R_1} \%$, $\beta_{R_2} \%$ и $\beta_{R_3} \%$ - классы точности резистора с известным сопротивлением R_1 , однодекадного магазина сопротивлений R_2 и трехдекадного магазина сопротивлений R_3 .

5.4) Полная абсолютная погрешность измерения сопротивления

$$\Delta R_X = \sqrt{(\Delta R_{\bar{O}}^{\bar{N}})^2 + (\Delta R_{\bar{O}}^{\bar{ID}})^2}.$$

5.5) Относительная погрешность измерения сопротивления в процентах

$$\delta_{R_X} = \frac{\Delta R_X}{\langle R_X \rangle} \cdot 100\%.$$

6) Таблица результатов прямых измерений :

$$R_1 = 10 \hat{\Omega} = 10000 \hat{\Omega} ;$$

№	$R_2, \hat{\Omega}$	$R_3, \hat{\Omega}$	$R_{Xi}, \hat{\Omega}$	$\Delta R_{Xi}, \hat{\Omega}$	$(\Delta R_{Xi})^2, \hat{\Omega}^2$
1	10000				
2					
3					
4					
5					
			$\langle R_X \rangle =$		$\sum_{i=1}^n (\Delta R_{Xi})^2 =$

7) Расчеты основных физических величин:

7.1) Расчет неизвестного сопротивления

$$R_{\tilde{O}1} = \dots \frac{1000}{1000} = \dots \hat{\Omega} \quad ; \quad R_{\tilde{O}2} = \dots \frac{1000}{\dots} = \dots \hat{\Omega} \quad ; \quad R_{\tilde{O}3} = \dots \frac{1000}{\dots} = \dots \hat{\Omega} \quad ;$$

$$R_{\tilde{O}4} = \dots \frac{1000}{\dots} = \dots \hat{\Omega} \quad ; \quad R_{\tilde{O}5} = \dots \frac{1000}{\dots} = \dots \hat{\Omega} \quad .$$

7.2) Абсолютная статистическая погрешность измерения сопротивления:

$$\Delta R_{\tilde{O}}^{\tilde{N}\tilde{O}} = 2,77 \sqrt{\frac{\dots}{5(5-1)}} = \dots \hat{\Omega} \quad .$$

7.3) Абсолютная приборная погрешность измерения сопротивления:

$$\Delta R_{\tilde{O}}^{\tilde{I}\tilde{D}} = \dots \cdot \sqrt{\left(\frac{\dots}{100}\right)^2 + \left(\frac{\dots}{100}\right)^2 + \left(\frac{\dots}{100}\right)^2} = \dots \hat{\Omega} \quad .$$

7.4) Абсолютная и относительная погрешности измерения сопротивления:

$$\Delta R_{\tilde{O}} = \sqrt{(\dots)^2 + (\dots)^2} = \dots \hat{\Omega} \quad ; \quad \delta_{R_X} = \frac{\dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \% .$$

8) Окончательные результаты:

$$R_X = (< R_X > \pm \Delta R_X)_a \hat{\Omega} = (\dots \pm \dots)_{0,95} \hat{\Omega} \quad ; \quad \delta_{R_X} = \dots \% .$$

9) Вывод: При измерении неизвестное сопротивление с помощью моста Уитстона основной вклад в абсолютную погрешность внесла ...

10) Работу выполнил(а): _____ (фамилия разборчиво).

Работу проверил:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-3 НАХОЖДЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА

1 Цель работы:

1. Изучить характер распределения потенциала вдоль замкнутой цепи.
2. Изучить методы измерений величины ЭДС модельных источников:
 - а) метод компенсации;
 - б) метод прямого измерения (метод известного сопротивления) и определить область применения этого метода.

2 Ключевые положения

В пункте 2 *Ключевые положения* лабораторной работы №2-1 были даны определения *потенциала* (11) и *разности потенциалов* (14) как одних из основных характеристик электростатического поля. Ниже будут даны определения *величины ЭДС источника*, *падения напряжения* и *напряжения*.

2.1 Распределение потенциала вдоль неоднородного участка цепи

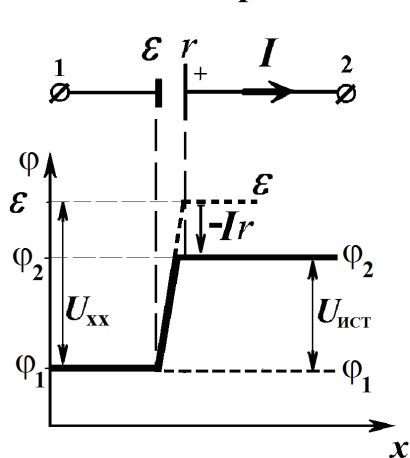


Рис. 13. Распределение потенциала на клеммах источника ЭДС

Неоднородным участком цепи называется часть электрической цепи, содержащая источник ЭДС. Определим, как в результате работы сторонних сил изменяется потенциал на различных участках электрической цепи.

Сначала рассмотрим участок электрической цепи 1–2, состоящий только из одного источника ЭДС (см. рис.13).

В режиме холостого хода ток через источник не течет, тогда вся работа сторонних сил $A_{\text{нòïð}}$ расходуется только на разделение зарядов внутри источника. При этом напряжение холостого хода равно максимально возможной разности потенциалов на клеммах источника (пунктирная линия на рис. 13):

$$U_{\text{òò}} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{A_{\text{нòïð}}}{q} = \varepsilon, \quad [\varepsilon] = \hat{\text{A}}. \quad (53)$$

Таким образом, *величина ЭДС источника* ε – это максимально возможное напряжение на клеммах источника в режиме холостого хода численно равное работе сторонних сил по перемещению зарядов внутри источника. Величина ЭДС источника измеряется в вольтах.

Когда через источник ε протекает ток I , то часть работы сторонних сил $A_{\text{нòïð}}$ будет расходоваться на преодоление внутреннего сопротивления источника r . Эта часть работы по закону Джоуля-Ленца равна

$$A_{\text{нñð}} = I^2 r \Delta t = q \cdot Ir.$$

Тогда напряжение на клеммах источника будет меньше, чем в режиме

холостого хода (53) на величину **падения напряжения** Ir на **внутреннем сопротивлении источника**:

$$U_{\text{эпò}} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\dot{A}_{\text{пòìð}} - \dot{A}_{\text{нпìð}}}{q} = \mathcal{E} - Ir. \quad (54)$$

На рис. 13 это падение напряжения Ir на внутреннем сопротивлении источника r изображено стрелкой вниз.

Рассмотрим теперь участок электрической цепи 1–3, (рис. 14) который помимо источника $\mathcal{E}$, будет содержать внешнее сопротивление R . Тогда часть работы сторонних сил $\dot{A}_{\text{пòìð}}$ расходуется на преодоление внутреннего сопротивления источника r и внешнего сопротивления R . Поскольку эта часть работы выделяется на сопротивлениях r и R в виде тепла, то по закону Джоуля-Ленца она будет равна

$$A_{\text{сгìð}} = I^2(r + R)\Delta t = q \cdot I(r + R).$$

Тогда напряжение на клеммах неоднородного участка цепи 1–3 по сравнению с (54) уменьшится еще и на величину **падения напряжения** IR на **внешнем сопротивлении**:

$$U_{\text{гáíáí}} = \varphi_3 - \varphi_1 = \frac{\dot{A}_{\text{пòìð}} - \dot{A}_{\text{сгìð}}}{q} = \mathcal{E} - I(r + R). \quad (55)$$

На рис. 14 оба падения напряжения Ir и IR изображены стрелками вниз.

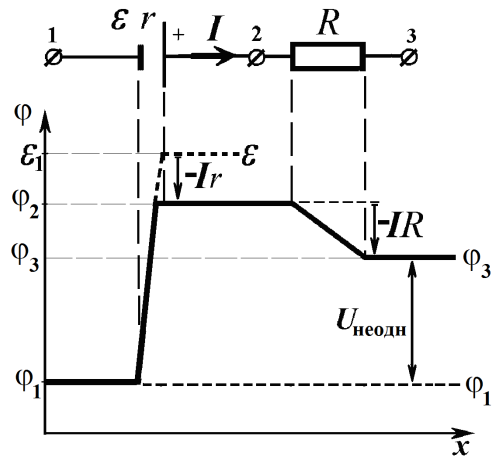
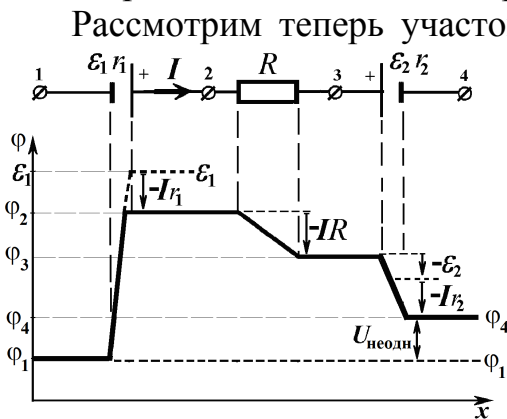


Рис. 14. Распределение потенциала вдоль неоднородного участка цепи

Рассмотрим теперь участок электрической цепи 1–4, содержащий один источник ЭДС $\mathcal{E}_1$, работа сторонних сил которого совпадает с направлением тока, и второй источник ЭДС $\mathcal{E}_2$, работа сторонних сил которого не совпадает с направлением тока (рис. 15). В этом случае $\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}_1$, и это означает, что источник $\mathcal{E}_2$ будет заряжаться током, создаваемым источником $\mathcal{E}_1$.

Рис. 15. Распределение потенциала вдоль неоднородного участка цепи, содержащем встречное включение источников ЭДС

Тогда часть работы сторонних сил $\dot{A}_{\text{пòìð}}$, создаваемая источником $\mathcal{E}_1$ будет расходоваться, как и прежде, на преодоление внутреннего сопротивления первого источника r_1 , внешнего сопротивления R , и, кроме того, на преодоление внутреннего сопротивления второго источника r_2

$$A_{\text{сгìð}} = I^2(r + R)\Delta t = q \cdot I(r_1 + R + r_2),$$

и на зарядку второго источника $\mathcal{E}_2$

$$A_{\text{свд}} = \mathcal{E}q.$$

Тогда напряжение на клеммах такого неоднородного участка цепи будет:

$$U_{\text{вд}} = \varphi_4 - \varphi_1 = \frac{A_{\text{нвд}} - A_{\text{свд}} - A_{\text{свд}}}{q} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 - I(r_1 + R + r_2). \quad (56)$$

Из (56) видно, что при этом от большего ЭДС $\mathcal{E}_1$, работа сторонних сил которого совпадает с током в цепи, будет вычитаться и ЭДС источника $\mathcal{E}_2$, работа сторонних сил которого не совпадает с направлением тока, и падение напряжения на всех сопротивлениях участка цепи (см. рис. 15).

Если концы неоднородного участка цепи 1–3 изображенного на рис. 14 замкнуть проводником, то потенциалы точек 1 и 3 сравняются $\varphi_1 = \varphi_3$, и мы получим простейший вариант полной цепи постоянного тока (рис. 16). В этом случае вся работа сторонних сил $A_{\text{нвд}}$ расходуется на преодоление внутреннего сопротивления источника r и внешнего сопротивления R :

$$A_{\text{нвд}} = A_{\text{свд}}.$$

И так как $\varphi_3 - \varphi_1 = 0$, то из (55) получаем, что вся ЭДС $\mathcal{E}$, которая создается сторонними силами источника падает на внутреннем сопротивлении источника r и на внешнем сопротивлении R :

$$\mathcal{E} = I(r + R). \quad (57)$$

На рис. 16 оба падения напряжения Ir и IR изображены стрелками вниз.

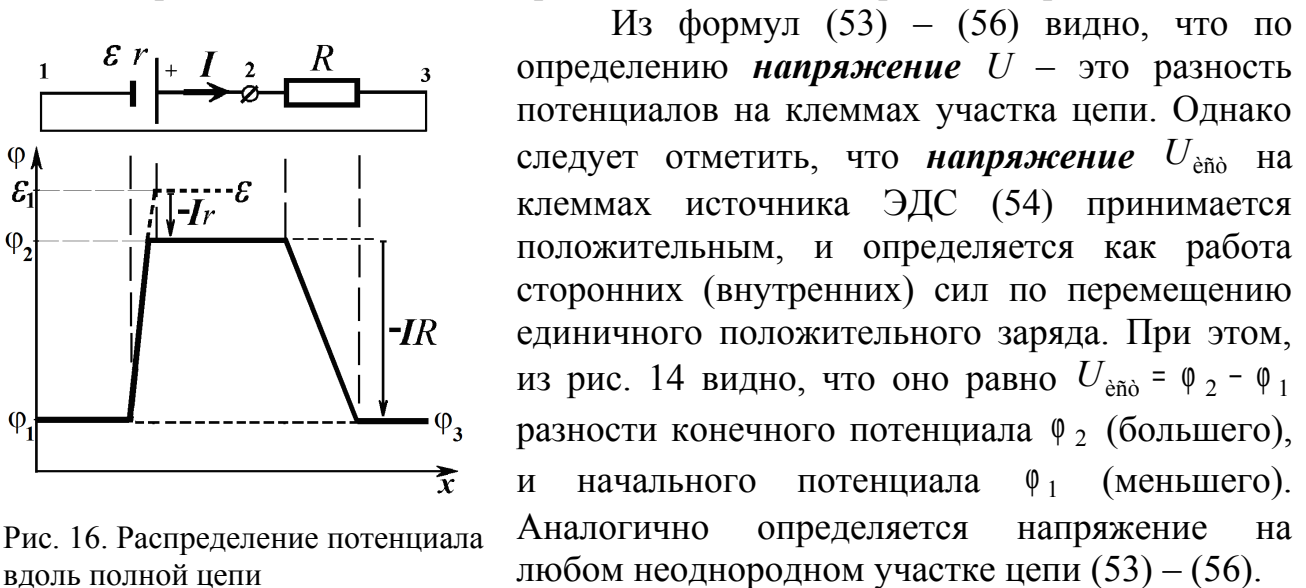


Рис. 16. Распределение потенциала вдоль полной цепи

Из формул (53) – (56) видно, что по определению **напряжение** U – это разность потенциалов на клеммах участка цепи. Однако следует отметить, что **напряжение** $U_{\text{вд}}$ на клеммах источника ЭДС (54) принимается положительным, и определяется как работа сторонних (внутренних) сил по перемещению единичного положительного заряда. При этом, из рис. 14 видно, что оно равно $U_{\text{вд}} = \varphi_2 - \varphi_1$ разности конечного потенциала φ_2 (большого), и начального потенциала φ_1 (меньшего). Аналогично определяется напряжение на любом неоднородном участке цепи (53) – (56).

Если же определять **напряжение** $U_{\text{вд}}$ на клеммах однородного участка 2–3, не содержащего источника ЭДС (рис. 14), то для того, чтобы оно было положительным его надо рассматривать как работу сил поля (внешних) по перемещению единичного положительного заряда. При этом, из рис. 14 видно, что оно равно $U_{\text{вд}} = \varphi_2 - \varphi_3$ разности начального потенциала φ_2 (большого), и конечного потенциала φ_3 (меньшего):

$$U_{\text{вд}} = \varphi_2 - \varphi_3 = \frac{A_{\text{нвд}}}{q} = IR. \quad (58)$$

Поэтому для однородного участка цепи на рис. 10 закон Ома

записывается в виде формулы (20).

2.2 Закон Ома для различных участков цепи

Из (54), (55), (57) и (58) нетрудно записать закон Ома для участка цепи 1–2, состоящего только из одного источника ЭДС (см. рис. 13):

$$I = \frac{\mathcal{E} - U_{\text{э.д.с.}}}{r}; \quad (59)$$

закон Ома для неоднородного участка цепи 1–3 (см. рис 14):

$$I = \frac{\mathcal{E} - U_{\text{э.д.с.}}}{r + R}; \quad (60)$$

закон Ома для полной цепи (рис. 16):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R}; \quad (61)$$

закон Ома для однородного участка цепи 1–2 (см. рис 15):

$$I = \frac{U_{\text{э.д.с.}}}{R}. \quad (62)$$

С помощью закона Ома можно решать только неразветвленные участки цепи или неразветвленную полную цепь.

3 Описание установки и методики измерений

Приборы и принадлежности (рис: 17, а): два источника ЭДС $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$, вольтметр V , микроамперметр μA (нуль индикатор с нулем в середине шкалы), потенциометр P , однодекадный магазин сопротивлений R_2 , ключи K_1 и K_2 .

В качестве модельного источника ЭДС с неизвестной величиной ЭДС выбираем источник $\mathcal{E}_1$. Последовательно с ним подключаем дополнительно однодекадный магазин сопротивлений R_2 , который будет моделировать внутреннее сопротивление источника. Таким образом мы получаем модельный источник ЭДС с изменяемым внутренним сопротивлением:

$$\mathcal{E}_X = \mathcal{E}_1; \quad r_X = r_1 + R_2. \quad (63)$$

3.1 Измерение ЭДС источника методом компенсации

Если непосредственно к клеммам модельного источника ЭДС $\mathcal{E}_X$ подключить вольтметр V (рис. 18), то показания вольтметра не будут равны ЭДС источника. Вольтметр показывает разность потенциалов, т.е. напряжение между точками A и B , к которым он подключен, и которое согласно (54) равно

$$\varphi_B - \varphi_A = \mathcal{E}_X - Ir_X. \quad (64)$$

Метод компенсации основан на том, что разность потенциалов на полюсах модельного источника $\mathcal{E}_X$ равна ЭДС, если ток в источнике отсутствует. Добиться этого можно если навстречу первому источнику $\mathcal{E}_1$ включить вспомогательный источник $\mathcal{E}_2$ как показано на рис. 17, а.

Для полной компенсации тока необходимо, чтобы выполнялось условие $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$. Если сначала замкнуть ключ K_2 при разомкнутом ключе K_1 , то ток

потечет по контуру $K_2MDC\varepsilon_2K_2$. На участке $K_1A\varepsilon_1BCDLK_1$ ток будет отсутствовать. Потенциалы точек B и C одинаковы $\varphi_B = \varphi_C$. Согласно (53) потенциал точки A больше потенциала точки B на величину ε_X : $\varphi_A - \varphi_B = \varepsilon_X$. Если $\varphi_M - \varphi_C > \varepsilon_X$, то $\varphi_M > \varphi_A > \varphi_C$, поэтому на потенциометре всегда можно найти такую точку F , потенциал которой равняется потенциалу точки A ($\varphi_F = \varphi_A$). Если движок потенциометра поставить в такую точку F и замкнуть ключ K_1 , то ток по участку AD не потечет, так как $\varphi_A - \varphi_B = \varphi_A - \varphi_D = 0$. Не потечет ток и по участкам AB и BC , последовательно соединенным с участком AD . Мы говорим, что в этот момент ЭДС ε_X скомпенсирована напряжением вспомогательного источника ε_2 . Показания микроамперметра равны нулю $I_1=0$.

По аналогии с (55) запишем напряжение на участке $CBAL$ (рис. 17, а):

$$\varphi_F - \varphi_C = \varepsilon_X - I_1 \cdot (r_X + R_{\mu A}). \quad (65)$$

Поскольку $I_1=0$, то

$$\varphi_F - \varphi_C = \varepsilon_X.$$

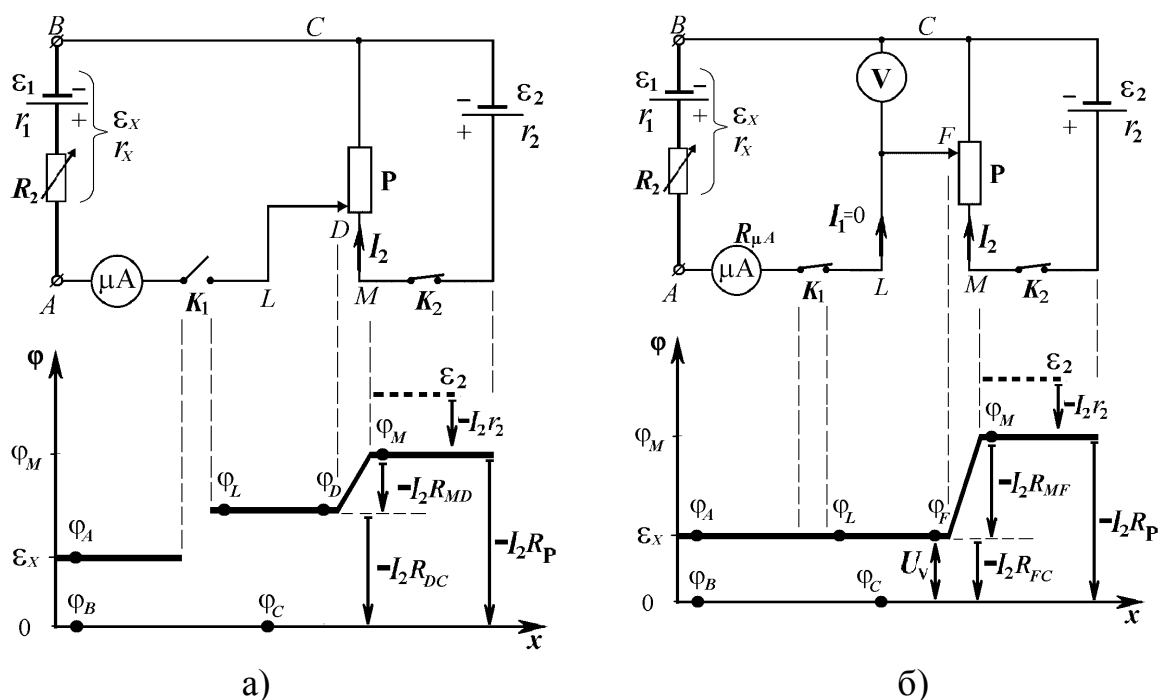


Рис. 17. Схема измерения ЭДС источника методом компенсации:

а) ключ K_1 разомкнут; б) ключ K_1 замкнут

Для измерения этого напряжения между точками C и F включают вольтметр V , (рис. 17, б). Величина внутреннего сопротивления вольтметра не влияет на показания, поскольку из (65) видно, если $I_1=0$, то $U_V = \varphi_F - \varphi_C = \varepsilon_X$.

В этом случае погрешность измерений равна погрешности вольтметра.

3.2 Измерение ЭДС источника прямым методом (метод известного сопротивления)

При непосредственном измерении напряжения на клеммах источника AB (рис. 18) разность потенциалов, которую показывает вольтметр (64), меньше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

Если падение напряжения внутри источника Ir_X меньше погрешности вольтметра, то значение ЭДС источника можно принять равным показаниям вольтметра, а погрешность измерения принять равной погрешности вольтметра. Если падение напряжения внутри источника больше погрешности вольтметра, показания вольтметра не будут соответствовать реальному значению ЭДС источника.

Сила тока в такой цепи определяется согласно закону Ома для полной цепи (61)

$$I = \frac{\mathcal{E}_X}{r_X + R_V},$$

где R_V – сопротивление вольтметра, а $\mathcal{E}_X$ и r_X определяется согласно (64).

Подставляем это выражение для силы тока в (64) и получим, что показания вольтметра

$$U_V = \mathcal{E}_X - \frac{\mathcal{E}_X \cdot r_X}{r_X + R_V} = \mathcal{E}_X \left(1 - \frac{1}{1 + R_V/r_X} \right). \quad (66)$$

Можно увидеть, что показания вольтметра U_V отличается от $\mathcal{E}_X$, если сопротивление вольтметра R_V будет сравнимо с внутренним сопротивлением источника ЭДС r_X . Например, если $R_V = r_X$, то $U_V = 0,5 \cdot \mathcal{E}_X$.

Относительная погрешность прямых измерений ЭДС источника в процентах с учетом (66)

$$\beta_{\text{вдв}} \% = \frac{\mathcal{E}_X - U_V}{\mathcal{E}_X} 100\% = \frac{r_X}{r_X + R_V} 100\% = \frac{100\%}{1 + R_V/r_X}, \quad (67)$$

также зависит от соотношения R_V/r_X .

Таким образом, чтобы измерить ЭДС источника сначала необходимо определить диапазон значений внутренних сопротивлений при которых измерение можно считать корректным.

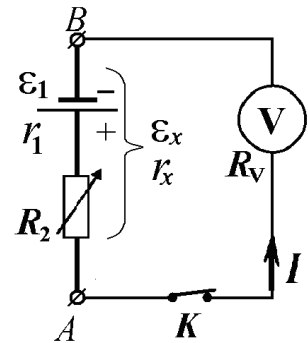


Рис. 18. Схема измерения ЭДС источника прямым методом

4 Обработка результатов измерений (смотри пункт 4 лабораторной работы № 2-2).

5 Порядок выполнения работы

5.1 Измерение ЭДС источника методом компенсации

1. Собрать схему рис. 19. В качестве исследуемого включить источник ЭДС $\mathcal{E}_1$, который находится с левой стороны лабораторной панели, а в качестве

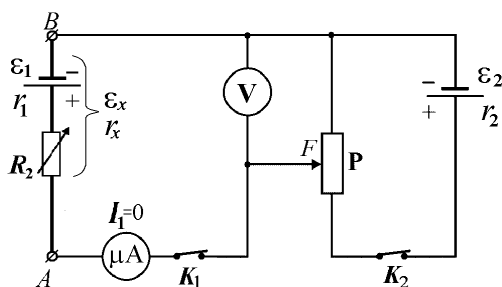


Рис. 19. Схема измерения ЭДС источника методом компенсации

вспомогательного источника $\mathcal{E}_2$ – правый источник ЭДС.

2. Установить значение сопротивления однодекадного магазина $R_2 = 0$, таким образом, получаем $r_X = r_1$.
3. Движок потенциометра разместить посередине. Замкнуть ключ K_2 , потом K_1 .
4. Перемещением движка потенциометра добиться отсутствия тока через микроамперметр.
5. В момент компенсации записать показания вольтметра $\mathcal{E}_{Xi}$ в таблицу. Выключить ключи K_1 и K_2 .
6. Устанавливать последовательно значение сопротивления однодекадного магазина R_2 равное $30\ \Omega$, $50\ \Omega$, $70\ \Omega$, $90\ \Omega$, т.е. $r_X = r_1 + R_2$. Выполнить пункты 3, 4 и 5.
7. Рассчитать **среднее значение** ЭДС $\langle \mathcal{E}_X \rangle$ по формуле (41), отклонение $\Delta \mathcal{E}_{Xi}$ каждого значения измеренной величины $\mathcal{E}_{Xi}$ от среднего значения $\langle \mathcal{E}_X \rangle$ по формуле (42), а также сумму квадратов отклонений от среднего $\sum_{i=1}^n (\Delta \mathcal{E}_{Xi})^2$ по формуле (43).
8. Зная сумму квадратов отклонений от среднего $\sum_{i=1}^n (\Delta \mathcal{E}_{Xi})^2$, по формуле Стьюдента (44) определить **абсолютную статистическую погрешность** $\Delta \mathcal{E}_X^{\text{ст}}$ с учетом того, что для доверительной достоверности $\alpha = 0,95$ и $n = 5$ измерений, коэффициент Стьюдента будет $t_{0,95;5} = 2,77$.
9. **Абсолютную погрешность прибора** измерения $\Delta \mathcal{E}_X^{\text{пр}}$ рассчитать по формуле (45):

$$\Delta \mathcal{E}_X^{\text{пр}} = \frac{\beta\% \cdot U_{\max}}{100},$$

где $\beta\%$ – класс точности вольтметра; $U_{\max}$ – предел шкалы вольтметра.

10. Определить полную абсолютную погрешность измерений сопротивления $\Delta \mathcal{E}_X$ по формуле (46). Вычислить среднюю относительную погрешность $\delta \mathcal{E}_X$ по формуле (47).

11. Записать конечный результат *измерения ЭДС источника методом компенсации* в виде доверительного интервала и относительной погрешности в процентах (48).
12. Сделать вывод о том, какая из компонент погрешности (статистическая или приборная) вносит основной вклад в полную погрешность измерений.

5.2 Измерение ЭДС источника прямым методом (метод известного сопротивления)

1. Собрать схему рис. 18. В качестве исследуемого включить источник ЭДС $\mathcal{E}_1$, который находится с левой стороны на лабораторной панели.
2. Установить значение сопротивления однодекадного магазина сопротивления $R_2 = 0$, таким образом, получаем $r_X = r_1$.
3. Записать показания вольтметра U_{Vi} в таблицу.
4. Устанавливать последовательно значения сопротивления однодекадного магазина R_2 равные $10\ \Omega$, $30\ \Omega$, $50\ \Omega$, $70\ \Omega$, $90\ \Omega$, т.е. $r_X = r_1 + R_2$. Выполнить п. 3.
5. По формуле (67) рассчитать относительную погрешность прямых измерений ЭДС источника в процентах для всех шести значений U_{Vi} :

$$\beta_{\text{прям}}(i) \% = \frac{\mathcal{E}_X - U_{Vi}}{\mathcal{E}_X} 100\%.$$

6. Представить конечный результат *измерения ЭДС источника прямым методом* в виде графика зависимости относительной погрешности прямых измерений ЭДС в процентах $\beta_{\text{прям}}(i) \%$ от отношения r_{Xi}/R_V .
7. Сделать вывод о том, в какой области отношения r_{Xi}/R_V , измерения можно считать корректными.

6 Контрольные вопросы

1. Что называется потенциалом, разностью потенциалов?
2. Что называется ЭДС источника, падением напряжения, напряжением?
3. Как записывается закон Ома для однородного участка цепи, для неоднородного участка цепи, для всей цепи?
4. При каких условиях разность потенциалов на полюсах источника равна его ЭДС?
5. Как рассчитать потенциалы отдельных точек цепи, если известны ЭДС всех источников и сопротивления всех участков цепи?
6. Что компенсируется в компенсационном методе измерения ЭДС источников? Нарисовать схему.

7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 2-3

I. Домашнее задание.

II. Протокол выполнения лабораторной работы № 2-3.

- 1) Тема: Определение ЭДС источника.

2) Цель работы:

2.1) Изучить методы измерения ЭДС: а) метод компенсации; б) метод прямого измерения (метод известного сопротивления).

2.2) Определить область применимости прямого метода измерений ЭДС.

3) Схема установки:

$\mathcal{E}_1, r_1$ – исследуемый источник ЭДС;

R_2 – однодекадный магазин сопротивлений;

$\mathcal{E}_X, r_X$ – модельный источник ЭДС;

$\mathcal{E}_2, r_2$ – вспомогательный источник ЭДС;

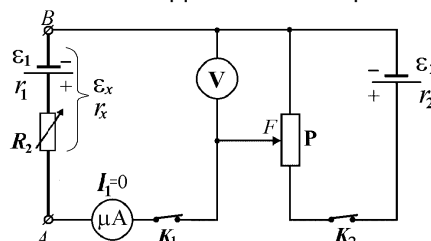
P – потенциометр;

V – вольтметр;

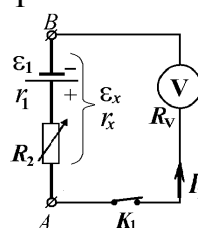
μA – микроамперметр (ноль-индикатор);

K_1, K_2 – ключи.

3.1) Схема метода компенсации



3.2) Схема метода прямых измерений



4) Таблица приборов

№ п/п	Наименование	Тип	Заводской номер	Предел шкалы	Цена деления	Класс точности $\beta\%$
1	Магазин сопротивлений R_2	P33	-			
2	Вольтметр	M 906				
3	Микроамперметр (ноль-индикатор)	M 906				

5) Рабочие формулы:

5.1) Абсолютная статистическая погрешность измерения ЭДС источника методом компенсации:

$$\Delta \mathcal{E}_X^{\text{НО}} = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \mathcal{E}_{Xi})^2}{n(n-1)}},$$

где $\alpha = 0,95$ – доверительная вероятность; $n = 5$ – число измерений;

$t_{0,95; 5} = 2,77$ – коэффициент Стьюдента;

5.2) Абсолютная приборная погрешность измерения ЭДС источника методом компенсации

$$\Delta \mathcal{E}_X^{\text{ИБ}} = \frac{\beta\% \cdot U_{\max}}{100},$$

где $\beta\%$ – класс точности вольтметра; $U_{\max}$ – предел шкалы вольтметра.

5.3) Полная абсолютная погрешность измерения ЭДС источника методом компенсации

$$\Delta \mathcal{E}_X = \sqrt{(\Delta \mathcal{E}_X^{\text{НО}})^2 + (\Delta \mathcal{E}_X^{\text{ИБ}})^2}.$$

5.4) Относительная погрешность измерения ЭДС методом компенсации в

процентах

$$\delta \varepsilon_X = \frac{\Delta \varepsilon_X}{\langle \varepsilon_X \rangle} 100\%.$$

5.5) Относительную погрешность прямых измерений ЭДС источника в процентах

$$\beta_{\text{r} \ddot{o} \ddot{y} \ddot{i}} \% = \frac{\langle \varepsilon_X \rangle - U_V}{\langle \varepsilon_X \rangle} 100\%,$$

где U_V – показания вольтметра; $\langle \varepsilon_X \rangle$ – среднее значение измерения ЭДС источника методом компенсации.

6) Таблица результатов прямых измерений:

$$R_V = 2 \cdot 10^5 \hat{\Omega}, r_1 = \dots \hat{\Omega}.$$

6.1) Метод компенсации

6.2) Метод прямых измерений

№	$r_X, \hat{\Omega}$	$\varepsilon_X, \hat{A}$	$\Delta \varepsilon_X, \hat{A}$	$(\Delta \varepsilon_X)^2, \hat{A}^2$	$U, \hat{A}$	$\beta_{\text{r} \ddot{o} \ddot{y} \ddot{i}} (i) \%$	r_{Xi}/R_V
1	$r_1 + 0$						
2	$r_1 + 10$						
3	$r_1 + 30$						
4	$r_1 + 50$						
5	$r_1 + 70$						
6	$r_1 + 90$						
		$\langle \varepsilon_X \rangle =$	$\sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{Xi})^2 =$				

7) Расчеты физических величин:

7.1) Метод компенсации

Абсолютная статистическая погрешность измерения ЭДС источника методом компенсации:

$$\Delta \varepsilon_X^{\text{ст}} = 2,77 \sqrt{\frac{\dots}{5(5-1)}} = \dots \hat{A}.$$

Абсолютная приборная погрешность измерения ЭДС источника методом компенсации:

$$\Delta \varepsilon_X^{\text{пб}} = \frac{\dots \cdot \dots}{100} = \dots \hat{A}.$$

Абсолютная и относительная погрешности измерения ЭДС источника методом компенсации:

$$\Delta \varepsilon_X = \sqrt{(\dots)^2 + (\dots)^2} = \dots \hat{A}, \quad \delta \varepsilon_X = \frac{\dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%.$$

7.2) Метод прямых измерений

Относительную погрешность прямых измерений ЭДС источника в процентах:

$$\beta_{\text{r} \ddot{o} \ddot{y} \ddot{i}(1)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%; \quad \beta_{\text{r} \ddot{o} \ddot{y} \ddot{i}(4)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots \%;$$

$$\beta_{\text{прям}(2)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots\%; \quad \beta_{\text{прям}(5)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots\%;$$

$$\beta_{\text{прям}(3)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots\%; \quad \beta_{\text{прям}(6)} \% = \frac{\dots - \dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots\%.$$

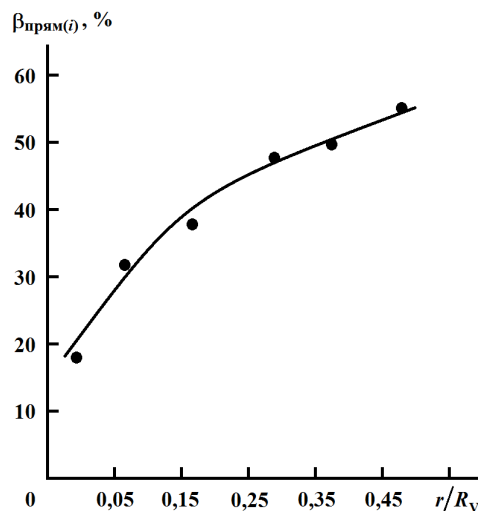
8) Окончательные результаты

8.1) Метод компенсации:

$$\mathcal{E}_X = (< \mathcal{E}_X > \pm \Delta \mathcal{E}_X)_\alpha \hat{A} = (\dots \pm \dots)_{0,95} \hat{A}; \quad \delta \mathcal{E}_X = \dots\%.$$

8.2) Метод прямых измерений:

График зависимости относительной погрешности прямых измерений ЭДС в процентах $\beta_{\text{прям}(i)} \%$ от отношения r_{Xi}/R_V . Например.



9) Выводы:

9.1) При измерении ЭДС источника методом компенсации основной вклад в абсолютную погрешность внесла ...

9.2) При определении ЭДС источника методом прямых измерений показания вольтметра можно считать корректными, когда ...

10) Работу выполнил(а): _____ (фамилия разборчиво).

Работу проверил:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-4 МОЩНОСТЬ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1 Цель работы:

1. Исследовать зависимость полезной мощности, полной мощности и КПД источника тока от внешнего сопротивления цепи.
2. Экспериментально найти условия при которых полезная мощность будет максимальной.

2 Ключевые положения

2.1 Мощность цепи постоянного тока

Для того, чтобы в цепи протекал постоянный ток, необходимо наличие источника ЭДС, в котором действуют сторонние силы. Работа сторонних сил по перемещению заряда Δq между полюсами источника, как видно из (53), равна

$$A_{\text{нòïð}} = \mathcal{E} \cdot \Delta q, \quad (68)$$

где $\mathcal{E}$ – ЭДС источника.

В результате выполнения этой работы, на положительный полюс источника переносится заряд Δq , который получает потенциальную энергию, равную $\mathcal{E} \cdot \Delta q$. Если замкнуть цепь, то по внешнему нагрузочному сопротивлению R и внутреннему сопротивлению источника r потечет ток. При этом потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию движения зарядов, которая, в свою очередь, переходит в тепло, в механическую работу (в электромоторах), в энергию света и прочее. По закону сохранения энергии эта полная энергия, выделяющаяся во всей цепи за время Δt равна работе сторонних сил, совершенной за это время, т.е. $W_{\text{I}} = A_{\text{нòïð}}$.

Таким образом, **полная мощность** источника тока численно равна работе, которую осуществляют сторонние силы источника за единицу времени:

$$P_{\text{I}} = \frac{W_{\text{I}}}{\Delta t} = \frac{A_{\text{нòïð}}}{\Delta t}. \quad (69)$$

С учетом (68) и определения силы тока (19) получаем:

$$P_{\text{I}} = \frac{\mathcal{E} \cdot \Delta q}{\Delta t} = \mathcal{E} \cdot I. \quad (70)$$

Полезная мощность выделяется только на внешнем нагрузочном сопротивлении R (тепло, механическая работа, свет и прочее)

$$P_{\text{пéâç}} = IU_R = I^2 \cdot R, \quad (71)$$

где $U_R = I \cdot R$ – разность потенциалов на нагрузочном сопротивлении R .

На внутреннем сопротивлении r бесполезно выделяется в виде тепла мощность

$$P_{\text{Ä}} = IU_r = I^2 \cdot r, \quad (72)$$

где $U_r = I \cdot r$ – разность потенциалов на внутреннем участке цепи.

Целенаправленность затрат энергии источника тока характеризуется

коэффициентом полезного действия (КПД). КПД источника называется величина, которая численно равна отношению полезной мощности $P_{\text{пéâç}}$ к полной мощности $P_{\text{г}}$:

$$\eta = \frac{P_{\text{пéâç}}}{P_{\text{г}}} . \quad (73)$$

Учитывая уравнения (70) и (71) можно записать

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} . \quad (74)$$

2.2 Зависимость полной мощности, полезной мощности и КПД источника ЭДС от нагрузочного сопротивления

Выведем формулы зависимости $P_{\text{г}}$, $P_{\text{пéâç}}$ и η от нагрузочного сопротивления R , цепи постоянного тока, в которой ЭДС источника $\mathcal{E}$ и внутреннее сопротивление r постоянные.

2.2.1 Полная мощность. С учетом закона Ома для полной цепи (61) можно получить зависимость полной мощности (70) от сопротивления

$$P_{\text{г}} = \mathcal{E} \cdot I = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r} . \quad (75)$$

Отсюда видно, что:

- в режиме короткого замыкания $R = 0$, полная мощность достигает наибольшего значения, когда знаменатель минимален $P_{\text{г}}^{\text{max}} = \mathcal{E}^2 / r$;
- в режиме холостого хода $R = \infty$ и полная мощность $P_{\text{г}} = 0$.

График зависимости полной мощности $P_{\text{г}}$ от внешнего сопротивления R изображен на рис. 20.

2.2.2 Полезная мощность. С учетом закона Ома для полной цепи (61) можно получить зависимость полезной мощности (71) от сопротивления

$$P_{\text{пéâç}} = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2} . \quad (76)$$

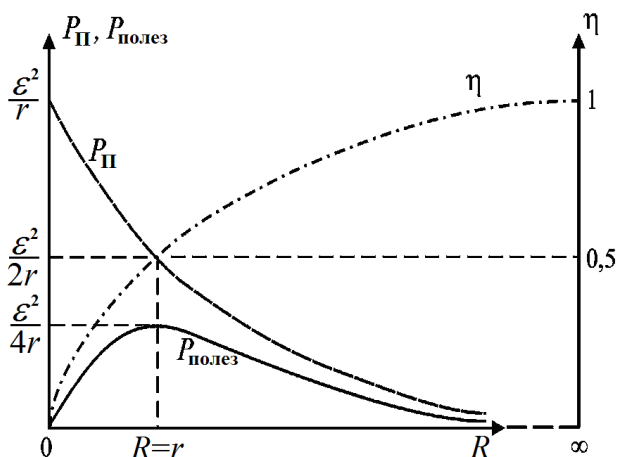


Рис. 20. Зависимость полной мощности, полезной мощности и КПД от нагрузочного сопротивления

График зависимости полезной мощности $P_{\text{пéâç}}$ от внешнего сопротивления R изображен на рис. 20. Из формулы (76) и по графику видно, что:

- в режиме короткого замыкания $R = 0$, полезная мощность $P_{\text{пéâç}} = 0$;
- в режиме холостого хода $R = \infty$, полезная мощность $P_{\text{пéâç}} = 0$.

Понятно, что при некотором промежуточном значении R , полезная мощность должна быть

максимальной. Для того, чтобы найти это значение R , необходимо уравнение (76) продифференцировать по R и первую производную приравнять к нулю:

$$\frac{dP_{\text{н\acute{e}а\grave{c}}}}{dR} = \frac{\mathcal{E}^2}{(R+r)^2} - \frac{2\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^3} = \frac{\mathcal{E}^2(R+r-2R)}{(R+r)^3} = \frac{\mathcal{E}^2(r-R)}{(R+r)^3} = 0. \quad (77)$$

Полученное выражение обращается в нуль при $R - r = 0$. Таким образом, получаем **условие согласования нагрузочного сопротивления и сопротивления источника**: полезная мощность достигает максимума, когда внешнее сопротивление равно внутреннему:

$$R = r. \quad (78)$$

Все элементы радиоэлектронной аппаратуры (транзисторы, микросхемы, усилительные каскады, динамики, приемные и передающие антенны и т.д.) конструируются обязательно с соблюдением этого условия при котором полезная мощность достигает своего максимального значения.

В режиме холостого хода, когда в (77) $R = \infty$, тогда тоже $dP_{\text{н\acute{e}а\grave{c}}}/dR = 0$, но при этом условии $P_{\text{н\acute{e}а\grave{c}}} = 0$, то есть полезную мощность мы не получаем.

2.2.3 КПД источника ЭДС. С учетом закона Ома для полной цепи (61) можно получить зависимость КПД (74) от сопротивления

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R+r} = \frac{1}{1+r/R}. \quad (79)$$

Из формулы видно:

- в режиме короткого замыкания $R = 0$, $r/R = \infty$, поэтому получаем, что КПД $\eta = 0$. В этом случае полная мощность P_{I} будет максимальной, но вся она бесполезно тратится на нагрев источника;
- при условии согласования, когда $R = r$ получаем $\eta = 1/2 = 50\%$, в этом случае $P_{\text{н\acute{e}а\grave{c}}} = P_{\text{I}}/2$;
- в режиме холостого хода $R = \infty$, получаем КПД $\eta = 1 = 100\%$. В этом случае полезную мощность из цепи постоянного тока не получаем, поскольку полезная мощность равна полной мощности, но каждая из них равна нулю $P_{\text{н\acute{e}а\grave{c}}} = P_{\text{I}} = 0$.

График зависимости КПД от R изображен на рис. 20.

2.3 Зависимость полной мощности, полезной мощности и КПД источника от силы тока в цепи

Выведем формулы зависимости P_{I} , $P_{\text{н\acute{e}а\grave{c}}}$ и η от силы тока I в цепи, в которой ЭДС источника $\mathcal{E}$ и внутреннее сопротивление r постоянные.

2.3.1 Полная мощность источника прямо пропорциональна току (70):

$$P_{\text{I}} = I \cdot \mathcal{E}. \quad (80)$$

График зависимости полной мощности P_{I} от тока в цепи I – прямая, изображенная на рис. 21.

В режиме короткого замыкания $I_{\text{max}} = \mathcal{E}/r$, полная мощность $P_{\text{I}}^{\text{max}} = \mathcal{E}^2/r$.

В режиме холостого хода $I = 0$, полная мощность $P_I = 0$.

2.3.2 Полезная мощность (71) с учетом того, что $U = \mathcal{E} - Ir$:

$$P_{\text{полез}} = I \cdot \mathcal{E} - I^2 r = I(\mathcal{E} - Ir). \quad (81)$$

График зависимости полезной мощности $P_{\text{полез}}$ от тока в цепи I – это перевернутая парабола, изображенная на рис. 21.

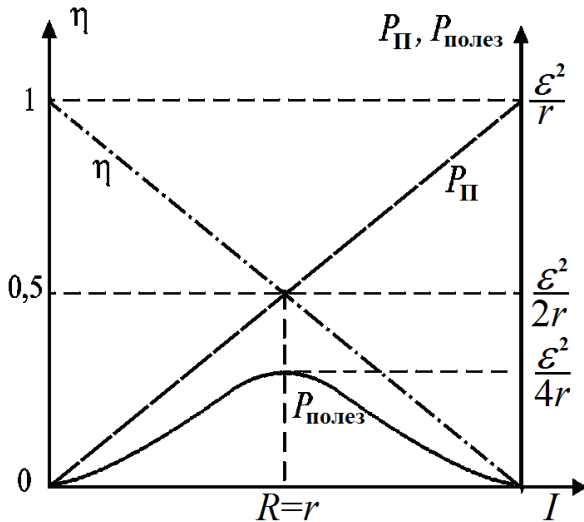


Рис. 21. Зависимость полной мощности, полезной мощности и КПД источника ЭДС от силы тока в цепи

В режиме короткого замыкания $(\mathcal{E} - I_{\text{max}} r) = 0$, полезная мощность $P_{\text{полез}} = 0$.

В режиме холостого хода $I = 0$, полезная мощность $P_{\text{полез}} = 0$.

Понятно, что при некотором промежуточном значении I полезная мощность должна быть максимальной. Чтобы найти это значение тока, нужно продифференцировать выражение (81) по току I , и первую производную приравнять нулю:

$$\frac{dP_{\text{полез}}}{dI} = \mathcal{E} - 2Ir = 0,$$

$$\text{откуда} \quad I = \frac{\mathcal{E}}{2r}. \quad (82)$$

Из сравнения (82) с (61) видно, что такой ток получается только когда $R = r$.

Мы получили такой же результат, как и при исследовании зависимости полезной мощности от сопротивления.

2.3.3 КПД источника ЭДС (74) с учетом того что $U = \mathcal{E} - Ir$

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{\mathcal{E} - Ir}{\mathcal{E}} = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}} I. \quad (83)$$

График зависимости КПД источника η от силы тока в цепи I – прямая с отрицательным коэффициентом наклона, изображенная на рис. 21.

В режиме короткого замыкания $I_{\text{max}} = \mathcal{E}/r$, получаем КПД источника $\eta = 0$.

При условии согласования, когда $I = \mathcal{E}/2r$ получаем $\eta = 1/2 = 50\%$, в этом случае $P_{\text{полез}} = P_I / 2$.

В режиме холостого хода $I = 0$, получаем КПД источника $\eta = 1$.

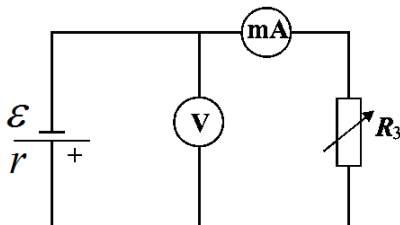


Рис. 22. Схема измерения зависимости мощности от внешнего сопротивления

3 Описание установки и методики измерений

Приборы и принадлежности (рис 22): источник ЭДС $\mathcal{E}$, вольтметр V , миллиамперметр mA , трехдекадный магазин сопротивлений R_3 .

Для исследования зависимости полной и полезной мощностей и КПД источника от внешнего сопротивления цепи составляем схему, изображенную на рис 22.

В качестве внешнего сопротивления используем трехдекадный магазин сопротивлений R_3 . Изменяя сопротивление магазина измеряем ток в цепи. Для

построения графика удобно выбирать целые значения сопротивления R_3 , например: $0\ \Omega$, $30\ \Omega$, $60\ \Omega$, $90\ \Omega$, $120\ \Omega$ и т.д.

Для нескольких значений тока и сопротивлений необходимо рассчитать значения полной мощности (70), полезной мощности (71) и КПД источника (73). По полученным данным строим графики зависимости полной и полезной мощностей и КПД источника от внешнего сопротивления цепи.

4 Обработка результатов измерений

Результаты этой работы необходимо представить в графическом виде: это графики зависимости полной, полезной мощностей и КПД источника от внешнего сопротивления цепи. Графическое представление результатов измерений обычно предполагает качественную оценку и поэтому не требует статистической обработки.

5 Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис.22. В качестве нагрузочного сопротивления включить трехдекадный магазин сопротивлений R_3 .
2. Постепенно увеличивая сопротивление трехдекадного магазина R_3 , добиться максимального показания вольтметра. Записать полученное таким образом значение ЭДС источника $\mathcal{E} = U_V^{\max}$ непосредственно перед таблицей измерений. Показания миллиамперметра при этом должны быть нулевые.
3. Определить ток короткого замыкания. Разделив на 10 значение этого тока получить шаг измерения силы тока:

$$\Delta I = \frac{I_{\text{ÊС}}}{10}.$$

4. Начиная с $I_1 = I_{\text{ÊС}}$ провести измерения значений внешнего сопротивления R_i , соответствующих 11 значениям силы тока
 $I_2 = I_{\text{ÊС}} - \Delta I$; $I_3 = I_{\text{ÊС}} - 2\Delta I$; $I_4 = I_{\text{ÊС}} - 3\Delta I$; ...; $I_{11} = I_{\text{ÊС}} - 10\Delta I$.
Результаты измерений записать таблицу измерений.
5. Особенно точно сделать измерение R_{12} и силы тока I_{12} при $U_V = \mathcal{E}/2$.
6. Рассчитать полную и полезную мощности и КПД источника. Результаты расчетов записать в таблицу.
7. Построить график зависимости полной, полезной мощностей и КПД источника от внешнего сопротивления цепи. Ось мощности расположить по левую сторону, а ось КПД по правую сторону графика.
8. По графику определить значение внутреннего сопротивления источника.
9. Сделать вывод о том, когда полезная мощность максимальная.

6 Контрольные вопросы

1. Что называется полной мощностью, полезной мощностью и КПД источника ЭДС?

2. Запишите законы зависимости полной и полезной мощностей, а также КПД источника от силы тока. При каких значениях силы тока эти величины равны нулю, максимальны?
3. Выведите, при каком значении силы тока полезная мощность максимальна.
4. Запишите законы зависимости полной и полезной мощностей, а также КПД источника от внешнего сопротивления цепи. При каких значениях внешнего сопротивления эти величины равны нулю, максимальны?
5. Выведите, при каком значении внешнего сопротивления полезная мощность максимальна.

7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 2-4

I Домашнее задание.

II Протокол выполнения лабораторной работы №2-4.

1) Тема: Определение мощности в цепи постоянного тока.

2) Цель работы:

2.1) Исследовать зависимость полной мощности, полезной мощности, КПД источника тока от внешнего сопротивления цепи.

2.2) Определить внутреннее сопротивление источника ЭДС.

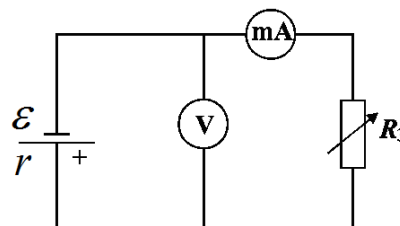
3) Схема установки:

$\mathcal{E}$, r – источник ЭДС;

R_3 – трехдекадный магазин сопротивлений;

mA – миллиамперметр;

V – вольтметр.



4) Таблица приборов:

№ п/п	Наименование	Тип	Заводской номер	Предел шкалы	Цена деления	Абсолютная погрешность (класс точности)
1	Магазин сопротивлений R_3	P333	-			
2	Миллиамперметр	M 906				
3	Вольтметр	M 906				

5) Формулы расчетов величин:

5.1) Полная мощность

$$P_{\text{I}} [\text{I}\hat{\text{A}}] = I[\text{I}\hat{\text{A}}] \cdot \mathcal{E}[\hat{\text{A}}],$$

где I – сила тока в цепи; $\mathcal{E}$ – ЭДС источника.

5.2) Полезная мощность

$$P_{\text{п\acute{e}a\grave{c}}} [\text{I}\hat{\text{A}}] = I^2[\text{I}\hat{\text{A}}] \cdot R[\hat{\text{I}}] \cdot 10^3,$$

где I – сила тока в цепи; R – внешнее (нагрузочное) сопротивление цепи.

5.3) КПД источника ЭДС

$$\eta [\%] = (P_{\text{п\acute{e}a\grave{c}}} / P_{\text{I}}) \cdot 100\%,$$

где $P_{\text{п\acute{e}a\grave{c}}}$ – полезная мощность; P_{I} – полная мощность.

6) Таблица результатов прямых измерений:

$\mathcal{E} = \dots \hat{\text{A}}$

№	$I, \text{I}\hat{\text{A}}$	$R, \hat{\text{I}}$	$P_{\text{I}}, \text{I}\hat{\text{A}}$	$P_{\text{п\acute{e}a\grave{c}}}, \text{I}\hat{\text{A}}$	$\eta, \%$
---	-----------------------------	---------------------	--	---	------------

1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11	$I_{\max}$	0			
$\varepsilon/2$					

7) Расчеты физических величин:

7.1) Полная мощность

$$P_{I1} = \dots \cdot \dots = \dots ; P_{I2} = \dots \cdot \dots = \dots ; \dots$$

7.2) Полезная мощность

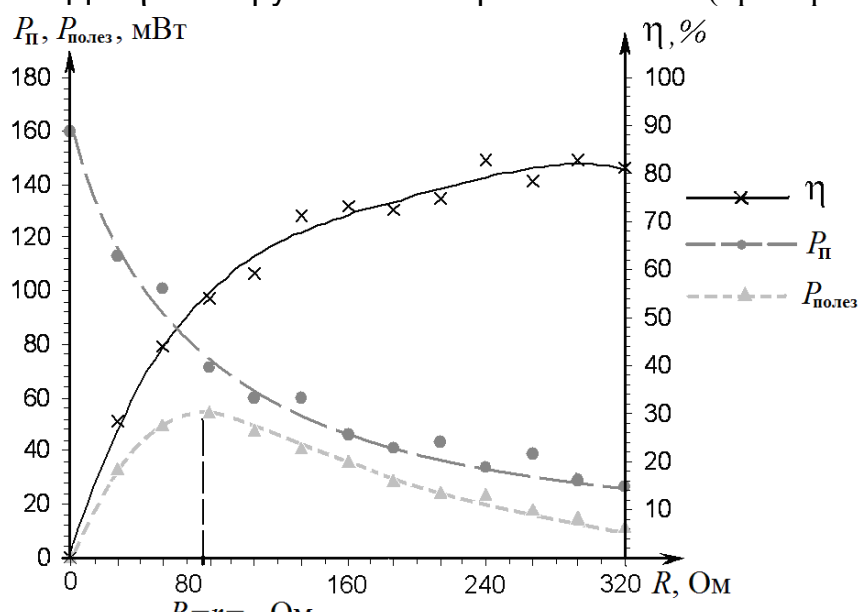
$$P_{\text{полез}1} = \dots \cdot \dots \cdot 10^3 = \dots ; P_{\text{полез}2} = \dots \cdot \dots \cdot 10^3 = \dots ; \dots$$

7.3) КПД источника ЭДС

$$\eta_1 \% = (\dots / \dots) \cdot 100\% = \dots\% ; \eta_2 \% = (\dots / \dots) \cdot 100\% = \dots\% ; \dots$$

8) Окончательные результаты:

График зависимости полной мощности P_I , полезной мощности $P_{\text{полез}}$ и КПД источника ЭДС η от нагрузочного сопротивления R (примерный)



9) Вывод: В зависимости от сопротивления, полезная мощность ...

10) Работу выполнил(а): _____ (фамилия разборчиво).

Работу проверил:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-1 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ТАНГЕНС-БУССОЛИ

1 Цель работы:

1. Научиться определять напряженность исследуемого магнитного поля, используя принцип суперпозиции полей.
2. Определить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля в лаборатории с помощью тангенс-буссоли.

2 Ключевые положения

2.1 Магнитное поле тока. Индукция и напряженность магнитного поля

Вокруг любого движущегося электрического заряда существует магнитное поле, основное свойство которого заключается в том, что на другие движущиеся в нем заряды действуют силы. Известно, например, что проводники, по которым токи текут в одинаковых направлениях, притягиваются, а в противоположных – отталкиваются. Это вызвано тем, что магнитное поле движущихся зарядов одного проводника действует на движущиеся заряды другого проводника. На неподвижные электрические заряды постоянное магнитное поле не действует. Образование магнитного поля вблизи постоянных магнитов объясняется ориентацией в одном направлении микротоков внутри вещества, представляющих собой направленное движение электронов в атомах.

Рассмотрим магнитное поле токов, текущих по проводникам различной конфигурации.

Произведение силы тока I на бесконечно малый отрезок длины проводника dl называется **элементом тока** Idl . Элемент тока – это вектор, направление которого совпадает с направлением тока. Элемент тока Idl при исследовании магнитных полей играет роль, подобную пробному электрическому заряду при исследовании электрических полей. На элемент тока, находящийся в магнитном поле, согласно экспериментальному **закону Ампера**, действует сила

$$d\vec{F} = I \cdot [d\vec{l} \times \vec{B}], \text{ или в скалярной форме } dF = B \cdot Idl \sin(d\vec{l} \wedge \vec{B}). \quad (84)$$

Величина $\vec{B}$ называется **вектором магнитной индукции**. За направление вектора магнитной индукции принято направление силы, с которой магнитное поле действует на северный полюс магнитной стрелки. Из уравнения (84) вытекает физическая сущность вектора $\vec{B}$:

$$B = dF / Idl \sin(d\vec{l} \wedge \vec{B}). \quad (85)$$

Вектор магнитной индукции численно равен силе, с которой магнитное поле действует на единичный элемент тока ($Idl = 1 \text{ А} \cdot \text{м}$), расположенный

перпендикулярно вектору магнитной индукции ($\sin(\vec{dl} \wedge \vec{B}) = 1$).

Направление вектора магнитной индукции определяется с помощью **правила “буравчика”** (правого винта): если ввинчивать буравчик по направлению тока (поступательное движение), то направление движения его рукоятки покажет направление силовых линий магнитного поля, а вектор магнитной индукции направлен по касательной к ним (рис. 23).

Следует отметить, что сила Ампера dF не совпадает по направлению с вектором магнитной индукции. Направление этой силы определяется по правилу векторного произведения, или по упрощенному **правилу “левой руки”**: если левую руку расположить так, чтобы вектор $\vec{B}$ входил в раскрытую ладонь, а четыре пальца направить по току, то отогнутый большой палец укажет направление силы. Сила, действующая на элемент тока, всегда перпендикулярна вектору магнитной индукции и элементу тока (рис. 24).

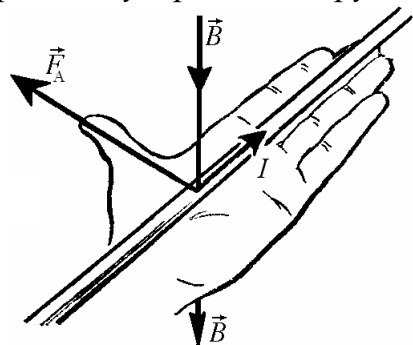


Рис. 24. Определение направления силы Ампера с помощью правила “левой руки”

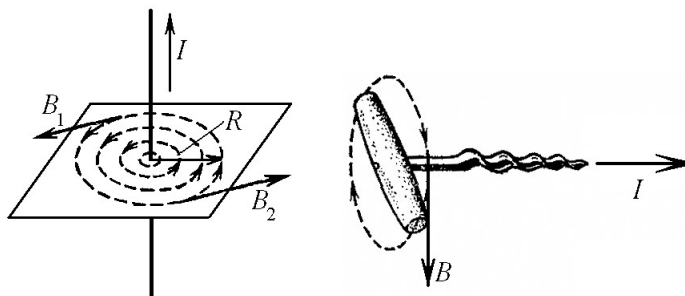


Рис. 23. Определение направления вектора напряженности магнитного поля с помощью правила буравчика

В системе СИ магнитная индукция измеряется в теслах.

Тесла (Тл) – это индукция такого магнитного поля, которое на элемент тока, равный $1 \text{ А} \cdot \text{м}$, расположенный перпендикулярно вектору $\vec{B}$, действует с силой в 1 Н :

$$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н} / 1 \text{ А} \cdot \text{м}.$$

Графически магнитное поле изображается с помощью магнитных силовых линий. Магнитная силовая линия – это такая линия, в каждой точке которой вектор $\vec{B}$ направлен по касательной к ней (рис. 23).

Каждый элемент тока проводника создает в окружающем пространстве магнитное поле, индукция которого определяется по закону Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu \mu_0 I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3}, \text{ или в скалярной форме } dB = \frac{\mu \mu_0 \cdot Idl \cdot \sin(\vec{dl} \wedge \vec{r})}{4\pi r^2}, \quad (86)$$

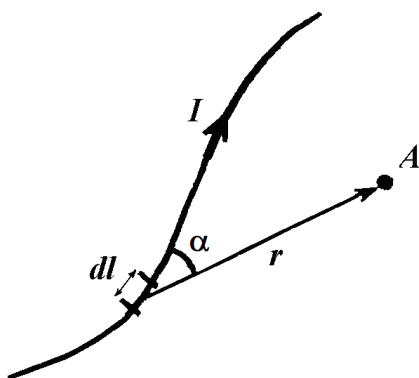


Рис. 25. Элемент с током

где r – расстояние от элемента тока Idl до точки A , в которой определяется индукция dB (рис. 25); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ \AA} \cdot \text{м}/\text{А}$ – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость среды показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в данной среде отличается от магнитной индукции в вакууме.

Величина B зависит от типа среды, так как вещество, помещенное в магнитное поле, намагничивается, создавая свое собственное

магнитное поле.

Если выражение (86) разделить на $\mu\mu_0$, то получим выражение для величины, не зависящей от типа среды:

$$dH = \frac{Idl \sin(\vec{dl} \wedge \vec{r})}{4\pi r^2}. \quad (87)$$

Формула (87) выражает закон Био-Савара-Лапласа для напряженности магнитного поля dH , созданного элементом тока Idl . Величина H называется **напряженностью магнитного поля**. Связь между индукцией $\vec{B}$ и напряженностью $\vec{H}$ выражается соотношением:

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}. \quad (88)$$

В изотропной, однородной среде направления векторов $\vec{B}$ и $\vec{H}$ совпадают.

В системе СИ напряженность измеряется в амперах на метр ($\text{А}/\text{м}$), как следует из формулы (87).

Линии вектора напряженности проводятся так, чтобы в каждой точке вектор напряженности был направлен по касательной к такой линии. Напряженность магнитного поля – это величина, характеризующая магнитное поле макротоков. Магнитная индукция характеризует суммарное поле макротоков и микротоков вещества.

Проводники с током обычно имеют конечную длину. Их можно представить как совокупность большого числа элементов тока Idl . Напряженность и индукция магнитного поля проводника в любой точке определяются как геометрическая сумма напряженностей $d\vec{H}$ и индукций $d\vec{B}$ полей отдельных элементов тока:

$$\vec{H} = \sum d\vec{H}; \quad \vec{B} = \sum d\vec{B}.$$

Этот **принцип суперпозиции** позволяет определить напряженность и индукцию полей, создаваемых проводниками любой формы. Однако, в общем случае, для проводников произвольной формы эта операция сложна.

Рассмотрим несколько частных случаев.

Прямой проводник конечной длины (рис. 26).

$$H = \frac{I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (89)$$

где r – кратчайшее расстояние от рассматриваемой точки A до линии тока.

Векторы напряженности $\vec{H}$ и индукции $\vec{B}$ перпендикулярны плоскости, проходящей через отрезок проводника BC и точку A .

Линии напряженности, как и линии вектора индукции, представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных к проводнику, а их центры лежат на проводнике. Направление линий напряженности определяется правилом буравчика (см. выше).

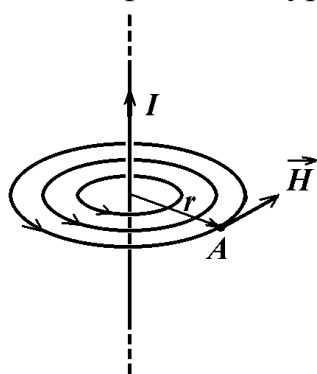


Рис. 27. Определение напряженности магнитного поля бесконечно длинного прямого проводника

Бесконечно длинный прямой проводник (рис. 27). Если проводник на рис. 26 удлинять, то углы α_1 и α_2 будут уменьшаться и для бесконечно длинного проводника α_1 и α_2 будут равны нулю. Учитывая, что $\cos 0^\circ = 1$, получим

$$H_A = I / 2\pi r. \quad (90)$$

Направления вектора H и линий напряженности такие же, как и для конечного, прямого проводника.

Круговой проводник (рис. 28). В центре кругового проводника напряженность магнитного поля определяется по формуле

$$H = I / 2R, \quad (91)$$

где R – радиус витка. Для всех точек, лежащих в плоскости витка, вектор H направлен перпендикулярно к этой плоскости. Это следует из рассмотрения совокупности магнитных полей, создаваемых каждым элементом проводника dl в отдельности.

Для определения направления вектора $\vec{H}$ в этих точках и на оси витка используется **обратное правило буравчика**: если вращать ручку буравчика по току, то поступательное движение укажет направление вектора $\vec{H}$.

В точках, лежащих на оси витка, напряженность рассчитывается по формуле

$$H = \frac{IR^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}}, \quad (92)$$

где h – расстояние от рассматриваемой точки до центра витка (рис. 29).

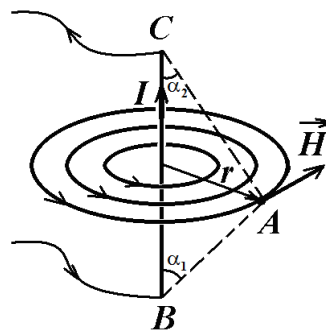


Рис. 26. Определение напряженности магнитного поля прямого проводника конечной длины

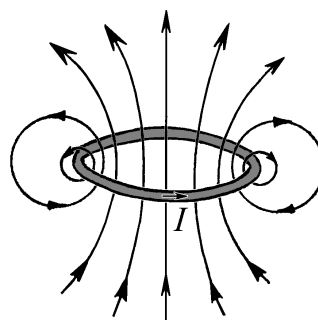


Рис. 28. Силовые линии магнитного поля кругового тока

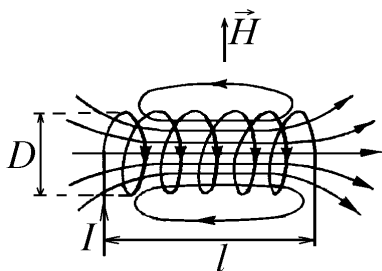


Рис. 30. Силовые линии
и
магнитного поля соленоида

Соленоид (рис. 30) – цилиндрическая катушка с плотно намотанными витками, у которой длина значительно больше диаметра. Внутри соленоида поле однородно, а его напряженность определяется по формуле

$$H = I \cdot N/l = I \cdot n, \quad (93)$$

где N – число витков в соленоиде; l – длина соленоида; n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида (плотность намотки витков). На концах соленоида однородность поля нарушается. Снаружи поле очень слабое по сравнению с полем внутри соленоида. Направление линий вектора H внутри соленоида определяется так же, как и в случае кругового тока.

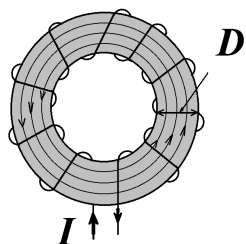


Рис. 31 – Торойд

Торойд (рис. 31) представляет собой замкнутую катушку, намотанную на каркас, имеющий форму тора. У тороида отсутствует краевой эффект. Все магнитное поле сосредоточено внутри тороида и линии вектора H представляют концентрические окружности. Если диаметр витков D значительно меньше длины кольца, то напряженность внутри тороида определяется по формуле

$$H = I \cdot N/l = I \cdot n,$$

где l – длина средней линии тороида.

2.2 Вихревой характер магнитного поля. Циркуляция вектора напряженности. Закон полного тока

Из всех приведенных выше примеров ясно, что линии векторов напряженности и индукции магнитного поля всегда замкнуты. Такое поле называется вихревым. В этом заключается существенное отличие магнитного поля от электростатического. В электростатическом поле силовые линии всегда разомкнуты, они начинаются на положительных зарядах или в бесконечности и заканчиваются на отрицательных зарядах или в бесконечности. Магнитные силовые линии не имеют ни начала, ни конца. Это означает, что в природе нет “магнитных” зарядов.

Циркуляцией вектора напряженности магнитного поля вдоль произвольно выбранного замкнутого контура L называется интеграл следующего вида:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_L H dl \cos(\vec{H} \wedge d\vec{l}) = \oint_L H_l dl, \quad (94)$$

где dl – бесконечно малый отрезок контура L ; $H_l = H \cos(\vec{H} \wedge d\vec{l})$ – проекция вектора $\vec{H}$ на направление отрезка dl .

По **закону полного тока**: циркуляция вектора напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint_L H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i. \quad (95)$$

Для записи закона полного тока (95), следует выбрать направление обхода контура L (рис. 32). Для определения знака, с которым нужно взять ток в уравнении (95), пользуются правилом буравчика. Если вращать рукоятку буравчика в направлении обхода контура, то те токи, направления которых совпадают с направлением поступательного движения буравчика, в уравнении (95) записываются со знаком плюс, обратные токи записываются со знаком минус. Если контур не охватывает тока, то циркуляция вектора $\vec{H}$ по этому контуру равна нулю. Циркуляция вектора $\vec{H}$ вдоль контура L , изображенного на рис. 32, равна

$$\oint_L H_l dl = I_3 - I_2.$$

Формула (95) выражает важнейшее свойство магнитного поля. Отличие от нуля циркуляции вектора $\vec{H}$ свидетельствует о замкнутости силовых линий поля, то есть о вихревом характере магнитного поля. Тот факт, что в правой части фигурирует ток, говорит о том, что магнитное поле порождается током, движущимися зарядами.

Циркуляция вектора $\vec{E}$ в электростатическом поле по любому замкнутому контуру равна нулю:

$$\oint_L E dl \cos(\vec{E} \wedge d\vec{l}) = 0,$$

что говорит о невихревом, потенциальном характере электростатического поля.

2.3 Поток вектора магнитной индукции

Условились линии вектора магнитной индукции $\vec{B}$ проводить так, чтобы число линий, пронизывающих единичную площадку, перпендикулярную вектору $\vec{B}$, было пропорционально численному значению вектора $\vec{B}$.

Потоком Φ вектора магнитной индукции, или просто магнитным потоком, через любую поверхность S называется число магнитных силовых линий, пронизывающих эту поверхность. Если плоская поверхность площадью

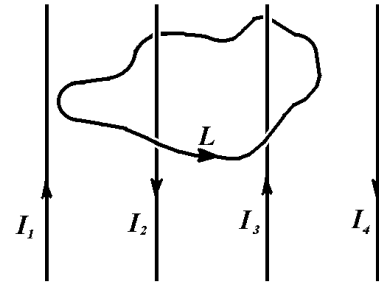


Рис. 32. Обход контура для записи закона полного тока

S помещена в однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, то, как видно из рис. 33,

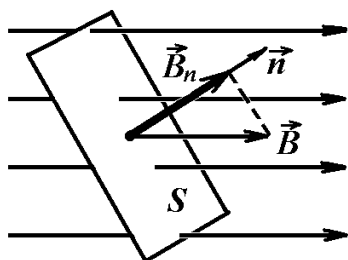


Рис. 33. Плоская поверхность в магнитном поле

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot S = BS \cos(\vec{B} \wedge \vec{n}) = B_n \cdot S, \quad (96)$$

где $\vec{n}$ – вектор единичной нормали к поверхности S ;

$B_n = B \cos(\vec{B} \wedge \vec{n})$ – проекция вектора $\vec{B}$ на нормаль $\vec{n}$.

Если поле неоднородно и поверхность, через которую рассчитывается поток, не является плоской, то эту поверхность нужно разбить на бесконечно малые участки dS , в пределах которых поле можно считать однородным, а сами участки плоскими.

Полный поток через поверхность

$$\hat{O} = \iint_S d\hat{O} = \iint_S B_n \cdot dS,$$

где $d\hat{O} = B_n \cdot dS$ – элементарный магнитный поток через элементарную площадку dS .

Магнитный поток через любую замкнутую поверхность равен нулю. Это следует из того, что силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, следовательно, количество линий магнитной индукции, вошедших в замкнутую поверхность, равно количеству линий, вышедших из нее:

$$\oint_S B_n \cdot dS = 0.$$

Вспомним, что поток вектора электрического смещения через любую замкнутую поверхность равен алгебраической сумме электрических зарядов, находящихся внутри этой поверхности:

$$\oint_S D_n \cdot dS = \sum_{i=1}^n q_i.$$

Это говорит о том, что линии вектора $\vec{D}$ начинаются и заканчиваются на электрических зарядах.

Магнитный поток в системе СИ измеряется в веберах:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ А}^2.$$

Направление обхода контура L (соответственно которому определяется знак проекции H_l) вместе с вектором единичной нормали $\vec{n}$ (относительно которого задается положительное направление силы тока) составляют электромагнитную систему координат. Направление обхода контура и направление вектора единичной нормали всегда связаны правилом буравчика.

2.4 Магнитное поле Земли

Земля представляет собой естественный магнит. Магнитная стрелка, укрепленная так, что она может вращаться вокруг вертикальной и горизонтальной осей, в разных точках Земли устанавливается под разными углами к ее поверхности. Это говорит о том, что силовые линии поля, а, следовательно, и вектор напряженности в разных точках Земли образуют разные углы с ее поверхностью (рис. 34). Те места, где силовые линии перпендикулярны поверхности Земли, называются **магнитными полюсами**. Магнитная стрелка здесь устанавливается вертикально. В северном полушарии, в котором расположен северный географический полюс N_G , находится южный магнитный полюс S_M . В южном полушарии находится северный магнитный полюс N_M . Точные местоположения географических и магнитных полюсов несколько не совпадают.

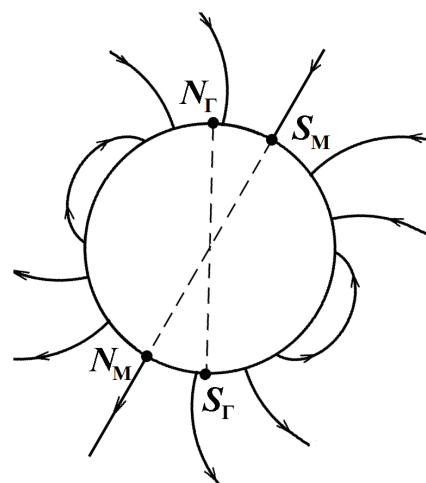


Рис. 34. Силовые линии магнитного поля Земли

Из рис. 34 видно, что силовые линии в южном полушарии выходят из Земли, в северном – входят в нее. Вертикальная плоскость, проведенная через магнитную стрелку, называется **плоскостью магнитного меридиана**. Линия пересечения этой плоскости с поверхностью Земли называется **магнитным меридианом**. Магнитные меридианы проходят через магнитные полюса. Вследствие несовпадения географических и магнитных полюсов географические и магнитные меридианы тоже не совпадают. Угол между географическим и магнитным меридианами называется **магнитным склонением** ϕ . Угол между направлением вектора напряженности в данной точке Земли и горизонтальной плоскостью называется **магнитным наклонением** i .

На рис. 35 изображен небольшой участок поверхности Земли северного полушария, где магнитное наклонение равно i . Вектор напряженности можно разложить на две составляющие: горизонтальную $\vec{H}_\Delta$ и вертикальную $\vec{H}_\Lambda$. Магнитная стрелка, насаженная на вертикальное острие, может свободно вращаться в горизонтальной плоскости. Под действием магнитного поля Земли она устанавливается в положении, указывающем своим северным полюсом направление горизонтальной составляющей $\vec{H}_\Delta$. Магнитное склонение, магнитное наклонение и численное значение горизонтальной составляющей напряженности полностью характеризуют поле Земли.

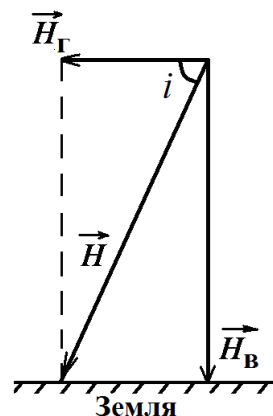


Рис. 35. Напряженность магнитного поля Земли

Значение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли можно определить с помощью тангенс-буссоли. Однако на стенде лабораторного стола укреплены измерительные приборы, содержащие постоянные магниты. В результате наложения их магнитных полей на магнитное поле Земли образуется какое-то результирующее поле, которое предлагается студентам исследовать.

В данной работе с помощью тангенс-буссоли определяются направление и величина горизонтальной составляющей напряженности $\vec{H}_A$ магнитного поля в различных точках лабораторного стола.

3 Описание установки и методики измерений

Приборы и принадлежности: тангенс-буссоль, источник постоянного тока, потенциометр, миллиамперметр, переключатель.

Тангенс-буссоль представляет собой тонкую катушку, состоящую из N витков, расположенных в вертикальной плоскости близко друг к другу так, что для расчета напряженности магнитного поля в центре катушки можно применить формулу

$$H_E = I \cdot N / 2R = I \cdot N / D, \quad (97)$$

где R – радиус катушки; D – диаметр катушки.

В центре тангенс-буссоли на вертикальном острие расположена магнитная стрелка со шкалой (компас).

Для выполнения работы следует собрать схему, изображенную на рис. 36, где T – тангенс-буссоль; Π – переключатель; mA – миллиамперметр; P – потенциометр для

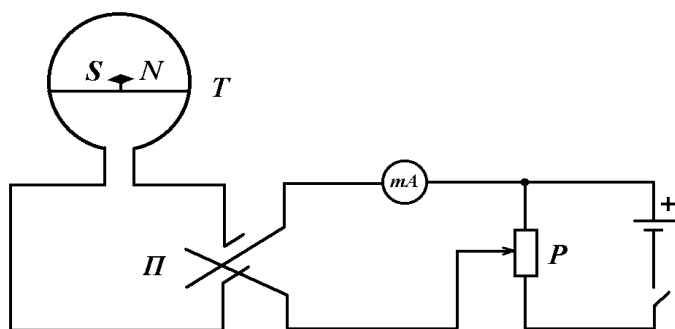


Рис. 36. Схема измерения напряженности магнитного поля Земли в данной точке

регулировки тока.

Метод измерения заключается в следующем. Когда ток в катушке отсутствует, магнитная стрелка устанавливается так, что своим северным полюсом она указывает направление горизонтальной составляющей напряженности исследуемого магнитного поля $\vec{H}_A$. Если по катушке пустить ток, возникнет магнитное поле тока с напряженностью $\vec{H}_E$, направленной перпендикулярно плоскости витков катушки. Таким образом, в горизонтальной плоскости накладываются два магнитных поля: исследуемое поле с напряженностью $\vec{H}_A$ и поле катушки с напряженностью $\vec{H}_E$. Магнитная стрелка устанавливается в направлении напряженности результирующего поля.

Для проведения измерений удобно, чтобы векторы $\vec{H}_A$ и $\vec{H}_E$ были взаимно перпендикулярны. Для этого в отсутствие тока катушку следует расположить так, чтобы магнитная стрелка оказалась в плоскости витков катушки 1, (рис. 37). Очевидно, в этой же плоскости будет расположен и вектор

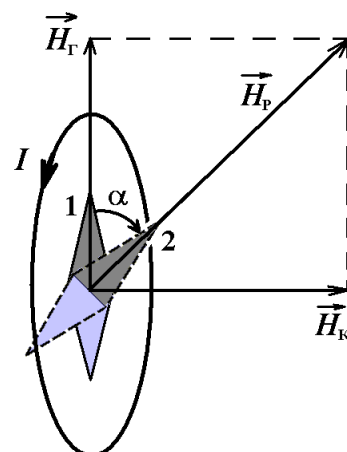
$\vec{H}_{\tilde{A}}$. Вектор $\vec{H}_{\tilde{E}}$ перпендикулярен плоскости витков катушки. Следовательно, $\vec{H}_{\tilde{A}}$ перпендикулярен $\vec{H}_{\tilde{E}}$. В этом случае параллелограмм, построенный на векторах $\vec{H}_{\tilde{E}}$ и $\vec{H}_{\tilde{A}}$, представляет собой прямоугольник. Вектор $\vec{H}_{\tilde{D}}$ результирующего поля направлен по диагонали прямоугольника. Из рис. 37 следует

$$H_{\tilde{E}}/H_{\tilde{A}} = \operatorname{tg} \alpha, \quad \text{отсюда} \quad H_{\tilde{A}} = H_{\tilde{E}}/\operatorname{tg} \alpha.$$

Учитывая формулу (97), получим

$$H_{\tilde{A}} = \frac{I \cdot N}{D \cdot \operatorname{tg} \alpha}.$$

(98) Рис. 37 – Расположение тангенс-буссоли



Для измерения угла α в тангенс-буссоли имеется шкала компаса. При правильной ориентации катушки в отсутствие тока магнитная стрелка устанавливается против нуля шкалы, который находится в плоскости катушки. При включении тока стрелка поворачивается на угол α , указывая направление напряженности результирующего магнитного поля в горизонтальной плоскости.

4 Обработка результатов измерений

Результаты этой работы представляют в графическом виде: это построенные векторы $\vec{H}_{\tilde{A}}$ с соблюдением масштаба и направлений относительно начерченной линии рабочего стола. Графическое представление результатов измерений обычно допускает качественную оценку и потому не требует статистической обработки.

5 Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 36).
2. В отчете в уменьшенном масштабе изобразить линию рабочего стола, посередине листа провести линию (эта линия соответствует линии стола, проведенной параллельно стенду). Определить направление линии стола (0х).
3. Выбрать на линии рабочего стола три точки, в которых будет определяться направление и величина горизонтальной составляющей магнитного поля H_{Γ} .
4. Расположить тангенс-буссоль так, чтобы центр магнитной стрелки оказался в первой из выбранных точек стола.
5. Определить направление H_{Γ} в данной точке. Для этого расположить катушку тангенс-буссоли так, чтобы плоскость ее витков совпадала с линией стола. В отсутствие тока измерить угол β , который составляет направление магнитной стрелки с направлением линии стола (0х), и записать его значение в таблицу.
6. Определить численное значение H_{Γ} . Для этого расположить тангенс-буссоль в данной точке так, чтобы в отсутствие тока магнитная стрелка оказалась в плоскости витков катушки.

7. Замкнуть цепь. Вращая ручку потенциометра добиться отклонения стрелки на $30 \dots 40^\circ$.
8. Записать в таблицу значения силы тока и угла отклонения магнитной стрелки при этом.
9. Рассчитать горизонтальную составляющую напряженности H_{Γ} магнитного поля в данной точке по формуле (98).
10. Аналогичным методом определить направление и величину H_{Γ} в других точках стола, выполнить пункты 4 – 9.
11. В отчете изобразить векторы $\vec{H}_A$ в указанных точках с соблюдением масштаба и направлений относительно линии стола.

6 Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией магнитного поля?
2. Что называется напряженностью магнитного поля?
3. Что называется линиями вектора напряженности?
4. Нарисовать картину линий вектора напряженности поля кругового тока. Как определить направление вектора напряженности в центре кругового тока?
5. В чем состоит закон Био-Савара-Лапласа?
6. Записать формулы расчета напряженности в центре и на оси кругового тока.
7. Каковы особенности магнитного поля и чем оно отличается от электростатического поля?
8. Что называется циркуляцией вектора напряженности?
9. В чем состоит закон полного тока?
10. Каково магнитное поле Земли? Что называется магнитным склонением и магнитным наклонением?
11. В чем заключается принцип суперпозиции полей? Как определить напряженность результирующего поля, если известны напряженности складывающихся полей?
12. Как определить направление и величину горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля с помощью тангенс-буссоли? Нарисовать схему и вывести формулу расчета.

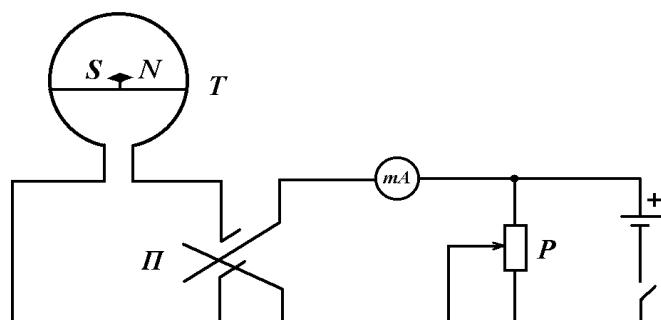
7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 3-1

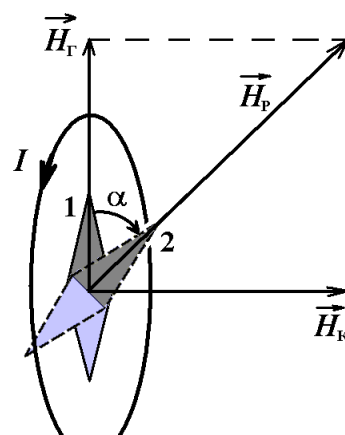
I. Домашнее задание.

II. Протокол выполнения лабораторной работы № 3-1.

- 1) Тема: Определение магнитного поля с помощью тангенс-буссоли.
- 2) Цель работы: Определить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля в лаборатории с помощью тангенс-буссоли, используя принцип суперпозиции полей
- 3) Схема установки:



T – тангенс-буссоль;
 Π – переключатель;
 mA – миллиамперметр;
 P – потенциометр.



4) Таблица приборов

№ п/п	Наименование	Тип	Заводской номер	Предел шкалы	Цена деления	Абсолютная погрешность (класс точности)
1	Миллиамперметр					
2	Тангенс-буссоль (транспортир)			360°		
3	Линейка					

5) Формулы расчетов величин

$$H_{\bar{A}} = \frac{I \cdot N}{D \cdot \operatorname{tg} \alpha};$$

I – сила тока; $N = 100$ – количество витков; D – внешний диаметр тангенс-буссоли;

6) Таблица результатов прямых измерений:

№	$\beta, ^\circ$	I, A	$\alpha, ^\circ$	$H_{\bar{A}}, \text{A/м}$
1				
2				
3				

$$\operatorname{tg}(45^\circ) = 1; \operatorname{tg}(30^\circ) = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577.$$

7) Расчет физических величин:

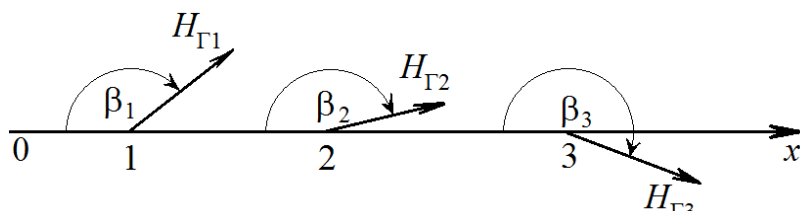
Напряженность магнитного поля в трех точках стола

$$H_{\bar{A}1} = \frac{\dots \text{A} \cdot 100}{\dots \text{м}} = \dots \text{A/м}; H_{\bar{A}2} = \frac{\dots \text{A} \cdot 100}{\dots \text{м}} = \dots \text{A/м}; H_{\bar{A}3} = \frac{\dots \text{A} \cdot 100}{\dots \text{м}} = \dots \text{A/м}.$$

8) Окончательные результаты:

Представить в виде векторной диаграммы (масштаб: 1 см – 5 А/м).

Например:



9) Выводы: Напряженность магнитного поля в разных точках не одинакова, поскольку ...

10) Работу выполнил(а): _____ (фамилия разборчиво).

Работу проверил:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

1 Цель работы:

1. Изучить законы движения заряженных частиц в магнитном поле.
2. Определить отношение e/m электронов, используя их движение в электрическом и магнитном полях.

2 Ключевые положения

2.1 Движение заряженных частиц в магнитном поле

На заряженную частицу с зарядом q , движущуюся в магнитном поле со скоростью v , действует сила Лоренца, равная

$$\vec{F}_\text{Л} = q \cdot [\vec{v} \times \vec{B}], \text{ или, в скалярной форме, } F_\text{Л} = qvB \sin(\vec{v} \wedge \vec{B}), \quad (99)$$

где B – индукция магнитного поля.

Сила Лоренца перпендикулярна и к вектору скорости, и к вектору магнитной индукции. Ее направление определяется в общем случае правилом векторного произведения. Для положительно заряженных частиц направление $F_\text{Л}$ можно определить по **правилу левой руки**: если левую руку расположить так, чтобы магнитные силовые линии входили в раскрытую ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены вдоль вектора скорости, то отогнутый большой палец укажет направление силы (см. рис. 24). Для отрицательно заряженной частицы сила направлена в противоположную сторону. Поскольку сила Лоренца перпендикулярна скорости (не совершает работы), она, не изменяя величины скорости, изменяет ее направление, следовательно искривляет траекторию полета частицы. Форма траектории зависит от угла между $\vec{v}$ и $\vec{B}$. Если $\vec{v} \parallel \vec{B}$, то $F_\text{Л} = 0$ и частица в однородном поле движется вдоль силовой линии равномерно и прямолинейно.

Рассмотрим случай, когда электрон движется в однородном магнитном поле перпендикулярно силовым линиям (рис. 38). В этом случае $\sin(\vec{v} \wedge \vec{B}) = 1$ и формула (99) примет вид

$$F_\text{Л} = evB, \quad (100)$$

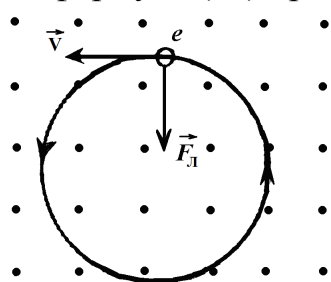


Рис. 38. Движение электрона в поперечном магнитном поле

где e – заряд электрона.

На рис. 38 магнитное поле изображено в виде точек, указывающих, что магнитные силовые линии перпендикулярны плоскости чертежа и направлены к нам. Пользуясь правилом левой руки и учитывая, что заряд электрона отрицателен, легко определить направление силы $F_\text{Л}$. Сила $F_\text{Л}$, перпендикулярна скорости, является центростремительной, поэтому для силы Лоренца можно записать выражение

$$evB = mv^2/R. \quad (101)$$

Отсюда определим радиус траектории

$$R = \frac{mv}{eB} = \frac{v}{B \cdot e/m}. \quad (102)$$

Так как поле однородное, скорость по величине не изменяется, то радиус R остается постоянным. Частица будет двигаться равномерно по окружности в плоскости, перпендикулярной силовым линиям.

Отношение заряда частицы к ее массе e/m является важной характеристикой элементарных частиц и называется **удельным зарядом частицы**.

Период обращения электрона – время одного оборота, которое равно отношению длины окружности к скорости движения:

$$T = 2\pi R/v. \quad (103)$$

Используя значение радиуса и (103), получим

$$T = \frac{2\pi m}{eB} = \frac{2\pi}{B \cdot e/m}. \quad (104)$$

Формула (104) показывает, что период обращения частиц в магнитном поле не зависит от скорости движения, а зависит от их удельного заряда и индукции поля. Если пучок электронов, движущихся с различными скоростями ($v_1 > v_2 > v_3$), влетает в однородное магнитное поле, то электроны с разными скоростями описывают окружности различных радиусов ($R_1 > R_2 > R_3$) (рис. 39), но полный оборот совершают одновременно. Это свойство используется для фокусировки электронных пучков в электронной оптике, в ускорителях элементарных частиц – циклотронах и др. Период T зависит от скорости только при очень больших скоростях, когда масса начинает существенно расти с увеличением скорости.

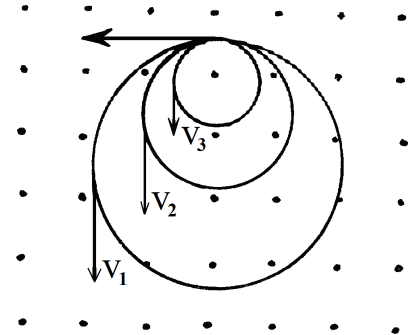


Рис. 39. Движение электронов с разными скоростями в поперечном магнитном поле

Если заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под углом α к силовым линиям, то она движется по винтовой линии. На рис. 40 изображено движение электрона в магнитном поле. В этом случае скорость можно разложить на две составляющие – $v_{\parallel}$, параллельную полю, и $v_{\perp}$, перпендикулярную полю, и представить движение частицы как сумму двух движений: равномерного прямолинейного вдоль силовой линии со скоростью $v_{\parallel}$ и равномерного по окружности со скоростью $v_{\perp}$. При этом частица движется по спирали, как бы «навиваясь» на силовую линию.

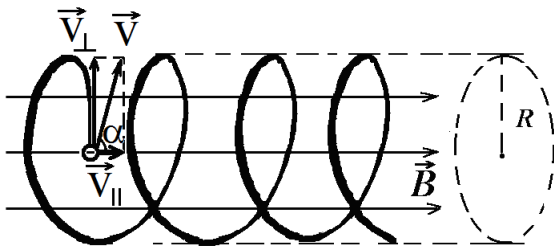


Рис. 40. Движение электрона в магнитном поле

Проекция винтовой линии на плоскость, перпендикулярную линиям поля, представляет окружность радиусом R , зависящим от угла α .

$$evB \sin \alpha = \frac{mv_{\perp}^2}{R}; \quad v_{\perp} = v \sin \alpha; \quad evB \sin \alpha = \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{R};$$

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}. \quad (105)$$

Чем меньше угол α , тем меньше радиус окружности при заданной скорости v .

Шаг винтовой линии h – это расстояние, которое пролетает частица вдоль силовой линии за время одного оборота T :

$$h = v_{\parallel} T = \frac{2\pi mv}{eB} \cos \alpha = \frac{2\pi mv_{\parallel}}{eB}. \quad (106)$$

Чем меньше угол α , тем больше шаг винтовой линии при заданной скорости v .

В неоднородных магнитных полях траектории движения частиц более сложные.

Удельный заряд электрона в данной работе определяется двумя способами: а) с помощью двухэлектродной электронной лампы, помещенной в магнитное поле соленоида; б) с помощью электронно-лучевой трубки, расположенной в магнитном поле Земли.

3 Описание установки и методики измерений

3.1 Способ а: Определение удельного заряда электрона с помощью двухэлектродной электронной лампы

Приборы и принадлежности: двухэлектродная электронная лампа, соленоид, три потенциометра, два вольтметра, микроамперметр, миллиамперметр, три источника тока.

Для выполнения работы следует собрать схему, изображенную на рис. 41.

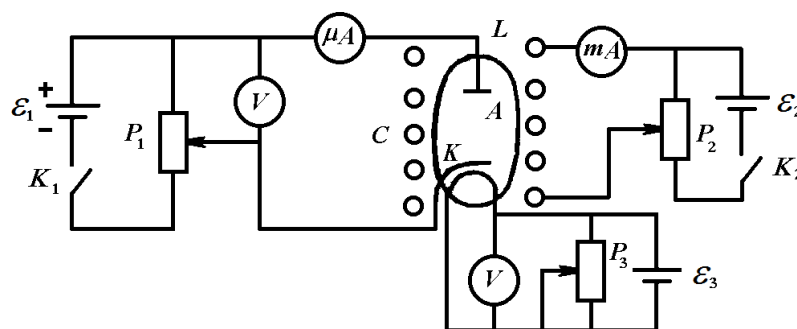


Рис. 41. Схема для определения удельного заряда электрона с помощью двухэлектродной электронной лампы

На рисунке: L – двухэлектродная электронная лампа; C – соленоид (кружочками изображены сечения витков соленоида); P_1 , P_2 , P_3 – потенциометры; V – вольтметры; μA – микроамперметр; mA – миллиамперметр.

Двухэлектродная электронная лампа L представляет собой откачанный

(вакуумированный) баллон, внутри которого расположены два электрода: анод в виде цилиндра и катод в виде нити, расположенной вдоль оси анода. Катод подогревается до высокой температуры. Из раскаленного катода вследствие явления термоэлектронной эмиссии вылетают электроны. Если анод соединить с положительным полюсом источника E_1 , а катод – с отрицательным, то между ними возникнет электрическое поле, под действием которого электроны будут двигаться от катода к аноду по радиусам (рис. 42, а). Микроамперметр зарегистрирует анодный ток.

Лампа L помещена в соленоид C так, чтобы ось анода совпала с осью соленоида. При замыкании ключа K_2 по соленоиду течет ток, который создает внутри соленоида магнитное поле, однородное в средней его части. Магнитные силовые линии параллельны оси соленоида и оси анода и они перпендикулярны к направлению движения электронов. На рис. 42, б

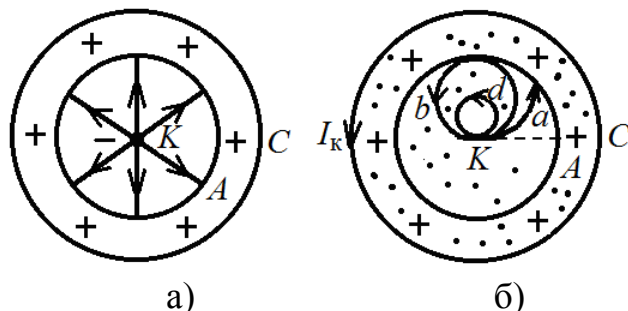


Рис. 42. Движение электрона в середине двухэлектродной лампы: а) без тока в соленоиде; б) с током в соленоиде

сечение соленоида C показано в виде одного витка, по которому течет ток против часовой стрелки. Магнитные силовые линии перпендикулярны чертежу и направлены к нам (точки на рис. 42, б). При движении электрона в магнитном поле на него действует сила Лоренца. Так как скорость электрона перпендикулярна силовым линиям магнитного поля, то $\sin(\vec{v} \wedge \vec{B}) = 1$ и

$$F_{\text{Л}} = evB.$$

Сила Лоренца всегда перпендикулярна вектору скорости и является центростремительной силой. Под действием этой силы траектории электронов будут искривляться.

Для вывода формулы расчета удельного заряда e/m электрона используем формулу (102). Из этой формулы получим

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{BR}, \quad (107)$$

где v – скорость электрона у анода, R – радиус траектории электрона, B – индукция магнитного поля.

Индукция магнитного поля соленоида определяется по формуле

$$B = \mu \mu_0 I_{\text{Л}} n, \quad (108)$$

где n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида; $\mu = 1$, так как внутри лампы вакуум; $I_{\text{Л}}$ – сила тока в соленоиде, измеряется миллиамперметром.

Скорость электрон приобретает под действием электрического поля между анодом и катодом. Если разность потенциалов между анодом и катодом равна U , то работа сил поля при перемещении электрона определяется по

формуле

$$A = eU.$$

В результате выполнения этой работы кинетическая энергия электрона возрастает. Работа сил поля равна изменению кинетической энергии:

$$A = eU = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

где v_0 – скорость электрона при вылете из катода; v – скорость электрона у анода. Если $v \gg v_0$, то

$$eU = \frac{mv^2}{2}.$$

Отсюда найдем скорость и подставим ее значение в формулу (107):

$$v = \sqrt{2eU/m};$$

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{BR} \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Возведем последнее выражение в квадрат и решим полученное выражение относительно e/m :

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{(BR)^2}, \quad (109)$$

где анодное напряжение U измеряется вольтметром.

Нужно определить радиус траектории R . Из формулы (102) видно, что при заданной скорости радиус траектории обратно пропорционален индукции магнитного поля. При малом токе в соленоиде индукция поля мала, радиус траектории велик (кривая a на рис. 42, б). С увеличением тока в соленоиде радиус траектории уменьшается, и при некотором значении тока I_E электрон будет двигаться по траектории b . В этом случае электрон пролетит мимо анода и вернется к катоду. Анодный ток станет равным нулю. При дальнейшем усилении магнитного поля радиус траектории будет уменьшаться, анодный ток останется равным нулю. Нужно измерить ток в соленоиде I_E именно в тот момент, когда электроны перемещаются по траекториям b , которые назовем критическими. В этом случае, как видно из рис. 42, б, радиус траектории равен половине радиуса анода: $R = r_A/2$. Радиус анода – величина известная.

Подставим в формулу (109) значения B и R :

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{(\mu_0 \cdot I_E \cdot n \cdot r_A)^2}. \quad (110)$$

Так как μ_0 , n , r_A – величины постоянные, формулу можно преобразовать:

$$\frac{e}{m} = A \frac{U}{I_E^2}, \quad (111)$$

где $A = \frac{8}{(\mu_0 \cdot n \cdot r_A)^2}$ можно рассчитать до начала измерений.

При выполнении работы следует учесть, что скорости теплового движе-

ния электронов в металле неодинаковы, следовательно, электроны вылетают из катода с различными скоростями и с различными кинетическими энергиями $mv_0^2/2$. Начальными энергиями некоторых электронов нельзя пренебрегать, для них полученные формулы несправедливы. Их скорости у анода тоже велики. Нет необходимости добиваться их движения по критической траектории, и поэтому не следует добиваться равенства нулю анодного тока. Медленно изменяя ток в соленоиде, нужно отметить окончание резкого спада анодного тока. В этот момент записать значение тока в соленоиде I_E .

3.2 Способ б: Определение удельного заряда электрона с помощью электронно-лучевой трубки

Приборы и принадлежности: Электронно-лучевая трубка на штативе, компас, угломер.

Электронно-лучевая трубка представляет собой стеклянную колбу, откачанную до высокого вакуума. В колбе находится ряд электродов, необходимых для получения узкого пучка электронов (рис. 43). На рисунке: 1 – подогреваемый катод, испускающий электроны; 2 – модулятор, регулирующий интенсивность электронного пучка; 3 и

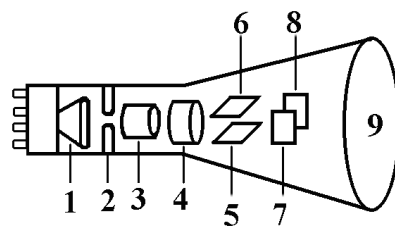


Рис. 43. Электронно-лучевая трубка

– два анода, ускоряющие электроны и фокусирующие электронный пучок на экран; 5 и 6 – пластины, отклоняющие электроны в вертикальном направлении, если на них подано напряжение; 7 и 8 – пластины, отклоняющие электроны в горизонтальном направлении; 9 – экран, флуоресцирующий под действием ударов электронов. В данной работе на пластины 5, 6 и 7, 8 напряжение не подается, поэтому они не влияют на движение электронов.

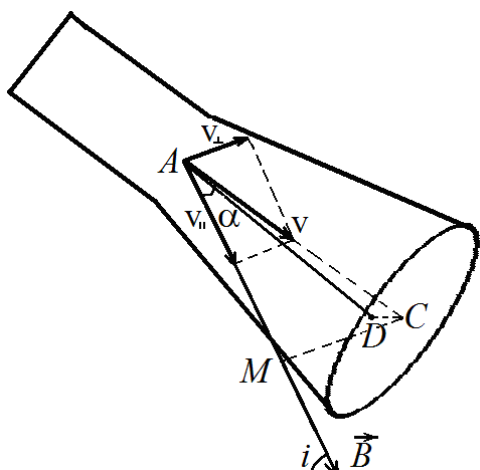


Рис. 44. Движение электронов в электронно-лучевой трубке, если ее ось направлена вдоль вектора индукции магнитного поля Земли

В работе используется влияние магнитного поля Земли на движение электронов внутри трубки. Если трубку расположить так, чтобы ее ось, а следовательно, и движение электронов были направлены вдоль вектора индукции магнитного поля Земли, то электроны будут двигаться прямолинейно, не испытывая действия силы Лоренца. В центре экрана образуется светящееся пятно. Если трубку повернуть так, чтобы движение электронов при вылете из второго анода было направлено под углом α к вектору $\vec{B}$ (рис. 44), то электроны будут двигаться по винтовой линии. Внутри трубки электроны успеют пройти небольшой отрезок винтовой линии AD , вследствие чего светящееся пятно на экране сместится в точку D . Обозначим смещение пятна CD через d .

Если спроецировать отрезок винтовой линии AD и экран трубки на плоскость, перпендикулярную вектору $\vec{B}$, то получим картину, изображенную на рис. 45. Проекция винтовой линии на плоскость, перпендикулярную $\vec{B}$, представляет собой окружность радиуса R , который определяется по формуле (105). Из этой формулы можно найти удельный заряд электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{v \sin \alpha}{BR}. \quad (112)$$

Проекция отрезка винтовой линии AD представляет дугу окружности MD . Из рис. 45 можно определить радиус окружности R . Из прямоугольного треугольника KOD следует

$$R^2 = (R - d)^2 + l^2.$$

Отсюда

$$R = \frac{d^2 + l^2}{2d}.$$

Из рис. 44 видно, что $l = MC = AC \cdot \sin \alpha$.

Пусть $AC = L$, тогда

$$R = \frac{d^2 + L^2 \sin^2 \alpha}{2d}. \quad (113)$$

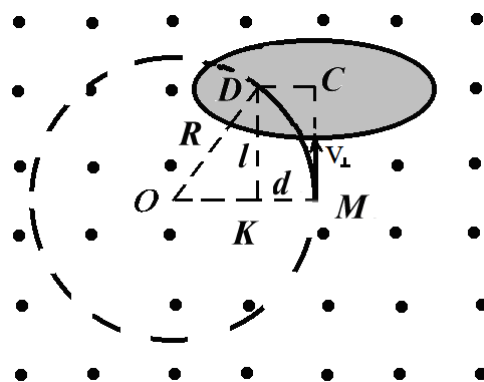


Рис. 45. Проекция движения электронов на плоскость, перпендикулярную вектору магнитного поля Земли

Расстояние L от второго анода до экрана известно. Скорость v электронов при вылете из второго анода определяется по формуле $v = \sqrt{2eU/m}$, где U – разность потенциалов между вторым анодом и катодом.

Подставив значение скорости в формулу (112), получим

$$\frac{e}{m} = \frac{\sin \alpha}{BR} \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

После возведения в квадрат и сокращения на e/m получим

$$\frac{e}{m} = \frac{2U \sin^2 \alpha}{(BR)^2}.$$

Подставим в эту формулу значение радиуса (113):

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B^2} \cdot \frac{d^2 \sin^2 \alpha}{(d^2 + L^2 \sin^2 \alpha)^2}. \quad (114)$$

Если $L^2 \sin^2 \alpha \gg d^2$, то формула приобретает вид

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B^2 L^4} \cdot \frac{d^2}{\sin^2 \alpha}. \quad (115)$$

Индукция магнитного поля на широте Одессы $B \approx 4 \cdot 10^{-5}$ Оё, угол наклона вектора $\vec{B}$ к горизонтальной плоскости $i = 60^\circ$. Напряжение U между катодом и вторым анодом известно.

4 Обработка результатов измерений (см. лабораторную работу №2-2)

5 Порядок выполнения работы

5.1 Способ а: Определение удельного заряда электрона с помощью двухэлектродной электронной лампы

1. Собрать схему измерения (см. рис. 41).
2. Записать постоянные параметры установки и рассчитать постоянную $A = 8/(\mu_0 \cdot n \cdot r_A)^2$.
3. Замкнуть цепь накала и подождать, пока катод прогреется.
4. Замкнуть ключ K_1 и с помощью потенциометра P_1 установить на вольтметре напряжение, указанное преподавателем.
5. Замкнуть ключ K_2 и с помощью потенциометра P_2 , постепенно увеличивая ток в соленоиде, уменьшить анодный ток до окончания его резкого спада.
6. Записать в таблицу значение тока в соленоиде I_E и анодное напряжение U .
7. Выполнить аналогичные измерения для двух других значениях анодного напряжения.
8. Рассчитать значение удельного заряда электрона по формуле (111).
9. Рассчитать среднее значение e/m , абсолютную и относительную погрешности измерения.

5.2 Способ б: Определение удельного заряда электрона с помощью электронно-лучевой трубки

1. Включить источник питания и подождать, пока нагреется катод.
2. Электронно-лучевую трубку с помощью компаса расположить в плоскости магнитного меридиана так, чтобы ее ось образовала угол 60° с горизонтальной плоскостью, была направлена вдоль вектора $\vec{B}$.
3. С помощью ручек управления расположить светящееся пятно в центре C экрана.
4. Повернуть трубку в вертикальной плоскости на угол $\alpha = 30^\circ$ и измерить смещение светящегося пятна d .
5. Измерить смещение при нескольких значениях угла α .
6. Рассчитать e/m для всех измерений с помощью формулы (115).
7. Рассчитать среднее значение отношения e/m , абсолютную и относительную погрешности измерений.

6 Контрольные вопросы

1. Что называется силой Лоренца? От чего зависит сила Лоренца?
2. Как определяется направление силы Лоренца для положительных и отрицательных зарядов?
3. Как движется заряженная частица в магнитном поле, если: а) скорость параллельна индукции поля, б) скорость перпендикулярна индукции, в) скорость образует произвольный угол α с индукцией поля?
4. Как определяется удельный заряд электрона с помощью двухэлектродной электронной лампы? Нарисовать схему и вывести формулу расчета.

5. Как определяется удельный заряд электрона с помощью электронно-лучевой трубки? Нарисовать схему и вывести формулу расчета.

7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 3-2

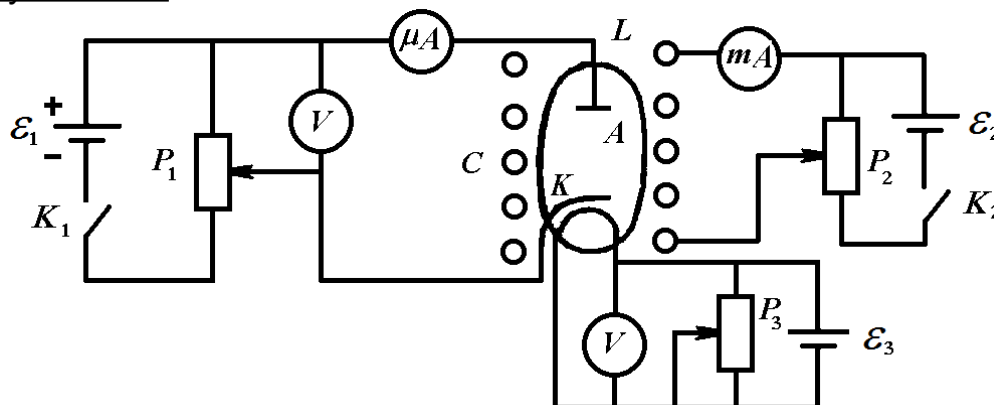
I. Домашнее задание.

II. Протокол выполнения лабораторной работы № 3-2. Способ а: Определение удельного заряда электрона с помощью двухэлектродной электронной лампы.

1) Тема: Определение удельного заряда электрона.

2) Цель работы: Определить отношение e/m электронов, используя их движение в электрическом и магнитном полях.

3) Схема установки:



L – двухэлектродная электронная лампа; C – соленоид (кружочками изображены пересечения витков соленоида); P_1, P_2, P_3 – потенциометры; V – вольтметры; μA – микроамперметр; mA – миллиамперметр.

4) Таблица приборов

№ п/п	Наименование	Тип	Заводской номер	Предел шкалы	Цена деления	Абсолютная погрешность (класс точности)
1	Миллиамперметр					
2	Вольтметр					

5) Формулы расчета величин:

5.1) Постоянная

$$A = \frac{8}{(\mu_0 \cdot n \cdot r_A)^2},$$

где μ_0 – магнитная постоянная; n – количество витков, приходящихся на единицу длины соленоида; r_A – радиус анода.

5.2) Удельный заряд электрона

$$\frac{e}{m} = A \frac{U}{I_E^2},$$

где I_E – сила тока в соленоиде; U – анодное напряжение.

5.3) Абсолютная погрешность измерения удельного заряда электрона

$$\Delta \left(\frac{e}{m} \right) = t_{\alpha; n} \cdot \sqrt{\frac{\sum \Delta (e/m)_i^2}{n(n-1)}},$$

где $\alpha = 0,95$ – доверительная вероятность; $n = 3$ – число измерений;
 $t_{0,95; 3} = 4,3$ – коэффициент Стьюдента;

5.4) Относительная погрешность измерения удельного заряда электрона в процентах

$$\delta \left(\frac{e}{m} \right) = \frac{\Delta (e/m)}{\langle e/m \rangle} \cdot 100\%$$

6) Таблица результатов прямых измерений :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ А·м/А} \cdot \text{м}, \quad n = \dots, \quad r_A = \dots \text{ м.}$$

№	U	$I_{\hat{e}}, \text{А}$	$e/m, \hat{e}/\hat{a}$	$\Delta (e/m)_i, \hat{e}/\hat{a}$	$\Delta (e/m)_i^2, (\hat{e}/\hat{a})^2$
1					
2					
3					
			$\langle e/m \rangle =$		$\sum \Delta (e/m)_i^2 =$

7) Расчеты физических величин:

7.1) Расчет удельного заряда электрона

$$\left(\frac{e}{m} \right)_1 = \dots \cdot \frac{\dots}{(\dots)^2} = \frac{\hat{e}}{\hat{a}}; \quad \left(\frac{e}{m} \right)_2 = \dots \cdot \frac{\dots}{(\dots)^2} = \frac{\hat{e}}{\hat{a}}; \quad \left(\frac{e}{m} \right)_3 = \dots \cdot \frac{\dots}{(\dots)^2} = \frac{\hat{e}}{\hat{a}}.$$

7.2) Абсолютная погрешность измерения удельного заряда электрона:

$$\Delta \left(\frac{e}{m} \right) = 4,3 \cdot \sqrt{\frac{\sum \dots}{3(3-1)}} = \dots \frac{\hat{e}}{\hat{a}}.$$

7.3) Относительная погрешность измерения удельного заряда электрона в процентах:

$$\delta \left(\frac{e}{m} \right) = \frac{\dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots\%.$$

8) Окончательные результаты:

$$\frac{e}{m} = (\langle e/m \rangle \pm \Delta (e/m))_{\alpha} \frac{\hat{e}}{\hat{a}} = (\dots \pm \dots)_{0,95} \frac{\hat{e}}{\hat{a}}; \quad \delta \left(\frac{e}{m} \right) = \dots\%.$$

9) Вывод:

10) Работу выполнил(а): _____ (фамилия разборчиво).

Работу проверил:

11) Дата.

7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 3-2

I. Домашнее задание.

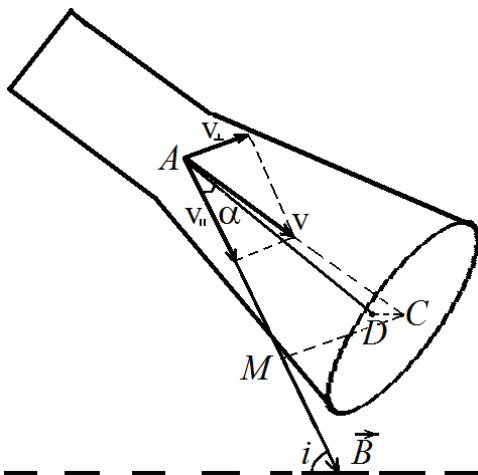
II. Протокол выполнения лабораторной работы № 3-2. Способ б:

Определение удельного заряда электрона с помощью электронно-лучевой трубки.

1) Тема: Определение удельного заряда электрона.

2) Цель работы: Определить отношение e/m электронов, используя их движение в электрическом и магнитном полях.

3) Схема установки:



Электронно-лучевая трубка

4) Таблица приборов:

№ п/п	Наименование	Тип	Заводской номер	Предел шкалы	Цена деления	Абсолютная погрешность (класс точности)
1	Электронно-лучевая трубка					
2	компас					
3	транспортёр					

5) Формулы расчета величин

5.1) Удельный заряд электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B^2 L^4} \cdot \frac{d^2}{\sin^2 \alpha},$$

где B - индукция магнитного поля; U - разность потенциалов между вторым анодом и катодом известна; L - расстояние от второго анода до экрана известно; d - смещение светового пятна; α - угол.

5.2) Абсолютная погрешность измерения удельного заряда электрона

$$\Delta \left(\frac{e}{m} \right) = t_{\alpha; n} \cdot \sqrt{\frac{\sum \Delta (e/m)_i^2}{n(n-1)}},$$

где $\alpha = 0,95$ - доверительная вероятность; $n = 3$ - число измерений; $t_{0,95; 3} = 4,3$ - коэффициент Стьюдента.

5.3) Относительная погрешность измерения удельного заряда электрона в процентах:

$$\delta \left(\frac{e}{m} \right) = \frac{\Delta (e/m)}{\langle e/m \rangle} \cdot 100\%.$$

6) Таблица результатов измерений

$$B = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}; L = \dots \text{ м}; U = \dots \text{ В}.$$

№	α	$d, \text{ м}$	$e/m, \text{ Кл/кг}$	$\Delta (e/m)_i, \text{ Кл/кг}$	$\Delta (e/m)_i^2, (\text{Кл/кг})^2$
1.					
2.					
3.					
			$\langle e/m \rangle =$		$\sum \Delta (e/m)_i^2 =$

7) Расчеты физических величин:

7.1) Расчет удельного заряда электрона

$$\left(\frac{e}{m} \right)_1 = \frac{8 \cdot \dots}{(\dots)^2 \cdot (\dots)^4} \cdot \frac{(\dots)^2}{\sin^2 \dots} = \frac{\hat{E}}{\hat{a}};$$

$$\left(\frac{e}{m} \right)_2 = \frac{8 \cdot \dots}{(\dots)^2 \cdot (\dots)^4} \cdot \frac{(\dots)^2}{\sin^2 \dots} = \frac{\hat{E}}{\hat{a}};$$

$$\left(\frac{e}{m} \right)_3 = \frac{8 \cdot \dots}{(\dots)^2 \cdot (\dots)^4} \cdot \frac{(\dots)^2}{\sin^2 \dots} = \frac{\hat{E}}{\hat{a}}.$$

7.2) Абсолютная погрешность измерения удельного заряда электрона:

$$\Delta \left(\frac{e}{m} \right) = 4,3 \cdot \sqrt{\frac{\sum \dots}{3(3-1)}} = \dots \frac{\hat{E}}{\hat{a}}.$$

7.3) Относительная погрешность измерения удельного заряда электрона в процентах:

$$\delta \left(\frac{e}{m} \right) = \frac{\dots}{\dots} \cdot 100\% = \dots\%.$$

8) Окончательные результаты:

$$\frac{e}{m} = (\langle e/m \rangle \pm \Delta (e/m))_{0,95} \frac{\hat{E}}{\hat{a}} = (\dots \pm \dots)_{0,95} \frac{\hat{E}}{\hat{a}}; \quad \delta \left(\frac{e}{m} \right) = \dots\%.$$

9) Вывод:

10) Работу выполнил(а): _____ (фамилия разборчиво).

Работу проверил:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-3

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

1 Цель работы:

1. Изучить явление электромагнитной индукции и его законы.
2. Изучить баллистический метод измерения индукции магнитного поля.
3. Исследовать магнитное поле соленоида.

2 Ключевые положения

2.1 Явление электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции состоит в том, что при любом изменении магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную контуром, в последнем возникает ЭДС индукции, численно равная скорости изменения магнитного потока.

$$\mathcal{E}_{\text{ѳ}} = - \frac{d\hat{\Phi}}{dt}. \quad (116)$$

Нужно обратить внимание на то, что ЭДС индукции зависит не от величины магнитного потока и не от его изменения, а от скорости его изменения. Если контур замкнут, то по нему течет индукционный ток. Знак (–) в уравнении (116) выражает закон Ленца, определяющий направление ЭДС.

ЭДС индукции имеет такое направление, при котором магнитное поле индукционного тока препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего эту ЭДС.

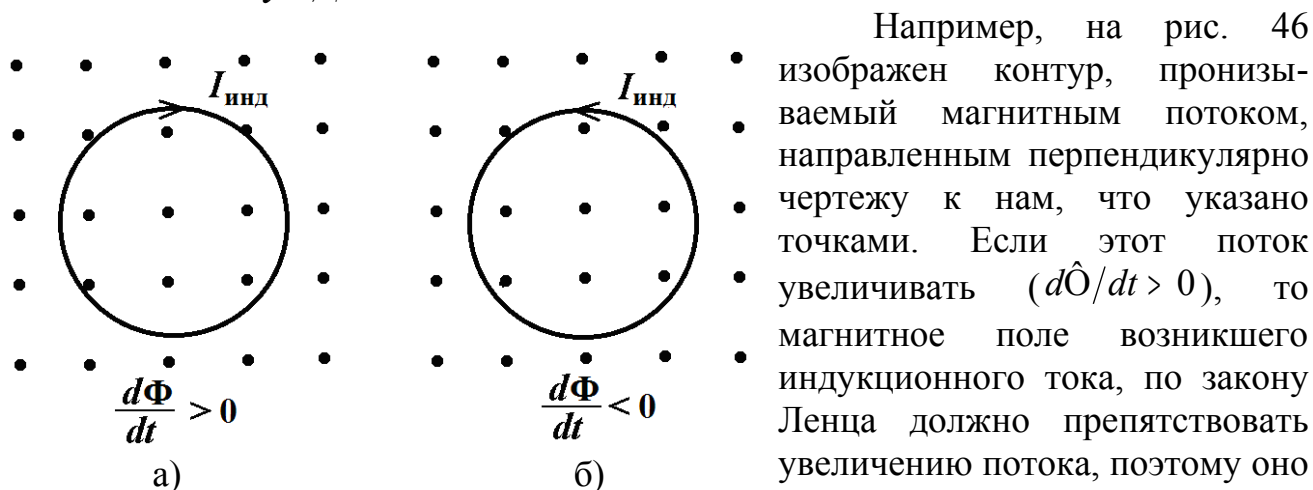


Рис. 46. Индукционный ток, возникающий в контуре:

а) при увеличении потока; б) при уменьшении потока

По правилу буравчика можно определить, в каком направлении потечет индукционный ток. Если поле тока направлено за чертеж, то ток течет по часовой стрелке. Если внешний магнитный поток уменьшается ($d\hat{\Phi}/dt < 0$), то магнитное поле индукционного тока совпадает по направлению с внешним полем, препятствуя уменьшению магнитного потока. Индукционный ток в этом случае течет против часовой стрелки (рис. 44, б). Итак, магнитное поле индукционного тока может совпадать по направлению с внешним магнитным

полем и может быть противоположным ему, в зависимости от того, уменьшается или увеличивается магнитный поток, пронизывающий контур.

Из формулы (96) видно, что изменения магнитного потока можно вызвать либо изменением индукции магнитного поля, оставляя контур неподвижным, либо поворотом контура в неизменном магнитном поле, либо изменением его площади.

В случае, когда контур неподвижен, а изменяется магнитное поле, возникновение ЭДС индукции объясняется тем, что изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, под действием которого свободные заряды в проводнике приходят в движение. Это поле существенно отличается от электростатического. Электростатическое поле потенциально, его силовые линии не замкнуты, начинаются и заканчиваются на зарядах, и циркуляция вектора $\vec{A}$ по любому замкнутому контуру равна нулю. Индукционное электрическое поле не потенциальное, а вихревое, его силовые линии замкнуты и охватывают магнитные силовые линии, и циркуляция вектора напряженности отлична от нуля. Вихревое электрическое поле существует независимо от наличия проводника. С помощью проводника мы только обнаруживаем это поле, регистрируя • • • •
индукционный ток или ЭДС.

В случае, когда незамкнутый проводник длиной l перемещается в неизменном магнитном поле, возникновение ЭДС индукции можно объяснить действием силы Лоренца. Если проводник (рис. 47) перемещать перпендикулярно магнитному полю со скоростью $\vec{v}$, то свободные электроны начнут смещаться перпендикулярно $\vec{v}$ и $\vec{B}$ со скоростью $\vec{u}$. Скорость $\vec{u}$ как правило, намного меньше $\vec{v}$, поэтому сила Лоренца направлена практически вдоль проводника. Относительно магнитного поля скорость движения электрона равна векторной сумме скоростей $\vec{v}$ и $\vec{u}$. Сила Лоренца перпендикулярна результирующей скорости

$\vec{v}_\delta$. Составляющая силы $\vec{F}_\parallel$, параллельная проводнику, перемещает заряды, создавая на одном конце проводника избыток электронов, на другом – их недостаток. Смещение электронов осуществляется до тех пор, пока сила Лоренца не уравнивается с силой Кулона F_E , которая возникает в результате образования индукционного электрического поля:

$$evB \sin(\vec{v} \wedge \vec{B}) = e\mathcal{E}_{\text{iia}}.$$

Движение электронов прекращается, а на концах проводника возникает разность потенциалов

$$U = vBl \sin(\vec{v} \wedge \vec{B}). \quad (117)$$

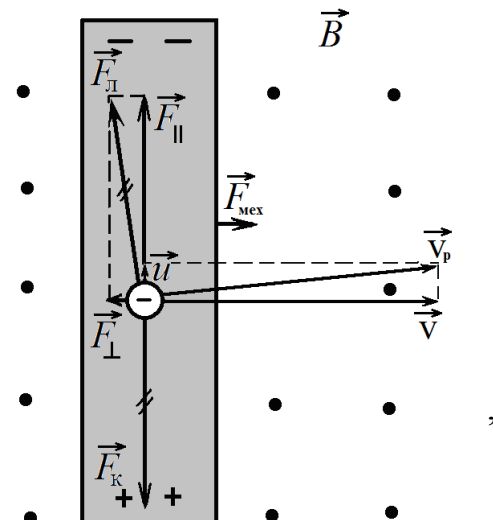


Рис. 47. Возникновение ЭДС индукции в движущемся проводнике

Составляющая силы Лоренца $F_{\perp}$ препятствует движению проводника и компенсируется внешней механической силой $F_{\text{ia}o}$, перемещающей проводник.

Выражение (116) для ЭДС индукции является универсальным и не зависит от способа изменения магнитного потока. Если весь замкнутый контур перемещать поступательно в однородном магнитном поле, то в нем не всегда возникает ЭДС индукции. Например, если контур $ABCD$ (рис. 48, а) перемещать в однородном магнитном поле поступательно, то на участках AB и CD возникают встречные ЭДС, алгебраическая сумма которых равна нулю. Ток в контуре не потечет. Чтобы в этом контуре возникла ЭДС индукции, нужно его вращать (рис. 48, б). Тогда на участках AB и CD возникнут ЭДС, действующие согласованно, и их алгебраическая сумма отлична от нуля.

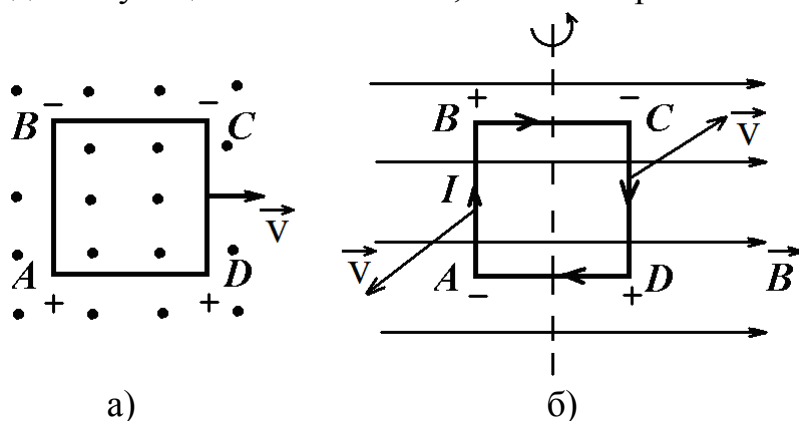


Рис. 48. Контур в магнитном поле: а) поступательное перемещение ; б) вращательное перемещение

Если сравнить оба примера, то можно заметить, что при поступательном движении контура в однородном поле, магнитный поток, пронизывающий площадь $ABCD$, не изменяется и ЭДС индукции равна нулю; при вращении контура магнитный поток изменяется и ЭДС отлична от нуля. Следовательно, и в

случае движения контура в неизменном магнитном поле необходимым условием возникновения ЭДС индукции является изменение магнитного потока, пронизывающего площадь, охватываемую контуром.

Индукционный ток, протекая по контуру с сопротивлением R , за время dt переносит через поперечное сечение проводника заряд dq , связанный с силой тока соотношением

$$dq = Idt .$$

Так как $I = \mathcal{E}_{\text{ia}o} / R$, а $\mathcal{E}_{\text{ia}o} = - d\Phi / dt$,

тогда

$$dq = - \frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt} dt = - \frac{d\Phi}{R} .$$

После интегрирования получим

$$q = \int_0^q dq = - \frac{1}{R} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi , \quad \text{или} \quad q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} . \quad (118)$$

Индукционный заряд, прошедший по контуру, зависит только от разности начального и конечного значений магнитного потока, пронизывающего контур и от сопротивления контура.

3 Описание установки и методики измерений

Приборы и принадлежности: соленоид, миллиамперметр, источник тока, потенциометр, переключатель, измерительная катушка, баллистический гальванометр, добавочное сопротивление.

В основе баллистического метода измерения индукции магнитного поля лежит явление электромагнитной индукции.

Для выполнения работы следует собрать схему, изображенную на рис. 49.

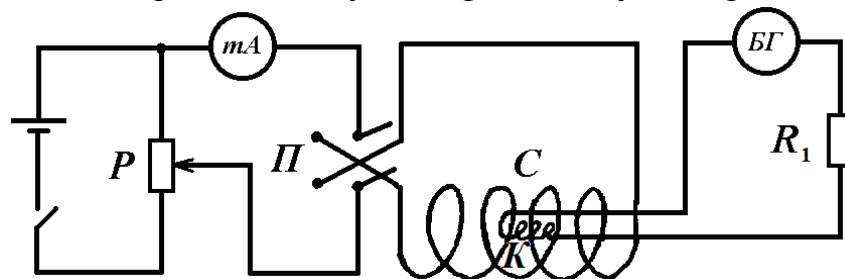


Рис. 49. Схема измерения индукции магнитного поля баллистическим методом

На рисунке: C – соленоид; Π – переключатель; P – потенциометр; mA – миллиамперметр; K – измерительная катушка; $БГ$ – баллистический гальванометр; R_1 – добавочное сопротивление.

Измерительная катушка K малого диаметра и малой длины, содержащая N витков и соединенная с баллистическим гальванометром $БГ$, помещается в исследуемое магнитное поле так, чтобы плоскость витков была перпендикулярна полю. При протекании тока по соленоиду катушку будет пронизывать поток Φ_1 . Для возбуждения в катушке ЭДС индукции нужно изменить магнитный поток, пронизывающий ее витки. С помощью переключателя Π изменяют направление тока в соленоиде, не изменяя его величины. Магнитный поток тоже изменит свое направление, не изменяя величины: $\hat{O}_2 = -\hat{O}_1$. В период изменения потока по цепи измерительной катушки потечет индукционный ток, в результате чего световой зайчик на шкале баллистического гальванометра отклонится на α делений шкалы.

Баллистический гальванометр – это зеркальный гальванометр, рамка которого подвешена на тонком подвесе и имеет большой момент инерции, вследствие чего период T ее собственных колебаний велик (10 ... 30 с). К подвесу прикреплено зеркало. Луч света от осветителя попадает на зеркало, отражается от него и попадает на шкалу. В результате на шкале наблюдается световой зайчик, в центре которого находится тонкая темная полоска. Рамка находится в магнитном поле постоянного магнита, поэтому при прохождении тока она поворачивается в магнитном поле, вследствие чего световой зайчик перемещается вдоль шкалы. Для того чтобы отклонение зайчика было пропорционально заряду, нужно, чтобы время прохождения заряда по цепи было значительно меньше периода собственных колебаний рамки гальванометра ($t = T/11$). Тогда

$$q = C \cdot \alpha, \quad (119)$$

где α – отклонение зайчика в делениях шкалы; C – баллистическая постоянная гальванометра, показывающая, какой заряд отклоняет зайчик на одно деление шкалы.

Баллистическая постоянная указывается на гальванометре. Там же указывается сопротивление гальванометра и его критическое сопротивление

$R_{кр}$ – наибольшее значение сопротивления всей цепи гальванометра, при котором движение рамки апериодическое (без колебаний). Если сопротивление цепи больше критического, то рамка, а следовательно, и световой зайчик будет колебаться, долго не устанавливаясь на нуль. Если сопротивление цепи меньше критического, то движение рамки будет апериодическое, но возвращение на нуль после отклонения происходит медленнее, чем при критическом сопротивлении. С помощью добавочного сопротивления R_1 (см. рис. 49) доводят сопротивление цепи гальванометра до критического.

Таким образом, заряд, прошедший по цепи измерительной катушки K при быстром изменении тока в соленоиде, измеряется баллистическим гальванометром.

Как было показано выше, индукционный заряд прямо пропорционален изменению магнитного потока:

$$q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R},$$

где Φ_1 и Φ_2 – начальное и конечное значения магнитного потока, пронизывающего витки катушки K ; R – сопротивление цепи катушки. Так как в катушке N витков, то

$$q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} N. \quad (120)$$

Учитывая, что $\hat{O}_2 = -\hat{O}_1$ и получим

$$q = N \frac{2\hat{O}_1}{R}. \quad (121)$$

Магнитный поток связан с индукцией магнитного поля соотношением

$$\Phi = BS \cos(\vec{n} \wedge \vec{B}),$$

но, так как плоскость витков катушки перпендикулярна силовым линиям, $\cos(\vec{n} \wedge \vec{B}) = 1$, поэтому

$$\Phi = BS,$$

где S – площадь поперечного сечения катушки. Подставим значение Φ в выражение для заряда

$$q = \frac{2BSN}{R}, \quad (122)$$

откуда:

$$B = \frac{Rq}{2SN}. \quad (123)$$

Учитывая (119), получим

$$B = \frac{RC}{2SN} \alpha, \quad (124)$$

где α – отклонение зайчика гальванометра в делениях шкалы, возникающее при быстром изменении направления тока в соленоиде.

Хотя индукционный заряд не зависит от скорости изменения магнитного потока (см. (118)), изменять его нужно быстро, потому что отклонение

баллистического гальванометра пропорционально заряду при кратковременном протекании тока. Чтобы избежать ошибки в определении нулевого положения зайчика на шкале (его нулевое положение непостоянно), нужно, изменив направление тока в соленоиде, измерить отклонение α_1 , затем, когда зайчик вернется в нулевое положение, снова изменить направление тока и измерить отклонение зайчика α_2 в другую сторону. В формулу (124) подставляется среднее значение отклонений

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

Сопротивление R в формуле (124) – это сопротивление всей цепи катушки.

$$R = R_{\text{Г}} + R_{\text{А}} + R_1, \quad (125)$$

где $R_{\text{К}}$ – сопротивление катушки; $R_{\text{Г}}$ – сопротивление баллистического гальванометра; R_1 – добавочное сопротивление, дополняющее сопротивление цепи катушки до критического значения. Таким образом, $R = R_{\text{ср}}$. Величины $R_{\text{Г}}$, R_1 , $R_{\text{К}}$, S , N , C постоянные и написаны на установке. Поэтому формулу (124) можно преобразовать:

$$B = A \cdot \alpha, \quad (126)$$

где

$$A = \frac{RC}{2SN}. \quad (127)$$

Постоянную A можно рассчитать до начала измерений.

Измерительная катушка K может перемещаться вдоль оси соленоида и перпендикулярно ей, может выдвигаться за пределы соленоида. Поэтому измерения индукции производятся для различных точек поля соленоида, чтобы определить его характер.

4 Обработка результатов измерений (см. лабораторную работу № 2-2)

5 Порядок выполнения работы:

1. Собрать схему измерения (см. рис. 49).
2. Записать постоянные величины $R_{\text{Г}}$, R_1 , $R_{\text{К}}$, S , N , C и вычислить постоянную A по формуле (127).
3. Измерительную катушку поместить в центре соленоида.
4. Замкнуть цепь соленоида и с помощью потенциометра установить в цепи ток, указанный на установке.
5. Переключателем Π изменить направление тока в соленоиде и записать в таблицу показания гальванометра α_1 .
6. После возвращения светового зайчика на нуль снова изменить направление тока в соленоиде и записать показания гальванометра α_2 .
7. Передвинуть измерительную катушку на 2 см от центра вдоль оси соленоида и проделать аналогичные измерения α_1 и α_2 .
8. Передвигая катушку каждый раз на 2 см, дойти до точек, лежащих вне соленоида.

9. Вновь поместить катушку в центр соленоида и, перемещая ее перпендикулярно оси соленоида, измерить α_1 и α_2 в трех-четырех точках.
10. Поместить катушку вне соленоида на его оси и произвести аналогичные измерения.
11. Рассчитать индукцию магнитного поля B по формуле (126) для всех точек измерения.
12. Для точек, лежащих на оси соленоида, построить график зависимости B от расстояния r от этих точек до центра соленоида.

6 Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией магнитного поля и в каких единицах она измеряется?
2. Что называется магнитными силовыми линиями?
3. Что называется магнитным потоком?
4. В чем состоит явление электромагнитной индукции?
5. От чего зависит и как направлена ЭДС индукции?
6. От чего зависит индукционный заряд?
7. В чем состоит баллистический метод измерения индукции магнитного поля? Нарисовать схему и вывести расчетную формулу.
8. При каком условии отклонение зайчика баллистического гальванометра пропорционально величине заряда, прошедшего по цепи?
9. Какое сопротивление называется критическим?
10. Каково магнитное поле соленоида?

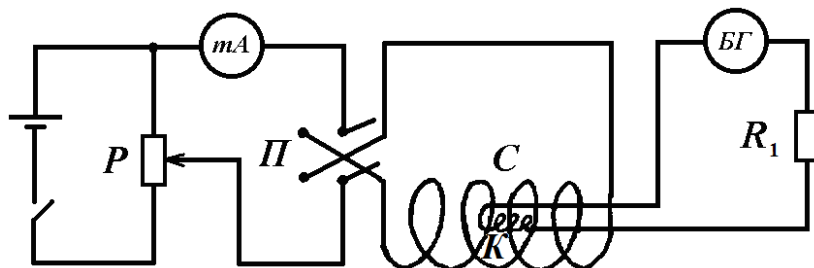
7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 3-3

I. Домашнее задание.

II. Протокол выполнения лабораторной работы № 3-3.

- 1) Тема: Исследование магнитного поля баллистическим методом.
- 2) Цель работы: Изучить явление электромагнитной индукции и его законы. Измерить индукцию магнитного поля соленоида.
- 3) Схема установки:



C – соленоид; Π – переключатель; P – потенциометр; mA – миллиамперметр; K – измерительная катушка; $BГ$ – баллистический гальванометр; R_1 – дополнительное сопротивление.

4) Таблица приборов:

№ п/п	Наименование	Тип	Заводской номер	Предел шкалы	Цена деления	Абсолютная погрешность (класс)
-------	--------------	-----	-----------------	--------------	--------------	--------------------------------

						точности)
1	Миллиамперметр					
2	Сопротивление R_1					

5) Формулы расчета величин:

5.1) Постоянная:

$$A = \frac{RC}{2SN}; \quad R = R_{\text{Г}} + R_{\text{А}} + R_1,$$

где $R_{\text{К}}$ – сопротивление катушки; $R_{\text{Г}}$ – сопротивление баллистического гальванометра; R_1 – дополнительное сопротивление, которое дополняет сопротивление цепи катушки до критического значения; C – баллистическая постоянная гальванометра; S – площадь поперечного сечения катушки; N – количество витков в катушке.

5.2) Индукция магнитного поля соленоида:

$$B = A \cdot \alpha,$$

где $\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ – среднее отклонение зайчика гальванометра в делениях шкалы.

6) Таблица результатов прямых измерений:

$$R_{\text{Г}} = \dots; \quad R_{\text{А}} = \dots; \quad R_1 = \dots; \quad \tilde{N} = \dots; \quad S = \dots^2; \quad N = \dots$$

№	α_1	α_2	α	$r, \text{мм}$	$B, \text{Оэ}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

7) Расчеты физических величин:

7.1) Постоянная:

$$A = \frac{(\dots + \dots + \dots) \cdot \dots}{2 \cdot \dots \cdot \dots} = \dots$$

7.2) Индукция магнитного поля соленоида:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}; \quad B_i = A \cdot \alpha_i = \dots = \dots \text{Оэ}.$$

8) Окончательные результаты:

Представить в виде графика зависимости магнитной индукции от расстояния этих точек до центра соленоида $B(r)$.

9) Вывод:

10) Работу выполнил(а): _____ (фамилия разборчиво).

Работу проверил:

11) Дата.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-4

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

1 Цель работы:

1. Исследовать зависимость магнитной индукции в ферромагнетике от напряженности магнитного поля.
2. Исследовать зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.

2 Ключевые положения

2.1 Намагничивание вещества

Для объяснения магнитных свойств различных веществ необходимо рассмотреть действие магнитного поля на движущиеся заряды в молекулах и атомах вещества, в частности на “электроны”, вращающиеся по некоторым орбитам.

Если тело не намагничено, в ориентациях электронных орбит нет никакого порядка и результирующий магнитный момент равен нулю.

Выясним теперь действие магнитного поля на вращение электрона в плоскости, перпендикулярной внешнему магнитному полю. Допустим, что в однородном магнитном поле электрон вращается вокруг заряда q по окружности радиуса R со скоростью v_0 .

Кулоновская сила

$$F_E = \frac{eq}{4\pi \epsilon_0 R^2},$$

является центростремительной $F_{\text{с}}$, и поэтому в отсутствие поля

$$\frac{eq}{4\pi \epsilon_0 R^2} = \frac{mv_0^2}{R}; \quad v_0 = \sqrt{\frac{eq}{4\pi \epsilon_0 R^2 \cdot m}}. \quad (128)$$

Величина магнитного момента орбиты

$$p_0 = J \cdot S = \frac{1}{2} ev_0 R. \quad (129)$$

При наличии поля B_0 на электрон действует сила Лоренца $F_E = evB_0$. Сила Лоренца, в зависимости от направления движения электрона по орбите, будет направлена либо от оси (рис. 50, а), либо к оси вращения (рис. 50, б). Тогда вместо формул (128) и (129) следует написать:

$$\frac{eq}{4\pi \epsilon_0 R^2} = \frac{mv^2}{R} \pm evB_0; \quad p = J \cdot S = \frac{1}{2} evR. \quad (130)$$

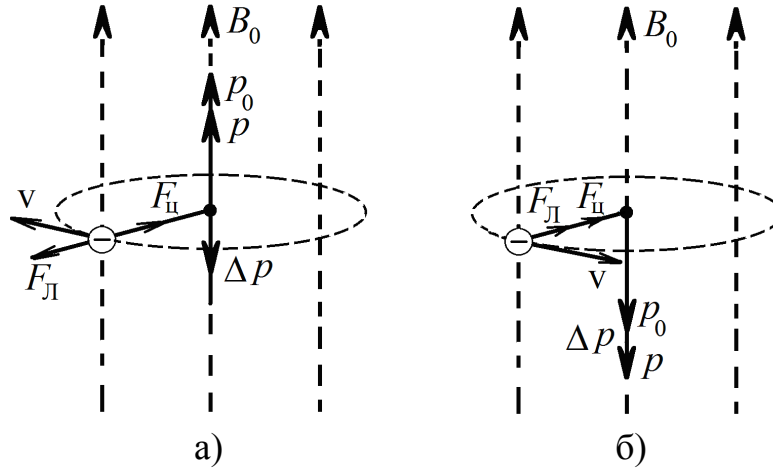


Рис. 50. Движение электрона во внешнем магнитном поле

Следовательно, скорость v движения электрона по орбите при наличии внешнего магнитного поля будет отличаться от скорости v_0 в отсутствие поля. Найдем разность этих скоростей из выражений (130) и (128):

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{mv_0^2}{R} \pm evB_0; \quad \frac{evB_0R}{m} = v^2 - v_0^2 \approx 2v(v - v_0); \quad v - v_0 \approx \pm \frac{eB_0R}{2m}.$$

Изменение величины магнитного момента орбиты

$$\Delta p = p - p_0 = \frac{1}{2}eR(v - v_0) \approx \frac{e^2R^2B_0}{4m}.$$

При любом направлении вращения электрона вектор $\Delta \vec{p}$ направлен против внешнего поля. Таким образом, для орбиты, изображенной на рис. 50, а, силы $F_{\vec{v}}$ и $F_{\vec{E}}$ направлены в разные стороны, при этом скорость вращения электрона становится меньше, чем в отсутствие поля, то есть $v_0 > v$, и поэтому $p_0 > p$. Вектор $\Delta \vec{p}$ направлен против $\vec{p}$ и против $\vec{A}_0$. Для орбиты, изображенной на рис. 50, б, сила $F_{\vec{E}}$ направлена к оси вращения, поэтому $v > v_0$, и следовательно, $p > p_0$. Вектор $\Delta \vec{p}$ направлен в ту же сторону, куда и $\vec{p}$, тоже против поля $\vec{A}_0$. Таким образом, для каждой орбиты изменение магнитного момента

$$\Delta \vec{p} = - \frac{e^2R^2}{4m} \vec{B}_0. \quad (131)$$

В диамагнетиках суммарный магнитный момент электронных орбит каждого атома или молекулы в отсутствие внешнего поля равен нулю. Это возможно, если в атомах существуют орбиты с противоположными направлениями вращения электронов, орбиты типа а и б на рис. 50. При внесении вещества в магнитное поле каждая орбита независимо от направления движения электрона, приобретает индуцированный магнитный момент $\Delta \vec{p}$, всегда направленный против поля. Это называется **диамагнитным эффектом**.

Если ось вращения электрона на орбите была расположена под углом к $\vec{A}_0$, то она начинает описывать коническую поверхность — прецессировать, подобно юле в таком направлении, что магнитный момент электронной орбиты

в направлении $\vec{A}_0$ уменьшается, а в противоположном направлении – увеличивается, уменьшая результирующее поле. В рассмотренном ранее случае перпендикулярной плоскости орбиты к $\vec{A}_0$ прецессия проявляется только в виде увеличения или уменьшения угловой скорости электрона.

Итак:

- 1) диамагнетизм есть свойство, присущее всем веществам;
- 2) каждое вещество противодействует проникновению магнитного поля внутрь его объема;
- 3) диамагнитный эффект не связан с упорядочением расположения электронных орбит;
- 4) вещества являются **диамагнетиками**, только если их атомы и молекулы не имеют собственного магнитного момента; тогда диамагнитный эффект является единственной реакцией вещества на воздействие внешнего магнитного поля. В парамагнетиках и ферромагнетиках намагниченность, обусловленная упорядочением расположения электронных орбит, значительно превосходит диамагнитный эффект.

Парамагнетиками являются вещества, у которых атомы или молекулы в отсутствие внешнего поля обладают некоторым магнитным моментом, например, если они содержат нечетное число электронов. Тепловое движение создает беспорядок в ориентациях их магнитных моментов, поэтому при отсутствии внешнего поля суммарная проекция векторов $\vec{P}$ на любое направление равна нулю. При наличии поля происходит некоторая ориентация магнитных моментов атомов, и тело намагничивается.

При очень низких температурах, когда дезориентирующее действие теплового движения очень мало, наблюдается магнитное насыщение, когда все элементарные магнитные моменты ориентируются по полю, и дальнейшее увеличение внешнего поля не вызывает увеличения намагниченности. При обычных температурах такое насыщение можно получить только в очень сильных магнитных полях в специальных экспериментах.

Таким образом, внешнее магнитное поле, во-первых, ориентирует магнитные моменты атомов в направлении поля, во-вторых, индуцирует дополнительные магнитные моменты, направленные противоположно внешнему полю. Вследствие этих явлений в веществе возникает внутреннее поле с индукцией $\vec{B}_{\text{аіодд}}$. Индукция результирующего поля $\vec{B}$ равна векторной сумме индукции поля макротока $\vec{B}_0$ и внутреннего поля атомов вещества $\vec{B}_{\text{аіодд}}$:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{аіодд}}.$$

У **диамагнетиков** (инертные газы, вода, цинк, ртуть, медь, золото, серебро и др.) магнитные моменты парных электронов ориентированы в противоположные стороны, так что магнитный момент атома в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю. При внесении диамагнетика в магнитное поле в его атомах индуцируются дополнительные магнитные моменты, направленные против поля. Индукция результирующего поля меньше индукции поля до внесения диамагнетика:

$B < B_0$, следовательно $\mu < 1$.

У **парамагнетиков** (кислород, редкоземельные элементы, щелочноземельные металлы) в отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов отличны от нуля, но ориентированы во всевозможных направлениях, поэтому суммарный магнитный момент всех атомов равен нулю. При внесении парамагнетика в магнитное поле магнитные моменты атомов приобретают преимущественную ориентацию, вследствие чего суммарный магнитный момент становится отличным от нуля и направление его совпадает с направлением внешнего поля. Парамагнетики усиливают поле, хотя и незначительно:

$B > B_0$, следовательно $\mu > 1$.

У диамагнетиков и парамагнетиков μ постоянна, а B линейно зависит от H (рис. 51). Графики этих зависимостей изображены на рис. 51 штриховыми линиями (в действительности они расположены гораздо ближе к графику для вакуума $\mu = 1$).

Ферромагнетики (железо, никель, кобальт, ряд сплавов) обладают особыми свойствами:

- 1) у них μ может достигать очень больших значений (10^5);
- 2) они могут оставаться намагниченными в отсутствие внешнего магнитного поля;
- 3) μ не является постоянной величиной, а зависит от напряженности поля H ;
- 4) зависимость B от H носит сложный характер (см. рис. 51);
- 5) у них наблюдается явление гистерезиса (рис. 52).

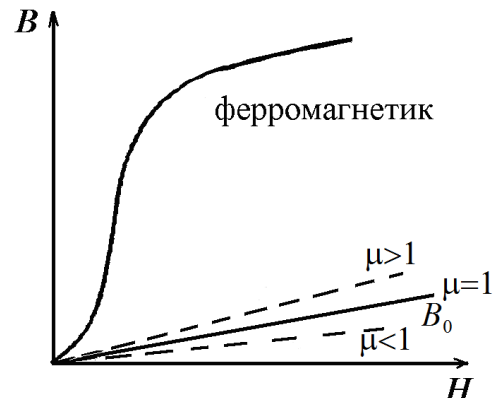


Рис. 51. График зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля для веществ с различными μ

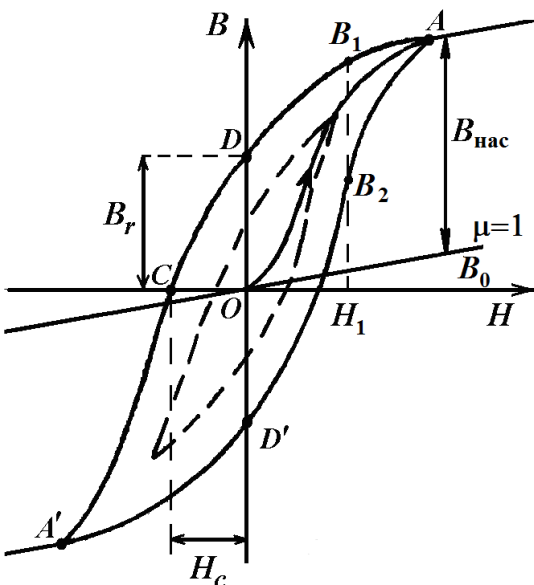


Рис. 52. Кривая перемагничивания ферромагнетика (магнитный гистерезис)

У ферромагнетиков в намагничивании определяющую роль играют спиновые моменты электронов. При определенных условиях в кристаллах могут возникать силы, которые заставляют магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу. В результате возникают области, самопроизвольно (спонтанно) намагниченные до насыщения. Эти области называются доменами. Их размеры $10^{-5} \dots 10^{-6}$ м. Каждый домен обладает магнитным моментом, но направлены они хаотично, поэтому суммарный магнитный момент не намагниченного тела в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю.

Объяснение возникновения доменов дается только квантовой механикой.

Сложный характер зависимости B от H обусловлен тем, что действие внешнего магнитного поля на домены на разных стадиях различно. В слабых полях домены, у которых моменты образуют меньший угол с внешним полем, растут за счет уменьшения доменов, у которых моменты образуют больший угол с внешним полем. Границы доменов смещаются. В более сильных полях происходит одновременный поворот всех электронов в домене без нарушения строгой параллельности друг другу. При определенном значении H ферромагнетик намагничивается до насыщения. Магнитные моменты всех доменов устанавливаются параллельно. При дальнейшем увеличении H , B растет линейно за счет роста B_0 , так как $B_{\text{набл}} = B_{\text{на}} + B_0$ остается постоянным.

Если не намагниченный ферромагнетик поместить в магнитное поле и изменять его напряженность, то индукция поля, как сказано выше, будет изменяться по сложной кривой OA (рис. 52). Эта кривая называется **основной кривой намагничивания**. Если довести ферромагнетик до насыщения, а затем уменьшать напряженность поля, то индукция тоже будет уменьшаться, но уже по кривой AD . Отставание изменения индукции от изменения напряженности магнитного поля называется **магнитным гистерезисом**. В результате, когда напряженность достигнет нулевого значения, индукция будет отлична от нуля и равна B_r . Это значение называется **остаточной индукцией** (remaining induction). Чтобы размагнитить ферромагнетик, нужно создать магнитное поле противоположного направления. Напряженность H_c , при которой индукция становится равной нулю, называется **коэрцитивной силой**. При дальнейшем увеличении напряженности поля обратного направления ферромагнетик перемагничивается и при некотором значении H достигает насыщения (точка A'). Если уменьшать напряженность до нуля, индукция будет изменяться по кривой $A'D'$. При увеличении напряженности в прямом направлении индукция изменяется по кривой $D'A$. Полученная замкнутая кривая называется **петлей гистерезиса**.

Если максимальные значения напряженности таковы, что намагничивание достигает насыщения, то петля называется максимальной петлей гистерезиса. Если насыщение не достигается, то получаются частные петли гистерезиса (штриховая кривая на рис. 52). Все частные петли лежат внутри максимальной, их вершины лежат на основной кривой намагничивания OA . *Площадь, ограниченная петлей гистерезиса, пропорциональна энергии, которую нужно затратить на один цикл перемагничивания ферромагнетика.*

Гистерезис приводит к тому, что индукция B не является однозначной функцией напряженности H , она зависит от того, в каком магнитном поле побывал ферромагнетик раньше. Например, для напряженности H_1 индукция может иметь любое значение в пределах от B_1 до B_2 .

Понятие магнитной проницаемости μ применяется лишь к основной кривой намагничивания. μ является функцией H . Зависимость μ от H изображена на рис. 53. При увеличении H , μ сначала возрастает до некоторого максимального значения, затем уменьшается и в сильных полях приближается к единице. Величины B_r , H_c , и $\mu_{\text{наб}}$ являются основными характеристиками ферромагнетика. Если H_c и B_r велики, то ферромагнетики называются магнитотвердыми, и их используют для изготовления постоянных магнитов. Ферромагнетики с малыми значениями H_c и B_r называются магнитомягкими, и их используют для изготовления сердечников трансформаторов.

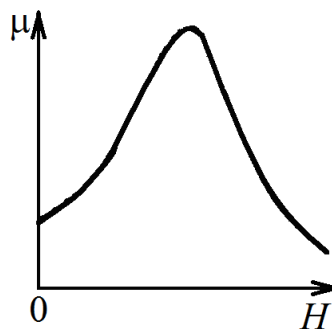


Рис. 53. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для ферромагнетиков

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура T_E , называемая точкой Кюри, при которой домены распадаются и ферромагнетик становится парамагнетиком. При охлаждении ферромагнетика ниже точки Кюри в нем снова возникают домены.

3 Описание установки и методики измерений

Приборы и принадлежности: тороид из исследуемого вещества, миллиамперметр, потенциометр, конденсатор, два резистора, электронно-лучевой осциллограф.

В данной работе исследуются магнитные свойства ферромагнетиков. Для этого на кольцеобразный тороидный сердечник, изготовленный из исследуемого вещества, наматываются две обмотки: первичная с числом витков N_1 и вторичная с числом витков N_2 , которые включаются в цепь, как показано на рис. 54. На рисунке: Т – тороид; N_1 – первичная обмотка; N_2 – вторичная обмотка; P – потенциометр; mA – миллиамперметр; C – конденсатор; R_1 и R_2 – резисторы с известными сопротивлениями; ЭО – электронно-лучевой осциллограф.

На экране осциллографа нужно получить петлю гистерезиса, график зависимости индукции B от напряженности H в ферромагнетике. Для этого на вертикально отклоняющие пластины осциллографа (клеммы y) нужно подать напряжение, пропорциональное индукции B , а на горизонтально отклоняющие пластины (клеммы x) – напряжение, пропорциональное напряженности H магнитного поля.

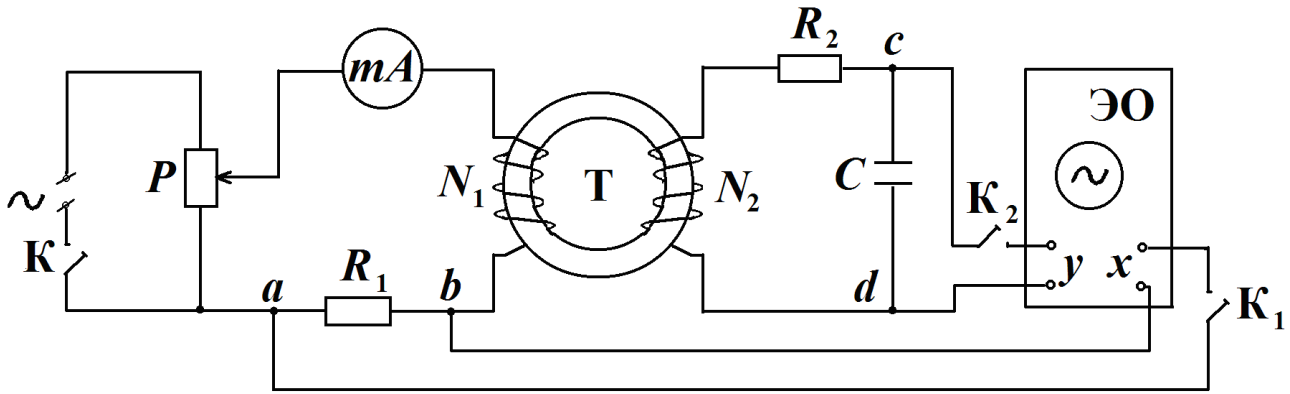


Рис. 54. Схема для измерения зависимости индукции от напряженности магнитного поля в ферромагнетиках (гистерезиса)

Докажем, что напряжение на концах резистора R_1 в цепи первичной обмотки тороида пропорционально H , а напряжение на конденсаторе C в цепи вторичной обмотки пропорционально B .

По первичной обмотке тороида течет переменный ток i от внешнего источника. Напряженность магнитного поля в тороиде определяется по формуле

$$H = i_1 n_1,$$

где n_1 — число витков, приходящихся на единицу длины тороида в первичной обмотке.

Напряжение на сопротивлении R_1

$$U_1 = i_1 R_1.$$

Учитывая, что $i_1 = H/n_1$, получим

$$U_x = U_1 = \frac{R_1}{n_1} H. \quad (132)$$

Это напряжение подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа.

Поскольку по первичной обмотке течет переменный ток, то вторичную обмотку пронизывает переменный магнитный поток, вследствие чего в ней возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_{\text{ѳ}} = - \frac{d\Phi}{dt} N_2.$$

Магнитный поток, пронизывающий поперечное сечение тороида площадью S ,

$$\hat{O} = BS.$$

Следовательно,

$$\mathcal{E}_{\text{ѳ}} = - SN_2 \frac{dB}{dt}.$$

Вследствие возникновения ЭДС по цепи вторичной катушки потечет ток

$$i_2 = \frac{\mathcal{E}_{\text{ѳ}}}{R_2} = - \frac{SN_2}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}.$$

Сопротивление цепи вторичной обмотки можно считать равным R_2 , так как в цепь включается конденсатор с емкостным сопротивлением, малым по

сравнению с R_2 . Напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i_2 dt.$$

Подставим значение i_2 , и получим:

$$U_C = - \frac{N_2 S}{R_2 C} \int dB = - \frac{N_2 S}{R_2 C} B.$$

Напряжение на конденсаторе пропорционально индукции магнитного поля B . Оно подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа.

$$U_y = \frac{N_2 S}{R_2 C} B. \quad (133)$$

Таким образом, отклонение следа электронного луча на экране осциллографа по горизонтали пропорционально H , по вертикали – пропорционально B . Изменение его положения на экране должно следовать кривой $B = f(H)$. За один период синусоидального изменения тока след луча на экране опишет полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий – в точности повторит ее. Поскольку частота изменения тока в сети равна 50 Гц, электронный луч 50 раз в секунду опишет петлю гистерезиса. Поэтому на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса. Изменяя амплитуду тока i_1 в первичной обмотке, можно изменять пределы изменения напряженности H . Как сказано выше, если пределы изменения H таковы, что ферромагнетик намагничивается до насыщения, то петля называется максимальной. При меньших пределах H луч описывает частные петли. Вершины всех петель лежат на основной кривой намагничивания. Следовательно, для построения основной кривой намагничивания необходимо измерить координаты n_y и n_x вершин петель гистерезиса. Зная величины напряжений u_y и u_x вызывающих отклонение электронного луча на одно деление шкалы, имеющейся на экране осциллографа, можно определить величины напряжений U_x и U_y , подаваемых на осциллограф:

$$U_x = n_x u_x; \quad U_y = n_y u_y.$$

Значения напряженности магнитного поля H определим из формулы (132):

$$H = \frac{n_1}{R_1} U_x = \frac{n_1}{R_1} u_x n_x. \quad (134)$$

Величины n_1 и R_1 постоянные и указаны на установке, поэтому последнее выражение можно преобразовать:

$$H = k_x n_x, \quad \text{где} \quad k_x = \frac{n_1}{R_1} u_x. \quad (135)$$

Формулу расчета индукции поля B выведем из выражения (133):

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y \quad \text{или} \quad B = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_y n_y, \quad (136)$$

$$B = k_y n_y, \quad \text{где} \quad k_y = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_y. \quad (137)$$

k_x и k_y вычисляются до начала измерения по известным данным.

4 Обработка результатов измерений (см. лабораторную работу № 2-2)

5 Порядок выполнения работы

1. Рассчитать постоянные k_x и k_y по формулам (135) и (137).
2. Собрать схему измерения (см. рис. 54).
3. Включить осциллограф.
4. При разомкнутых ключах K_1 и K_2 установить при помощи потенциометра P в первичной обмотке тороида ток, указанный преподавателем.
5. Замкнуть ключ K_2 и с помощью рукоятки «усил. Y» добиться, чтобы вертикальная линия на экране осциллографа имела заданную преподавателем длину. В дальнейшем положение рукоятки «усил. Y» не менять.

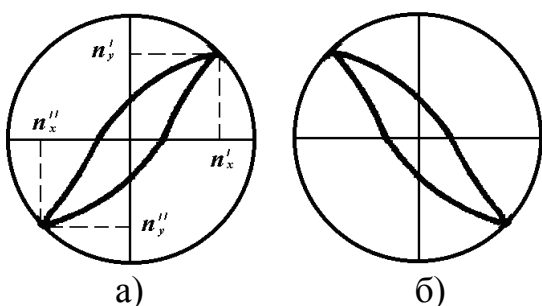


Рис. 55. Вид петли гистерезиса на экране электронно-лучевого осциллографа

6. Замкнуть ключ K_1 . Петля гистерезиса на экране осциллографа должна иметь вид, указанный на рис. 55, а. Если петля расположена так, как указано на рис. 53, б, то проводники a и b следует поменять местами.
7. Измерить координаты вершин n_x и n_y . Каждую координату найти как среднее арифметическое координат верхней и нижней вершин петли:

$$n_x = \frac{n'_x + n''_x}{2}; \quad n_y = \frac{n'_y + n''_y}{2}.$$

Для более точного измерения n_x нужно измерять при разомкнутом ключе K_2 , когда на экране осциллографа видна только горизонтальная прямая; n_y измеряется при разомкнутом ключе K_1 , когда на экране видна только вертикальная прямая.

8. Уменьшая ток в первичной обмотке с помощью потенциометра P , получить на экране осциллографа ряд (10 ... 12) частных петель гистерезиса и измерить координаты их вершин n_x и n_y вышеуказанным методом. Результаты измерения записать в таблицу.
9. Рассчитать H и B для всех точек по формулам (135) и (137).
10. Рассчитать магнитную проницаемость μ для всех точек из формулы (88).
11. Построить графики зависимости $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$.

6 Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией и напряженностью магнитного поля?
2. Что называется относительной магнитной проницаемостью вещества?
3. Какие вещества называются диамагнетиками и каков механизм их намагничивания?
4. Какие вещества называются парамагнетиками и каков механизм их намагничивания?

5. Какие вещества называются ферромагнетиками и каков механизм их намагничивания?
6. В чем заключается явление магнитного гистерезиса? Что называется коэрцитивной силой?
7. Как определить потери энергии при перемагничивании ферромагнетика?
8. В чем заключается метод исследования зависимости индукции магнитного поля от его напряженности, используемый в данной работе? Нарисовать схему и вывести формулы расчета B и H .
9. Как зависит магнитная проницаемость ферромагнетика от напряженности магнитного поля?

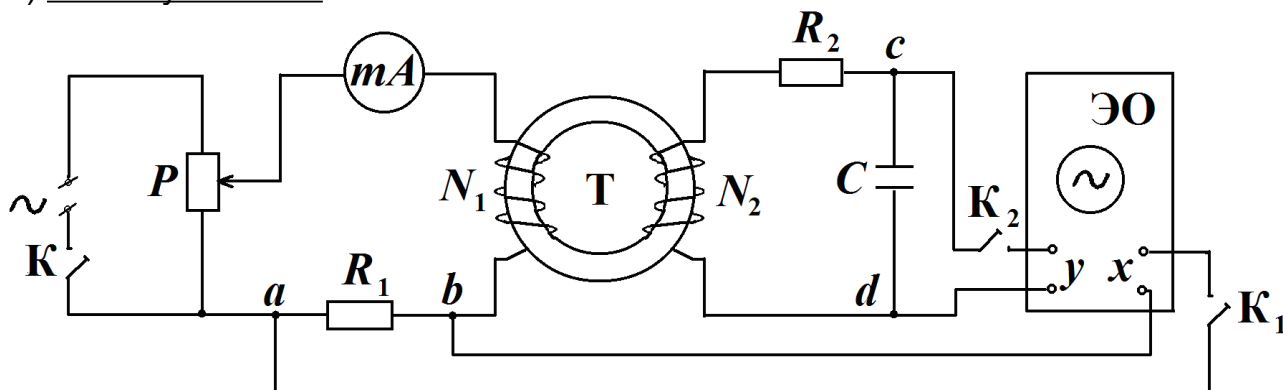
7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 3-4

I. Домашнее задание.

II. Протокол выполнения лабораторной работы № 3-4.

- 1) Тема: Исследование магнитного поля в ферромагнетиках.
- 2) Цель работы: Исследовать зависимость магнитной индукции и магнитной проницаемости в ферромагнетике от напряженности магнитного поля.
- 3) Схема установки:



T – тороид; N_1 – первичная обмотка; N_2 – вторичная обмотка; P – потенциометр; mA – миллиамперметр; C – конденсатор; R_1 и R_2 – резисторы с известными сопротивлениями; ЭО – электронно-лучевой осциллограф; $\hat{E}$, $\hat{E}_1$ и $\hat{E}_2$ – ключи.

4) Таблица приборов

№ п/п	Наименование	Тип	Заводской номер	Предел шкалы	Цена деления	Абсолютная погрешность (класс точности)
1	Осциллограф	ЭО-7				
2	Миллиамперметр	М 906				

5) Формулы расчета величин

5.1) Постоянные

$$k_x = \frac{n_1}{R_1} u_x, \quad k_y = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_y,$$

где n_1 – число витков, приходящихся на единицу длины тороида в первичной обмотке; R_1 и R_2 – сопротивления; u_x и u_y – величины напряжений

вызывающих отклонение электронного луча на одно деление шкалы; C – емкость конденсатора; S – площадь сечения тороида; N_2 – число витков во вторичной обмотке.

5.2) Напряженность магнитного поля и магнитная индукция

$$H = k_x n_x, \quad B = k_y n_y.$$

5.3) Магнитная проницаемость среды

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

6) Таблица результатов прямых измерений:

$$n_1 = 1,15 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}; R_1 = 27 \text{ Ом}; R_2 = 3000 \text{ Ом}; u_x = 6 \cdot 10^{-2} \text{ В}; u_y = 4 \cdot 10^{-2} \text{ В}; \\ C = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}; S = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Вб/А}.$$

№	$n_x, \text{м}^{-1}$	$n_y, \text{м}^{-1}$	$H, \text{А/м}$	$B, \text{Тл}$	μ
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

7) Расчеты физических величин:

7.1) Постоянные

$$k_x = \frac{1}{n_1} \cdot \dots \text{В/А} = \dots \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad k_y = \frac{1}{n_2} \cdot \dots \text{В/А} = \dots \frac{\text{Тл}}{\text{м}}.$$

7.2) Напряженность магнитного поля и магнитная индукция

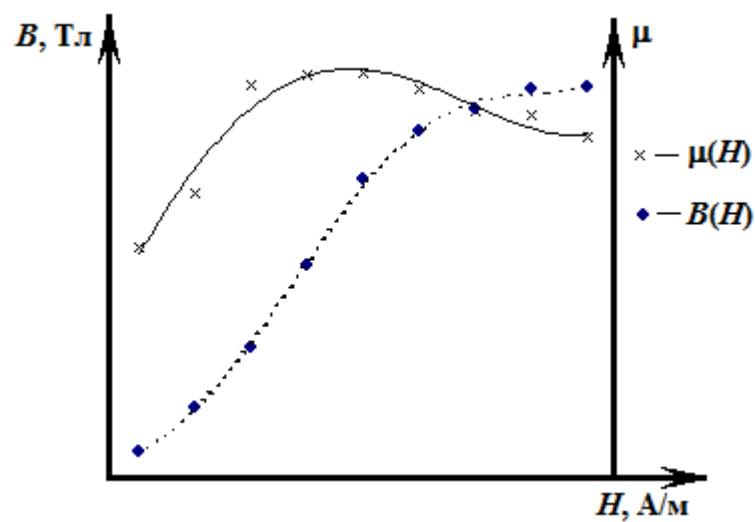
$$H = \dots \frac{\text{А}}{\text{м}} \cdot \dots \text{м} = \dots \text{А/м}; \quad B = \dots \frac{\text{Тл}}{\text{м}} \cdot \dots \text{м} = \dots \text{Тл}.$$

7.3) Магнитная проницаемость среды

$$\mu = \frac{\dots \text{Тл}}{\dots \frac{\text{А}}{\text{м}} \cdot \dots \frac{\text{А}}{\text{м}}} = \dots.$$

8) Окончательные результаты:

Представить в виде графиков зависимости магнитной индукции и магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля (примерный вид):



9) Вывод: В ходе лабораторной работы были получены зависимости ...

10) Работу выполнил(а): _____ (фамилия разборчиво).

Работу проверил:

11) Дата.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Викулин И.М.** Электромагнетизм: метод. указания для самостоятельной работы студентов по курсу физики/ Викулин И.М. – Одесса: УГАС, 2000.
2. **Трофимова Т.И.** Курс физики/ Трофимова Т.И. – М.: Высшая школа, 1990.
3. **Детлаф А.А.** Курс физики/ Детлаф А.А., Яворский Б.М.– М.: Высшая школа, 1989.
4. **Калашников С.Г.** Электричество/ Калашников С.Г. – М.: Наука, 1970.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2-1	5
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2-2	17
ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ЗА ДОПОМОГОЮ МОСТА УІТСТОНА.....	17
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2-3	27
ЗНАХОДЖЕННЯ ЕРС ДЖЕРЕЛА	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2-4	38
ПОТУЖНІСТЬ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	38
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3-1	45
ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ	45
ЗА ДОПОМОГОЮ ТАНГЕНС-БУСОЛІ.....	45
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3-2.....	57
ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА.....	57
.....	62
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3-3.....	69
ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ БАЛІСТИЧНИМ МЕТОДОМ.....	69
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3-4.....	77
ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У ФЕРОМАГНЕТИКАХ.....	77
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-1	88
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.....	88
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-2.....	101
ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОСТА УИТСТОНА.....	101
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-3.....	112
НАХОЖДЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА.....	112
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-4.....	123
МОЩНОСТЬ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	123
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-1.....	130
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	130
С ПОМОЩЬЮ ТАНГЕНС-БУССОЛИ.....	130
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-2.....	142
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА.....	142
.....	147
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-3.....	154
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	154
.....	154
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-4.....	162
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ.....	162
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	174

