Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства
та природокористування

Кафедра хімії та фізики

**05-06 34**

# Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Фізика»

## розділ «ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ»

для студентів інженерно-технічних напрямів підготовки
денної, заочної та дистанційної форми навчання

Рекомендовано
науково-методичною
радою НУВГП
протокол № від . .20 р.

**РІВНЕ – 2014**

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізика», розділ «ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ» для студентів інженерно-технічних напрямів підготовки денної, заочної та дистанційної форм навчання/ Є.С.Никонюк, О.Д. Кочергіна, В.Р. Гаєвський, М.В. Мороз, Б.П.Рудик, Рівне: НУВГП. 2013. - 32 с.

Упорядник:
Никонюк Є.С., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри хімії та фізики;

Кочергіна О.Д., асистент кафедри хімії та фізики;

Гаєвський В.Р., канд. техн. наук, доцент кафедри хімії та фізики;

Мороз М.В., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри хімії та фізики;

Рудик Б.П., зав лаб. кафедри хімії та фізики.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Відповідальний за випуск:
Гаращенко В.І., канд. техн. наук, доцент, кафедри хімії та фізики.

© Никонюк Є.С., Кочергіна О.Д.,
Гаєвський В.Р., Мороз М.В.,
Рудик Б.П., 2013
© НУВГП, 2014

Національний університет
водного господарства
та природокористування

## ЗМІСТ

ВСТУП ..... 3
Лабораторна робота № 4.1 Вивчення гальванометра магнітоелектричної системи ..... 4
Лабораторна робота № 4.2 Перевірка закону Ампера ..... 10
Лабораторна робота № 4.3 Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона ..... 15
Лабораторна робота № 4.4 Вивчення магнітного поля соленоїда за допомогою давача Холла ..... 19
Лабораторна робота № 4.5 Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі ..... 26
Література ..... 29
Додаток 1 Приклад оформлення титульної сторінки .. 30
Додаток 2 Приклад оформлення звіту ..... 31

Національний університет
водного господарства
та природокористування

## ВСТУП

В даній методичці представлені лабораторні роботи з дисципліни «Фізика» розділ «ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ», які виконуються на кафедрі хімії та фізики.

Метою лабораторних робіт є вивчення фізичних процесів і явищ, які лежать в основі даного розділу фізики, а завданням є навчити студента вимірювати електричні величин і виконувати обробку результатів вимірювань. В процесі виконання лабораторної роботи студент оформляє звіт (див. зразок у додатках 1, 2).

У вступному занятті подана принципи дії, класифікація і основні характеристики електровимірювальних приладів.

У кожній лабораторній роботі вказана мета, теоретичні відомості, опис експериментальної установки, електрична схема, хід роботи і контрольні запитання.

У кожній лабораторній роботі вказана мета, теоретичні відомості, опис експериментальної установки, електрична схема, хід роботи і контрольні запитання, по яких студенти захищає роботу.

Національний університет водного господарства та природокористування



# Лабораторна робота № 4.1

## Вивчення гальванометра магнітоелектричної системи

**Мета роботи:** визначити внутрішній опір гальванометра, ціну поділки по струму і по напрузі.

### Теоретичні відомості

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі (інтерактивного комплексу Ч II), §§3.10-3.11, 4.1)

Гальванометр магнітоелектричної системи служить для вимірювання малих постійних струмів і напруг $(I \sim (10^{-8} \div 10^{-5})A$; $U \sim (10^{-6} \div 10^{-2})B)$. В основі роботи гальванометра лежить дія магнітного поля на рамку з електричним струмом.

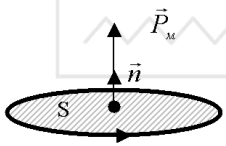


Рис.1.

Контур зі струмом характеризується магнітним моментом

$$\vec{P}_м = I\ S\ \vec{n}\,, \qquad (1)$$

де $I$ – сила струму, $S$ – площа контура, $\vec{n}$ – одиничний вектор нормалі до площини контура, зв'язаний з напрямком струму правилом правого гвинта (рис.1). Якщо контур зі струмом вмістити в магнітне поле, то на нього діятиме обертаючий момент сили

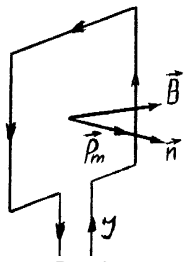


Рис.2

$$\vec{M} = \vec{P}_м \times \vec{B}$$

або в скалярній формі

$$M = P_м B \sin\alpha\,, \qquad (2)$$

де $\vec{B}$ – вектор магнітної індукції, $\alpha$ – кут між $\vec{P}_м$ і $\vec{B}$ (рис. 2). В стані рівноваги магнітний момент рамки напрямлений паралельно до ліній магнітної індукції (площина рамки перпендикулярна до $\vec{B}$). Чим більший кут між $\vec{P}_м$ і $\vec{B}$, тим більший за вели-

чиною момент сили повертає рамку в положення рівноваги. Обертаючий момент, згідно з (1) і (2), пропорційний силі струму в рамці, що і лежить в основі принципу дії вимірювальних приладів магнітоелектричної системи. Схема такого приладу подана на рис. 3. В магнітному полі постійного магніту **1** між нерухомим циліндром, виготовленим з магнітом'якого заліза (з малою коерцитивною силою), і полюсними виступами ***N-S*** знаходиться прямокутна котушка (рамка) **2**. Вона укріплена на двох півосях, на одній з яких закріплена вказівна стрілка приладу **4**. За кінцем стрілки розміщена шкала. Струм до рухомої котушки підводиться через дві спіральні пружини **3**. У відсутності струму ці пружини утримують рамку в рівноважному положенні, коли її площина паралельна до $\vec{B}$. При проходженні через котушку струму, на котушку діє з боку магнітного поля обертаючий момент сили, пропорційний силі струму. Під дією цього моменту котушка ***2*** повернеться на кут $\alpha$, при якому обертаючий момент зрівноважиться протидіючим моментом, створеним пружинами. Оскільки момент пружних сил пропорційний куту закручування пружини, то із рівності обертаючого і протидіючого моментів випливає, що величина кута повороту пропорційна силі струму. Відповідно і відхилення вказівної стрілки приладу пропорційне силі струму, тобто

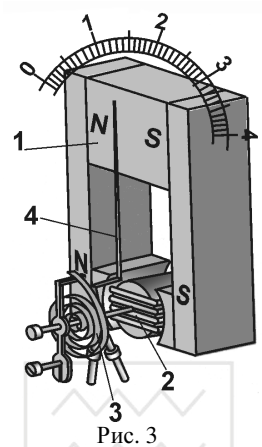


Рис. 3

$$I = k_i n\,, \tag{3}$$

де $k_i$ – коефіцієнт пропорційності , який називається ціною поділки приладу по струму, $n$ – кількість поділок, на яку відхилилась стрілка при вимірюванні. З (3) знайдемо $k_i = I / n$, тобто ціна *поділки гальванометра по струму* дорівнює силі струму, який викликає зміщення стрілки приладу на одну поділку.

Згідно з законом Ома, спад напруги на гальванометрі

$$U = I\, R_g\,, \tag{4}$$

де $R_g$ – внутрішній опір гальванометра. З формул (3) і (4) одержимо

$$U = k_i\, R_g \cdot n = k_{\mathrm{V}}\, n\,, \tag{5}$$

Національний університет водного господарства та природокористування

$$k_{\text{v}} = k_i \cdot R_g \qquad (6)$$

де $k_{\text{v}}$ – ціна поділки гальванометра по напрузі.

**Вивід робочої формули**

Для визначення $R_g$, $k_i$ та $k_{\text{v}}$ використаємо схему, подану на рис.4.

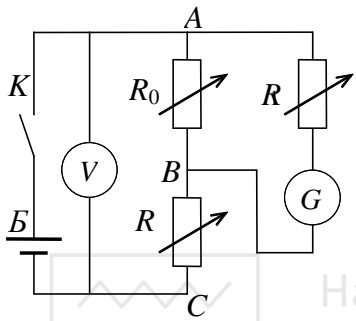


Рис. 4

Тут $G$ – досліджуваний гальванометр, $V$ – вольтметр, $R_1; R_0; R$; – магазини опорів.

Згідно закону Ома, сила струму на ділянці АС

$$I = \frac{U}{R_{AC}}, \qquad (7)$$

де $U$ – напруга на клемах джерела, $R_{\text{AC}}$ – опір ділянки кола, який рівний

$$R_{AC} = R_{AB} + R. \qquad (8)$$

Підставляючи вираз (8) у формулу (7), одержимо

$$I = \frac{U}{R_{AB} + R} \qquad (9)$$

звідки

$$U = I\, R_{AB} + IR.$$

Очевидно, що

$$R_{AB} = \frac{R_0(R_1 + R_g)}{R_0 + (R_1 + R_g)}. \qquad (10)$$

В загальному випадку зі зміною $R_1$ змінюється $R_{AB}$ і сила струму $I$.

Спад напруги на ділянці $AB$ дорівнює

$$U_{AB} = I_1(R_1 + R_g) = I_1^1\, R_0, \qquad (11)$$

де $I_1$ – сила струму, що проходить через гальванометр, $I_1^1$ – сила струму, що проходить через опір $R_0$.

За законом Кірхгофа

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$I = I_1^1 + I_1 . \qquad (12)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (9), (11) і (12) відносно $I_1$, одержимо

$$I_1 = \frac{UR_0}{(R_{AB} + R)(R_g + R_0 \cdot R_1)} = k_i n_1 . \qquad (13)$$

Нехай $R_1 = 0$. Тоді струм, згідно з (13)

$$I_2 = \frac{UR_0}{(R'_{AB} + R)(R_g + R_0)} = k_i n_2 , \qquad (14)$$

де $$R'_{AB} = \frac{R_0 R_g}{R_0 + R_g}$$

Із формули (13)

$$UR_0 = k_i n_1 (R_{AB} + R)(R_1 + R_g + R_0), \qquad (16)$$

а з виразу (14)

$$UR_0 = k_i n_2 (R'_{AB} + R)(R_g + R_0). \qquad (17)$$

Прирівнюючи праві частини одержаних виразів (16) і (17), отримаємо

$$k_i n_1 (R_{AB} + R)(R_1 + R_g + R_0) = k_i n_2 (R'_{AB} + R)(R_g + R_0). \qquad (18)$$

Підставляючи значення $R_{AB}$ і $R'_{AB}$ із (10) та (15) в (18) і розв'язуючи одержане рівняння відносно $R_g$, маємо

$$R_g = \frac{n_1 R_1}{n_2 - n_1} - \frac{R R_0}{R + R_0} . \qquad (19)$$

Ціну поділки по струму визначаємо із рівняння (14)

$$k_i = \frac{U R_0}{n_2 \left(R_g (R + R_0) + R R_0\right)} . \qquad (20)$$

**Хід роботи**

1. Електрична схема приведена на рис. 5, де $Б$ – джерело постійного струму, $G$ – гальванометр, $R; R_0; R_1$ – магазини опорів, П – перемикач, за допомогою якого змінюють напрямок струму в гальванометрі, К – ключ, $V$ – вольтметр. Опір $R$ має бути вели-

Національний університет водного господарства та природокористування

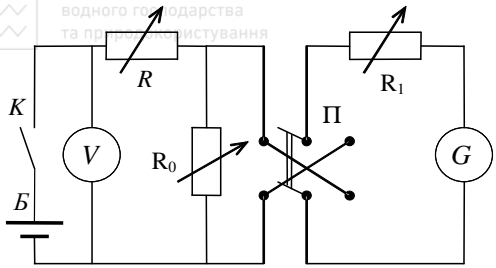


Рис. 5

ким і вказаний викладачем; магазин опорів $R_1$ та $R_0$ виведені на нуль.

2. Перевірити, чи суміщена стрілка гальванометра з нулем шкали.
3. Замкнути ключ К.
4. Підібрати опір $R_0$ такий, щоб стрілка гальванометра відхилилась майже до кінця шкали. Записати показ гальванометра $n_2$ (в поділках)
5. Перемикачем П змінити напрям струму через гальванометр на протилежний і записати показ гальванометра $n_2'$.
6. Перемикачем П змінюючи напрям струму через гальванометр, дослід повторити 2 рази для $n_2$ і $n_2'$.
7. Підібрати опір $R_1$ такий, щоб покази гальванометра $n_1$ становили близько $0{,}4\,n_2$ (в цьому випадку точність вимірювань $R_g$ буде максимальною). Записати показ гальванометра в $n_1$.
8. Перемикачем П змінити напрямок струму через гальванометр і записати показ гальванометра $n_1'$.
9. Перемикачем П змінити напрямок струму через гальванометр дослід повторити ще 2 рази для $n_1$ і $n_1'$.
10. Записати значення опорів $R$, $R_1$, $R_0$.
11. Записати покази вольтметра *U*.
12. Оцінити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.
13. Знайти середні значення $n_1$ і $n_2$.
14. За робочими формулами (19), (20) і (6) обчислити $R_g$, $k_i$, $k_v$.
15. Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$\Delta R_g = \sqrt{\left(\frac{n_2 R_1 \Delta n_1}{(n_2 - n_1)^2}\right)^2 + \left(\frac{n_1 R_1 \Delta n_2}{(n_2 - n_1)^2}\right)^2 + \left(\frac{n_1 \Delta R_1}{n_2 - n_1}\right)^2 + \left(\frac{R_0^2 \Delta R}{(R + R_0)^2}\right)^2 + \left(\frac{R^2 \Delta R_0}{(R + R_0)^2}\right)^2}$$

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta R_g}{R_g}.$$

**Результати вимірювань**

$R =$ $\Delta(R)_0 =$

$R_0 =$ $\Delta(R_0)_0 =$

$R_1 =$ $\Delta(R_1)_0 =$

$U =$ $\Delta U_0 =$

$\Delta(n_1)_0 = \Delta(n_2)_0 =$

| № | $n_1$ | $n_1'$ | $n_2$ | $n_2'$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| Ср. | $n_1 =$ | | $n_2 =$ | |

Національний університет
водного господарства
та природокористування

**Контрольні запитання**

1. Що називається магнітним моментом контуру зі струмом? Які його величина, напрямок, одиниця вимірювання?
2. Записати вираз для моменту сили, що діє на контур зі струмом, вміщений в магнітне поле.
3. При якій орієнтації контуру зі струмом в магнітному полі обертаючий момент максимальний? В якому випадку він дорівнює нулю?
4. Яка будова і принцип дії гальванометра магнітоелектричної системи?
5. Дайте визначення ціни поділки гальванометра по струму і по напрузі. Встановіть зв'язок між $k_i$ та $k_V$.
6. Покажіть, що кут повороту рухомої частини гальванометра прямо пропорційний силі струму.
7. Чи можна гальванометром магнітоелектричної системи вимірювати змінні струми? Відповідь обґрунтуйте.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

# Лабораторна робота № 4.2

## Перевірка закону Ампера

**Мета роботи:** 1) перевірити закон Ампера шляхом встановлення лінійності залежності *F(I)*) в незмінному магнітному полі;
2) визначити індукцію магнітного поля.

### Опис установки

Установка для перевірки закону Ампера зображена на рис.1. Вона складається з фізичного маятника *А* і електромагніта *М*. Фізичний маятник тут – мідний провідник, зігнутий у вигляді прямокутної рамки. Сторона рамки *ab* довжиною $\ell$ розміщена між полюсами електромагніта *М* перпендикулярно до ліній магнітної індукції; в точках *c* і *d* закріплені опорні тригранні призми *Д*, що опираються на спеціальні латунні підшипники. Біля опорних призм до кінців *c* і *d* припаяні легкі гнучкі провідники *П*, за допомогою яких провідник включають в електричне коло. Струм у провіднику, а значить і на ділянці *ab,* можна змінювати за допомогою реостата *R* і вимірювати амперметром *А*. Електромагніт *М* живиться від джерела напруги $\mathscr{E}$ . Рамка живиться струмом від джерела напруги О.

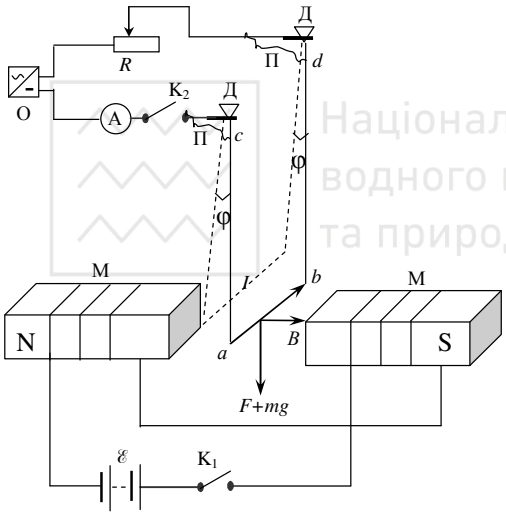


Рис.1

### Теоретичні відомості та вивід робочої формули

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі (інтерактивного комплексу Ч II), §§4.1, 4.4, 5.1, 5.3)

Національний університет
та природокористування

Нехай у магнітному полі з індукцією $\vec{B}$ знаходиться лінійний елемент струму $Id\vec{\ell}$. На нього з боку поля діє сила, величина і напрямок якої визначаються законом Ампера

$$d\vec{F}_A = Id\vec{\ell} \times \vec{B}, \tag{1}$$

або у скалярній формі

$$dF_A = Id\ell B \sin\alpha, \tag{2}$$

де $\alpha$ – кут між $d\vec{\ell}$ та $\vec{B}$.

Сила, що діє на провідник зі струмом скінченої довжини, визначається за (1) або (2) інтегруванням по всій довжині провідника

$$F_A = I \int\limits_{(\ell)} Bd\ell \sin\alpha. \tag{3}$$

Зокрема, для прямолінійного провідника в однорідному магнітному полі $(\vec{B} = const)$ з (3) одержимо

$$F_A = I\ell B \sin\alpha. \tag{4}$$

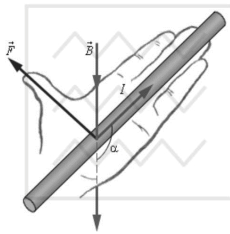


Рис.2

Напрямок сили Ампера знаходиться за правилом лівої руки (рис.2).

В даній лабораторній роботі, щоб одержати формулу для обчислення сили Ампера, розглянемо рівняння руху фізичного маятника (рамки *abcd*) Цей маятник здійснює коливання відносно осі *cd*. Застосуємо до нього основний закон динаміки обертального руху твердого тіла

$$I \cdot \ddot{\varphi} = M, \tag{5}$$

де $I$ – момент інерції маятника відносно осі *c d*, $\ddot{\varphi}$ –кутове прискорення, $M$ – головний момент зовнішніх сил відносно цієї осі.

У відсутності струму обертовий момент створює сила тяжіння, прикладена до центра мас маятника(див рис.3, 4).

$$M_1 = -mgr_1 \sin\varphi, \tag{6}$$

де $r_1$ відстань від осі обертання до центра мас, $\varphi$ – кут відхилення маятника від положення рівноваги, $m$ – маса маятника. Знак "–" означає, що момент сили тяжіння обертає маятник в бік, протилежний напрямку відхилення від рівноваги.

Якщо через ділянку *ab*, що знаходиться в магнітному полі електромагніта *M*, проходить електричний струм, то на маятник, крім сили тяжіння, діє сила Ампера. Напрямок сили Ампера, в залежності від

Національний університет водного господарства та природокористування

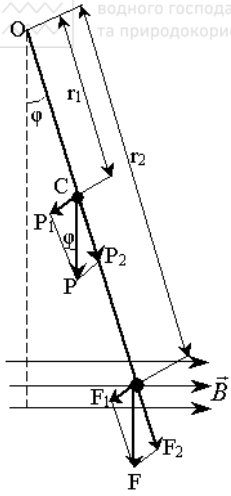



Рис.3

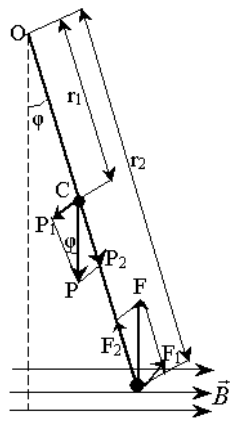



Рис.4

напрямку струму, або співпадає з напрямком сили тяжіння, або протилежний до нього. Сила Ампера прикладена до ділянки провідника *ab* і створює момент сили

$$M_2 = \pm F_A \cdot r_2 \sin\varphi \qquad (7)$$

де $r_2$ – відстань від ділянки провідника ab до осі обертання. Знак "–" в (7) відноситься до випадку, коли сила Ампера співнапрямлена з силою тяжіння (рис.3), а знак "+" – протилежно напрямлена (рис.4).

Після підстановки (7) і (6) в (5) одержимо

$$I\ddot{\varphi} = -mgr_1 \sin\varphi \mp F_A r_2 \sin\varphi .$$

Для малих кутів $\sin\varphi \simeq \varphi$, тому, якщо кут відхилення малий, останнє рівняння можна записати у вигляді

$$I\ddot{\varphi} \simeq -(mgr_1 \pm F_A r_2)\varphi \text{, або } \ddot{\varphi} + (\frac{mgr_1 \pm F_A r_2}{I})\varphi = 0 .$$

Введемо позначення

$$\omega^2 = \frac{mgr_1 \pm F_A r_2}{I} , \qquad (8)$$

тоді останнє рівняння набуде вигляду

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \cdot \varphi = 0 . \qquad (9)$$

Вираз (9) – диференціальне рівняння вільних гармонічних коливань, розв'язок якого

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega t + \alpha_0), \qquad (10)$$

де $\varphi_0$ – амплітудне значення кута відхилення, $\omega$ – власна циклічна частота, квадрат якої визначається рівнянням (8). Якщо струм в провіднику відсутній, то $F_A = 0$, і маятник коливається з циклічною частотою $\omega_0$. Тоді з (8)

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$\omega_0^2 = \frac{mgr_1}{I}. \qquad (11)$$

З (8) і (11) знайдемо $\omega^2 - \omega_0^2 = \pm\frac{F_A \cdot r_2}{I}$, або

$$F_A = \pm\frac{I(\omega^2 - \omega_0^2)}{r_2}. \qquad (12)$$

Циклічна чистота пов'язана з періодом коливань співвідношенням $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Врахувавши це, а також виразивши I з (11), запишемо рівняння (12) у вигляді

$$F_A = \pm\frac{mgr_1}{r_2}\left[(\frac{T_0}{T})^2 - 1\right],$$

де $T_0$ і $T$ – періоди коливань маятника у відсутності та при наявності струму, відповідно. Відношення $\frac{T_0}{T}$ можна замінити відношенням проміжків часу $\frac{t_0}{t}$, за які маятник здійснив однакову кількість коливань. Тоді останнє рівняння набуде вигляду

$$F_A = \pm c\left[\left(\frac{t_0}{t}\right)^2 - 1\right], \qquad (13)$$

де $c = \frac{mgr_1}{r_2}$ – постійна лабораторної установки, яка вказана в її паспорті. Таким чином, вимірявши $t_0$ і $t$, за формулою (13) можна розрахувати силу Ампера для кількох значень сили струму і побудувати графік залежності $F_A(I)$. Оскільки напрямок струму на ділянці провідника ab перпендикулярний до ліній магнітної індукції (див. рис.1), то формула (4) для сили Ампера набуде вигляду

$$F_A = IB\ell, \qquad (14)$$

де $\ell$ – довжина ділянки провідника ab.

В даній лабораторній роботі індукція магнітного поля $B$ залишається незмінною, тому залежність $F_A(I)$ має бути лінійною. В цьому суть перевірки закону Ампера. Визначивши $F_A$ для даного значення сили

струму, з (14) можна визначити індукцію магнітного поля, в якому знаходиться ділянка провідника *ab*.

$$B = \frac{F_A}{I\ \ell}. \qquad (15)$$

**Хід роботи**

1. Розімкнути ключ $К_2$ (показ амперметр – 0 А).
2. Відхілити рамку на невеликий кут, пропустити 5 коливань і виміряти час 50 коливань. Дані записати в таблицю 1 для $I$= 0 $A$.
3. Замкнути ключ $К_2$, за допомогою реостата виставити струм $I$=1А і виміряти час 50 коливань рамки. Дані записати в таблицю 1 при $I$= 1 А.
4. Повторити вимірювання часу при інших струмах. Результати вимірювань записати в таблицю 1.
5. За робочою формулою (13) обчислити $F_a$ для всіх струмів і дані занести в таблицю 1 ($t_0$ відповідає $I$= 0 А).
6. Побудувати графік залежності $F_a(I)$.
7. Вибрати на графіку три точки, які найкраще підтверджують спів падання експериментальної і теоретичної (лінійної) залежності сили Ампера від сили струму, і занести відповідні значення $F$ та $I$ в таб. 2.
8. Обчислити значення вектора магнітної індукції $\boldsymbol{B}$ за робочою формулою (15) для трьох значень струму.
9. Визначити середнє значення $B$
10. Обчислити відносну і абсолютну похибки за формулами, приведеними нижче і записати кінцевий результат.

$$\Delta B_i = \left| B_{cp} - B_i \right| , \qquad \varepsilon = \frac{\Delta B_{cp}}{B_{cp}} \cdot 100\%$$

**Результати вимірювань**

$c$= $\ell$ =

Таблиця 1

| $I$, А | 0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t$, с | | | | | | | |
| $F_A$, Н | | | | | | | |

Національний університет водного господарства та природокористування

Таблиця 2

| № | $I$, $A$ | $F_A$, $H$ | $B$, $Тл$ | $\Delta B$, $Тл$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| Ср. | | | | |

**Контрольні запитання**

1. Сформулювати і записати закон Ампера. Як визначається напрямок сили Ампера?
2. При якому напрямку провідника зі струмом у магнітному полі сила Ампера максимальна?
3. Дати визначення вектора магнітної індукції і його одиниці вимірювання в СІ.
4. Дати визначення основних характеристик гармонічних коливань (амплітуди, частоти, періоду, циклічної частоти, фази). Встановити зв'язок між циклічною частотою і періодом.
5. Що таке фізичний маятник? Вивести диференціальне рівняння вільних гармонічних коливань фізичного маятника. Чи будуть коливання маятника гармонічними при великих амплітудах?
6. Як впливає сила Ампера на період коливань фізичного маятника в даній лабораторній роботі? Як зміниться період коливань маятника при зміні напрямку струму на протилежний?
7. Вивести робочу формулу для обчислення сили Ампера. Чому при її виведенні не враховують індукційні струми?

## Лабораторна робота № 4.3

## Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона

**Мета роботи:** визначити питомий заряд електрона методом магнетрона.

**Теоретичні відомості та вивід робочої формули**

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі (інтерактивного комплексу Ч II), §§3.17, 4.5)

Магнетрон – це вакуумний діод, що знаходиться в однорідному магнітному полі, яке напрямлене перпендикулярно швидкості руху електронів. Діод складається з циліндричного порожнистого анода радіуса $R$ і катода у вигляді дротини малого радіуса. Катод розміщений вздовж осі циліндричного анода.

Електрони, що вилітають з розжареного катода під дією електричного поля, створеного між анодом і катодом, рухаються до анода. При цьому електричне поле виконує роботу

$$A = e \cdot U \,, \tag{1}$$

де $U$ – різниця потенціалів між анодом і катодом, $e$ – заряд електрона. Згідно закону збереження енергії кінетична енергія електрона буде

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = eU \,, \tag{2}$$

де $m$ – маса електрона, $\upsilon$ – його швидкість. З (2) знайдемо швидкість

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \,. \tag{3}$$

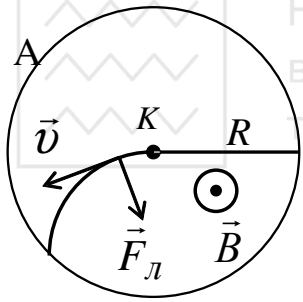


Рис.1

При наявності магнітного поля, вектор індукції якого напрямлений вздовж осі катода, на електрон крім електричного поля буде діяти сила збоку магнітного поля, магнітна складова сили Лоренца (яку будемо називати силою Лоренца), напрямок якої перпендикулярний до вектора швидкості електрона $\vec{\upsilon}$ і вектора індукції магнітного поля $\vec{B}$. На рис.1 зображено зріз магнетрона площиною , перпендикулярною до катода К (як і до анода А та вектора магнітної індукції $\vec{B}$). Кривою зображена траєкторія руху електрона при наявності дії електричного і магнітного полів. Сила Лоренца дорівнює

$$\vec{F}_л = e\vec{\upsilon} \times \vec{B} \,. \tag{4}$$

В скалярній формі $F_Л = e \cdot \upsilon \cdot B \sin\alpha$

Так як $\vec{\upsilon}$ і $\vec{B}$ перпендикулярні $(\sin\alpha = 1)$, то модуль сили Лоренца

$$F_Л = e \cdot \upsilon \cdot B \,. \tag{5}$$

Оскільки електрон рухається по колу ( сила Лоренца при цьому виконує роль доцентрової сили), то (5) запишемо у вигляді

$$\frac{m \cdot \upsilon^2}{r} = e \cdot \upsilon \cdot B . \qquad (6)$$

З (6) знаходимо радіус кола, по якому рухається електрон

$$r = \frac{m \cdot \upsilon}{e \cdot B} . \qquad (7)$$

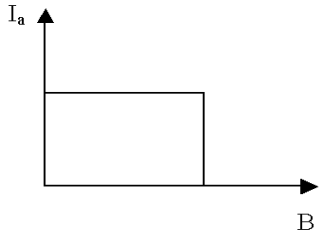


Рис.2

З виразу (7) видно, що чим більша індукція магнітного поля В, тим менший радіус кривизни траєкторії електронів. При деякому значенні індукції магнітного поля, яке назвемо критичним $B_к$, електрони не долітають до анода і починають рухатися по колу радіусом $r_к = \frac{R}{2}$. При цьому сила анодного струму $I_a$ повинна різко зменшуватися (рис.2). Дослід показує, що при критичному значенні індукції магнітного поля анодний струм не падає стрибком до нуля, а плавно зменшується (рис.3). Такий хід залежності анодного струму пояснюється тим, що вилітаючі з катода електрони мають певний розподіл за швидкостями, пов'язаний з їх тепловим рухом всередині катода. Щоб зменшити вплив початкових швидкостей, потрібно працювати при більших прискорюючих напругах.

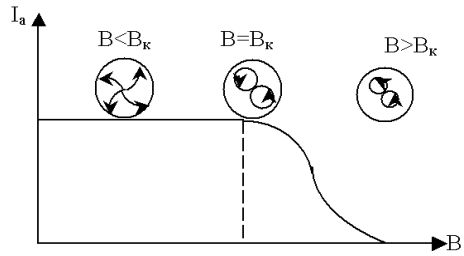


Рис.3

Крім того, плавний спад кривої $I_a = f(B)$ зумовлений некоаксіальністю катода і анода, наявністю залишкового газу в лампі, неоднорідністю поля соленоїда по висоті анода і т.д.

Із співвідношення (3) і (7) та з врахуванням, що $r_к = \frac{R}{2}$, одержимо

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{R^2 \cdot B_к^2} . \qquad (8)$$

Індукція магнітного поля соленоїда, довжина $\ell$ якого співмірна з діаметром d, находиться за формулою

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_{ск}}{\sqrt{\ell^2 + d^2}}, \qquad (9)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ Гн/м$; $N$ – число витків соленоїда.

Остаточно, підставляючи (9) у (8), отримаємо робочоу формулу для визначення питомого заряду електрона

$$\frac{e}{m} = \frac{8\,U\,(\ell^2 + d^2)}{(R^2\ N\ I_{ск}\ \mu_0)^2}. \qquad (10)$$

**Опис установки**

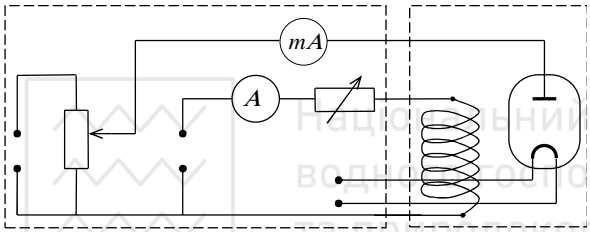



Рис.4

Схема експериментальної установки зображена на рис. 4 . Вона складається з модуля ФПЕ–03, блока живлення (БЖ), міліамперметра.

**Хід роботи**

1. Встановити анодну напругу $U_a = 100B$ по вольтметру блока живлення.
2. Змінюючи силу струму в соленоїді при постійній анодній напрузі, зняти залежність анодного струму від струму соленоїда $I_a$ *від* $I_c$. Дані занести в таблицю.
3. Оцінити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.
4. Побудувати графік залежності $I_a = f(I_c)$ і визначити по ньому критичний струм $I_{ск}$. Значення $I_{ск}$ вибирається на кривій $I_a = f(I_c)$ в точці, де $I_a$ починає спадати.
5. За робочою формулою (10) визначити питомий заряд електрона.

Національний університет водного господарства та природокористування

6. Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат

$$\varepsilon=\sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2+\left(\frac{2\Delta R}{R}\right)^2+\left(\frac{2\Delta\mu_0}{\mu_0}\right)^2+\left(\frac{2\Delta I_{ск}}{I_{ск}}\right)^2+\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2+\left(\frac{2\Delta\ell}{\ell}\right)^2+\left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2}$$

$$\Delta\left(\frac{e}{m}\right)=\pm\varepsilon\cdot\frac{e}{m}.$$

**Результати вимірювань**

| | |
|---|---|
| $U$= | $\Delta U_0$= |
| $l$= | $\Delta l_0$= |
| $d$= | $\Delta d_0$= |
| $R$= | $\Delta R_0$= |
| $N$= | $\Delta N_0$= |
| $\mu_{0=}$ | $\Delta(\mu_0)_0$= |
| $I_{ск}$= | $\Delta(I_{ск})_0$= |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_a$, mA | | | | | | | | | | |
| $I_c$, A | | | | | | | | | | |

Національний університет водного господарства та природокористування

**Контрольні запитання**

1. Яка будова магнетрона? Практичне використання магнетрона.
2. Описати електромагнітне поле в магнетроні.
3. Довести, що сила Лоренца не виконує роботи.
4. При яких умовах виникає сила Лоренца? Яка величина і напрям сили Лоренца?
5. Чому в залежності $I_a = f(I_c)$ відсутній різкий спад?
6. Вивести робочу формулу.

## Лабораторна робота № 4.4

## Вивчення магнітного поля соленоїда за допомогою давача Холла

**Мета роботи**: ознайомитися з холлівським методом вимірювання індукції магнітного поля; дослідити залежність індукції магнітного

поля в центрі соленоїда від сили струму; дослідити осьову неоднорідність магнітного поля в соленоїді.

**Теоретичні відомості та вивід робочої формули**

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі (інтерактивного комплексу Ч II), §§4.2-4.3)

***Соленоїд*** – котушку із провідника зі струмом можна вважати системою послідовно з'єднаних однакових колових струмів (рис.1), тому для розрахунку індукції $B$ магнітного поля в довільній точці на осі соленоїда потрібно спочатку розглянути магнітне поле на осі колового струму (одного витка соленоїда) (рис.2). Виберемо елемент струму $Id\vec{\ell}$. Вектор індукції магнітного поля, створеного цим елементом в точці А, положення якої задається радіус-вектором $\vec{r}$, визначається законом Біо-Савара-Лапласа (у вакуумі)

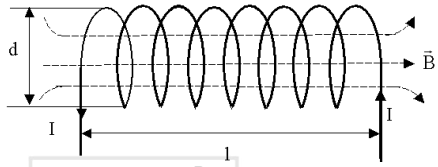


Рис.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3}, \qquad (1)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала. При цьому $d\vec{B}$ можна розкласти на дві складові: $d\vec{B}_{\parallel}$ – паралельну до осі Z і $d\vec{B}_{\perp}$ – перпендикулярну до цієї осі. За принципом суперпозиції вектор індукції магнітного поля в даному випадку,

$$\vec{B} = \oint\limits_{(\ell)} d\vec{B} = \oint\limits_{(\ell)} d\vec{B}_{\parallel} + \oint\limits_{(\ell)} d\vec{B}_{\perp} = \oint\limits_{(\ell)} d\vec{B}_{\parallel}. \qquad (2)$$

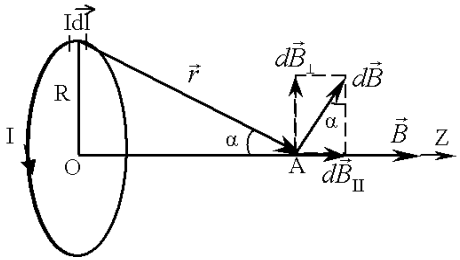


Рис.2

Тут враховано, що для кожного елементу $Id\vec{\ell}$ знайдеться симетричний елемент, що дає складову $d\vec{B}_{\perp}$ протилежного напрямку. Якщо врахувати, що $d\vec{B}_{\parallel}$ усіх елементів напрямлені вздовж осі Z, а також,

що
Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$\mathrm{dB}_{\parallel} = dB\sin\alpha = \frac{R}{r}dB \qquad \text{і } d\vec{\ell} \perp \vec{r},$$

то після підстановки (1) у (2) отримаємо для індукції магнітного поля на осі колового струму

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_0^{2\pi R}\frac{Rd\ell}{r^3} = \frac{\mu_0 IR^2}{2r^3}. \qquad (3)$$

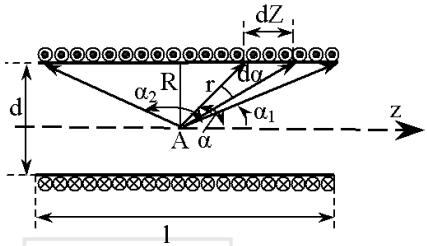


Рис. 3

Зауважимо, що в центрі колового струму ( r = R )

$$\mathrm{B} = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Для розрахунку **індукції магнітного поля соленоїда** розглянемо його осьовий переріз (рис. 3),припускаючи постійність щільності намотки вздовж осі *Z*. Якщо на одиницю довжини соленоїда припадає n витків, то на ділянці довжиною *dz* буде *ndz* витків, які в точці *A* створять магнітне поле з індукцією

$$dB = \frac{\mu_0 IR^2}{2r^3}\cdot ndz. \qquad (4)$$

Враховуючи, що $\mathrm{r} = \frac{\mathrm{R}}{\sin\alpha}$, $\mathrm{dz} = \frac{\mathrm{r}d\alpha}{\sin\alpha} = \frac{Rd\alpha}{\sin^2\alpha}$. проінтегруємо вираз (4) по всій довжині соленоїда

$$B = \int_{(\ell)} dB = \frac{\mu_0 In}{2}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2}\sin\alpha\mathrm{d}\alpha = \frac{\mu_0 In}{2}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2).$$

Отже індукції магнітного поля на осі соленоїда

$$B = \frac{\mu_0 I\, n}{2}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2). \qquad (5)$$

Якщо соленоїд довгий $(\ell >> d)$, то $\alpha_1 = 0$ і $\alpha_2 = \pi$. Тоді

$$\mathrm{B} = \mu_0\, I\, n. \qquad (6)$$

Зауважимо, що формулу (6) можна отримати, використавши теорему про циркуляцію вектора індукції магнітного поля. Для довгого соленоїда магнітне поле практично однорідне (силові лінії еквідистантні

Національний університет
водного господарства
та природокористування

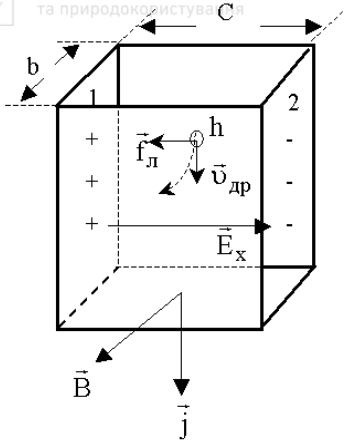



Рис. 4

і паралельні до осі соленоїда). Для реальних соленоїдів, коли $d \approx \ell$, поле найсильніше в центрі соленоїда і зменшується при наближенні до його кінців.

Для визначення індукції магнітного поля на осі соленоїда в цій роботі використовуються напівпровідникові давачі, дія яких ґрунтується на **ефекті Холла** – давачі Холла (ДХ) (рис. 4). Нехай для ДХ використано напівпровідниковий кристал з дірковою провідністю (носії струму – дірки (hole)). Якщо вздовж такого кристалу протікає електричний струм з густиною $\vec{j}$ і він розміщений у поперечному магнітному полі з індукцією $\vec{B}$, то на носії струму, заряд яких *e*, і які рухаються з дрейфовою швидкістю $\vec{\upsilon}_{др}$, буде діяти сила Лоренца

$$f_л = e\upsilon_{др} \cdot B\,. \qquad (7)$$

Ця сила, як видно з рис.4, буде відхиляти носії до грані 1, і між гранями 1 та 2 виникне поперечне холлівське поле з напруженістю $\vec{E}_x$, значення якої визначене з умови рівноваги $(f_л = eE_x)$ становить

$$E_x = \upsilon_{др} \cdot B\,. \qquad (8)$$

Різниця потенціалів між гранями 1 та 2 або холлівська напруга складає

$$U_x = E_x \cdot c = c\upsilon_{др}B\,. \qquad (9)$$

Якщо врахувати, що густина струму пов'язана з $\upsilon_{др}$ і концентрацією носіїв *p* співвідношенням $j = ep\upsilon_{др}$, то (9) перепишеться як

$$U_x = \frac{jB}{ep} \cdot c = \frac{I \cdot Bc}{ep \cdot bc} = \frac{1}{ep} \cdot \frac{IB}{b} = R_x \frac{IB}{b}, \qquad (10)$$

де *I* – сила струму, що протікає по кристалу, а $R_x = \frac{1}{ep}$ – постійна Холла.

Національний університет
та природокористування

Оскільки значення $b$ і $R_x$ є фіксованими параметрами ДХ, а сила струму підтримується постійною (для ДХ цієї роботи $I = 4мА$), то доцільно ввести коефіцієнт пропорційності $K_x = \dfrac{b}{R_x I}$, і тоді (10) запишеться як

$$B = K_x U_x . \qquad (11)$$

Отже, для визначення значення індукції магнітного поля соленоїда достатньо виміряти холлівську напругу між контактами 1–2 ДХ (рис.5) і помножити її на $K_x$. У зв'язку з нееквіпотенціальністю контактів 1 та 2 з'являється напруга нееквіпотенціальності $\Delta U_{\text{н.е.}}$ навіть при відсутності магнітного поля. Врахувавши $\Delta U_{\text{н.е.}}$, запишемо

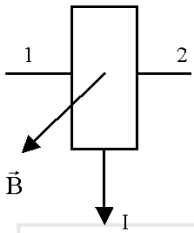


Рис.5

$$U_x = U_x' - \Delta U_{\text{н.е.}}, \qquad (12)$$

де $U_x'$ – напруга, що вимірюється вольтметром з великим вхідним опором (чи потенціометром), приєднаним безпосередньо до контактів 1 та 2 ДХ. Параметри $K_x$ і $\Delta U_{\text{н.е.}}$, а також кількість витків $N$, довжина $\ell$ і діаметр $d$ соленоїда задаються як паспортні дані блоку соленоїда.

Національний університет водного господарства та природокористування

**Опис установки**

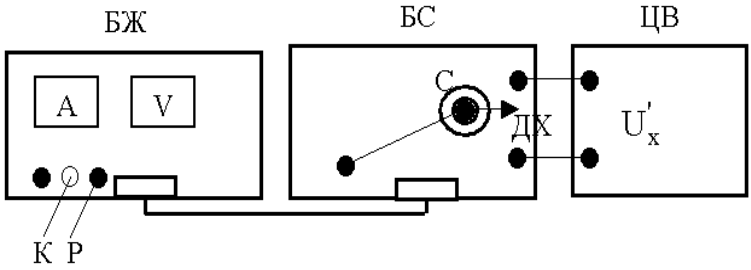


Рис.6

Блок-схема експериментальної установки зображена на рис.6. Блок живлення забезпечує регульований (регулятор Р) струм через соленоїд $(I_c = 0{,}3 \div 1{,}7\,A)$ який вимірюється амперметром А,

Національний університет
водного господарства
та природокористування

а також струм через ДХ (*I=4мА*). Давач Холла розміщений на рухомому штоці з шкалою, нульова позначка якої відповідає положенню ДХ в центрі соленоїда. Напруга на зондових контактах давача Холла вимірюється цифровим вольтметром.

## Хід роботи

### Дослідження залежності магнітної індукції в центрі соленоїда від струму соленоїда і осьової неоднорідності магнітного поля соленоїда

1. Розмістити шток з ДХ в трубі соленоїда в положенні "0" по шкалі (центр соленоїда).
2. Ввімкнути в мережу ~220В БЖ і ЦВ, поставивши перемикач К в положення $5 \div 25B$.
3. Виміряти напругу $U_x'$ при різних значеннях струму соленоїда $I_c = (0{,}4 \div 1{,}6)$А, з кроком $(0{,}2 \div 0{,}3)$ А. Дані занести в таблицю 1.
4. Встановити задане викладачем значення $I_c$.
5. Переміщуючи шток з ДХ вздовж осі соленоїда з кроком $\Delta z = 1$см, виміряти $U_x'$, розрахувати $U_x$ і $B$. Дані занести в табл.2.
6. За формулою (12) розрахувати $U_x$.
7. За формулою (11) розрахувати $B$ при всіх значеннях $I_c$ і Z
8. Побудувати графік залежності $B = f(I_c)$ і $B = f(z)$. Зробити висновок.
9. Для центру соленоїда розрахувати В за формулами (5) та (6). Результати порівняти з експериментом; зробити висновки.

### Результати вимірювань

$K_x =$ $\Delta U_{\text{н.е.}} =$

N = $I_c =$

$\ell =$ $d =$ $n = \dfrac{N}{\ell} =$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 1

| № | $I_c$, $A$ | $U'_x$, $B$ | $U_x$, $B$ | $B$, $Тл$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |

Таблиця 2

| z, *мм* | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 95 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U'_x$, $B$ | | | | | | | | | | | |
| $U_x$, $B$ | | | | | | | | | | | |
| $B$, $Тл$ | | | | | | | | | | | |

Національний університет
водного господарства
та природокористування

**Контрольні запитання**

1. Записати і пояснити закон Біо-Савара-Лапласа.
2. Вивести формулу для індукції магнітного поля на осі і в центрі колового струму.
3. Вивести формулу для індукції магнітного поля в центрі довгого соленоїда, користуючись теоремою про циркуляцію вектора індукції магнітного поля.
4. В чому суть ефекту Холла?

Національний університет
водного господарства
та природокористування

# Лабораторна робота № 4.5

## Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі

**Мета роботи:** визначити горизонтальну складову напруженості магнітного поля Землі.

### Теоретичні відомості

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі (інтерактивного комплексу Ч II), §§ 4.1, 4.2)

Закон Біо-Савара-Лапласа (у вакуумі) у векторній формі записується

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} I \frac{d\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3}, \qquad (1)$$

а в скалярній формі $dH = \frac{1}{4\pi} \frac{I\, d\ell\, r \sin\alpha}{r^2}$,

де $d\vec{\ell}$ – вектор елементу довжини провідника, $I$ сила струму, що тече по провіднику, $\vec{r}$ - радіус-вектор, вектор, який сполучає елемент довжини зі струмом (елемент струму $I \cdot d\vec{\ell}$ ) з точкою, де визначають вектор напруженість магнітного поля $d\vec{H}$ .

Для визначення напруженості від усього провідника, необхідно застосувати принцип суперпозиції: напруженість магнітного поля, створеного сукупністю окремих магнітних полів рівна геометричній сумі напруженостей цих окремих полів.

$$\vec{H} = \sum_i^n \vec{H}_i \qquad (2)$$

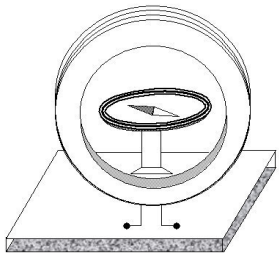


Рис.1

Тангенс-гальванометр – прилад призначений для вимірювання горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі, складається з вертикально встановленої колової рамки, на яку намотано кілька витків ізольованого провідника. В центрі рамки знаходиться маленька магнітна стрілка, що може вільно обертатися в

горизонтальній площині (рис.1)

На основі формул (1) та (2) напруженість магнітного поля в центрі колової рамки зі струмом визначається за формулою

$$H = \frac{IN}{2R}, \tag{3}$$

де $I$ – сила струму в рамці, $N$ – кількість витків, $R$ – радіус кола. Напрямок $\vec{H}$ визначається за правилом свердлика і співпадає з нормаллю до площини рамки. Крім того, існує магнітне поле Землі, напрямок напруженості якого співпадає з напрямком магнітного меридіана. При проходженні струму через котушку напруженість результуючого магнітного поля, згідно з принципом суперпозиції, дорівнює векторній сумі напруженостей магнітного поля Землі і магнітного поля колового струму. Якщо площина колового струму збігається з площиною магнітного меридіана, то горизонтальна складова напруженості магнітного поля Землі $\vec{H}_0$ лежить у площині колового струму, а напруженість $\vec{H}$ магнітного поля струму перпендикулярна до цієї площини, отже і до $\vec{H}_0$. За принципом суперпозиції результуюча напруженість $\vec{H}_1 = \vec{H} + \vec{H}_0$ може бути знайдена геометрично за правилом паралелограма (рис.2). Магнітна стрілка, яка у відсутності струму орієнтувалася вздовж $\vec{H}_0$, при проходженні струму через рамку повертається на деякий кут $\alpha$ і встановлюється вздовж напрямку результуючого поля $\vec{H}_1$. Як видно з рис.2

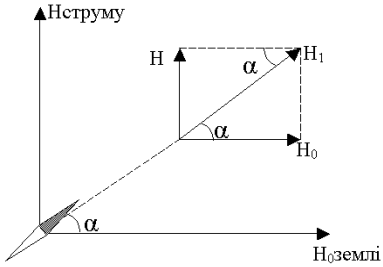


Рис.2

$$H_0 = \frac{H}{tg\alpha}. \tag{4}$$

Підставивши (1) в (2), одержимо

$$H_0 = \frac{I\ N}{2\ R\ tg\alpha}. \tag{5}$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

## Хід роботи

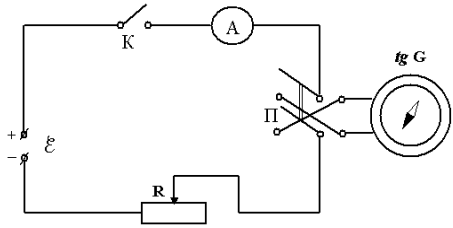


Рис.3

1. . Скласти схему згідно рис.3.
2. Повертаючи тангенс-гальванометр у горизонтальній площині, встановити так, щоб кінець магнітної стрілки показував нуль.
3. Повертаючи рамку, встановити площину її витків паралельно до магнітної стрілки.
4. Замкнути ключ К (перемикач П замкнений в довільному положенні) і за допомогою реостата підібрати таку силу струму, щоб кут відхилення стрілки $\alpha$ був близьким до 45° (в цьому випадку похибка вимірювань буде найменшою). Виміряти кути відхилення кінців стрілки $\alpha_1$ і $\alpha_2$.
5. Перемикачем П змінити напрямок струму на протилежний, виміряти кути відхилення стрілки $\alpha_3$ і $\alpha_4$.
6. Дослід повторити два рази при незмінній силі струму.
7. Записати значення величин $I, R, N$.
8. Оцінити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.
9. Визначити середнє значення $\alpha$.
10. За робочою формулою (5) знайти $H_0$.
11. .Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат.

$$\varepsilon = \pm\sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}\right)^2}$$

$$\Delta H_0 = \varepsilon \cdot H_0$$

Величина $\Delta\alpha$ має бути виражена в радіанах.

### Результати вимірювань

| | |
|---|---|
| $I =$ | $\Delta I_0 =$ |
| $R =$ | $\Delta R_0 =$ |
| $N =$ | $\Delta\alpha_0 =$ |

| № | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| Ср | $\alpha =$ | | | |

**Контрольні запитання**

1. Сформулювати і записати закон Біо-Савара-Лапласа та принцип суперпозиції магнітних полів.
2. Який зв'язок між магнітною індукцією та напруженістю магнітного поля? В яких одиницях вимірюються В та Н?
3. Вивести формулу для напруженості магнітного поля в центрі колового струму.
4. Пояснити будову і принцип дії тангенс-гальванометра. Вивести робочу формулу.
5. Чому магнітна стрілка тангенс-гальванометра повинна бути невеликого розміру?
6. Від чого залежить кут відхилення стрілки в даній роботі?
7. Чому похибка вимірювань найменша, коли кут відхилення $\alpha$ близький до 45°?

**Література**


1. Навчальний посібник "Загальна фізика", ч. II, під редакцією Олексин Д.І., Орленка В.Ф. Рівне, НУВГП, 2009
2. Трофимова Т.И. Курс физики.–М., "Высшая школа", 1990.
3. Детлаф А.А., Яворский В.М. Курс физики.–М., "Высшая школа", 1989.
4. Савельев И.В. Курс физики.–М., "Наука", 1989, т.1–3.
5. Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М. та ін. Курс фізики. За ред. Лопатинського І.Є., Львів, "Бескид Біт" 2002.
6. Олексин Д.І., Мороз В.М. Загальна фізика. Частина 1. Конспект лекцій для студентів заочної форми навчання. Рівне, 2002, 073-89.
7. Дубчак Д.І., Ковалець М.О., Орленко В.Ф., Никонюк Є.С., Шляховий В.Л. Загальна фізика. Частина 2. Конспект лекцій для студентів заочної форми навчаня. Рівне, 2002, 073-90.
8. Кучерук І.М. та ін. Загальний курс фізики. У трьох томах, К., 1999.

Національний університет
водного господарства
та природокористування



Приклад оформлення титульної сторінки

***НУВГП***

***Кафедра хімії та фізики***

# *Звіт*

***з лабораторної роботи №***

**Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі**

Національний університет
водного господарства
та природокористування

***Виконав:***
***ст. МБ 11***
***Яковчук А.А***
***Перевірив:***
***Орленко В.Ф.***

***Рівне 2013 р***

Національний університет
водного господарства
та природокористування



Приклад оформлення звіту

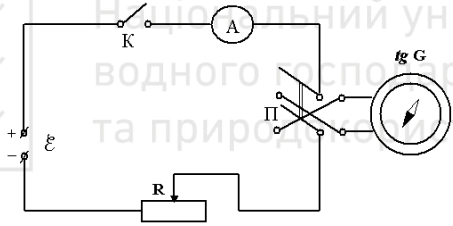
---

***1. МЕТА РОБОТИ:*** визначити горизонтальну складову напруженості магнітного поля Землі.

***2. РОБОЧА ФОРМУЛА***

$$H_0 = \frac{I\ N}{2\ R\ tg\alpha}$$

$I$ – сила струму;
$\alpha$ – кут відхилення стрілки;
$R$ – радіус колових витків;
$N$ – кількість витків.




***3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ***

$I =$ $\Delta I_0 =$

$R =$ $\Delta R_0 =$

$N =$ $\Delta\alpha_0 =$

| № | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| Ср | $\alpha =$ | | | |

Національний університет
водного господарства
та природокористування

## 4. *ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ*

(Підставляємо в робочу формулу середні значення)

$H_0 =$

(Похибки обчислюються за вибраною методикою)

$$\varepsilon = \pm\sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}\right)^2}$$

$$\Delta H_0 = \varepsilon \cdot H_0$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

## 5. *КІНЦЕВИЙ РЕЗУЛЬТАТ*

$\boldsymbol{H_0 = H_0 \pm \Delta H_0}$

$\boldsymbol{\varepsilon =}$ %