

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА  
ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Інструкція до лабораторної роботи

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за природничими і технічними спеціальностями*

Укладач: Гусєва Ю.І., Самар Г.В.

Електронне мережеве навчальне видання

Київ  
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО  
2024

УДК 537.8

Г 96

**Укладачі:** Гусєва Юлія Ігорівна, доктор філософії з фізики та астрономії, старший викладач кафедри загальної фізики

Самар Ганна Володимирівна, старший викладач кафедри загальної фізики

**Рецензент:** Савченко Д.В., в.о. зав. кафедри ЗФ та моделювання фізичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського, д-р фіз.-мат. наук, доц.

**Відповідальний редактор:** С.О Решетняк, завідувач кафедри загальної фізики, доктор фіз.-мат. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 8 від 20.06.2024 р.)  
за поданням Вченої ради фізико-математичного факультету  
(протокол № 7 від 20.05.2024 р.)*

**Г 96** Загальна фізика. Дослідження магнітного поля. [Електронний ресурс] інструкція до лабораторної роботи : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за природничими і технічними спеціальностями / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю.І. Гусєва, Г.В. Самар – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. –10 с.

У навчальному посібнику викладено теоретичні відомості, опис лабораторної роботи з теми «Дослідження магнітного поля», наведено методичні вказівки до виконання цієї роботи. Посібник призначений для студентів, які навчаються у закладах вищої освіти і вивчають нормативну навчальну дисципліну «Загальна фізика 2» з циклу математичної та природничо-наукової підготовки за спеціальністю «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Посібник може бути корисним для науково-педагогічних працівників, які викладають курс фізики, під час планування та підготовки завдань до лабораторних робіт та модульних контрольних робіт з курсу загальної фізики.

УДК 537.8

Реєстр. № . Обсяг 0,5 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017

□□□□Ю.І. Гусєва, Г.В. Самар, 2024  
□□□□КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

## Лабораторна робота № ФПЕ-04

### ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

**Мета роботи:** ознайомитись з холлівським методом вимірювання індукції магнітного поля, визначення сталої Холла, вимірювання індукції магнітного поля у різних точках на осі соленоїда скінченної довжини.

#### Прилади:

ДЖ – джерело живлення, РV – цифровий вольтметр, С – соленоїд, Ш – шток з нанесеною шкалою та закріплений на торці датчика Холла.

#### Короткі теоретичні відомості

В просторі, що оточує провідники зі струмом або рухомі заряди, виникає магнітне поле. Це поле можна виявити при впливі його на інший провідник зі струмом або на магнітну стрілку. Магнітне поле в кожній точці простору кількісно може бути описано за допомогою вектору напруженості магнітного поля  $\vec{H}$  або вектору магнітної індукції поля  $\vec{B}$ .

У вакуумі вектори  $\vec{H}$  та  $\vec{B}$  пов'язані наступним співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (1)$$

де  $\mu_0$  – магнітна стала,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_{\text{H}}}{\text{м}}$ .

Для обчислення індукції магнітного поля використовують закон Біо-Савара-Лапласа, згідно якого елементарна індукція магнітного поля  $d\vec{B}$ , що створена елементом провідника зі струмом  $I d\vec{l}$  в деякій точці простору на відстані  $\vec{r}$ , складає

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 [I d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3} \quad (2)$$

Для визначення результуючої індукції, що створена провідником кінцевого розміру, необхідно скористатися принципом суперпозиції магнітних полів та знайти суму елементарних індукцій  $d\vec{B}$ , створених окремими елементами провідника:

$$\vec{B} = \sum_k d\vec{B}_k = \sum_k \frac{\mu_0 [I d\vec{l}, \vec{r}]_k}{4\pi r_k^3} \quad (3)$$

В граничному випадку сума записується у вигляді інтегралу по контуру провідника зі струмом.

Використаємо формулу (3) для обчислення індукції магнітного поля на осі соленоїда. Кожен виток соленоїду – це круговий струм, тому спочатку порахуємо індукцію поля на осі кругового витка зі струмом (рис.1).

Щоб обчислити індукцію магнітного поля в точці А на відстані  $h$  від центру колового витка, поділимо його на нескінченно малі елементи  $I d\vec{l}$  і обчислимо спочатку індукцію  $d\vec{B}$ , створену цим елементом. Помічаємо, що при додаванні компонент магнітного поля  $d\vec{B}_2$ , які перпендикулярні до осі  $OA$ , вони компенсують одна одну в наслідок симетрії контуру.

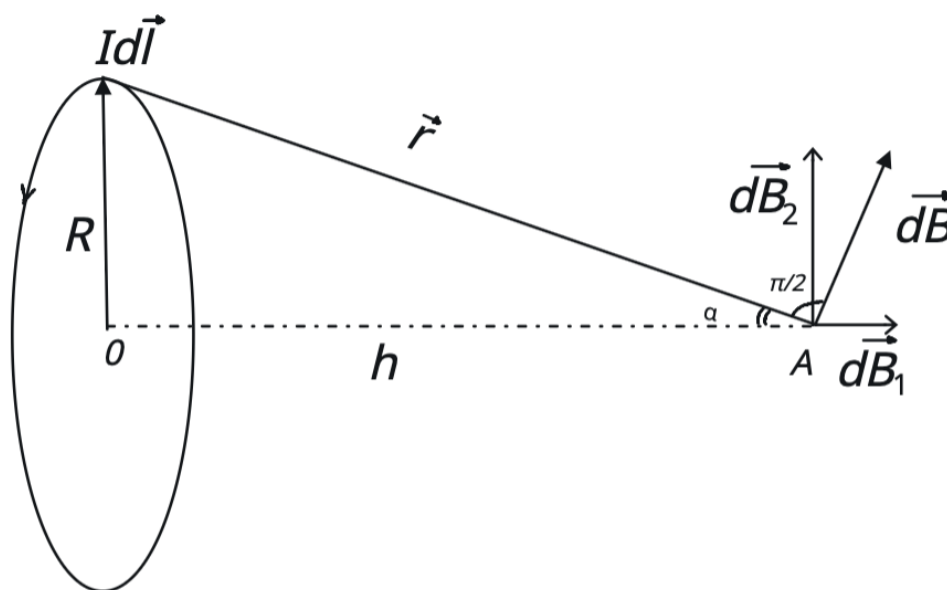


Рис. 1 Схематичне зображення одного витка соленоїда для визначення індукцію поля на його осі

Тому результуюча індукція магнітного поля в точці А направлена вздовж осі кругового струму і по модулю складає

$$B = \oint_L dB_1 \quad (4)$$

$$dB_1 = dB \sin \alpha = dB \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 I dl R}{4\pi r^3} \quad (5)$$

В (5) враховано, що вектори  $d\vec{l}$  та  $\vec{r}$  взаємно перпендикулярні. Підставимо (5) у (4) та враховуючи, що значення величин  $R$  та  $r$  постійні, маємо

$$B = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0 I dl R}{4\pi r^3} = \frac{\mu_0 I R^2}{2r^3} \quad (6)$$

Перейдемо тепер до виведення формули для поля на осі соленоїда, що зображений на рис.2.

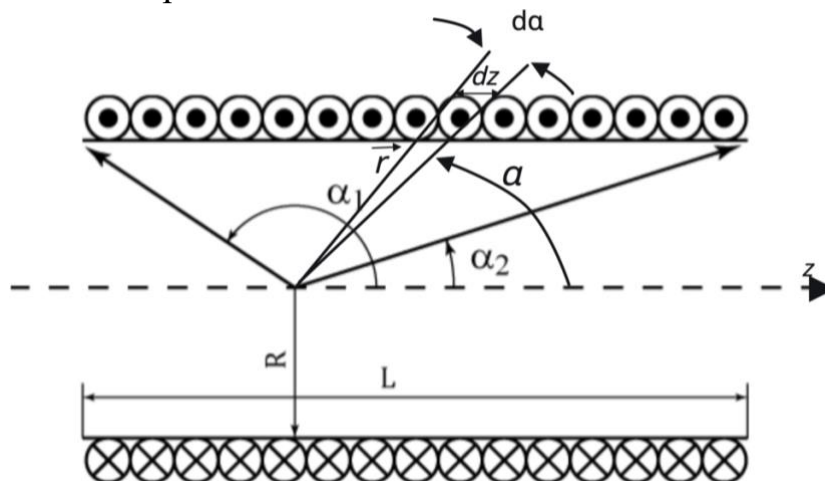


Рис. 2 Схематичне зображення соленоїда в розрізі з геометричними позначками, які необхідні для оцінки значення магнітної індукції

Соленоїдом називають сукупність спірально намотаних на циліндричну поверхню витків ізоляваного провідника, по якому проходить електричний струм. Зазвичай провідник намотаний в один шар щільно та рівномірно. Тобто кількість витків обмотки на одиницю довжини  $n = N/L$  є сталою величиною (тут  $N$  – кількість витків,  $L$  – довжина соленоїда). В такому випадку соленоїд можемо вважати сукупністю кілець зі струмом, отже, будемо користуватися формулою (6) для розрахунків магнітного поля на його осі.

Нехай на одиницю довжини соленоїда припадає  $n$  витків, тоді на ділянці  $dz$  буде  $ndz$  витків, які в точці  $O$  соленоїда згідно (6) створюють індукцію

$$dB_z = \frac{\mu_0 IR^2}{2r^3} ndz \quad (7)$$

На рис.2 також окремо зображені елемент  $dl$ , радіус-вектор і кути  $\alpha$  і  $d\alpha$ . З геометричних побудов рис.2 виходить:

$$r = \frac{R}{\sin\alpha}; \quad dz = \frac{r d\alpha}{\sin\alpha}. \quad (8)$$

Щоб знайти результуюче значення магнітної індукції магнітного поля в точці  $O$ , підставимо (8) в (7) та проінтегруємо від  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$ :

$$B_z = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \mu_0 n I \sin\alpha d\alpha = \mu_0 n \frac{I}{2} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \quad (9)$$

де  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  -кути між радіус-векторами, проведеними з точки  $O$  до крайніх витків, та віссю соленоїда (див. Рис.2).

Приблизний вигляд зміни індукції магнітного поля вздовж осі соленоїда наведено на Рис.3

У випадку нескінченно довгого соленоїда ( $\alpha_1 \rightarrow 0, \alpha_2 \rightarrow \pi$ )

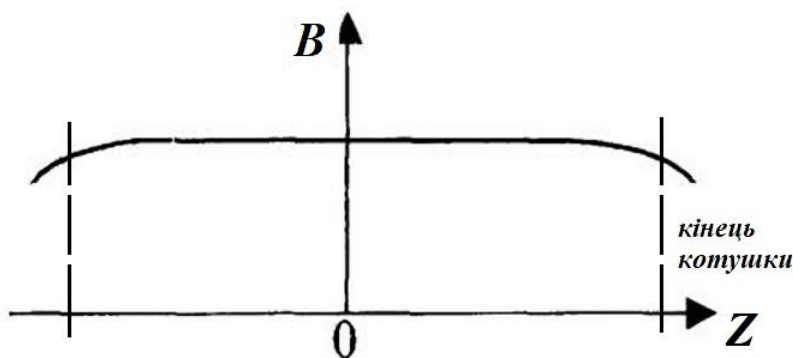


Рис. 3 Схематичний графік залежності магнітної індукції від положення вздовж осі.

$$B_z = \int_0^\pi \mu_0 n I \sin \alpha d\alpha = \mu_0 n I \Rightarrow H_z = nI. \quad (10)$$

### Ефект Холла

Якщо через провідну пластинку з поперечним перерізом  $a \times h$  пропустити струм густиною  $\vec{j}$  і помістити її в поперечне магнітне поле з індукцією  $\vec{B}$ , то перпендикулярно векторам  $\vec{j}$  і  $\vec{B}$  створюється електричне поле напруженістю  $\vec{E}$  (див. рис.4). На електрони, що рухаються зі швидкістю  $\vec{v}$  в магнітному полі з індукцією  $\vec{B}$  діє сила Лоренца  $\vec{F} = e[\vec{v} \cdot \vec{B}]$ , яка відхиляє електрони до однієї з граней провідника. Ця грань заряджається негативно. Протилежна грань заряджається позитивно внаслідок нестачі електронів. При цьому виникає різниця потенціалів  $\Delta\phi_x$  (ЕРС Холла), яка пропорційна величині струму і індукції магнітного поля:

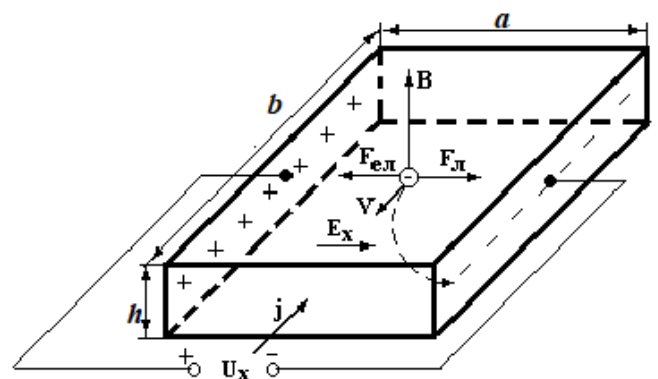


Рис. 4 Схематичне зображення ефекту Холла

$$\Delta\phi_x = R_x j B a = \frac{R_x I B}{h}, \quad (11)$$

де  $I = jah$ .

Коефіцієнт пропорційності  $R_x$  називається сталю Холла. Ця величина є основною кількісною характеристикою ефекту Холла і є неоднаковою для різних провідників та напівпровідників. Знак  $R_x$  збігається зі знаком носіїв заряду. Для металів  $R_x \sim 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$ , а для напівпровідників  $R_x \sim 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Отже, холлівська різниця потенціалів в напівпровідниках значно більша, ніж у провідниках, тому спостерігати ефект Холла в напівпровідниках простіше, ніж у металах.

### Метод вимірювання



Для експериментального дослідження напруженості магнітного поля на осі соленоїда в роботі використовується метод, що ґрунтується на ефекті Холла.

У роботі використовується датчик Холла марки Х501 із керуючим струмом 90 мА, оскільки стала Холла для напівпровідників значно більша, ніж для провідників.

Силкові лінії магнітного поля на осі соленоїда направлені уздовж осі, тому датчик Холла розташований на торці спеціального штока, вставленого в соленоїд. Товщина датчика у напрямі магнітного поля рівна 0.2 мм. Для вимірювання положення датчика усередині соленоїда на бічній грані штока нанесена міліметрова шкала.

За відсутності магнітного поля ЕРС Холла повинна бути рівна нулю. Проте унаслідок різних побічних явищ, наприклад, неточної установки



вихідних електродів датчика, можливе отримання ненульових значень навіть за відсутності струму в соленоїді. Для виключення похибки вимірювання проводять двічі при протилежних напрямках струму в соленоїді. В даній роботі зміну напрямку струму в соленоїді не передбачено. Похибка визначення ЕРС Холла вказана на касеті ФПЕ-04м і становить  $\pm 0,5$  мВ.

### Порядок виконання роботи

#### ***Завдання 1. Визначення залежності магнітної індукції в середній точці на осі соленоїда і тарування датчика Холла.***

1. Ознайомитись із установкою та принципом її дії.
2. Поставити шток з датчиком Холла в середнє положення на осі соленоїда («0» на шкалі).
3. Ввімкнути джерело живлення та цифровий вольтметр у мережу напруги 220В та виміряти ЕРС Холла в центрі соленоїда для струмів 0,5; 1; 2 А, при цьому із виміряних значень  $\Delta\phi_x$  необхідно вирахувати поправку  $\delta(\Delta\phi_x)$ , вказану на датчику Холла. Дані занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№	Струм соленоїда, $I_c, A$	ЕРС датчика хола, $\Delta\phi_x, B$	Індукція В, Тл	Стала Холла, $R_x$ , $B \cdot m / (Tл \cdot A)$

4. Визначити індукцію магнітного поля для заданих значень сили струму  $I_c$  за формулї. (10). Дані занести в таблицю 1.
5. Обчислити значення сталої Холла  $R_x$  для кожного вимірювання за формулою (11), дані занести в таблицю. Знайти середнє значення  $\langle R_x \rangle$ .
6. Побудувати графіки залежності  $B=f(I_c)$  та  $\Delta\phi_x = f(I_c)$  за даними таблиці 1.

#### ***Завдання 2. Дослідження залежності індукції магнітного поля від координати x, відрахованої від середньої точки.***



1. Встановити величину сили струму в котушці соленоїда за вказівкою викладача.
2. Переміщуючи шток з датчиком Холла вздовж осі соленоїда з інтервалом  $\Delta x=10$  мм, виміряти ЕРС Холла. Отримані дані занести в таблицю 2.

Таблиця 2

Положення датчика $x$ , мм									
ЕРС датчика Холла, В									
Індукція, Тл									

3. Визначити індукцію поля для кожного положення датчика Холла за формулою (11). При розрахунках використати значення  $R_x$ , отримані в завданні 1. Дані занести в Таблицю 2.
4. Побудувати графік залежності  $B=f(z)$  за даними таблиці 2.
5. Повторити вимірювання і розрахунки виконані в п.2 – 4 для нового заданого викладачем чи лаборантом значення  $I_c$  (в діапазоні 0,5 -2 А).
6. Для одного із отриманих значень  $B$  вирахувати абсолютну і відносну похибки вимірювань.

### Контрольні питання

1. Сформулюйте закон Біо-Савара-Лапласа.
2. Користуючись законом Біо-Савара-Лапласа, виведіть формулу для індукції магнітного поля на осі кругового витка зі струмом.
3. Сформулюйте теорему про циркуляцію вектору  $B$  по контуру  $L$ . Використавши цю теорему виведіть формулу для індукції магнітного поля нескінченного соленоїда.
4. Опишіть метод вимірювання індукції магнітного поля за допомогою датчика Холла.
5. Використавши принцип суперпозиції виведіть формулу для індукції магнітного поля для нескінченного соленоїда.
6. Виведіть формулу для ЕРС Холла.
7. Нарисуйте схему вимірювань для дослідження залежності  $B=f(z)$ .
8. Від яких величин залежить стала Холла?
9. Намалюйте профіль магнітних силових ліній для скінченного та нескінченного соленоїда.

## **Література**

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т, Луцик П.П.. Т.2. Електрика і магнетизм. К .; «Техніка», 2006.
2. І.Ф.Скіцько, О.І.Скіцько: Фізика (Фізика для інженерів). Електронне мережеве навчальне видання. Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.