

Дослідження магнітного поля соленоїда за допомогою датчика Холла

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи датчика Холла, дослідити розподіл магнітного поля всередині соленоїда

Прилади та аксесуари : касета ФПЕ – 04 з соленоїдом та датчиком Холла на штоку, джерело живлення, цифровий вольтметр.

Теоретичне введення

Магнітне поле соленоїда

Соленоїд є ізольованим провідником, намотаним по гвинтовій лінії на циліндричний каркас. Слово «соленоїд» утворене поєднанням двох грецьких слів — solen (труба) та eidos (схожий). Тобто соленоїд - це котушка, що формою нагадує трубу (рис.1).

При подачі електричного струму через обмотку в порожнині соленоїда створюється магнітне поле.

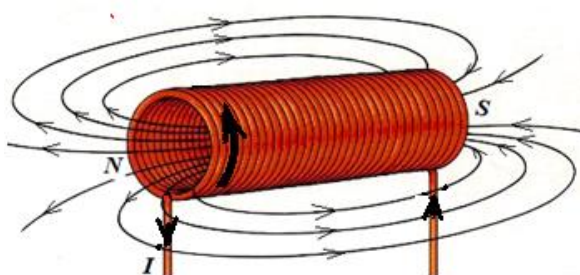


Рис.1

Лінії магнітного поля соленоїда показані на рис. 1 та рис. 2. Усередині соленоїда напрямком ліній утворює з напрямком струму правогвинтову систему.

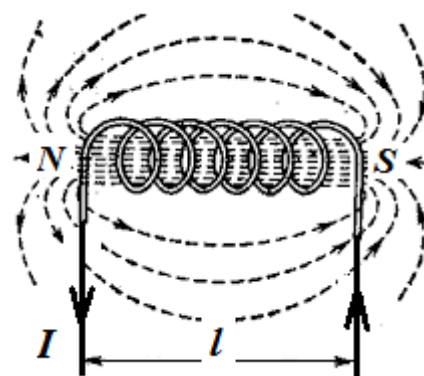


Рис. 2.

Якщо довжина обмотки соленоїда значно більша за його діаметр, то соленоїд вважається нескінченно довгим. Усередині нескінченного соленоїда магнітне поле однорідне, тобто. у всіх точках всередині соленоїда вектор \mathbf{B} індукції магнітного поля є постійним, спрямованим по осі соленоїда і має величину (див. [1], § 8.4)

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I, \quad (1)$$

де N – число витків у соленоїді, l – довжина намотування соленоїда, n – число витків на одиницю довжини, I – сила струму у соленоїді, μ_0 – магнітна постійна, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Соленоїди **практично використовуються** в багатьох галузях діяльності людини. Наприклад, клапани двигунів, тягове реле стартера автомобіля, клапани гідравлічних систем, підйомні електромагніти, соленоїдні замки, детектори у Великому адронному колайдері в ЦЕРН, установки індукційного загартування та нагрівання та багато іншого.

Ефект Холла

Для знаходження магнітної індукції на осі соленоїда в установці використовується вимірювач магнітної індукції, принцип роботи якого заснований на ефекті Холла.

Ефект Холла полягає у наступному. Якщо пропускати струм I через прямокутну пластинку провідника або напівпровідника вздовж довжини пластинки, а перпендикулярно до площини пластинки прикласти магнітне поле B , то на бокових сторонах пластинки виникає різниця потенціалів U_x (рис. 3).

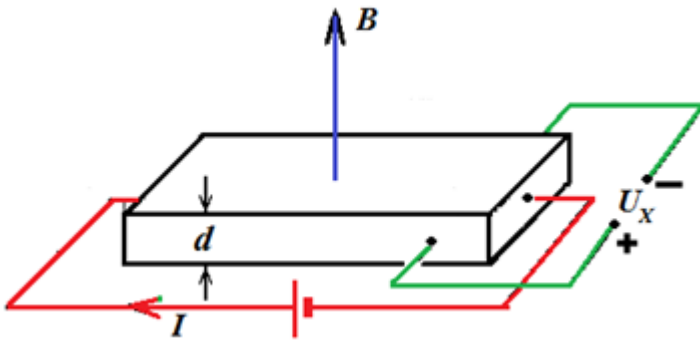


Рис. 3.

Це явище пояснюється тим, що на рухомі носії струму с зарядом q (електрони провідності або дірки) в магнітному полі діє магнітна сила (сила Лоренца) F_L , величина і напрямок якої визначається векторним виразом

$$F_L = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

Сила Лоренца відхиляє носії струму від початкового напрямку руху в напрямку, перпендикулярному

як вектору швидкості \mathbf{v} направлено руху, так і вектору магнітної індукції \mathbf{B} .

На рис. 4 показано напрям сили Лоренца, що діє на електрони провідності в напівпровіднику n -типу (з електронним типом провідності) або в металі, поміщеному в магнітне поле. Струм I вздовж пластинки проходить зліва направо, вектор магнітної індукції B направлений вертикально вгору. Нагадаємо, що електрони, які мають негативний заряд, рухаються в бік протилежний струму. Скориставшись правилом векторного добутку і враховуючи негативний знак заряду електрона, з формули (2) визначаємо, що електрони відхиляються силою Лоренца на дальню грань пластинки.

Внаслідок цього на ній виникає надлишок електронів, а на ближній – їх нестача. Дальня грань пластинки заряджається негативно, а ближня – позитивно, і поміж ними виникає електрична напруга U_x (названа також ЕРС Холла) (рис. 3).

Можна показати (див., наприклад, [1, 2]), що ця холлівська напруга U_x розраховується за формулою

$$U_x = R_x \cdot \frac{I \cdot B}{d}. \quad (3)$$

Тут I – сила струму, B – модуль вектора магнітної індукції, d – товщина пластинки. Коефіцієнт пропорційності R_x називається **постійною Холла**. Вона

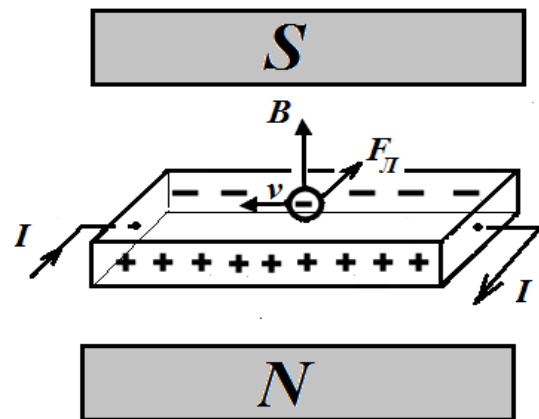


Рис. 4.

має розмірність $[m^3/A \cdot s]$, залежить тільки від матеріалу провідника та є його характеристикою.

Класична теорія електропровідності дає такий вираз для постійної Холла.

$$R_x = \frac{1}{nq}, \quad (4)$$

(n – концентрація, тобто кількість носіїв струму в одиниці об'єму, q – їх заряд).

Для металів, у яких концентрація електронів $n \sim 10^{28} m^{-3}$, $R_x \sim 10^{-9} m^3/A \cdot s$, для напівпровідників $R_x \sim 10 m^3/A \cdot s$.

Вимірявши постійну Холла R_x , можна знайти концентрацію носіїв струму, а визначивши її знак можна судити про природу провідності даного напівпровідника або металу. Якщо виявиться, що $R_x < 0$, це означатиме, що провідність здійснюється електронами, якщо $R_x > 0$ – дірками.

На основі ефекту Холла працюють *датчики Холла – прилади*, що дозволяють прямо і точно *вимірювати магнітну індукцію поля*, а також виконують інші завдання автоматики.

Як же визначити постійну Холла R_x для речовини датчика, що використовується?

З формули (3) випливає, що

$$R_x = \frac{d}{B} \cdot \frac{U_x}{I} \quad (5)$$

У правій частині рівняння (5) стоять чотири величини. Змінюючи струм I (за **приладом**) в обмотці соленоїда, тобто, змінюючи цим величину магнітного поля, можна визначити (за **приладом**) відповідне значення холлівської напруги U_x . Товщина датчика d також **може бути виміряна** безпосередньо. А от недостатню **четверту величину B формулі (5) розраховують**, користуючись тим, що датчик поміщений в центр соленоїда, в якому значення магнітної індукції дорівнює $B = \mu_0 n I$.

Тоді формула для розрахунку R_x набуває вигляду

$$R_x = \frac{U_x d}{\mu_0 n I^2} \quad (5a)$$

Що дає знання знайденої постійної Холла R_x датчика?

Визначимо з формули (3) індукцію магнітного поля:

$$B = \frac{U_x d}{I R_x}. \quad (6)$$

Тепер **можна**, вимірявши датчиком у будь-якій точці магнітного поля напругу U_x при заданій силі струму в обмотці соленоїда I і відомій постійній R_x , **визначити магнітну індукцію B цієї точці**.

Методика експерименту та експериментальна установка

Таким чином, мета роботи - вивчення магнітного поля всередині соленоїда зі струмом - буде досягнута після виконання двох експериментів:

- визначення постійної Холла R_x для даного датчика (тарування датчика Холла);

- вимірювання за допомогою датчика Холла магнітної індукції у різних точках на осі соленоїда кінцевої довжини.



Рис. 5.

Досліджуваний соленоїд закріплений у пластмасовій коробці (рис. 5). Від джерела живлення (див. фото) на соленоїд подається струм, силу якого можна змінювати. Струм у соленоїді фіксується амперметром джерела живлення (див. фото). Вздовж осі соленоїда переміщується шток, на кінці якого міститься вимірювач магнітної індукції – датчик Холла. На штоку через 1 см нанесені поділки, за допомогою яких ведеться відлік переміщення датчика Холла вздовж осі соленоїда.

У датчику виникає напруга U_x , яка пропорційна магнітній індукції поля і вимірюється цифровим вольтметром.

Параметри соленоїда: число витків $N = 2700$, довжина $l = 15$ см, число витків на одиницю довжини $n = 1,8 \cdot 10^4$ 1/м.

Товщина датчика $d = 0,2$ мм.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Визначення постійної Холла R_x .



Фото

1. Помістити датчик Холла у центр соленоїда. Для цього висунути шток з датчиком у положення «0» за шкалою штока.
2. Повернути ручки регуляторів струму та напруги на панелі «ДжЖивл» до упору проти годинникової стрілки, увімкнути тумблер МЕРЕЖА.
3. Увімкнути тумблер МЕРЕЖА цифрового вольтметра, перемикачем «ВИД РОБОТИ» встановити режим вимірювання постійної напруги "U=".
4. Встановити за допомогою джерела живлення силу струму в соленоїді 0,5 А та виміряти ЕРС Холла у центрі соленоїда. Дані занести до табл. 1.
5. Збільшуючи силу струму в соленоїді через 0,5 А до максимального, провести вимірювання U_x .

6. Обчислити за формулою $R_x = \frac{U_x d}{\mu_0 n I^2}$ постійну Холла для кожного виміру. Дані занести таблицю 1. Знайти середнє значення $\langle R_x \rangle$.

N за/п	Струм соленоїда I, A	ЕРС датчика Холла, U_x, B	Постійна Холла $R_x, m^3/A \cdot c.$ за формулою (5a)	$\langle R_x \rangle$
1	0,5			
2	1,0			
3	1,5			
4	2,0			

Завдання 2. Дослідження залежності індукції магнітного поля соленоїда в різних точках на його осі від координати Z , що відраховується від середньої точки.

1. Встановити величину струму I в котушці соленоїда за вказівкою викладача.
2. Переміщуючи шток з датчиком Холла вздовж осі соленоїда з інтервалом 1 см, виміряти U_x у різних точках його осі. Отримані дані занести в таблицю 2.
3. Обчислити індукцію поля для кожного положення датчика Холла за формулою

$$B = \frac{U_x d}{IR_x}$$

При розрахунку використовувати значення $\langle R_x \rangle$, отримане в завданні 1. Отримані результати занести в таблицю 2.

Таблиця 2. Сила струму $I = \mathbf{XX}$ А задається викладачем та залишається сталою.

$\langle R_x \rangle = \text{див. завдання 1.}$

Положення датчика $Z, \text{ см}$	ЕРС датчика Холла, U_x, B	Магнітна індукція B , Тл
-10		
-9		
-8		
-7		
-6		
-5		
-4		
-3		
-2		
-1		
0		
+1		
+2		
+3		
+4		

4. За даними таблиці 2, побудувати графік залежності $B = f(Z)$
5. За наявності навчального часу повторити вимірювання та розрахунки для нового значення сили струму в соленоїді (за завданням викладача).

Література

1. Кучерук І.М. та ін. Загальний курс фізики. У 3 т. 2-ге вид., випр.. – К. :Техніка, 2006. Т.2. Електрика і магнетизм.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум.:Навч. Посібник / В. М. Барановський, П. В. Бережний, І. Т. Горбачук та ін.:За заг. ред. І.Т.Горбачука.- К.: Вища шк. 1992 – 509 с.

Контрольні питання

1. Чому індукція магнітного поля є силовою характеристикою магнітного поля? Написати вираз для магнітної сили, що діє на заряджену частинку.
2. Описати магнітне поле ідеального нескінченного соленоїда.
3. Описати магнітне поле кінцевого соленоїда. Описати відмінності магнітного поля кінцевого соленоїда від магнітного поля ідеального нескінченного соленоїда. У якій області простору магнітне поле кінцевого соленоїда найбільш близько до магнітного поля відповідного ідеального нескінченного соленоїда?
4. Що таке ефект Холла?
5. У яких речовинах – металах чи напівпровідниках – ЕРС Холла більше? Чому?
6. Як влаштований датчик Холла? На яких засадах ґрунтуються методи вимірювання індукції магнітного поля?

Правила техніки безпеки. При включеному джерелі струму змінювати схему не можна. Джерело струму включаються в останню чергу після складання схеми і відключаються перед її розбиранням. До включення джерела та перед його вимиканням регулятори величини вихідного струму повинні бути встановлені на нуль (**вщент проти годинникової стрілки**).

Склали І.П.Гаркуша, А.С.Зайцев