

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»
Кафедра фізики

Федун В.І.

ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА

Методичні вказівки
щодо виконання лабораторної роботи № 56
з курсу «Фізика»
для студентів всіх спеціальностей
всіх форм навчання

Маріуполь
2019

УДК 537. 613

Вивчення магнітного поля соленоїда: методичні вказівки щодо виконання лабораторної роботи № 56 з курсу «Фізика» для студентів всіх спеціальностей всіх форм навчання / уклад. В.І. Федун. – Маріуполь: ПДТУ, 2019. – 12 с.

Даний методичний посібник містить виклад основних теоретичних положень по магнітному полю соленоїда, обґрунтування методу вимірювань, опис лабораторного стенду і порядок виконання лабораторної роботи.

Укладач: В.І. Федун, ст.викладач

Рецензент: О.В. Цветкова, канд. фіз.-мат. наук, доцент

Узгоджено
на засіданні кафедри фізики
протокол № 11 від 11 квітня 2019 г.

Узгоджено
на засіданні методичної комісії
факультету інформаційних технологій,
протокол № 9 від 8 травня 2019 г.

©ДВНЗ «ПДТУ», 2019
© В.І. Федун, 2019

ВСТУП

Магнітне поле – силове поле, яке діє на рухомі електричні заряди і на тіла, що мають магнітний момент (незалежно від стану їх руху). Джерелами магнітного поля є намагнічені тіла, провідники зі струмом і рухомі заряджені електрикою тіла. Природа цих джерел єдина: магнітне поле виникає в результаті руху заряджених мікрочастинок, а також завдяки наявності у мікрочастинок власного магнітного моменту (спину). Магнітне поле виникає також при зміні в часі електричного поля. Магнітні поля знайшли широке практичне застосування і часто є об'єктом або інструментом наукових досліджень.

1 МЕТА РОБОТИ

1. Ознайомитися з балістичним методом вимірювання індукції магнітного поля.
2. Вивчити характер зміни індукції магнітного поля уздовж осі соленоїда та з'ясувати залежність індукції магнітного поля в центрі соленоїда від струму.

2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Соленоїд (від грецького *solen* – трубка і *eidos* – вид) – котушка індуктивності зазвичай у вигляді намотаного на циліндричну поверхню ізольованого провідника, по якому тече електричний струм. Для отримання однорідного магнітного поля всередині соленоїда необхідно, щоб його довжина значно перевершувала його діаметр.

Магнітне поле соленоїда є результат складання полів, які створюються круговими струмами в його обмотці. Магнітне поле можна зобразити графічно за допомогою ліній індукції магнітного поля. На рис.1 показані лінії індукції магнітного поля соленоїда. Магнітною лінією або лінією індукції магнітного

поля називають лінію, дотична до якої в кожній точці збігається з напрямом вектора індукції магнітного поля. Індукція магнітного поля в кожній точці має певний напрям, отже, й лінії індукції магнітного поля в кожній точці мають єдиний напрям, а значить, лінії індукції магнітного поля не перетинаються.

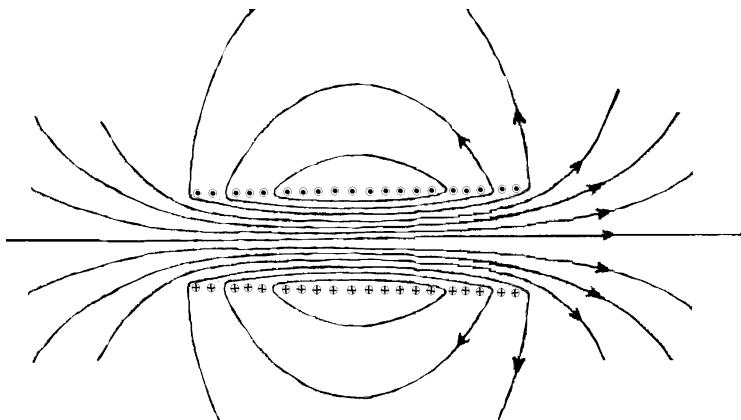


Рисунок 1 – Лінії магнітної індукції поля всередині і навколо соленоїда.

З рисунку 1 видно, що лінії індукції магнітного поля в центральній області соленоїда майже паралельні один одному. Вектор індукції магнітного поля на осі соленоїда спрямований уздовж осі соленоїда і пов'язаний з напрямком струму правилом правого гвинта. Усередині соленоїда поле можна вважати однорідним. При віддаленні від центру до кінців соленоїда силові лінії втрачають паралельність, число ліній індукції магнітного поля, які проходять через обмотку збільшується, отож поле стає неоднорідним.

Індукція магнітного поля соленоїда на його осі (рис.2) в СІ визначається формулою:

$$B = \frac{1}{2} \mu \mu_0 I n (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (2.1)$$

де I сила струму;

n – кількість витків на одиницю довжини соленоїда (або відношення загального числа витків N соленоїда до його довжини l , тобто $n = N/l$);

α_1 і α_2 – кути між віссю соленоїда і радіусами - векторами, проведеними з даної точки до кінців соленоїда (рис. 2 і 3).

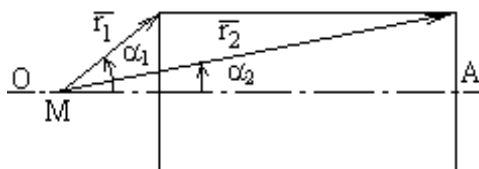


Рисунок 2 – Для розрахунку поля зовні соленоїда

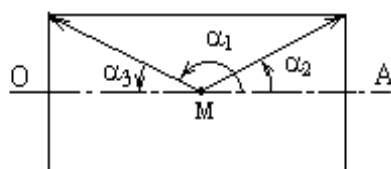


Рисунок 3 – Для розрахунку поля всередині соленоїда

Якщо точка спостереження M знаходиться всередині соленоїда (рис.3), то кут $\alpha_1 = \alpha_3$ тупий і формула (2.1) набуде вигляду:

$$B = \frac{1}{2} \mu \mu_0 I n (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (2.2)$$

У центрі соленоїда, довжина якого багато більше його діаметру d ($l \ll d$), індукція магнітного поля на осі соленоїда:

$$B = \mu \mu_0 I n,$$

так як $\cos \alpha_1 = \cos \alpha_3 = 1$, то на його кінцях:

$$B = \mu \mu_0 I n / 2.$$

Матеріал для обдарованих студентів. Зверніть увагу на особливості поля B біля торця довгого соленоїда:

1. Лінії вектора індукції магнітного поля розташовані так, як показано на рис. 4. Це неважко зрозуміти за допомогою принципу суперпозиції: якщо приставити справа ще такий же соленоїд, поле $\vec{B}$ поза утвореного таким чином складеного соленоїда повинен звернутися в нуль, а це можливо тільки при зазначеній на малюнку конфігурації поля.

2. З того ж принципу суперпозиції випливає, що нормальна складова B_{Π} буде однакою по площі торця, бо при утворенні складеного соленоїда $B_{\Pi} + B_{\Pi} = B_0$, де B_0 – поле всередині соленоїда далеко від його торців. У центрі торця $B = B_0$, і ми отримуємо, що $B = B_0 / 2$.

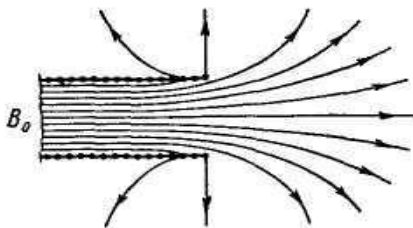


Рисунок 4 – Лінії магнітної індукції на торці соленоїда

4 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

В роботі вимірюється індукція магнітного поля на осі соленоїда в різних точках балістичним методом. Схема установки приведена на рис.5. Вимірювальний пристрій L_1 , виготовлений у вигляді котушки невеликих розмірів, витки якої розташовуються нормально до магнітного поля всередині соленоїда L , з'єднується з балістичним гальванометром Γ . Розміри вимірювальної котушки замалі в порівнянні з розмірами соленоїда. Отже, поле, яке пронизує витки вимірювальної

катушки, можна вважати однорідним. На схемі також показані ключі K_1 , K_2 , K_3 , амперметр A , реостат R та E – джерело напруги.

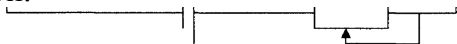


Рисунок 5 – . Принципова схема установки

5 МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ

При замиканні ключа K_3 всередині соленоїда (L) виникає магнітне поле. З наростанням індукції магнітного поля соленоїда збільшується магнітний потік Φ , що пронизує катушку L ($\Phi = B S \cos(\overset{\vee}{B}, \overset{\vee}{n})$, де S – площа поперечного перерізу вимірювальної катушки, $\overset{\vee}{B}$ – величина магнітної індукції всередині соленоїда, $\overset{\vee}{n}$ – нормаль до перетину катушки), та в вимірювальному ланцюгу виникає короткочасний індукційний струм, а рамка гальванометра повертається на певний кут. Кут повороту залежить від кількості електрики індукційного струму, що пройшов в ланцюзі гальванометра. Поява індукційного струму пов'язана з виникненням у вимірювальній катушці електрорушійної сили ϵ (ЕРС). Причиною появи ЕРС електромагнітної індукції є зміна магнітного потоку, що пронизує витки катушки L_1 .

Згідно із законом електромагнітної індукції ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} N, \quad (5.1)$$

де Φ – магнітний потік;

t – час;

N число витків вимірювальної котушки.

Струм в вимірювальної котушці за законом Ома визначається виразом:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} \quad (5.2)$$

де R повний опір ланцюга (сума опорів котушки, гальванометра і підвідних проводів).

Згідно з визначенням сили струму

$$I(t) = \frac{dq}{dt}, \quad (5.3)$$

де q кількість електрики.

Виходячи з цього, маємо

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R},$$

або підставляючи значення е.р.с. з (5.1) отримуємо

$$\frac{dq}{dt} = - \frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.4)$$

Магнітний потік пов'язаний з індукцією магнітного поля (B) співвідношенням

$$\Phi = B S \cos(\vec{B}, \vec{n}), \quad (5.5)$$

де S площа одного витка вимірювальної котушки;

$\vec{n}$ вектор нормалі, відновлений до площини витка.

Так як $\vec{B} \uparrow \uparrow \vec{n}$, то $\cos(\vec{B}, \vec{n}) = 1$.

Тоді зміна потоку

$$d\Phi = S dB$$

Підставляючи це в рівняння (5.4) отримуємо

$$dq = -\frac{NS}{R} dB$$

Інтегруючи цей вираз від "0" до "B" отримуємо

$$q = \frac{NSB}{R} \quad (5.6)$$

Кут повороту рамки гальванометра або відхилення "зайчика" на шкалі пропорційний кількості електрики, що пройшла через вимірювальний ланцюг, тобто

$$q = C \Delta x \quad (5.7)$$

де C постійна гальванометра за кількістю електрики; Δx відхилення "зайчика" за шкалою.

З огляду на це, записуємо остаточний вираз для визначення величини магнітної індукції

$$B = \frac{CR}{NS} \Delta x \quad (5.8)$$

6 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Прилади й приналежності: соленоїд, вимірювальна котушка, балістичний гальванометр, джерело струму, реостат, амперметр, вимірювальна лінійка.

$$B = \frac{CR}{NS} \Delta x$$

Розрахункова формула:

де R повний опір ланцюга;

N число витків вимірювальної котушки;

S площа одного витка;

(6.1)

C постійна гальванометра за кількістю електрики;
 Δx відхилення "зайчика" за шкалою.

1. Після візуального ознайомлення з установкою з дозволу викладача або лаборанта приступити до вимірювань.

2. Встановити вимірювальну котушку в певній точці на осі соленоїда.

3. Розімкнути ключ K_2 (рис.6), замкнути ключ K_1 . При замкнутому ключі K_3 встановити заданий струм (0,2 А) в ланцюзі соленоїда за допомогою реостата R .

4. Розімкнути ключі K_3 і K_1 , а ключ K_2 замкнути. Визначити початкове положення "зайчика" x_1 .

5. Швидко замкнути ключ K_3 , помітити при цьому максимальне відхилення "зайчика" на шкалі x_2 . Визначити $\Delta x = x_1 - x_2$ та записати отриманий результат в таблицю 6.1.

6. Вимірювання провести при положенні вимірювальної котушки L_I в соленоїді на різних відстанях від лівого торця соленоїда (не менше десяти точок в інтервалі від лівого до правого кінця соленоїда).

7. Повторити досліди при значеннях струму в ланцюзі соленоїда 0,10 А; 0,05 А.

8. Обчислити значення магнітної індукції на осі соленоїда в точках, де проводилися вимірювання за формулою (6.1).

9. Побудувати на одному малюнку (на одних координатних осях) графіки залежності величини індукції магнітного поля на осі соленоїда від координат точок по досвідченим даним (для кожного струму).

10. Побудувати графік залежності магнітної індукції в центрі соленоїда від величини струму, що протікає по обмотці.

Таблиця 6.1

$R =$, $N =$, $S =$, $C =$

№	Відстань від кінця соленоїда	$I = 0,2 \text{ A}$		$I = 0,1 \text{ A}$		$I = 0,05 \text{ A}$	
		Δx , см	B , мкТл	Δx , см	B , мкТл	Δx , см	B , мкТл
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

8 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- Від яких величин залежить ЕРС електромагнітної індукції, яка виникає в замкнутому контурі?
- Для вимірювання якої фізичної величини призначений балістичної гальванометр?
- Які фізичні процеси відбуваються в вимірювальній котушці при комутації струму в соленоїді?
- Охарактеризуйте магнітне поле соленоїда і намалюйте картину силових ліній магнітного поля.
- Дайте визначення вектора індукції магнітного поля, лінії індукції.
- Запишіть формулу для визначення індукції магнітного поля на осі соленоїда кінцевої довжини. Отримайте з неї вираз для визначення індукції поля, створеного нескінченно довгим соленоїдом.
- Виведіть розрахункову формулу.
- Поясніть явище електромагнітної індукції.
- Сформулюйте закон Фарадея та правило Ленца.

9 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З ЕЛЕМЕНТАМИ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Користуючись теоремою про циркуляцію магнітного поля, вивести формулу магнітної індукції для довгого соленоїда.
2. Якщо пропустити через дрітчану спіраль струм, то витки її притягуються один до одного і спіраль стягується по осі. Поясніть це явище.
3. Як потрібно змінити силу струму в обмотці соленоїда, щоб при видаленні феромагнітного сердечника індукція магнітного поля залишилася незмінною?
4. При включенні магнітного поля, перпендикулярного до площини витка радіуса R , по витку пройшов заряд Q . Який заряд протече по витку, якщо його (при незмінному полі) скласти "вісімкою", що складається з двох кіл, причому радіус меншої окружності дорівнює $R/4$? Площина "вісімки" також перпендикулярна до магнітного поля.
5. До котушки наближають плоский магніт (рис.6). Визначте полярність ЕРС, яка індукована в котушці.

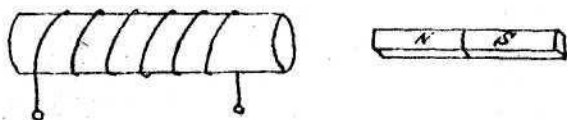


Рисунок 6 – До питання 5

6. Визначте напрям індукційного струму в колі вторинної обмотки АВ при замиканні і розмиканні ключа K (рис.7)

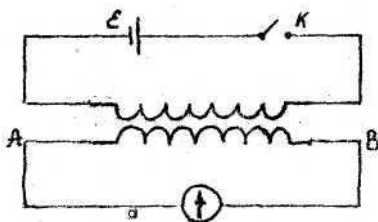


Рисунок 7 – До питання 6

7. Дослідіть експериментально магнітне поле соленоїда після внесення в нього феромагнітного сердечника. Поясніть отриманий результат. (Дослідження проводяться в навчальних лабораторіях.)

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Детлаф А.А. и др. Курс физики, т.2 - М.: Высшая школа, 1977, - §§14.1; 15.5; 19.1.
2. Савельев И.В. Курс общей физики, т.2 - М.: Наука, 1982, - §§ 40, 50, 60, 61.
3. Элементарный учебник физики // Под ред. Ландсберга Г.С., т.2 - М.: Наука, 1975, - §§ 118, 119, 126, 127 - 142.