

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра фізики

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ

МАГНЕТИЗМ

Харків 2009

Лабораторний практикум розглянуто та рекомендовано

до друку на засіданні кафедри „Фізика” 21 березня 2008 р.,
протокол № 7.

Зібрані описи базових лабораторних робіт з фізики за розділом «Магнетизм». Розробка містить основні теоретичні відомості за темою робіт, порядок виконання робіт, контрольні питання і зразки звітів про виконані роботи.

Лабораторний практикум призначений для студентів всіх спеціальностей, які вивчають курс «Фізика», денної і заочної форм навчання.

Укладач

проф. Д.В. Філь

Рецензент

проф. А.М. Ніколенко

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ

МАГНЕТИЗМ

Відповідальний за випуск Філь Д.В.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 03.04.08 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 3,0. Обл.-вид.арк. 3,25.

Замовлення № Тираж 200. Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК 2874 від. 12.06.2007 р.

Друкарня УкрДАЗТу,
61050, Харків - 50, пл. Фейєрбаха, 7

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота 51 Визначення магнітного поля на осі соленоїда.....	5
Лабораторна робота 54 Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона.....	16
Лабораторна робота 55 Дослідження магнітної індукції і магнітної проникності феромагнетика.....	26
Лабораторна робота 56 Визначення магнітної сприйнятливості парамагнетика.....	38
Лабораторна робота 57 Вивчення петлі гістерезису феромагнетика за допомогою осцилографа.....	46

ВСТУП

Лабораторний практикум призначений для підготовки студентів до виконання і захисту лабораторних робіт з фізики за розділом «Магнетизм».

Опис кожної роботи включає підрозділ «звіт про виконану роботу», в якому наведено послідовність оформлення звіту. Він містить робочі формули, приклади оформлення таблиць, в які вносяться результати експерименту і результати обробки експериментальних даних, а також формули для розрахунку похибок. Підрозділ «звіт про виконану роботу» є зразком для оформлення звіту студентом у зошиті для лабораторних робіт.

Під час підготовки до виконання роботи студент має ознайомитись з метою роботи і основними теоретичними відомостями. До початку експерименту студент повинен підготувати бланк звіту в зошиті для лабораторних робіт згідно зі зразком, що наведено в розробці.

Експериментальна частина дослідження виконується згідно з наведеною послідовністю виконання роботи. Дані, наведені на установці, і одержані експериментальні дані записуються в зошит для лабораторних робіт у завчасно підготовлений бланк звіту. Обробка експериментальних даних включає проведення розрахунків за робочими формулами, побудову графіків і проведення розрахунків похибок.

Для захисту роботи студент має подати викладачеві заповнений звіт (на основі експериментальних даних, які одержано студентом особисто під час виконання експериментальної частини роботи), а також відповісти на контрольні питання (згідно зі списком, що наведено).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 51

Визначення магнітного поля на осі соленоїда

Мета роботи: вивчення просторового розподілу магнітного поля в соленоїді.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для визначення магнітного поля на осі соленоїда в залежності від координати.

Теоретичні відомості

Соленоїдом називається циліндричний навій, що складається з великої кількості витків проволочки, які утворюють гвинтову лінію. Соленоїд використовується для створення магнітного поля, величину якого можна змінювати шляхом зміни величини електричного струму в обмотці. Якщо довжина соленоїда значно більша за його діаметр, напруженість магнітного поля всередині соленоїда (на значній відстані від торців) дорівнює

$$H = nI, \quad (51.1)$$

де n – щільність витків (кількість витків на 1 м довжини);

I – сила струму в соленоїді.

Рівняння (51.1) називається формулою для напруженості магнітного поля нескінченно довгого соленоїда. Одиниця вимірювання напруженості магнітного поля – А/м. Магнітне поле соленоїда кінцевої довжини можна знайти, виходячи з закону Біо-Савара-Лапласа. Напруженість магнітного поля на осі такого соленоїда дорівнює

$$H = \frac{nI}{2} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (51.2)$$

де φ_1 і φ_2 – кути, під якими видно торці соленоїда з даної точки осі (рисунок 51.1).

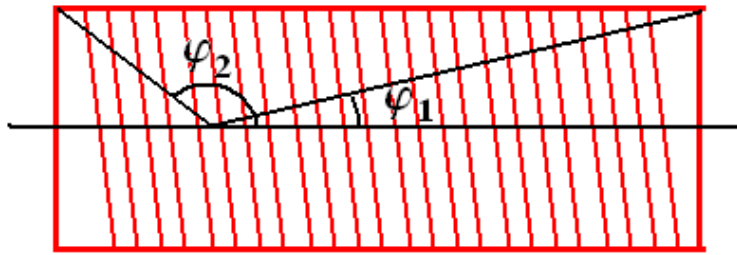


Рисунок 1.1 – Кути φ_1 і φ_2 , під якими видно торці з даної точки на осі соленоїда

Згідно з формулою (51.2) напруженість магнітного поля найбільша в центрі соленоїда, а поблизу торців її величина зменшується. Силві лінії напруженості магнітного поля навколо соленоїда мають вигляд, показаний на рисунку 51.2.

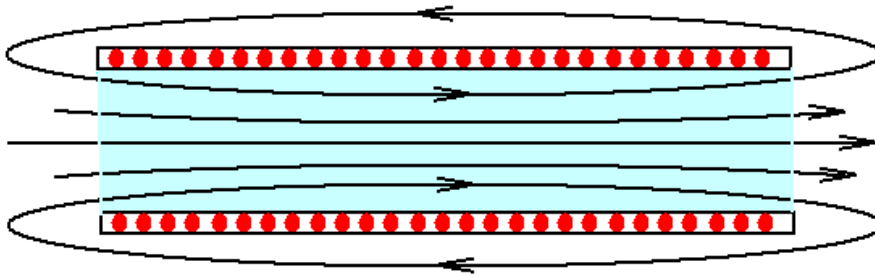


Рисунок 51.2 – Силві лінії магнітного поля в соленоїді (соленоїд зображений у розрізі)

У даній роботі вимірювання магнітного поля здійснюється за допомогою явища електромагнітної індукції. Явище електромагнітної індукції полягає у виникненні електричного струму в замкненому провіднику при зміні потоку вектора магнітної індукції через контур, що утворює провідник. Такий струм називається індукційним. Явище електромагнітної індукції описується законом Фарадея. Закон Фарадея стверджує, що електрорушійна сила, яка спричиняє індукційний струм (ЕРС електромагнітної індукції), дорівнює взятій з протилежним знаком швидкості зміни потоку вектора магнітної індукції через контур:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (51.3)$$

Потік вектора магнітної індукції (магнітний потік) через плоский контур в однорідному магнітному полі дорівнює

$$\Phi = BS \cos \phi , \quad (51.4)$$

де B – величина магнітної індукції;

S – площа контура;

ϕ – кут між вектором магнітної індукції і вектором нормалі до контура. Магнітний потік вимірюється у веберах (Вб).

Магнітна індукція зв'язана з напруженістю магнітного поля співвідношенням

$$B = \mu\mu_0 H , \quad (51.5)$$

де μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ – магнітна проникність середовища (для вакууму і повітря $\mu = 1$). Магнітна індукція вимірюється у теслах (Тл).

Потік вектора магнітної індукції через вимірювальний навій з N витками дорівнює

$$\Phi = BSN \cos \phi , \quad (51.6)$$

де S – площа поперечного перерізу навою;

ϕ – кут між вектором магнітної індукції і віссю навою.

Опис установки

Установка зображена на рисунку 51.3. Вона містить два соленоїди (короткий соленоїд С1 і довгий соленоїд С2), гальванометр G (зі шкалою S2), стержень з вимірювальним навоєм и шкалою S1, амперметр А, реостат R. Напруженість магнітного поля вимірюється на осі соленоїда С1 за допомогою вимірювального навою і гальванометра. Положення вимірювального навою на осі соленоїда змінюється при переміщенні стержня і контролюється за допомогою шкали S1. Заряд, що протікає через гальванометр, визначається за величиною відкидання «зайчика» по шкалі гальванометра S2.

Соленоїд С2 і амперметр А використовуються для калібрування показників гальванометра (визначення коефіцієнта пропорційності між величиною відхилення «зайчика» і напруженістю магнітного поля). Перемикач К1 вмикає і вимикає електричний струм через соленоїд С1 чи С2 (у залежності від положення перемикача К2).

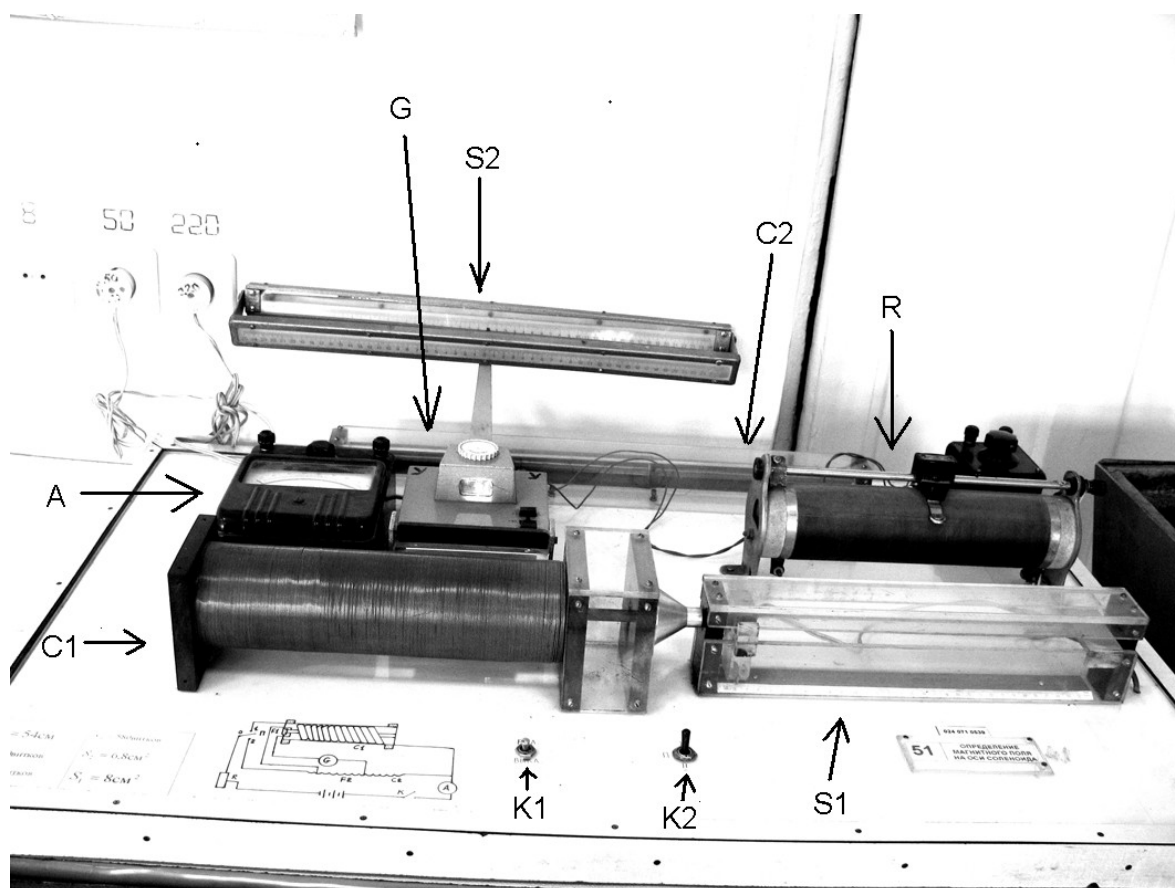


Рисунок 51.3 – Лабораторна установка

Робочі формули

Лабораторна установка зібрана таким чином, що напруженість магнітного поля H прямо пропорційна відхиленню «зайчика» гальванометра α . Для вимірювання напруженості в абсолютних одиницях потрібно знайти коефіцієнт пропорційності.

У лабораторній установці вимірювальний навій в соленоїді С1 з'єднаний в одне коло з вимірювальним навоєм у соленоїді С2

і гальванометром. Згідно з законом Ома струм через це коло дорівнює

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (51.7)$$

де R – повний електричний опір кола.

Враховуючи зв'язок між струмом і зарядом $I = dq/dt$, знаходимо, що величина заряду, яка протікає через гальванометр, дорівнює (за модулем)

$$q = \frac{\Phi}{R}, \quad (51.8)$$

де Φ – магнітний потік через вимірювальний навій при досягненні сили струму в соленоїді стаціонарного значення. Гальванометр працює таким чином, що відхилення «зайчика» гальванометра α прямо пропорційне заряду q .

Для калібрування гальванометра (знаходження коефіцієнта пропорційності між H і α) треба зробити одне вимірювання при пропусканні струму через довгий соленоїд С2. У цьому випадку відхилення «зайчика» $\alpha_2 \propto \Phi_2 = n_2 S_2 \mu_0 H_2$,

де n_2 – кількість витків в вимірювальному навою в соленоїді С2;

S_2 – площа поперечного перерізу цього навою;

$$H_2 = \frac{I_2 N_2}{L_2} - \quad (51.9)$$

напруженість магнітного поля всередині довгого соленоїда, яка розрахована за формулою (51.1) (I_2 – сила струму в обмотці соленоїда; N_2 – кількість витків; L_2 – довжина соленоїда).

Якщо електричний струм подано на короткий соленоїд С1, то відхилення «зайчика» $\alpha_1 \propto \Phi_1 = n_1 S_1 \mu_0 H_1$,

де n_1 – кількість витків у вимірювальному навої в соленоїді С1;

S_1 – площа поперечного перерізу цього навою;

H_1 – напруженість магнітного поля на осі короткого соленоїда.

Складаємо пропорцію

$$\begin{aligned}\alpha_1 & - n_1 S_1 H_1 \\ \alpha_2 & - n_2 S_2 H_2\end{aligned}\quad (51.10)$$

З пропорції випливає, що

$$H_1 = \frac{n_2 S_2 H_2 \alpha_1}{n_1 S_1 \alpha_2} \quad (51.11)$$

або

$$H_1 = \eta \alpha_1, \quad (51.12)$$

де з урахуванням виразу (51.9)

$$\eta = \frac{n_2 S_2 N_2 I_2}{n_1 S_1 L_2 \alpha_2} \quad (51.13)$$

є шуканим коефіцієнтом пропорційності.

Послідовність виконання роботи

1 За допомогою регулятора на гальванометрі встановити нуль гальванометра (положення «зайчика» на шкалі S2).

2 Перемкнути перемикач K2 у положення II, а перемикач K1 у положення «вкл».

3 За допомогою реостата R встановити струм I_2 через соленоїд C2 в діапазоні $0,5 \div 1$ А. Записати встановлене значення струму (сила струму вимірюється амперметром А).

4 Вимкнути ключ K1. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент вимкнення (відхилення заміряти по модулю в сантиметрах з точністю до 0,1 см). Увімкнути ключ K1. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент увімкнення. Знайти середнє значення модуля відхилення α_2 при вмиканні і вимиканні K1.

5 Перемкнути перемикач K2 у положення I.

6 Переміщуючи стержень, встановити покажчик на шкалі S2 по черзі в положення $x = 0$ см, 3 см, 6 см і так далі через 3 см. Вмикаючи і вимикаючи ключ K1, знайти середнє значення модуля відхилення α_1 для кожного x . Дані занести в таблицю.

7 Використовуючи дані, що приведено на панелі установки, а також дані, які одержано в пп. 3, 4, розрахувати коефіцієнт пропорційності η .

8 З даних, що одержано в п. 6, розрахувати напруженість магнітного поля для усіх x . Результати занести в таблицю.

9 На підставі результатів п. 8 побудувати графік залежності напруженості магнітного поля H_1 від координати x .

10 Розрахувати відносну і абсолютну похибку.

Контрольні питання

1 Записати формули для напруженості магнітного поля в нескінченно довгому соленоїді, соленоїді кінцевої довжини. Пояснити позначення. В яких одиницях вимірюється напруженість магнітного поля? Де напруженість магнітного поля соленоїда є більшою: всередині чи на торці?

2 Записати зв'язок між напруженістю магнітного поля і магнітною індукцією у вакуумі, у магнітному середовищі. В яких одиницях вимірюється магнітна індукція?

3 Чим відрізняються силові лінії магнітного поля від силових ліній електростатичного поля? Нарисувати силові лінії магнітного поля соленоїда.

4 Що таке соленоїд? Для чого він використовується?

5 Чому дорівнює магнітний момент соленоїда? Написати зв'язок між магнітним моментом контуру зі струмом і механічним моментом, що діє на контур з боку зовнішнього магнітного поля.

6 У чому полягає явище електромагнітної індукції? Записати закон Фарадея для ЕРС електромагнітної індукції. Пояснити позначення.

7 Що називається потоком вектора магнітної індукції через контур? В яких одиницях вимірюється потік вектора магнітної

індукції? Нехай магнітне поле є однорідним. Чому дорівнює магнітний потік через плоский контур, навій з N витками?

8 Чому змінюється магнітний потік через вимірювальний навій у даній роботі?

Звіт про виконану роботу

1 Робоча формула для визначення коефіцієнта пропорційності

$$\eta = \frac{n_2 S_2 N_2 I_2}{n_1 S_1 L_2 \alpha_2}$$

2 Дані, що приведені на панелі установки

Число витків соленоїда С2 $N_2 =$

Довжина соленоїда С2 $L_2 =$ м

Число витків вимірювального навою 1 $n_1 =$

Число витків вимірювального навою 2 $n_2 =$

Площа поперечного перерізу вимірювального навою 1

$S_1 =$ м²

Площа поперечного перерізу вимірювального навою 2

$S_2 =$ м²

3 Результаті калібрувального вимірювання

Сила струму $I_2 =$ А

Відхилення «зайчика» гальванометра $\alpha_2 =$ см

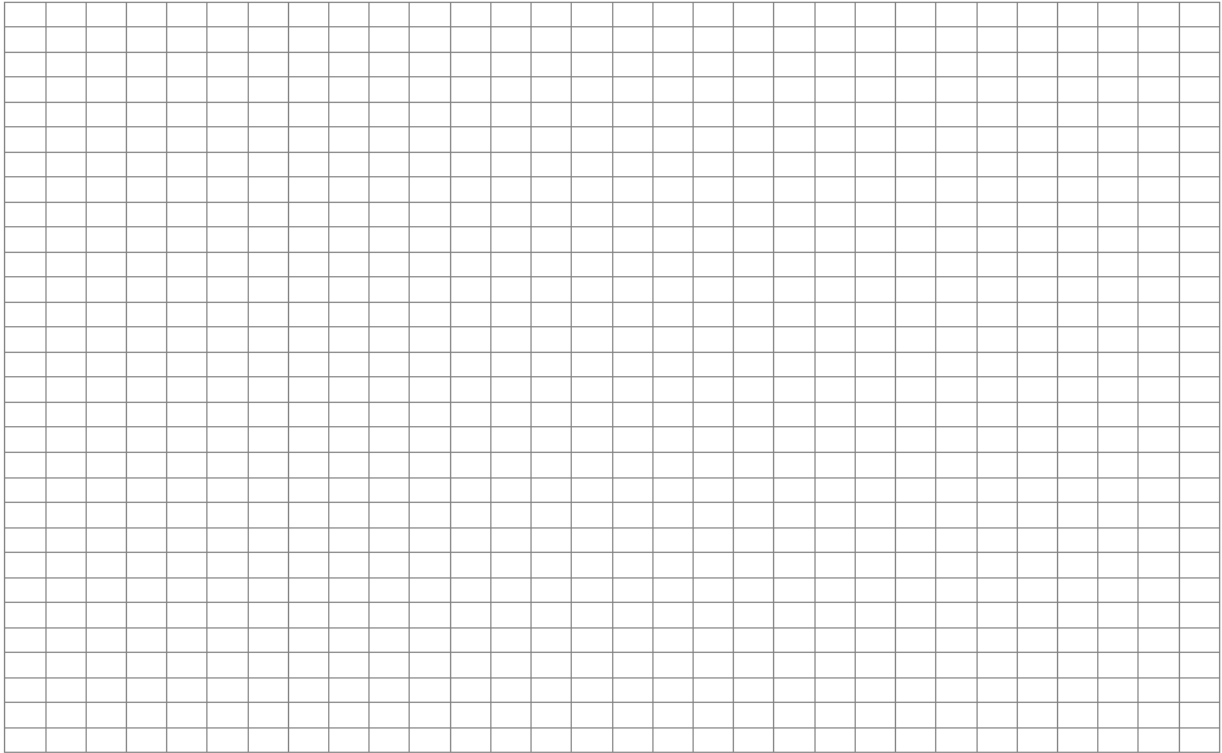
4 Розрахунок коефіцієнта пропорційності

$$\eta = \frac{n_2 S_2 N_2 I_2}{n_1 S_1 L_2 \alpha_2}$$

5 Результати експерименту

x , см	α_1 , см	$H = \eta \alpha_1$

6 Графік залежності $H(x)$



7 Визначення відносної і абсолютної похибки

Відносна похибка величини (51.12) з урахування (51.13), розраховується за формулою

$$\frac{\Delta H}{H} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_2}{\alpha_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_2}{I_2}\right)^2}.$$

Абсолютні похибки $\Delta\alpha_1$ і $\Delta\alpha_2$ складають 0,1 см.

Абсолютна похибка ΔI_2 визначається класом точності амперметра n_I і діапазоном вимірювання I_{\max} .

$n_I =$

$I_{\max} =$

$$\Delta I_2 = \frac{n_I I_{\max}}{100}$$

Відносна (в відсотках) і абсолютна похибка в центрі соленоїда ($x = 15$ см) складають

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_2}{\alpha_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_2}{I_2}\right)^2} \cdot 100\%$$

$$\Delta H = \frac{\varepsilon}{100\%} H$$

Відносна (в відсотках) і абсолютна похибка на торці соленоїда ($x = 0$ см) складають

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_2}{\alpha_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_2}{I_2}\right)^2} \cdot 100\%$$

$$\Delta H = \frac{\varepsilon}{100\%} H$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 54

Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона

Мета роботи: вивчення закономірностей руху заряджених частинок у магнітному полі і визначення питомого заряду електрона.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для визначення питомого заряду електрона методом магнетрона.

Теоретичні відомості

Питомим зарядом частинки називається відношення електричного заряду частинки до її маси. Одиницею вимірювання питомого заряду в системі СІ є Кл/кг.

Якщо заряджена частинка рухається в однорідному магнітному полі перпендикулярно напрямку поля, то її траєкторія являє собою коло. На заряджену частинку в магнітному полі діє сила Лоренца, що дорівнює

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (54.1)$$

де q – величина електричного заряду частинки;

\vec{v} – її швидкість;

\vec{B} – магнітна індукція.

Сила Лоренца (точніше, магнітна складова сили Лоренца) є доцентровою силою. Радіус кола можна знайти, якщо прирівняти добуток маси частинки на доцентрове прискорення силі Лоренца

$$ma = m \frac{v^2}{R} = qvB. \quad (54.2)$$

У формулі (54.2) взято до уваги, що $\vec{v} \perp \vec{B}$. Тож радіус кола R дорівнює

$$R = \frac{mv}{Bq}. \quad (54.3)$$

Вимірюючи R , можна знайти питомий заряд q/m .

Магнетрон є пристроєм, який застосовується для генерації електромагнітних хвиль надвисокої частоти. Зокрема, магнетрон є основним елементом побутових НВЧ-печей, які використовують енергію електромагнітних хвиль для приготування їжі. У магнетроні електромагнітні хвилі випромінюються електронами, які рухаються у схрещених електричному і магнітному полях. Електрони в магнетроні рухаються траєкторіями, близькими до колових. Радіуси кривизни траєкторій електронів (формула (54.3)) обернено пропорційні питомому заряду електрона.

Метод магнетрона полягає в дослідженні залежності електричного струму в двохелектродній лампі з циліндричним анодом та розташованим на його осі катодом від величини зовнішнього магнітного поля. У такій лампі, яка поміщена всередину соленоїда, вісь симетрії якого співпадає з катодом, електрони рухаються таким же чином, як і в магнетроні. За відсутності магнітного поля електрони, що вилітають з катода, під дією електричного поля рухаються по радіусу (рисунок 54.1, траєкторія а). Вмикання магнітного поля призводить до викривлення траєкторій під дією сили Лоренца (траєкторія б).

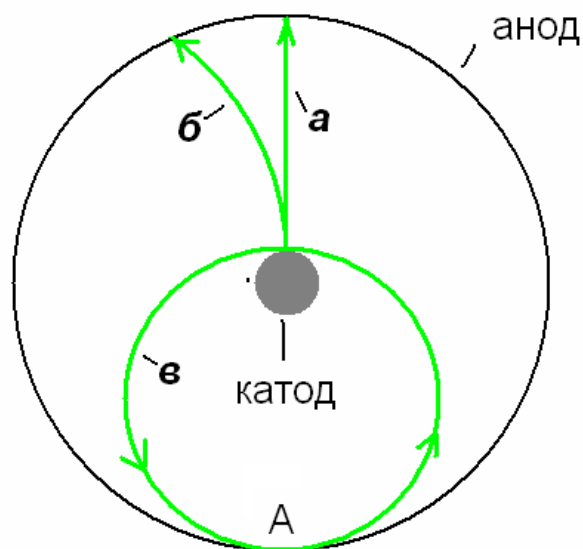


Рисунок 54.1 – Схема руху електронів у двохелектродній лампі

Чим більша магнітна індукція, тим менший радіус кривизни траєкторії. При певному значенні магнітної індукції, яка

називається критичною $B_{кр}$, траєкторії стають замкненими (траєкторія ϵ) і електрони перестають попадати на анод, внаслідок чого анодний струм різко зменшується. Подальше збільшення поля призводить до ще більшого зменшення радіуса траєкторії і анодний струм зникає.

Робочі формули

Рух електрона будемо описувати у циліндричних координатах r, φ (r – відстань електрона від катода, φ – кут, на який обертається радіус-вектор електрона (начало координат співпадає з катодом)). Розглянемо траєкторію ϵ . Швидкість електрона можна розкласти на радіальну (паралельну радіусу) і тангенціальну (перпендикулярну радіусу) компоненти $\vec{v} = \vec{v}_r + \vec{v}_\tau$, де $v_r = dr/dt$ і $v_\tau = rd\varphi/dt = r\omega$ (ω є кутовою швидкістю). У точці А максимальної відстані r_{max} електрона від катода його радіальна швидкість дорівнює нулю. Тож у точці А $v = r_{max}\omega$. Оскільки магнітна складова сили Лоренца не виконує роботи, кінетична енергія електрона дорівнює роботі електростатичного поля. У точці А

$$eU = \frac{mv^2}{2} = \frac{mr_{max}^2\omega^2}{2}, \quad (54.4)$$

де U – електростатичний потенціал у точці А.

Для визначення кутової швидкості ω запишемо основне рівняння динаміки обертального руху:

$$\frac{d}{dt}(J\omega) = M, \quad (54.5)$$

де M – момент сили, що діє на електрон (відносно осі, що співпадає з катодом);

J – момент інерції електрона, $J = mr^2$.

Сила, що діє на електрон, дорівнює

$$\vec{F} = -e\vec{E} - e\vec{v} \times \vec{B}.$$

У даному випадку момент електростатичної компоненти сили дорівнює нулю (плече сили дорівнює нулю). У момент дає внесок тільки тангенціальна (перпендикулярна радіусу) компонента магнітної складової сили Лоренца. Ця компонента дорівнює $F_{L,\perp} = ev_r B$. Плечем цієї компоненти сили є r . Таким чином, момент сили дорівнює

$$M = ev_r Br = eBr \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{eBr^2}{2} \right). \quad (54.6)$$

З формул (54.5) і (54.6) випливає, що

$$\frac{d}{dt} (mr^2 \omega) = \frac{d}{dt} \left(\frac{eBr^2}{2} \right) \quad (54.7)$$

і

$$mr^2 \omega = \frac{eBr^2}{2} + const. \quad (54.8)$$

Константа $const$ підлягає визначенню. Оскільки рівняння (54.8) виконується в усіх точках траєкторії, у тому числі в точці $r = 0$, то $const = 0$. Підставляючи в рівняння (54.8) $const = 0$ і скорочуючи r^2 , маємо

$$\omega = \frac{eB}{2m}. \quad (54.9)$$

Підставляючи вираз (54.9) у вираз (54.4), знаходимо

$$U = \frac{e B^2 r_{\max}^2}{8m}. \quad (54.10)$$

Траєкторія дотикається анода, коли $r_{\max} = R_a$ (R_a – радіус анода). При цьому U дорівнює напрузі між катодом і анодом. З

формули (54.10) впливає формула для визначення питомого заряду:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{кр}^2 R_a^2} \cdot \quad (54.11)$$

Критичну магнітну індукцію будемо розраховувати за допомогою формули для нескінченно довгого соленоїда:

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 I_{кр} \cdot N}{l}, \quad (54.12)$$

де N – число витків соленоїда;

l – його довжина;

$I_{кр}$ – значення сили струму в соленоїді в точці перегину кривої залежності анодного струму I_a від струму в соленоїді I_c ;

μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Опис установки

Установка зображена на рисунку 54.2. Обмотка соленоїда С живиться від джерела постійного струму напругою 50 В. Струм у соленоїді вимірюється амперметром А1, силу струму змінюють за допомогою реостата R зі змінним опором. Анодна напруга подається від універсального джерела живлення. Величина напруги контролюється вольтметром В за допомогою потенціометра П. Двохелектродна лампа розташована всередині соленоїда С. Анодний струм вимірюється амперметром А2.

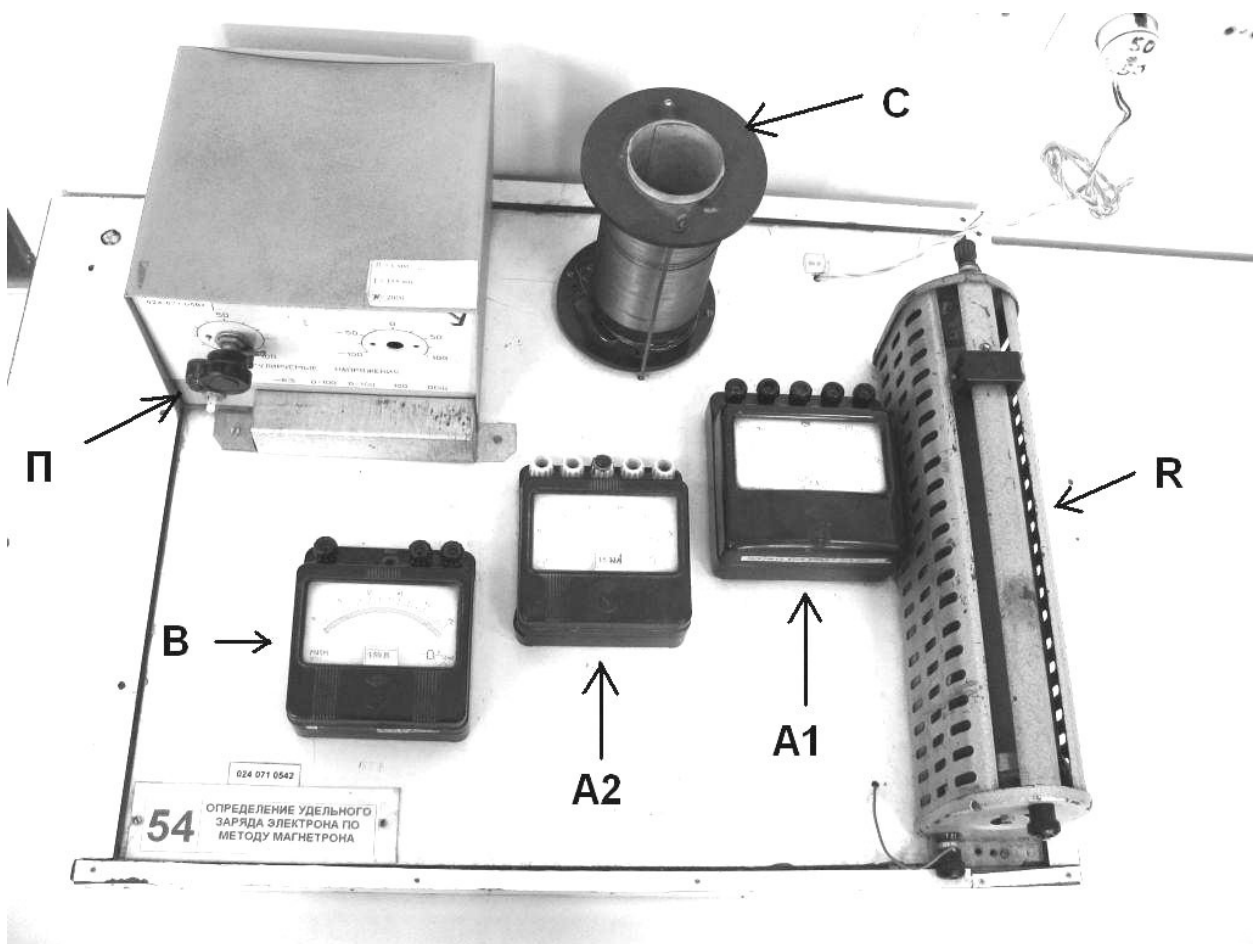


Рисунок 54.2 – Лабораторна установка

Послідовність виконання роботи

1 Встановити за допомогою потенціометра П напругу між анодом і катодом $U=90$ В.

2 Виміряти значення анодного струму I_a для таких значень струму соленоїда: $I_c = 0$ А; 0,2 А; 0,4 А; 0,6 А; 0,65 А; 0,7 А; 0,75 А; 0,8 А; 1,0 А; 1,2 А; 1,4 А. У процесі роботи підтримувати постійну анодну напругу. Значення струму соленоїда та відповідне йому значенні I_a анодного струму записати у вигляді таблиці.

3 На підставі цих даних побудувати графік залежності анодного струму I_a від струму в соленоїді I_c . Визначити з графіка значення струму в соленоїді $I_{кр}$, що відповідає точці перегину кривої $I_a(I_c)$.

- 4 За формулою (54.12) розрахувати величину критичної напруженості $B_{кр}$.
- 5 За формулою (54.11) визначити питомий заряд електрона e/m .
- 6 Розрахувати відносну і абсолютну похибки.

Контрольні питання

- 1 Що називається питомим зарядом електрона? В яких одиницях за системою СІ вимірюється питомий заряд?
- 2 Що таке магнітна складова сила Лоренца? Записати формулу для магнітної складової сили Лоренца в скалярній і векторній формах.
- 3 Як направлена магнітна складова сили Лоренца відносно напрямку магнітної індукції, швидкості зарядженої частинки?
- 4 Швидкість зарядженої частинки перпендикулярна магнітному полю. Якою траєкторією рухається частинка? Швидкість зарядженої частинки направлена під гострим чи тупим кутом до магнітного поля. Якою траєкторією рухається частинка?
- 5 Записати формулу для радіуса кола, по якому рухається заряджена частинка в магнітному полі. Як зміниться радіус кола, по якому рухається заряджена частинка в магнітному полі, якщо збільшиться величина магнітної індукції, збільшиться маса частинки, збільшиться швидкість частинки?
- 6 Знайти період обертання зарядженої частинки по колу в магнітному полі.
- 7 Що таке магнетрон? Для чого він використовується? Яку роль відіграє в роботі магнетрона сила Лоренца?
- 8 Що таке мас-спектрометр? Для чого він використовується? Яку роль відіграє в роботі мас-спектрометра сила Лоренца?
- 9 Що таке циклотрон? Для чого він використовується? Яку роль відіграє в роботі циклотрона сила Лоренца?

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули для визначення критичного магнітного поля і питомого заряду

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 I_{кр} \cdot N}{l}$$
$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{кр}^2 R_a^2}$$

2 Дані, що приведені на панелі установки
Число витків соленоїда $N =$

Довжина соленоїда $l =$ м

Радіус анода $R_a =$ м

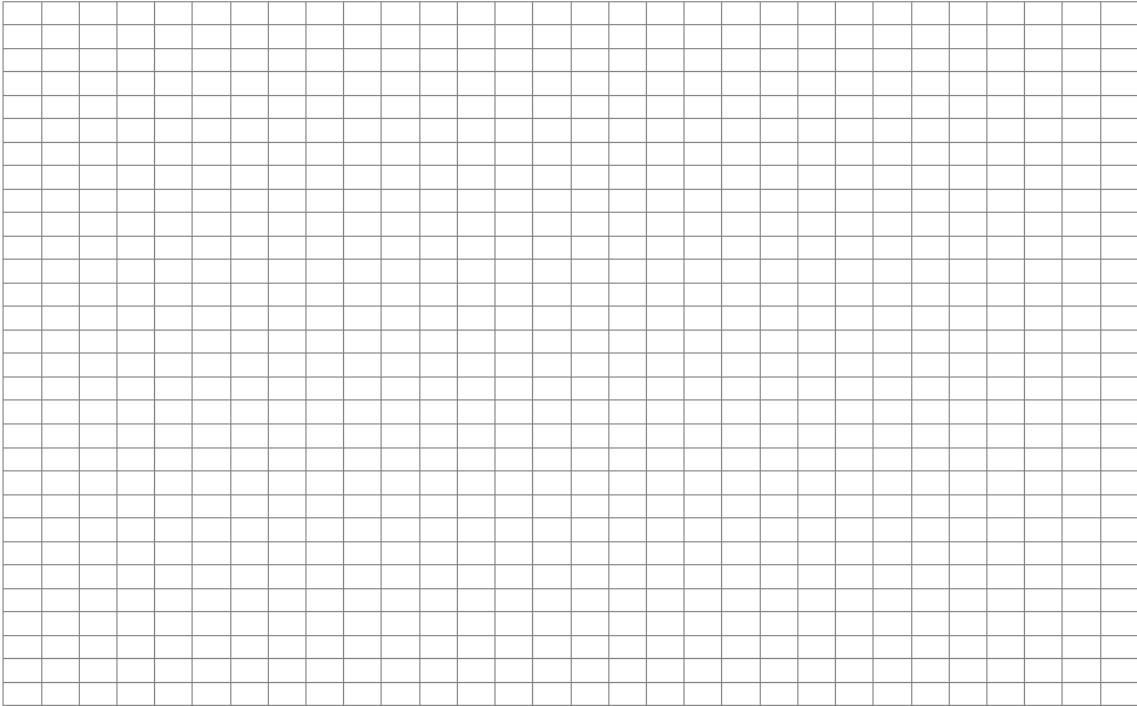
3 Значення напруги між катодом і анодом, що підтримується сталим під час вимірювань

$U =$ В

4 Результати експерименту

I_c, A	I_a, A
0	
0,2	
0,4	
0,6	
0,65	
0,7	
0,75	
0,8	
1,0	
1,2	
1,4	

5 Графік залежності $I_a(I_c)$



Значення струму I_c в точці перегину кривої

$$I_{кр} = \quad \text{А}$$

6 Розрахунок критичної магнітної індукції і питомого заряду

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 I_{кр} \cdot N}{l}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{кр}^2 R_a^2}$$

7 Визначення відносної і абсолютної похибки

Згідно з формулами (54.11) і (54.12) похибка розраховується за формулою

$$\frac{\Delta(e/m)}{e/m} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta I_{кр}}{I_{кр}}\right)^2}.$$

ΔU і $\Delta I_{кр}$ визначаються класом точності вимірювальних приладів n_u , n_I і діапазонами вимірювання U_{\max} , I_{\max} .

$$n_u = \quad U_{\max} =$$

$$n_I = \quad I_{\max} =$$

$$\Delta U = \frac{n_u U_{\max}}{100}$$

$$\Delta I_{кр} = \frac{n_I I_{\max}}{100}$$

Відносна похибка

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta I_{кр}}{I_{кр}}\right)^2} \cdot 100\%$$

Абсолютна похибка

$$\Delta(e/m) = \frac{\varepsilon}{100\%} \frac{e}{m}.$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 55

Дослідження магнітної індукції і магнітної проникності феромагнетика

Мета роботи: вивчення кривої намагніченості феромагнетика і залежності магнітної проникності феромагнетика від напруженості магнітного поля.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для вимірювання магнітної індукції у феромагнетик у залежності від напруженості магнітного поля.

Теоретичні відомості

За своїми магнітними властивостями речовини поділяються на діамагнетики, парамагнетики і феромагнетики. Феромагнетики характеризуються великим значенням магнітної проникності (відношенням магнітної індукції в речовині до індукції у вакуумі при тому самому значенні напруженості магнітного поля). Магнітна проникність μ феромагнетика не є сталою, а залежить від напруженості магнітного поля. Відповідно магнітна індукція $B = \mu\mu_0 H$ нелінійно залежить від напруженості магнітного поля.

Нелінійність зв'язана з особливостями процесу намагнічування феромагнетика. Феромагнетик у ненамагніченому стані розбивається на домени – області, в яких речовина намагнічена до насичення. При цьому магнітні моменти різних доменів орієнтовані рівноправно в усіх напрямках і сумарна намагніченість дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле призводить, по-перше, до зміщення границь доменів і зростання розмірів тих доменів, вектори намагніченості яких складають з напрямком зовнішнього магнітного поля гострий кут, і, по-друге, до повороту магнітних моментів доменів у напрямку зовнішнього магнітного поля. Після того як всі домени орієнтуються по полю, подальше зростання намагніченості зупиняється (досягається насичення).

У даній роботі досліджується магнітна індукція і магнітна проникність заліза. Використовується тороїд (навіть у формі тора),

всередину якого поміщено залізний сердечник. Магнітні силові лінії в торі мають форму замкнених кіл, які розташовано всередині тороїда. Зовні тороїда магнітне поле дорівнює нулю. Згідно з теоремою про циркуляцію напруженості магнітного поля (циркуляція напруженості магнітного поля по контуру дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які пронизують контур) напруженість магнітного поля в тороїді дорівнює

$$H_2 = \frac{N_2 I_2}{2\pi R}, \quad (55.1)$$

де N_2 – число витків тороїда;

I_2 – сила струму в тороїді;

R – відстань від головної осі тороїда до точки спостереження.

У роботі для калібрування гальванометра використовується довгий соленоїд, який можна розглядати як нескінченно довгий. Згідно з теоремою про циркуляцію напруженості магнітного поля напруженість магнітного поля в довгому соленоїді дорівнює

$$H_1 = \frac{N_1 I_1}{L_1}, \quad (55.2)$$

де N_1 – число витків у соленоїді;

I_1 – сила струму в соленоїді;

L_1 – довжина соленоїда.

У даній роботі вимірювання магнітної індукції здійснюється на основі явища електромагнітної індукції. Явище електромагнітної індукції полягає в виникненні електричного струму в замкненому провіднику при зміні потоку магнітної індукції через контур, що утворює провідник. Такий струм називається індукційним. Згідно з законом Фарадея електрорушійна сила, яка спричиняє індукційний струм (ЕРС електромагнітної індукції), дорівнює взятій з протилежним знаком швидкості зміни потоку вектора магнітної індукції через контур

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (55.3)$$

Потік вектора магнітної індукції (магнітний потік) через плоский контур в однорідному магнітному полі дорівнює

$$\Phi = BS \cos \phi, \quad (55.4)$$

де B – величина магнітної індукції;

S – площа контура;

ϕ – кут між вектором магнітної індукції і вектором нормалі до контура. Магнітний потік вимірюється у веберах (Вб).

Потік вектора магнітної індукції через вторинну обмотку на тороїді дорівнює

$$\Phi_2 = BS_2 n_2, \quad (55.5)$$

де S_2 – площа поперечного перерізу тороїда;

n_2 – число витків вторинної обмотки тороїда.

На довгому соленоїді також є вторинна обмотка. Потік вектора магнітної індукції через цю обмотку дорівнює

$$\Phi_1 = \mu_0 H_1 S_1 n_1, \quad (55.6)$$

де S_1 – площа поперечного перерізу соленоїда;

n_1 – число витків вторинної обмотки соленоїда;

μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Опис установки

Установка зображена на рисунку 55.1. Вона містить тороїд Т, довгий соленоїд С, гальванометр G (зі шкалою S), амперметри А1 і А2, реостат R. Електричний струм подається на первинну обмотку тороїда чи соленоїда. Сила струму вимірюється міліамперметром А1 (у діапазоні до 100 мА) чи амперметром А2 (у діапазоні більше 100 мА). Реостат R дозволяє змінювати силу

струму. Перемикач К1 дозволяє перейти з режиму, коли струм подається на соленоїд, до режиму, коли струм подається на тороїд. Перемикач К2 вмикає і вимикає електричний струм через первинну обмотку соленоїда (тороїда) в залежності від положення перемикача К1. Перемикач К3 призначений для перемикачання між міліамперметром і амперметром. Магнітна індукція в тороїді (соленоїді) вимірюється за допомогою гальванометра G зі шкалою S.

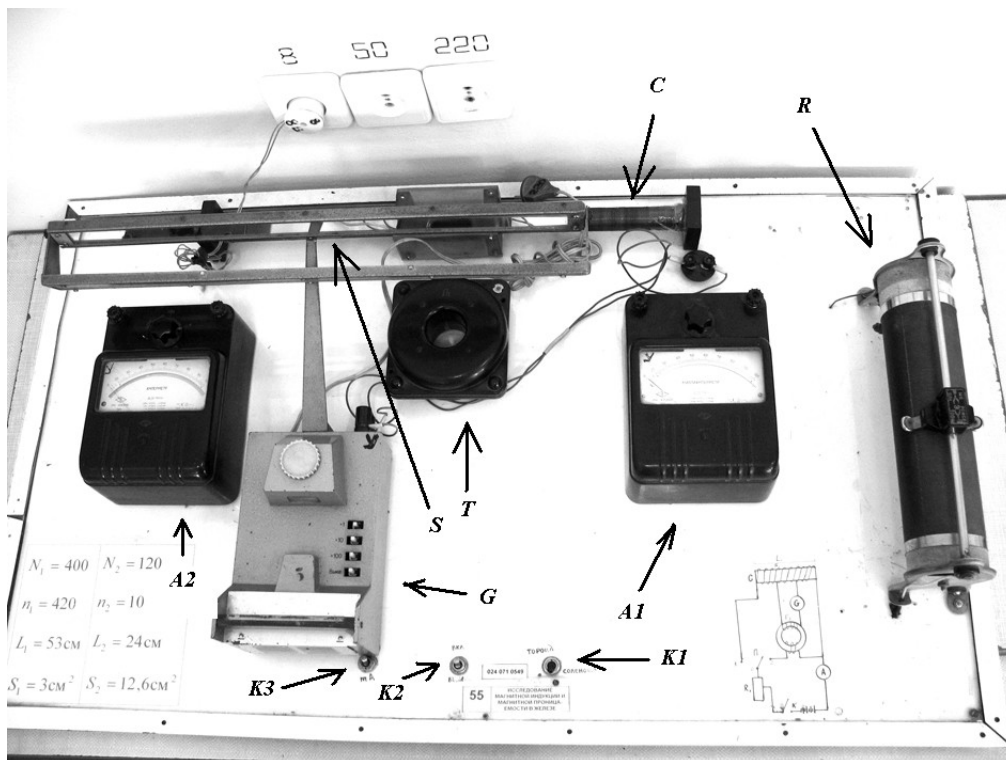


Рисунок 55.1 – Лабораторна установка

Робочі формули

Лабораторна установка зібрана таким чином, що відхилення «зайчика» гальванометра β прямо пропорційне магнітній індукції B в тороїді. Для вимірювання магнітної індукції в абсолютних одиницях потрібно знайти коефіцієнт пропорційності.

Гальванометр з'єднаний з вторинними обмотками тороїда і соленоїда в послідовний електричний ланцюг. Згідно з законом Ома струм через цій ланцюг дорівнює

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (55.7)$$

де R – повний опір кола.

Враховуючи зв'язок між струмом і зарядом $I = dq/dt$, знаходимо, що величина заряду, яка протікає через гальванометр, дорівнює (за модулем)

$$q = \frac{\Phi}{R}, \quad (55.8)$$

де Φ – магнітний потік через вторинну обмотку тороїда (соленоїда) при досягненні сили струму стаціонарного значення. Гальванометр працює таким чином, що відхилення «зайчика» гальванометра прямо пропорційне заряду q .

Для калібрування гальванометра (знаходження коефіцієнта пропорційності між B і β) треба зробити одне вимірювання при пропусканні струму через довгий соленоїд. У цьому випадку відхилення «зайчика» прямо пропорційно потоку вектора магнітної індукції через вторинну обмотку довгого соленоїда:

$$\alpha \propto \Phi_1 = n_1 S_1 \mu_0 H_1,$$

де n_1 – кількість витків у вторинній обмотці соленоїда;

S_1 – площа поперечного перерізу соленоїда;

H_1 – напруженість магнітного поля всередині довгого соленоїда (55.2) (у цій формулі I_1 – сила струму в первинній обмотці соленоїда).

Якщо електричний струм подано на тороїд, то відхилення «зайчика»

$$\beta \propto \Phi_2 = n_2 S_2 B,$$

де n_2 – кількість витків вторинної обмотки тороїда;

S_2 – площа поперечного перерізу тороїду.

Складаємо пропорцію

$$\begin{aligned} \alpha &= n_1 S_1 \mu_0 H_1 \\ \beta &= n_2 S_2 B \end{aligned} \quad (55.9)$$

З пропорції випливає, що

$$B = \frac{n_1 S_1 \mu_0 H_1 \beta}{n_2 S_2 \alpha} \quad (55.10)$$

або з урахування (55.2),

$$B = \eta \beta, \quad (55.11)$$

де

$$\eta = \frac{n_1 S_1 \mu_0 N_1 I_1}{n_2 S_2 L_1 \alpha} \quad (55.12)$$

є шуканим коефіцієнтом пропорційності.

Якщо в тороїді магнітний сердечник був би відсутнім, то магнітна індукція всередині тороїда дорівнювала

$$B_0 = \mu_0 H_2 = \frac{\mu_0 N_2 I_2}{L_2}, \quad (55.13)$$

де L_2 – довжина сердечника тороїда.

Формулу (55.13) запишемо у вигляді

$$B_0 = k I_2, \quad (55.14)$$

де

$$k = \frac{\mu_0 N_2}{L_2} \quad (55.15)$$

є коефіцієнтом пропорційності між струмом і магнітною індукцією у вакуумі. Магнітна проникність матеріалу сердечника тороїда визначається за формулою

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (55.16)$$

Послідовність виконання роботи

1 За допомогою регулятора на гальванометрі встановити нуль гальванометра (положення «зайчика» на шкалі S).

2 Перемкнути перемикач К1 у положення «соленоїд», а перемикач К2 у положення «вкл».

3 За допомогою реостата R встановити струм I_1 через соленоїд С в діапазоні 0,3÷0,5 А. Записати встановлене значення струму (сила струму вимірюється амперметром А2, ключ К3 в положенні «А»).

4 Вимкнути ключ К2. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент вимкнення (відхилення заміряти за модулем у сантиметрах з точністю до 0,1 см). Увімкнути ключ К2. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент увімкнення. Знайти середнє значення модуля відхилення α при вмиканні і вимиканні К2.

5 Перемкнути перемикач К1 у положення «тороїд», а перемикач К2 у положення «вкл».

6 За допомогою реостата встановити сили струму 20 мА (сила струму вимірюється міліамперметром А1, ключ К3 в положенні «мА»).

7 Вимкнути ключ К2. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент вимкнення (відхилення заміряти за модулем у сантиметрах з точністю до 0,1 см). Увімкнути ключ К2. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент увімкнення. Знайти середнє значення модуля відхилення β при вмиканні і вимиканні К2.

8 Повторити пп. 5-7 для значень струму 30 мА, 40 мА, 50 мА, 60 мА, 70 мА, 80 мА, 90 мА.

9 Перемкнути ключ К3 в положення «А». Далі сила струму буде вимірюватись амперметром А2.

10 Повторити пп. 5-7 для значень струму 200 мА, 300 мА, 400 мА.

11 Одержані значення β занести в таблицю.

12 Використовуючи дані, що приведено на панелі установки, а також дані, одержані в пп. 3, 4, розрахувати коефіцієнт пропорційності η і коефіцієнт пропорційності k .

13 Для кожного значення I_2 розрахувати величини B_0 , B і μ . Результати занести в таблицю.

14 Побудувати графік залежності магнітної індукції у феромагнетика B від напруженості магнітного поля у вакуумі B_0 .

15 Побудувати графік залежності магнітної проникності феромагнетика μ від напруженості магнітного поля у вакуумі B_0 .

16 Розрахувати відносну і абсолютну похибку.

Контрольні питання

1 Що називається магнітною проникністю речовини? Записати зв'язок між магнітною індукцією і напруженістю магнітного поля в речовині.

2 Які характерні властивості магнітної проникності феромагнетика?

3 Які речовини називаються феромагнетиками? Що називається температурою Кюрі?

4 Що таке магнітні домени? Як відбувається процес намагнічування феромагнетика?

5 Нарисувати основну криву намагніченості феромагнетика. Показати на цій кривій намагніченість насичення. Пояснити, чому досягається насичення.

6 Написати формули для розрахунку напруженості магнітного поля і магнітної індукції тороїда і довгого соленоїда. В яких одиницях вимірюється напруженість магнітного поля і магнітна індукція?

7 Що називається потоком вектора магнітної індукції? В яких одиницях вимірюється потік вектора магнітної індукції?

8 У чому полягає явище електромагнітної індукції? Записати закон Фарадея для ЕРС електромагнітної індукції.

Пояснити, де в даній роботі використовується явище електромагнітної індукції.

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули

Магнітна індукція в феромагнетику

$$B = \eta \beta ,$$

де коефіцієнтом пропорційності є

$$\eta = \frac{n_1 S_1 \mu_0 N_1 I_1}{n_2 S_2 L_1 \alpha}$$

Магнітна індукція у вакуумі

-

$$B_0 = k I_2 ,$$

де коефіцієнтом пропорційності є

$$k = \frac{\mu_0 N_2}{L_2}$$

2 Дані, що приведені на панелі установки

Число витків первинної обмотки соленоїда $N_1 =$

Довжина соленоїда $L_1 =$ м

Число витків вторинної обмотки соленоїда $n_1 =$

Площа поперечного перерізу соленоїда $S_1 =$ м²

Число витків первинної обмотки тороїда $N_2 =$

Довжина сердечника тороїда $L_2 =$ м

Число витків вторинної обмотки тороїда $n_2 =$

Площа поперечного перерізу тороїда $S_2 =$ м²

3 Результати калібрувального вимірювання

Сила струму $I_1 =$ А

Відхилення «зайчика» гальванометра $\alpha =$ см

4 Розрахунок коефіцієнта пропорційності k

$$k = \frac{\mu_0 N_2}{L_2}$$

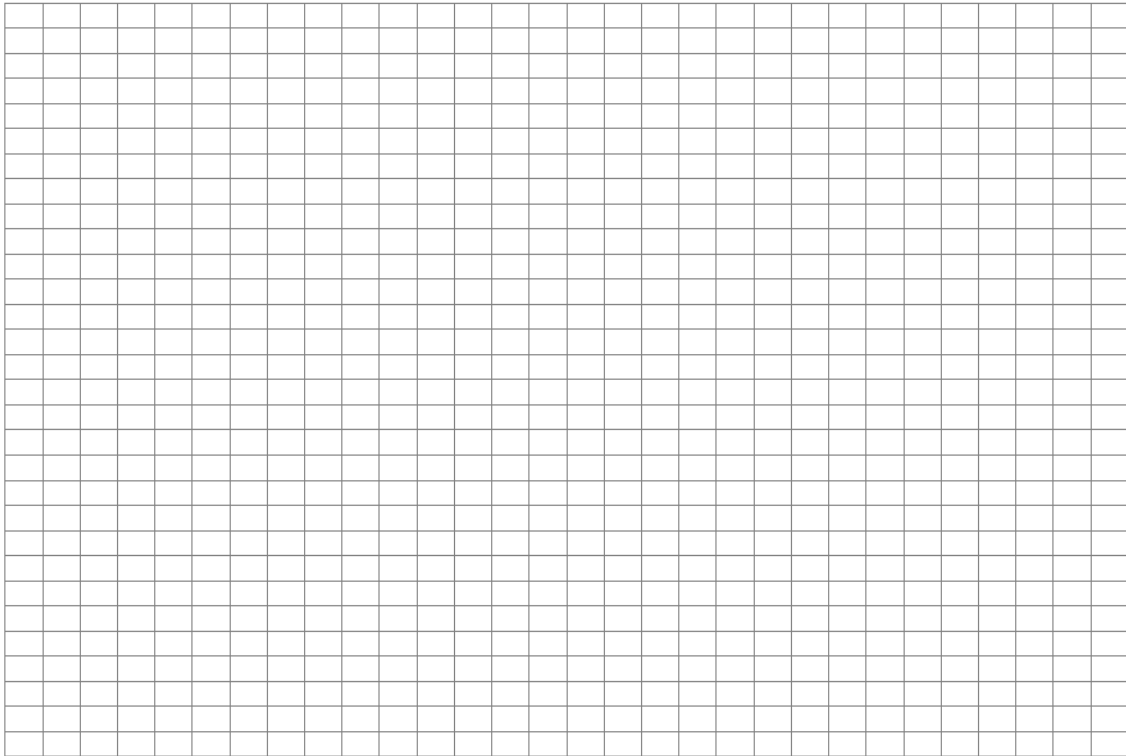
5 Розрахунок коефіцієнта пропорційності η

$$\eta = \frac{n_1 S_1 \mu_0 N_1 I_1}{n_2 S_2 L_1 \alpha}$$

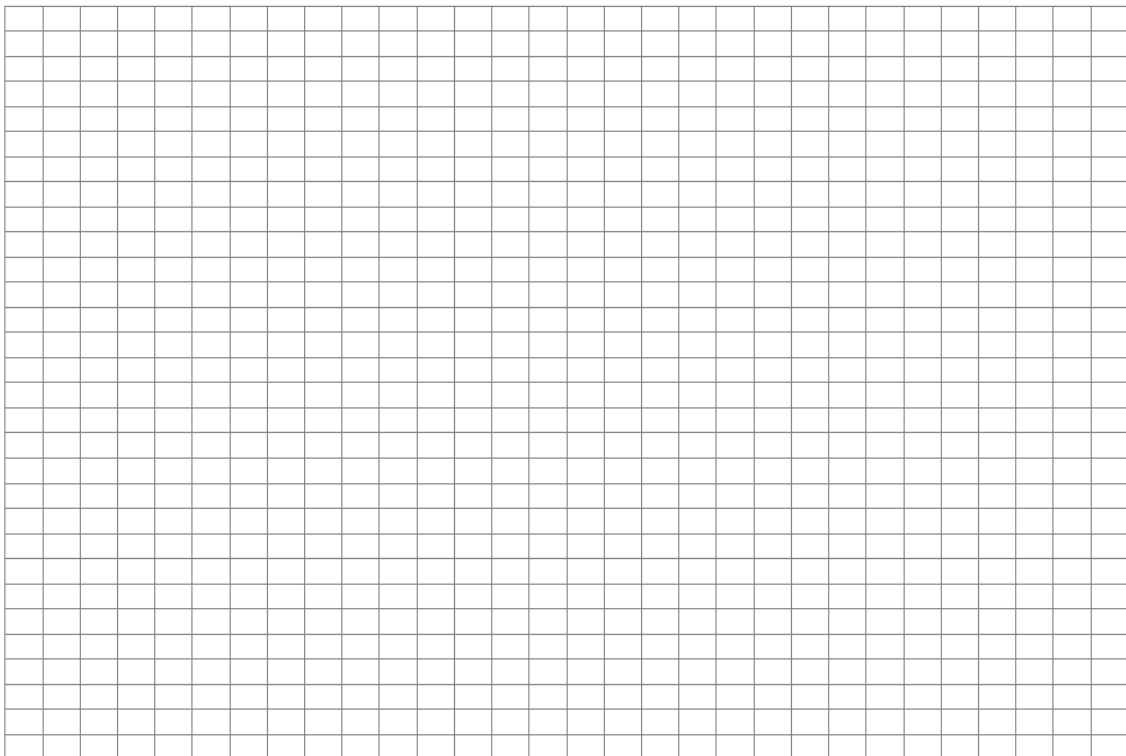
6 Результати експерименту і розрахунків B_0 , B , і μ

$I_2, 10^{-3}$ А	β , см	$B_0 = kI_2$	$B = \eta\beta$	$\mu = B/B_0$
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				
200				
300				
400				

7 Графік залежності $B(B_0)$



8 Графік залежності $\mu(B_0)$



9 Визначення відносної і абсолютної похибки

У даній роботі потрібно розрахувати похибку магнітної індукції при максимальному струмі. Згідно з формулами (55.11), (55.12)

$$\frac{\Delta B}{B} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_1}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right)^2}$$

(беремо величину β з останнього рядка таблиці).

Абсолютні похибки $\Delta \alpha$ і $\Delta \beta$ складають 0,1 см.

Абсолютна похибка ΔI_1 визначається класом точності амперметра і діапазоном вимірювання.

$$n_I = \quad \quad \quad I_{\max} =$$

$$\Delta I_1 = \frac{n_I I_{\max}}{100}$$

Відносна (у відсотках) і абсолютна похибка

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_1}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right)^2} \cdot 100\%$$

$$\Delta B = \frac{\varepsilon}{100\%} B$$

(беремо величину B з останнього рядка таблиці).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 56

Визначення магнітної сприйнятливості парамагнетика

Мета роботи: визначення магнітної сприйнятливості розчину хлорного заліза у воді.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для визначення магнітної сприйнятливості рідини.

Теоретичні відомості

У зовнішньому магнітному полі будь-яка речовина намагнічується (набуває намагніченості). Вектором намагніченості називається магнітний момент одиниці об'єму речовини

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V}, \quad (56.1)$$

де $\vec{P}_m = \sum \vec{p}_a$, магнітний момент зразка, є векторною сумою магнітних моментів молекул \vec{p}_a .

У досить слабких полях намагніченість прямо пропорційна напруженості магнітного поля

$$\vec{J} = \chi \vec{H}. \quad (56.2)$$

Коефіцієнт пропорційності χ між намагніченістю і напруженістю магнітного поля називається магнітною сприйнятливістю магнетика.

Магнітні моменти молекул зумовлені мікроскопічними коловими струмами. Якщо магнітні моменти молекул орієнтовані переважно в певному напрямку (завдяки чому і виникає середній магнітний момент зразка), то на поверхні зразка з'являються некомпенсовані молекулярні струми, які створюють у зразку додаткову магнітну індукцію $\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала). Повна магнітна індукція є сумою магнітної

індукції у вакуумі і додаткової індукції, зумовленої молекулярними струмами:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}. \quad (56.3)$$

З виразу (56.3) випливає, що магнітна сприйнятливість χ і магнітна проникність μ зв'язані співвідношенням

$$\mu = 1 + \chi. \quad (56.4)$$

За своїми магнітними властивостями речовини поділяються на діамагнетики, парамагнетики і феромагнетики. Діамагнетики і парамагнетики є слабо магнітними речовинами. Для них $|\chi| \ll 1$. У парамагнетиках $\chi > 0$ і напрямок вектора намагніченості співпадає з напрямком напруженості магнітного поля (тобто вони намагнічуються по полю). У діамагнетиках $\chi < 0$ і напрямок вектора намагніченості є протилежним напрямку напруженості магнітного поля (тобто вони намагнічуються проти поля).

Магнітна сприйнятливість парамагнетика зменшується при підвищенні температури. Це зв'язано з тим, що при підвищенні температури зростають температурні коливання магнітних моментів молекул і ступінь їх упорядкованості в зовнішньому полі зменшується. При досить високих температурах магнітна сприйнятливість парамагнетика обернено пропорційна термодинамічній температурі $\chi \propto \frac{1}{T}$ (закон Кюрі).

У зовнішньому неоднорідному магнітному полі на магнетик діє сила, пропорційна градієнту напруженості магнітного поля. Ця сила втягує парамагнетик в область, де поле більше. Навпаки, діамагнетик відштовхується в область, де поле менше.

Знайдемо силу, що діє на парамагнетик в неоднорідному магнітному полі. Для спрощення розрахунків уявимо, що магнітний момент молекули зумовлений струмом, що тече по контуру, який має форму квадрата зі стороною a (рисунок 56.1). Рівнодіюча сил Ампера, які діють на сторони квадрата, дорівнює

$$f_m = F_{A2} - F_{A1} = Ia(B_2 - B_1) \approx Ia^2 \frac{dB}{dz} \approx Ia^2 \mu_0 \frac{dH}{dz} = p_a \mu_0 \frac{dH}{dz}, \quad (56.5)$$

де p_a – магнітний момент однієї молекули.

Намагніченість J є магнітним моментом одиниці об'єму, і силу, що діє на одиницю об'єму, можна знайти з виразу (56.5), замінивши p_a на J ,

$$f_H = J \mu_0 \frac{dH}{dz} = \chi \mu_0 H \frac{dH}{dz}. \quad (56.6)$$

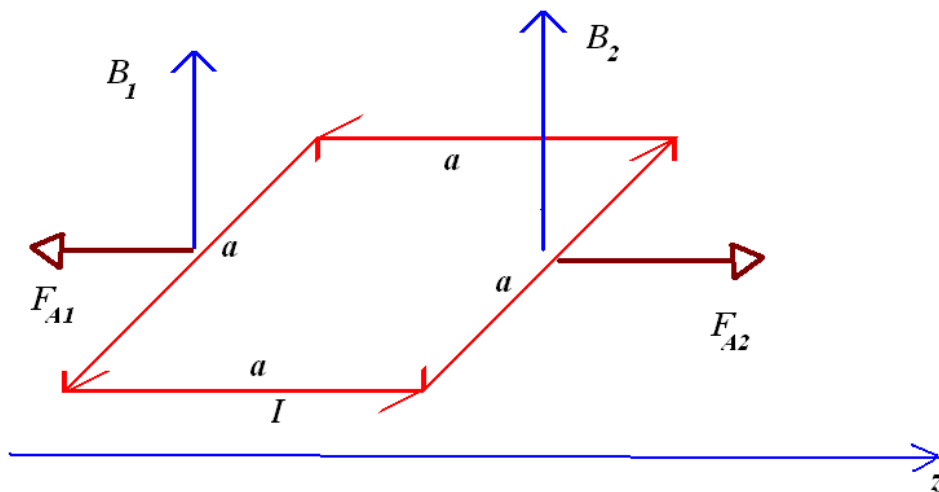


Рисунок 56.1 – Сили Ампера, що діють на молекулярний струм у напрямку градієнта магнітного поля (напрямок z)

Опис установки

Установка зображена на рисунку 56.2. Вона містить електромагніт M з полюсними наконечниками у формі зрізаних конусів. Обмотки електромагніта підключені до джерела постійного струму, величину якого можна регулювати за допомогою реостата R і амперметра A . Електромагніт вмикається і вимикається ключем K . Величина магнітної індукції визначається за допомогою калібрувального графіка G . Посередині між полюсами електромагніта знаходиться U -подібна скляна трубка з розчином хлорного заліза. Положення трубки

можна регулювати за допомогою гвинта Р. Зміна висоти рівня рідини в трубці вимірюється за допомогою шкали S.

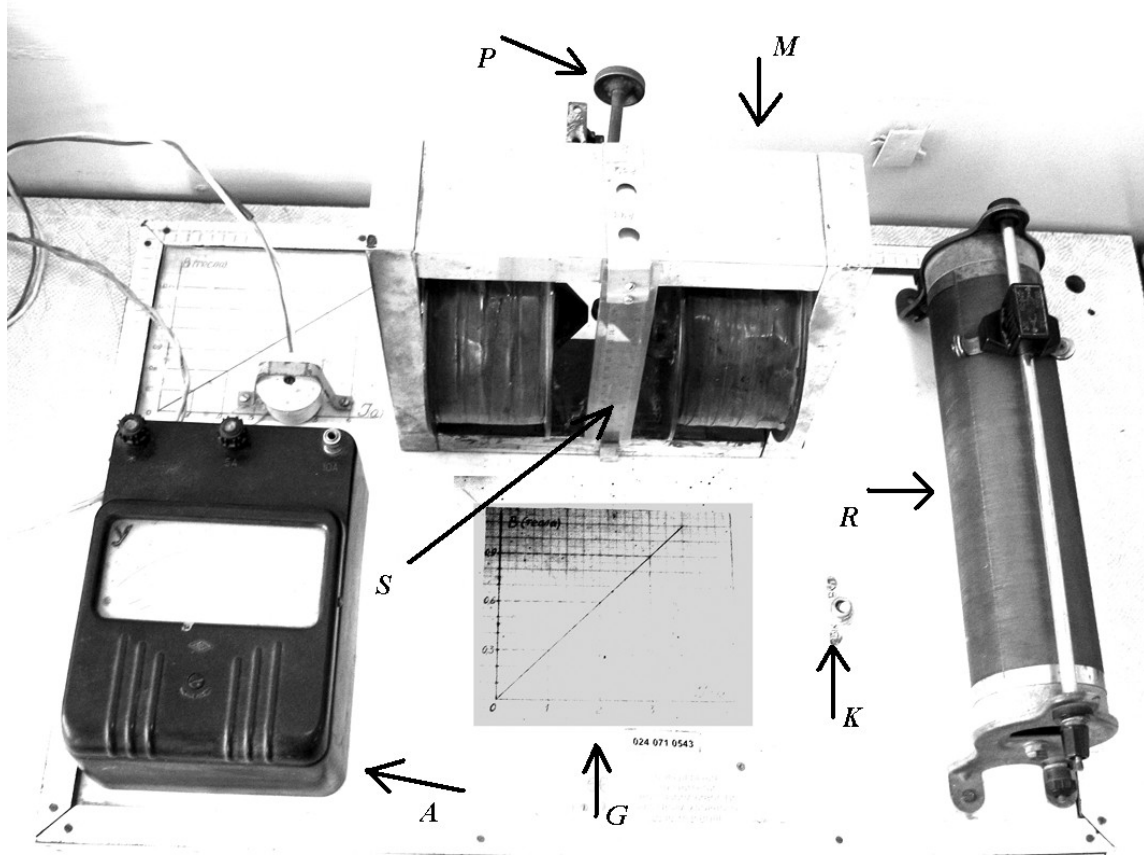


Рисунок 56.2 – Лабораторна установка

Робоча формула

Сила, що діє на рідину з боку магнітного поля, дорівнює

$$F_H = \int S f_H dz = \int S \chi \mu_0 H \frac{dH}{dz} = S \chi \mu_0 \int_0^H H dH = \frac{1}{2} S \chi \mu_0 H^2, \quad (56.7)$$

де S – площа поперечного перерізу стовпа рідини;

H – напруженість магнітного поля між полюсами електромагніту.

Ця сила викликає підйом рівня рідини. Рідина буде підніматись, доки сила (56.7) не буде урівноважена вагою піднятого стовпа рідини

$$F_g = \rho Vg = \rho Shg, \quad (56.8)$$

де g – прискорення вільного падіння;

ρ – густина рідини;

h – висота підйому рідини.

З умови $F_g = F_H$ знаходимо $\mu_0 H^2 \chi = 2\rho gh$, або з урахуванням $B \approx \mu_0 H$,

$$\chi = \frac{2\mu_0 \rho gh}{B^2}. \quad (56.9)$$

Послідовність виконання роботи

- 1 Ключем К увімкнути струм через електромагніт.
- 2 За допомогою реостата R встановити максимальний струм ($\approx 2,5$ А).
- 3 При увімкненому струмі за допомогою гвинта P встановити U-подібну трубку так, щоб рівень рідини знаходився точно на осі симетрії полюсних конусів.
- 4 Ключем К вимкнути струм. Заміряти величину h , на яку опустився рівень рідини в трубці.
- 5 Занести в таблицю встановлене значення струму і знайдену величину h .
- 6 За допомогою калібрувального графіка визначити величину магнітної індукції B , яка відповідає встановленому струму. Величину B також занести в таблицю.
- 7 Повторити експеримент (пп. 1 - 6) для двох інших значень струму: ≈ 2 А і $\approx 1,5$ А (при кожному вимірюванні заново встановлювати рівень рідини на вісь конусів).
- 8 З одержаних даних розрахувати магнітну сприйнятливість χ для кожного вимірювання. За трьома вимірюваннями знайти середнє значення χ .
- 9 Розрахувати відносну і абсолютну похибку.

Контрольні питання

- 1 Що таке сила Ампера? Чому вона дорівнює?
- 2 Чому дорівнює магнітний момент плоского контура зі струмом? В яких одиницях він вимірюється?

3 Що називається вектором намагніченості? В яких одиницях вимірюється намагніченість?

4 Що називається магнітною сприйнятливістю?

5 Записати формулу, що дає зв'язок між магнітною проникністю і магнітною сприйнятливістю. Вивести цю формулу.

6 Чим відрізняється парамагнетик від діамагнетика?

7 Як діє неоднорідне магнітне поле на парамагнетик і діамагнетик?

8 Як магнітна сприйнятливість парамагнетика залежить від температури? Поясніть якісно цю залежність.

Звіт про виконану роботу

1 Робоча формула для визначення магнітної сприйнятливості

$$\chi = \frac{2\mu_0\rho gh}{B^2}$$

2 Дані, що приведені на панелі установки

Густина рідини $\rho =$ кг/м³

3 Результати експерименту

№	I , А	B , Тл	h , м	χ
1				
2				
3				

4 Розрахунки χ

$$\chi_1 = \frac{2\mu_0\rho gh_1}{B_1^2}$$

$$\chi_2 = \frac{2\mu_0\rho gh_2}{B_2^2}$$

$$\chi_3 = \frac{2\mu_0\rho gh_3}{B_3^2}$$

Середнє значення

$$\chi_{\text{сер}} = \frac{\chi_1 + \chi_2 + \chi_3}{3}$$

5 Розрахунок відносної і абсолютної похибки

Відносна похибка величини (56.9) розраховується за формулою

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta B}{B}\right)^2} .$$

Як видно з калібрувального графіка, $B \propto I$. Відповідно

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta I}{I} .$$

Таким чином,

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta I}{I}\right)^2} .$$

Абсолютна похибка Δh складає 10^{-3} м.

Абсолютна похибка ΔI визначається класом точності амперметра і діапазоном вимірювання.

$$n_I =$$

$$I_{\max} =$$

$$\Delta I = \frac{n_I I_{\max}}{100}$$

Розрахунок похибки провести для максимального струму.

Відносна (у відсотках) і абсолютна похибка складають

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h_1}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta I}{I_1}\right)^2} \cdot 100\%$$

$$\Delta \chi = \frac{\varepsilon}{100\%} \chi_1$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 57

**Вивчення петлі гістерезису феромагнетика за допомогою
осцилографа**

Мета роботи: вивчення законів намагнічування феромагнетика.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для вивчення петлі магнітного гістерезису.

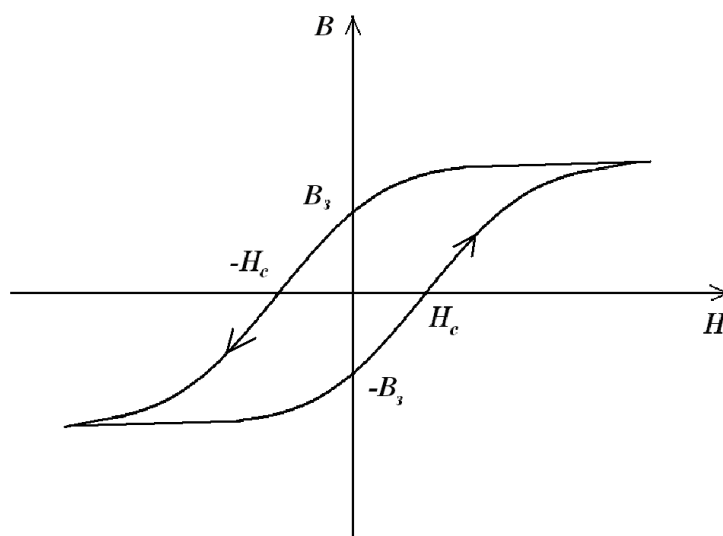
Теоретичні відомості

Феромагнетиками називаються речовини, які мають велику магнітну проникність ($\mu \gg 1$) і намагніченість яких нелінійно залежить від напруженості магнітного поля і визначається передісторією процесу намагнічування зразка. Найбільш розповсюдженим і відомим представником феромагнетиків є залізо.

Для кожного феромагнетика існує певна температура, вище якої він втрачає феромагнітні властивості і перетворюється на парамагнетик. Ця температура називається температурою Кюрі. Характерною властивістю феромагнетика є також спонтанна намагніченість – ненульова намагніченість за відсутності зовнішнього магнітного поля.

Якщо взяти ненамагнічений феромагнетик і помістити його в магнітне поле, яке зростає з часом, то, вимірюючи його намагніченість, одержимо основну криву намагнічування феромагнетика (залежність намагніченості J від напруженості магнітного поля H для первісно ненамагніченого феромагнетика). При зростанні H намагніченість спочатку зростає швидко, потім – повільніше, а наприкінці досягається магнітне насичення (зростання намагніченості зупиняється). Намагніченість насичення – це максимальне значення намагніченості, що досягається в даному феромагнетикі і лишається незмінним при подальшому зростанні напруженості поля. Якщо після намагнічування до насичення почати зменшувати зовнішнє магнітне поле, то намагніченість також почне зменшуватись, але крива намагнічування буде лежати над основною кривою намагнічування. При напруженості поля $H = 0$ намагніченість буде відмінна від нуля. Намагніченість феромагнетика, яка лишається після вимкнення зовнішнього

магнітного поля, називається залишковою намагніченістю J_3 . Зміна напрямку напруженості поля на протилежний і досягнення певного значення напруженості призведе до повного розмагнічування феромагнетика. Напруженість магнітного поля, яка потрібна для повного розмагнічування феромагнетика, називається коерцитивною силою H_c . Подальше зростання напруженості магнітного поля призведе до намагнічування феромагнетика у протилежному напрямку. Процес може бути циклічно продовжено. Замкнена крива залежності $J(H)$ при процесі циклічного перемагнічування феромагнетика називається петлею магнітного гістерезису в координатах (H, J) . Петлею магнітного гістерезису також називають залежність магнітної індукції феромагнетика B від напруженості магнітного поля H (рисунок 57.1). На цій петлі також присутні дві точки, які відповідають коерцитивній силі H_c , а замість точок залишкової намагніченості присутні точки залишкової магнітної індукції $B_3 = \mu_0 J_3$.



B_3 – залишкова магнітна індукція, H_c – коерцитивна сила
Рисунок 57.1 – Петля магнітного гістерезису в координатах (H, B)

Можна показати, що площа петлі гістерезису в координатах (H, B) дорівнює втратам енергії при перемагнічуванні феромагнетика в перерахунку на один цикл на одиницю об'єму речовини.

У залежності від вигляду петлі гістерезису відрізняють два типи феромагнетиків: жорсткі і м'які. У жорстких феромагнетиків петля гістерезису широка, а значення залишкової намагніченості і коерцитивної сили великі. У м'яких феромагнетиків петля гістерезису вузька, а значення залишкової намагніченості і коерцитивної сили малі. Жорсткі феромагнетики використовуються для виготовлення постійних магнітів, а м'які – для виготовлення сердечників трансформаторів.

Специфіка процесу намагнічування феромагнетиків пов'язана з тим, що в них існують невеликі, але макроскопічні області, що називаються доменами, лінійний розмір яких $1 \div 10$ мкм. У середині кожного домену речовина спонтанно намагнічена до насичення. У ненамагніченому зразку магнітні моменти різних доменів орієнтовані рівноправно в усіх напрямках. При намагнічуванні переважним є напрямком вздовж зовнішнього поля. Намагнічування феромагнетика у зовнішньому магнітному полі відбувається за рахунок зміщення границь доменів і збільшення розмірів тих доменів, вектори намагніченості яких складають з напрямком зовнішнього магнітного поля гострий кут, а також за рахунок переорієнтації магнітних моментів доменів у напрямку зовнішнього магнітного поля. Після того, як всі домени будуть орієнтовані по полю, подальше зростання намагніченості зупиняється (досягається насичення).

Опис установки

Установка зображена на рисунку 57.2. Вона містить тороїд Т з феромагнітним сердечником з двома обмотками. На первинну обмотку подається змінний електричний струм, за рахунок якого феромагнетик циклічно перемагнічується. Величина струму вимірюється амперметром А і регулюється реостатом R1.

До первинної обмотки підключено також x-вхід осцилографа О. Вторинна обмотка використовується для вимірювання магнітної індукції. Вторинна обмотка з'єднана послідовно з магазином опорів R2 і конденсатором С. Паралельно конденсатору підключено у-вхід осцилографа. Петля

гістерезису в координатах (H, B) відображається на екрані осцилографа. Магазин опорів R_2 дозволяє регулювати висоту зображення. Реостат R_1 дозволяє регулювати максимальне значення напруженості магнітного поля в циклі перемагнічування (від якого залежить форма петлі). Ціну поділки на екрані осцилографа приведено на ручках регулювання осцилографа.

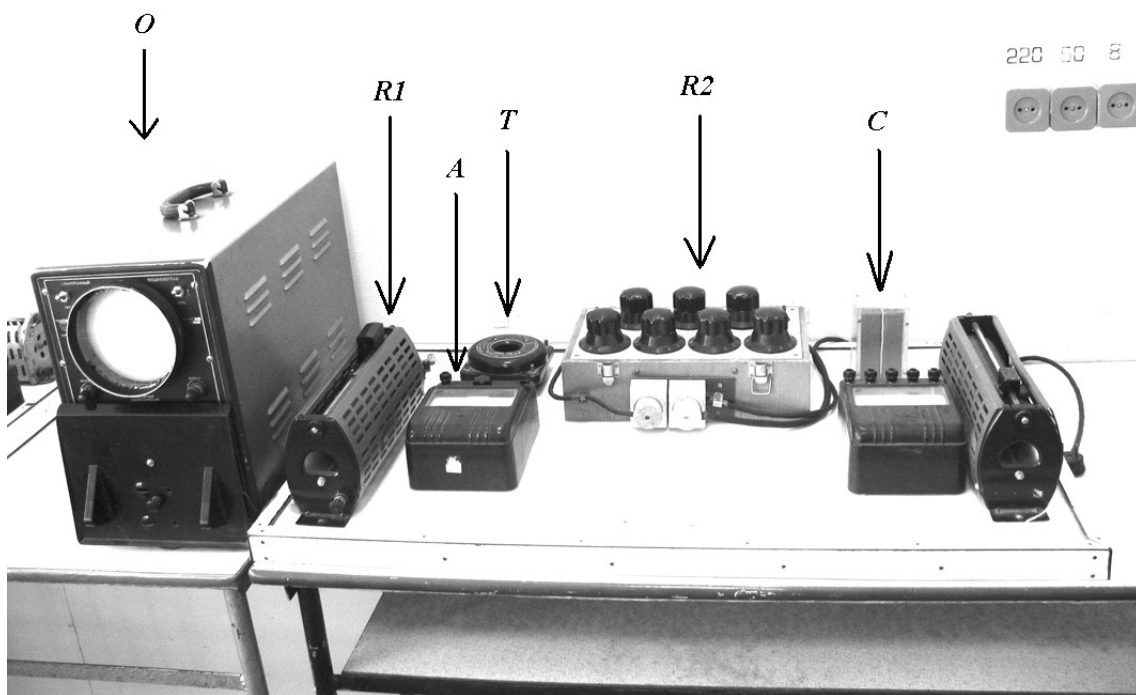


Рисунок 57.2 – Лабораторна установка

Робочі формули

Для визначення кількісних характеристик петлі гістерезису потрібно знайти масштаб, який відповідає поділці на екрані осцилографа. Принципову електричну схему установки зображено на рисунку 57.3. На x клеми осцилографа подається напруга з опору R_0 : $U_x = R_0 I_1$. Напруженість магнітного поля всередині тороїда визначається за формулою

$$H = n_1 I_1, \quad (57.1)$$

де I_1 – сила струму в первинній обмотці;

n_1 – щільність витків в обмотці.

Таким чином, $U_x \propto H$. Максимальна напруженість H_{\max} досягається при максимальному струмі $I_{\max} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{еф}}$, де $I_{\text{еф}} = I$ – ефективна сила струму (яка вимірюється амперметром). Повна ширина петлі $2H_{\max} = 2\sqrt{2} \cdot n_1 I$. Якщо повна ширина петлі складає l_x одиниць поділки, то ціна поділки по осі x

$$a_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot n_1 I}{l_x}. \quad (57.2)$$

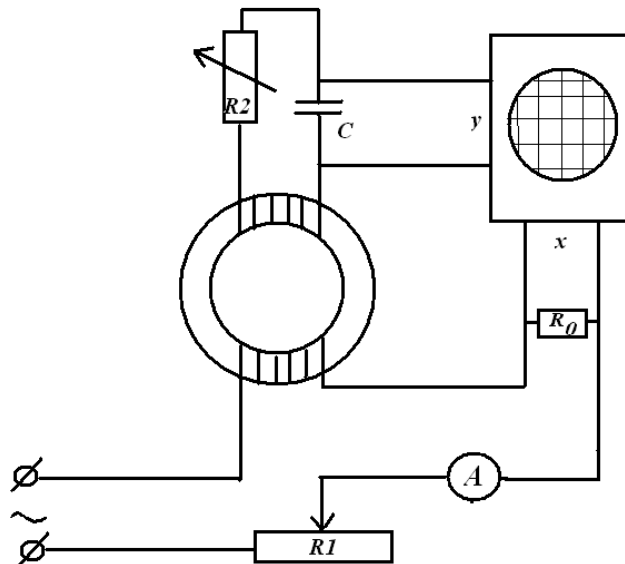


Рисунок 57.3 – Принципова електрична схема установки

Потрібно також визначити ціну поділки по осі y . Для спрощення розглянемо випадок, коли магнітна індукція на вторинній обмотці змінюється за гармонічним законом $B = B_m \cos(\omega t)$. Тоді ЕРС електромагнітної індукції дорівнює

$$\mathcal{E} = B_m S_2 N_2 \omega \sin(\omega t), \quad (57.3)$$

де S_2 – площа поперечного перерізу вторинної обмотки;

N_2 – число витків у цій обмотці.

Згідно з законами змінного струму амплітуда струму в колі вторинної обмотки (рисунок 57.3) дорівнює

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{R_2} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}, \quad (57.4)$$

де ε_m – амплітуда ЕРС, $\varepsilon_m = B_m S_2 N_2 \omega$;

R_2 – опір магістину опорів;

C – ємність конденсатора (індуктивністю обмотки нехтуємо).

Амплітуда напруги на конденсаторі дорівнює

$$U_C = R_C I_m = \frac{1}{\omega C} \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}. \quad (57.5)$$

У даній установці активний опір є значно більшим за реактивний $R_2 \gg R_C = \frac{1}{\omega C}$. Тому

$$U_C \approx \frac{\varepsilon_m}{\omega C R_2} = \frac{B_m S_2 N_2 \omega}{\omega C R_2} = \frac{B_m S_2 N_2}{C R_2}. \quad (57.6)$$

З (57.6) випливає, що магнітна індукція прямо пропорційна напрузі на конденсаторі:

$$B_m = \frac{U_C C R_2}{S_2 N_2}. \quad (57.7)$$

Повна висота петлі гістерезису $2B_m$. Ціна поділки в теслах дорівнює $a_y = 2B_m / l_y$, де l_y – висота петлі в одиницях поділки. Таким чином,

$$a_y = \frac{2B_m}{l_y} = \frac{2U_C C R_2}{l_y S_2 N_2}. \quad (57.8)$$

З іншого боку, на екрані осцилографа повна висота петлі відповідає подвійній амплітуді напруги на конденсаторі $2U_c = l_y u_y$, де u_y – ціна поділки у вольтах. З урахуванням (57.8), одержуємо остаточний вираз для ціни поділки

$$a_y = \frac{u_y CR_2}{S_2 N_2}. \quad (57.9)$$

Для визначення залишкової магнітної індукції потрібно знайти з графіка петлі гістерезису цю величину в одиницях поділки (L_{B_3}) і помножити її на ціну поділки по осі Y

$$B_3 = L_{B_3} a_y. \quad (57.10)$$

Залишкова намагніченість дорівнює

$$J_3 = \frac{B_3}{\mu_0}. \quad (57.11)$$

Для визначення коерцитивної сили потрібно знайти H_c в одиницях поділки (L_{H_c}) і помножити цю величину на ціну поділки по осі x

$$H_c = L_{H_c} a_x. \quad (57.12)$$

Магнітна проникність при максимальному H визначається за формулою

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{l_y a_y}{\mu_0 l_x a_x}. \quad (57.13)$$

Робота з перемагнічування на одиничний об'єм визначається за формулою

$$A = S_h a_x a_y, \quad (57.14)$$

де S_h – площа петлі в одиницях поділки.

Послідовність виконання роботи

1 Включити осцилограф. За допомогою реостата і магазину опорів відрегулювати зображення петлі. Петля повинна займати більшу частину екрана, але не виходити за його межі.

2 Використовуючи амперметр, знайти ефективне значення сили струму через первинну обмотку.

3 Зарисувати петлю гістерезису, додержуючись масштабу поділки на екрані (доцільно вибрати масштаб таким, що одиниці поділки на екрані відповідають декільком клітинкам на рисунку). На рисунку провести горизонтальну і вертикальну осі. Осі мають ділити петлю точно пополам. Вісь x відповідає напруженості магнітного поля, вісь y – магнітній індукції.

4 На рисунку вказати точки, які відповідають значенням залишкової магнітної індукції і коерцитивної сили (див. рисунок 57.1).

5 За формулами (57.2) і (57.9) визначити ціну поділки по осі x і y .

6 З рисунка визначити величини L_{Bz} , L_{Hc} і S_h в одиницях поділки. За формулами (57.10), (57.11), (57.12), (57.13) і (57.14) розрахувати кількісні характеристики петлі гістерезису.

Контрольні питання

1 Які речовини називаються феромагнетиками? Що називається температурою Кюрі?

2 Поясніть, чому в феромагнетику в достатньо сильних полях досягається намагніченість насичення?

3 Нарисуйте петлю гістерезису. Поясніть рисунок.

4 Що називається залишковою намагніченістю? Що називається коерцитивною силою? В яких одиницях вимірюються ці величини? Як з рисунка петлі гістерезису знайти ці величини?

5 У чому полягає різниця між жорсткими і м'якими феромагнетиками? Де використовуються жорсткі і м'які феромагнетики?

6 Що таке магнітні домени? Як відбувається процес намагнічування феромагнетика?

7 Що таке тороїд? Чому дорівнює напруженість магнітного поля в тороїді? Як направлені магнітні силові лінії в тороїді?

8 У чому полягає явище електромагнітної індукції? За якою формулою розраховується ЕРС електромагнітної індукції в обмотці, яка знаходиться в магнітному полі, що змінюється за гармонічним законом?

9 За якою формулою можна розрахувати втрати енергії з перемагнічування феромагнетика в періодичному зовнішньому магнітному полі?

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули

Ціна поділки

$$a_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot n_1 I}{l_x} \quad (\text{А/м}), \quad a_y = \frac{u_y C R_2}{S_2 N_2} \quad (\text{Тл})$$

2 Дані, що приведені на панелі установки і осцилографі

Густина витків первинної обмотки тороїда $n_1 =$ м⁻¹

Число витків вторинної обмотки тороїда $N_2 =$

Площа поперечного перерізу вторинної обмотки $S_2 =$ м²

Ємність конденсатора $C =$ Ф

Ціна поділки у вольтах $u_y =$ В

3 Результати вимірювання

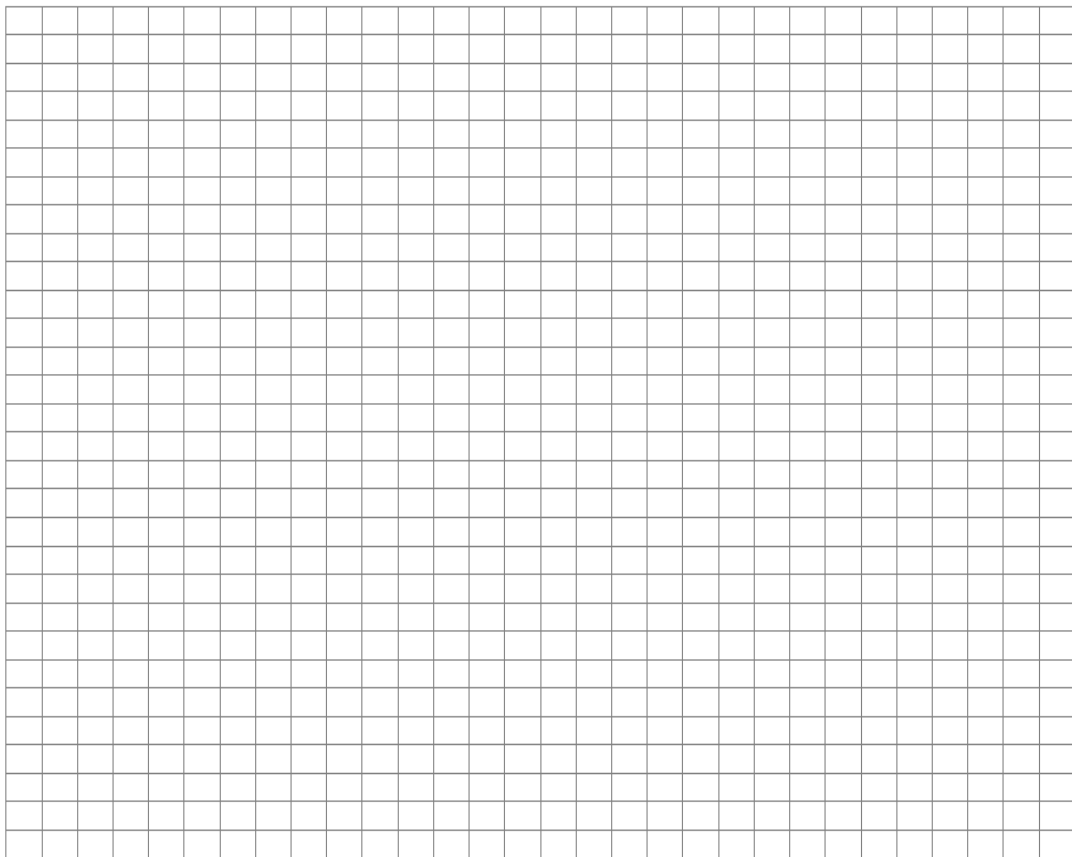
Ефективна сила струму через первинну обмотку

$$I = \quad \text{А}$$

Опір магазина опорів

$$R_2 = \quad \text{Ом}$$

4 Рисунок петлі гістерезису



5 Аналіз рисунка

$$l_x =$$

$$l_y =$$

$$L_{B_3} =$$

$$L_{H_c} =$$

$$S_h =$$

6 Розрахунок ціни поділки

$$a_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot n_1 I}{l_x}$$

$$a_y = \frac{u_y C R_2}{S_2 N_2}$$

7 Розрахунок характеристик петлі гістерезису

Залишкова магнітна індукція, Тл,

$$B_3 = L_{B_3} a_y$$

Залишкова намагніченість, А/м,

$$J_3 = \frac{B_3}{\mu_0}$$

Коерцитивна сила, А/м,

$$H_c = L_{H_c} a_x$$

Магнітна проникність

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{l_y a_y}{\mu_0 l_x a_x}$$

Робота з перемагнічування на цикл на одиницю об'єму, Дж/м³,

$$A = S_h a_x a_y$$

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота № 51 Визначення магнітного поля на осі соленоїда.....	5
Лабораторна робота № 54 Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона.....	16
Лабораторна робота № 55 Дослідження магнітної індукції і магнітної проникності феромагнетика.....	26
Лабораторна робота № 56 Визначення магнітної сприйнятливості парамагнетика.....	38
Лабораторна робота № 57 Вивчення петлі гістерезису феромагнетика за допомогою осцилографа.....	46

ВСТУП

Лабораторний практикум призначений для підготовки студентів до виконання і захисту лабораторних робіт з фізики за розділом «Магнетизм».

Опис кожної роботи включає підрозділ «звіт про виконану роботу», в якому наведено послідовність оформлення звіту. Він містить робочі формули, приклади оформлення таблиць, в які вносяться результати експерименту і результати обробки експериментальних даних, а також формули для розрахунку похибок. Підрозділ «звіт про виконану роботу» є зразком для оформлення звіту студентом у зошиті для лабораторних робіт.

Під час підготовки до виконання роботи студент має ознайомитись з метою роботи і основними теоретичними відомостями. До початку експерименту студент повинен підготувати бланк звіту в зошиті для лабораторних робіт згідно зі зразком, що наведено в розробці.

Експериментальна частина дослідження виконується згідно з наведеною послідовністю виконання роботи. Дані, наведені на установці, і одержані експериментальні дані записуються в зошит для лабораторних робіт у завчасно підготовлений бланк звіту. Обробка експериментальних даних включає проведення розрахунків за робочими формулами, побудову графіків і проведення розрахунків похибок.

Для захисту роботи студент має подати викладачеві заповнений звіт (на основі експериментальних даних, які одержано студентом особисто під час виконання експериментальної частини роботи), а також відповісти на контрольні питання (згідно зі списком, що наведено).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 51

Визначення магнітного поля на осі соленоїда

Мета роботи: вивчення просторового розподілу магнітного поля в соленоїді.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для визначення магнітного поля на осі соленоїда в залежності від координати.

Теоретичні відомості

Соленоїдом називається циліндричний навій, що складається з великої кількості витків проволочки, які утворюють гвинтову лінію. Соленоїд використовується для створення магнітного поля, величину якого можна змінювати шляхом зміни величини електричного струму в обмотці. Якщо довжина соленоїда значно більша за його діаметр, напруженість магнітного поля всередині соленоїда (на значній відстані від торців) дорівнює

$$H = nI, \quad (51.1)$$

де n – щільність витків (кількість витків на 1 м довжини);

I – сила струму в соленоїді.

Рівняння (51.1) називається формулою для напруженості магнітного поля нескінченно довгого соленоїда. Одиниця вимірювання напруженості магнітного поля – А/м. Магнітне поле соленоїда кінцевої довжини можна знайти, виходячи з закону Біо-Савара-Лапласа. Напруженість магнітного поля на осі такого соленоїда дорівнює

$$H = \frac{nI}{2} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (51.2)$$

де φ_1 і φ_2 – кути, під якими видно торці соленоїда з даної точки осі (рисунок 51.1).

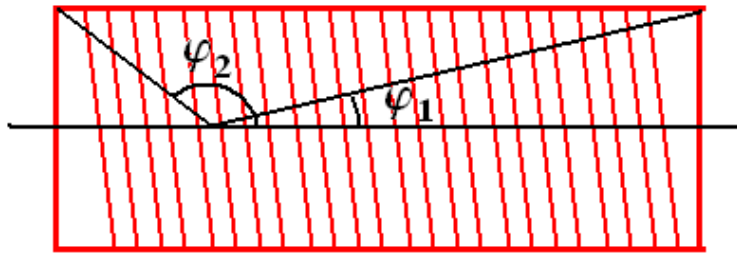


Рисунок 1.1 – Кути φ_1 і φ_2 , під якими видно торці з даної точки на осі соленоїда

Згідно з формулою (51.2) напруженість магнітного поля найбільша в центрі соленоїда, а поблизу торців її величина зменшується. Силві лінії напруженості магнітного поля навколо соленоїда мають вигляд, показаний на рисунку 51.2.

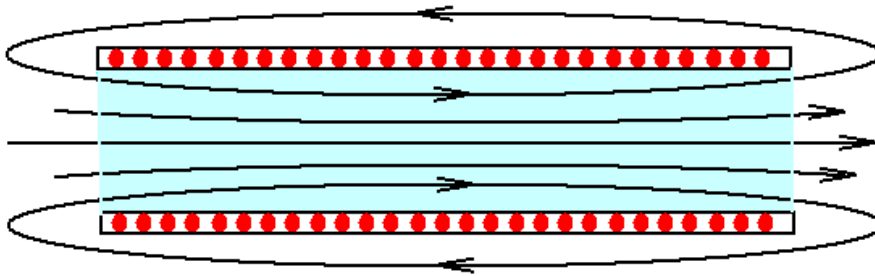


Рисунок 51.2 – Силві лінії магнітного поля в соленоїді (соленоїд зображений у розрізі)

У даній роботі вимірювання магнітного поля здійснюється за допомогою явища електромагнітної індукції. Явище електромагнітної індукції полягає у виникненні електричного струму в замкненому провіднику при зміні потоку вектора магнітної індукції через контур, що утворює провідник. Такий струм називається індукційним. Явище електромагнітної індукції описується законом Фарадея. Закон Фарадея стверджує, що електрорушійна сила, яка спричиняє індукційний струм (ЕРС електромагнітної індукції), дорівнює взятій з протилежним знаком швидкості зміни потоку вектора магнітної індукції через контур:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (51.3)$$

Потік вектора магнітної індукції (магнітний потік) через плоский контур в однорідному магнітному полі дорівнює

$$\Phi = BS \cos \phi , \quad (51.4)$$

де B – величина магнітної індукції;

S – площа контура;

ϕ – кут між вектором магнітної індукції і вектором нормалі до контура. Магнітний потік вимірюється у веберах (Вб).

Магнітна індукція зв'язана з напруженістю магнітного поля співвідношенням

$$B = \mu\mu_0 H , \quad (51.5)$$

де μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ – магнітна проникність середовища (для вакууму і повітря $\mu = 1$). Магнітна індукція вимірюється у теслах (Тл).

Потік вектора магнітної індукції через вимірювальний навій з N витками дорівнює

$$\Phi = BSN \cos \phi , \quad (51.6)$$

де S – площа поперечного перерізу навою;

ϕ – кут між вектором магнітної індукції і віссю навою.

Опис установки

Установка зображена на рисунку 51.3. Вона містить два соленоїди (короткий соленоїд С1 і довгий соленоїд С2), гальванометр G (зі шкалою S2), стержень з вимірювальним навоєм и шкалою S1, амперметр А, реостат R. Напруженість магнітного поля вимірюється на осі соленоїда С1 за допомогою вимірювального навою і гальванометра. Положення вимірювального навою на осі соленоїда змінюється при переміщенні стержня і контролюється за допомогою шкали S1. Заряд, що протікає через гальванометр, визначається за величиною відкидання «зайчика» по шкалі гальванометра S2.

Соленоїд С2 і амперметр А використовуються для калібрування показників гальванометра (визначення коефіцієнта пропорційності між величиною відхилення «зайчика» і напруженістю магнітного поля). Перемикач К1 вмикає і вимикає електричний струм через соленоїд С1 чи С2 (у залежності від положення перемикача К2).

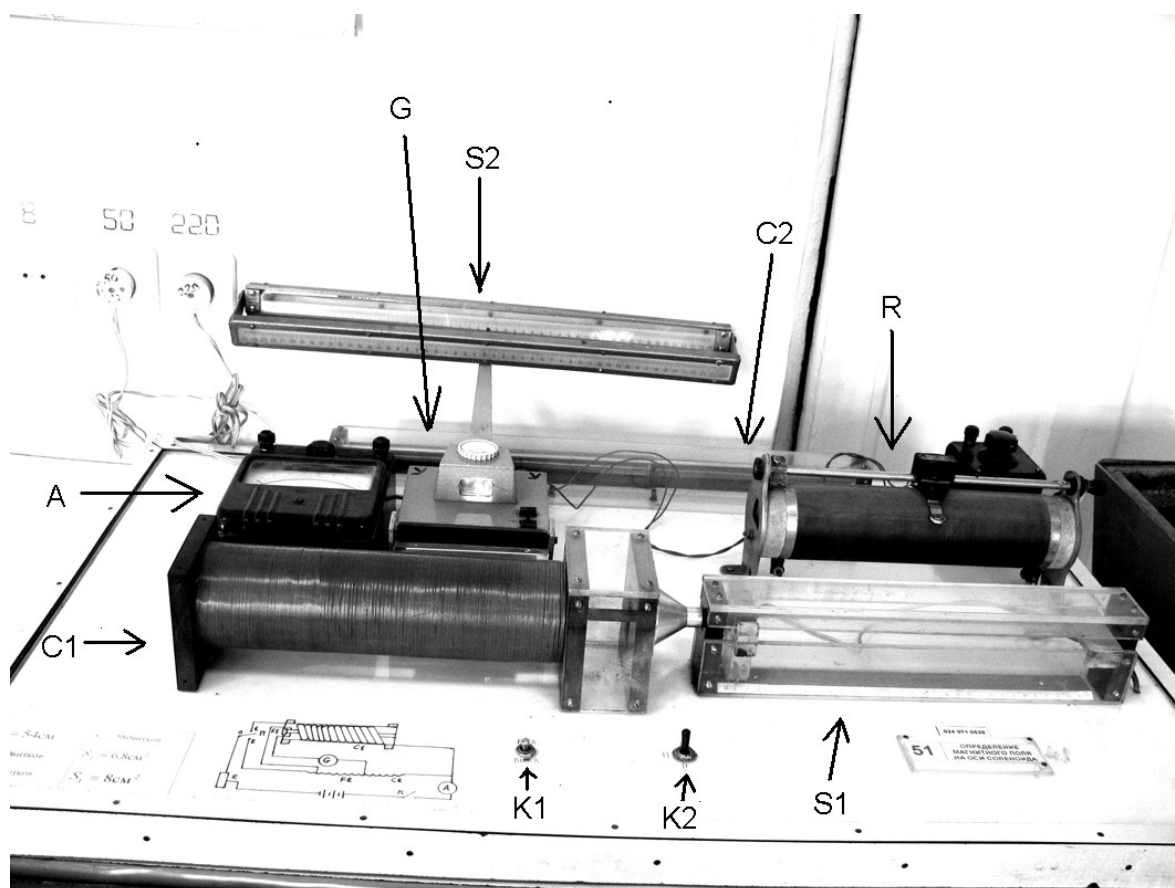


Рисунок 51.3 – Лабораторна установка

Робочі формули

Лабораторна установка зібрана таким чином, що напруженість магнітного поля H прямо пропорційна відхиленню «зайчика» гальванометра α . Для вимірювання напруженості в абсолютних одиницях потрібно знайти коефіцієнт пропорційності.

У лабораторній установці вимірювальний навій в соленоїді С1 з'єднаний в одне коло з вимірювальним навоєм у соленоїді С2

і гальванометром. Згідно з законом Ома струм через це коло дорівнює

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (51.7)$$

де R – повний електричний опір кола.

Враховуючи зв'язок між струмом і зарядом $I = dq/dt$, знаходимо, що величина заряду, яка протікає через гальванометр, дорівнює (за модулем)

$$q = \frac{\Phi}{R}, \quad (51.8)$$

де Φ – магнітний потік через вимірювальний навій при досягненні сили струму в соленоїді стаціонарного значення. Гальванометр працює таким чином, що відхилення «зайчика» гальванометра α прямо пропорційне заряду q .

Для калібрування гальванометра (знаходження коефіцієнта пропорційності між H і α) треба зробити одне вимірювання при пропусканні струму через довгий соленоїд S_2 . У цьому випадку відхилення «зайчика» $\alpha_2 \propto \Phi_2 = n_2 S_2 \mu_0 H_2$,

де n_2 – кількість витків в вимірювальному навою в соленоїді S_2 ;

S_2 – площа поперечного перерізу цього навою;

$$H_2 = \frac{I_2 N_2}{L_2} - \quad (51.9)$$

напруженість магнітного поля всередині довгого соленоїда, яка розрахована за формулою (51.1) (I_2 – сила струму в обмотці соленоїда; N_2 – кількість витків; L_2 – довжина соленоїда).

Якщо електричний струм подано на короткий соленоїд S_1 , то відхилення «зайчика» $\alpha_1 \propto \Phi_1 = n_1 S_1 \mu_0 H_1$,

де n_1 – кількість витків у вимірювальному навої в соленоїді S_1 ;

S_1 – площа поперечного перерізу цього навою;

H_1 – напруженість магнітного поля на осі короткого соленоїда.

Складаємо пропорцію

$$\begin{aligned} \alpha_1 & - n_1 S_1 H_1 \\ \alpha_2 & - n_2 S_2 H_2 \end{aligned} \quad (51.10)$$

З пропорції випливає, що

$$H_1 = \frac{n_2 S_2 H_2 \alpha_1}{n_1 S_1 \alpha_2} \quad (51.11)$$

або

$$H_1 = \eta \alpha_1, \quad (51.12)$$

де з урахуванням виразу (51.9)

$$\eta = \frac{n_2 S_2 N_2 I_2}{n_1 S_1 L_2 \alpha_2} \quad (51.13)$$

є шуканим коефіцієнтом пропорційності.

Послідовність виконання роботи

1 За допомогою регулятора на гальванометрі встановити нуль гальванометра (положення «зайчика» на шкалі S2).

2 Перемкнути перемикач K2 у положення II, а перемикач K1 у положення «вкл».

3 За допомогою реостата R встановити струм I_2 через соленоїд C2 в діапазоні 0,5–1 А. Записати встановлене значення струму (сила струму вимірюється амперметром А).

4 Вимкнути ключ K1. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент вимкнення (відхилення заміряти по модулю в сантиметрах з точністю до 0,1 см). Увімкнути ключ K1. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент увімкнення. Знайти середнє значення модуля відхилення α_2 при вмиканні і вимиканні K1.

5 Перемкнути перемикач K2 у положення I.

6 Переміщуючи стержень, встановити покажчик на шкалі S2 по черзі в положення $x = 0$ см, 3 см, 6 см і так далі через 3 см. Вмикаючи і вимикаючи ключ K1, знайти середнє значення модуля відхилення α_1 для кожного x . Дані занести в таблицю.

7 Використовуючи дані, що приведено на панелі установки, а також дані, які одержано в пп. 3, 4, розрахувати коефіцієнт пропорційності η .

8 З даних, що одержано в п. 6, розрахувати напруженість магнітного поля для усіх x . Результати занести в таблицю.

9 На підставі результатів п. 8 побудувати графік залежності напруженості магнітного поля H_1 від координати x .

10 Розрахувати відносну і абсолютну похибку.

Контрольні питання

1 Записати формули для напруженості магнітного поля в нескінченно довгому соленоїді, соленоїді кінцевої довжини. Пояснити позначення. В яких одиницях вимірюється напруженість магнітного поля? Де напруженість магнітного поля соленоїда є більшою: всередині чи на торці?

2 Записати зв'язок між напруженістю магнітного поля і магнітною індукцією у вакуумі, у магнітному середовищі. В яких одиницях вимірюється магнітна індукція?

3 Чим відрізняються силові лінії магнітного поля від силових ліній електростатичного поля? Нарисувати силові лінії магнітного поля соленоїда.

4 Що таке соленоїд? Для чого він використовується?

5 Чому дорівнює магнітний момент соленоїда? Написати зв'язок між магнітним моментом контура зі струмом і механічним моментом, що діє на контур з боку зовнішнього магнітного поля.

6 У чому полягає явище електромагнітної індукції? Записати закон Фарадея для ЕРС електромагнітної індукції. Пояснити позначення.

7 Що називається потоком вектора магнітної індукції через контур? В яких одиницях вимірюється потік вектора магнітної

індукції? Нехай магнітне поле є однорідним. Чому дорівнює магнітний потік через плоский контур, навій з N витками?

8 Чому змінюється магнітний потік через вимірювальний навій у даній роботі?

Звіт про виконану роботу

1 Робоча формула для визначення коефіцієнта пропорційності

$$\eta = \frac{n_2 S_2 N_2 I_2}{n_1 S_1 L_2 \alpha_2}$$

2 Дані, що приведені на панелі установки

Число витків соленоїда С2 $N_2 =$

Довжина соленоїда С2 $L_2 =$ м

Число витків вимірювального навою 1 $n_1 =$

Число витків вимірювального навою 2 $n_2 =$

Площа поперечного перерізу вимірювального навою 1

$S_1 =$ м²

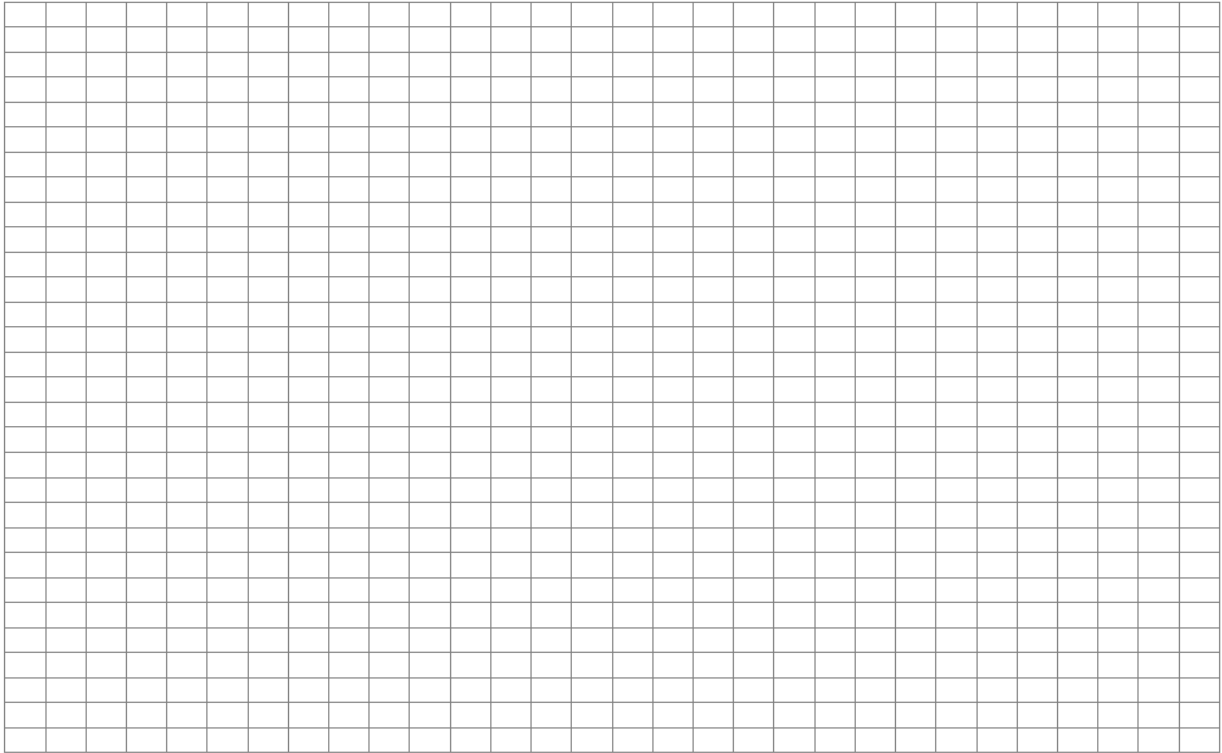
Площа поперечного перерізу вимірювального навою 2

$S_2 =$ м²

3 Результаті калібрувального вимірювання

Сила струму $I_2 =$ А

Відхилення «зайчика» гальванометра $\alpha_2 =$ см



7 Визначення відносної і абсолютної похибки

Відносна похибка величини (51.12) з урахування (51.13), розраховується за формулою

$$\frac{\Delta H}{H} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_2}{\alpha_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_2}{I_2}\right)^2}.$$

Абсолютні похибки $\Delta\alpha_1$ і $\Delta\alpha_2$ складають 0,1 см.

Абсолютна похибка ΔI_2 визначається класом точності амперметра n_I і діапазоном вимірювання I_{\max} .

$$n_I =$$

$$I_{\max} =$$

$$\Delta I_2 = \frac{n_I I_{\max}}{100}$$

Відносна (в відсотках) і абсолютна похибка в центрі соленоїда ($x = 15$ см) складають

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_2}{\alpha_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_2}{I_2}\right)^2} \cdot 100\%$$

$$\Delta H = \frac{\varepsilon}{100\%} H$$

Відносна (в відсотках) і абсолютна похибка на торці соленоїда ($x = 0$ см) складають

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_2}{\alpha_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_2}{I_2}\right)^2} \cdot 100\%$$

$$\Delta H = \frac{\varepsilon}{100\%} H$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 54

Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона

Мета роботи: вивчення закономірностей руху заряджених частинок у магнітному полі і визначення питомого заряду електрона.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для визначення питомого заряду електрона методом магнетрона.

Теоретичні відомості

Питомим зарядом частинки називається відношення електричного заряду частинки до її маси. Одиницею вимірювання питомого заряду в системі СІ є Кл/кг.

Якщо заряджена частинка рухається в однорідному магнітному полі перпендикулярно напрямку поля, то її траєкторія являє собою коло. На заряджену частинку в магнітному полі діє сила Лоренца, що дорівнює

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (54.1)$$

де q – величина електричного заряду частинки;

\vec{v} – її швидкість;

\vec{B} – магнітна індукція.

Сила Лоренца (точніше, магнітна складова сили Лоренца) є доцентровою силою. Радіус кола можна знайти, якщо прирівняти добуток маси частинки на доцентрове прискорення силі Лоренца

$$ma = m \frac{v^2}{R} = qvB. \quad (54.2)$$

У формулі (54.2) взято до уваги, що $\vec{v} \perp \vec{B}$. Тож радіус кола R дорівнює

$$R = \frac{mv}{Bq}. \quad (54.3)$$

Вимірюючи R , можна знайти питомий заряд q/m .

Магнетрон є пристроєм, який застосовується для генерації електромагнітних хвиль надвисокої частоти. Зокрема, магнетрон є основним елементом побутових НВЧ-печей, які використовують енергію електромагнітних хвиль для приготування їжі. У магнетроні електромагнітні хвилі випромінюються електронами, які рухаються у схрещених електричному і магнітному полях. Електрони в магнетроні рухаються траєкторіями, близькими до колових. Радіуси кривизни траєкторій електронів (формула (54.3)) обернено пропорційні питомому заряду електрона.

Метод магнетрона полягає в дослідженні залежності електричного струму в двохелектродній лампі з циліндричним анодом та розташованим на його осі катодом від величини зовнішнього магнітного поля. У такій лампі, яка поміщена всередину соленоїда, вісь симетрії якого співпадає з катодом, електрони рухаються таким же чином, як і в магнетроні. За відсутності магнітного поля електрони, що вилітають з катода, під дією електричного поля рухаються по радіусу (рисунок 54.1, траєкторія а). Вмикання магнітного поля призводить до викривлення траєкторій під дією сили Лоренца (траєкторія б).

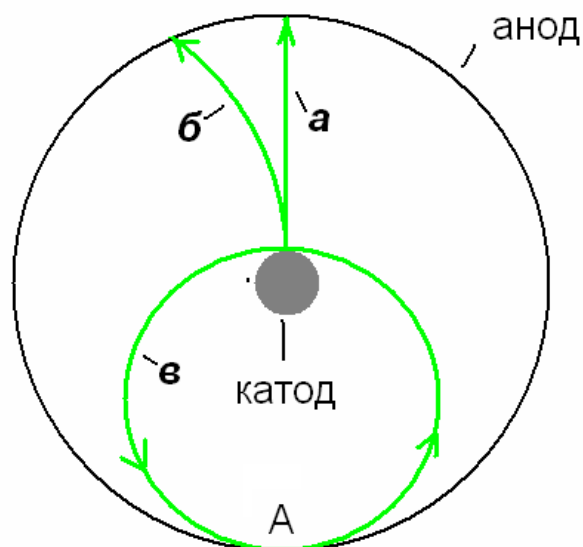


Рисунок 54.1 – Схема руху електронів у двохелектродній лампі

Чим більша магнітна індукція, тим менший радіус кривизни траєкторії. При певному значенні магнітної індукції, яка

називається критичною $B_{кр}$, траєкторії стають замкненими (траєкторія ϵ) і електрони перестають попадати на анод, внаслідок чого анодний струм різко зменшується. Подальше збільшення поля призводить до ще більшого зменшення радіуса траєкторії і анодний струм зникає.

Робочі формули

Рух електрона будемо описувати у циліндричних координатах r, φ (r – відстань електрона від катода, φ – кут, на який обертається радіус-вектор електрона (начало координат співпадає з катодом)). Розглянемо траєкторію ϵ . Швидкість електрона можна розкласти на радіальну (паралельну радіусу) і тангенціальну (перпендикулярну радіусу) компоненти $\vec{v} = \vec{v}_r + \vec{v}_\tau$, де $v_r = dr/dt$ і $v_\tau = rd\varphi/dt = r\omega$ (ω є кутовою швидкістю). У точці А максимальної відстані r_{max} електрона від катода його радіальна швидкість дорівнює нулю. Тож у точці А $v = r_{max}\omega$. Оскільки магнітна складова сили Лоренца не виконує роботи, кінетична енергія електрона дорівнює роботі електростатичного поля. У точці А

$$eU = \frac{mv^2}{2} = \frac{mr_{max}^2\omega^2}{2}, \quad (54.4)$$

де U – електростатичний потенціал у точці А.

Для визначення кутової швидкості ω запишемо основне рівняння динаміки обертального руху:

$$\frac{d}{dt}(J\omega) = M, \quad (54.5)$$

де M – момент сили, що діє на електрон (відносно осі, що співпадає з катодом);

J – момент інерції електрона, $J = mr^2$.

Сила, що діє на електрон, дорівнює

$$\vec{F} = -e\vec{E} - e\vec{v} \times \vec{B}.$$

У даному випадку момент електростатичної компоненти сили дорівнює нулю (плече сили дорівнює нулю). У момент дає внесок тільки тангенціальна (перпендикулярна радіусу) компонента магнітної складової сили Лоренца. Ця компонента дорівнює $F_{L,\perp} = ev_r B$. Плечем цієї компоненти сили є r . Таким чином, момент сили дорівнює

$$M = ev_r Br = eBr \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{eBr^2}{2} \right). \quad (54.6)$$

З формул (54.5) і (54.6) випливає, що

$$\frac{d}{dt} (mr^2 \omega) = \frac{d}{dt} \left(\frac{eBr^2}{2} \right) \quad (54.7)$$

і

$$mr^2 \omega = \frac{eBr^2}{2} + const. \quad (54.8)$$

Константа $const$ підлягає визначенню. Оскільки рівняння (54.8) виконується в усіх точках траєкторії, у тому числі в точці $r=0$, то $const=0$. Підставляючи в рівняння (54.8) $const=0$ і скорочуючи r^2 , маємо

$$\omega = \frac{eB}{2m}. \quad (54.9)$$

Підставляючи вираз (54.9) у вираз (54.4), знаходимо

$$U = \frac{e B^2 r_{\max}^2}{8m}. \quad (54.10)$$

Траєкторія дотикається анода, коли $r_{\max} = R_a$ (R_a – радіус анода). При цьому U дорівнює напрузі між катодом і анодом. З

формули (54.10) впливає формула для визначення питомого заряду:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{кр}^2 R_a^2} \cdot \quad (54.11)$$

Критичну магнітну індукцію будемо розраховувати за допомогою формули для нескінченно довгого соленоїда:

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 I_{кр} \cdot N}{l}, \quad (54.12)$$

де N – число витків соленоїда;

l – його довжина;

$I_{кр}$ – значення сили струму в соленоїді в точці перегину кривої залежності анодного струму I_a від струму в соленоїді I_c ;

μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Опис установки

Установка зображена на рисунку 54.2. Обмотка соленоїда С живиться від джерела постійного струму напругою 50 В. Струм у соленоїді вимірюється амперметром А1, силу струму змінюють за допомогою реостата R зі змінним опором. Анодна напруга подається від універсального джерела живлення. Величина напруги контролюється вольтметром В за допомогою потенціометра П. Двохелектродна лампа розташована всередині соленоїда С. Анодний струм вимірюється амперметром А2.

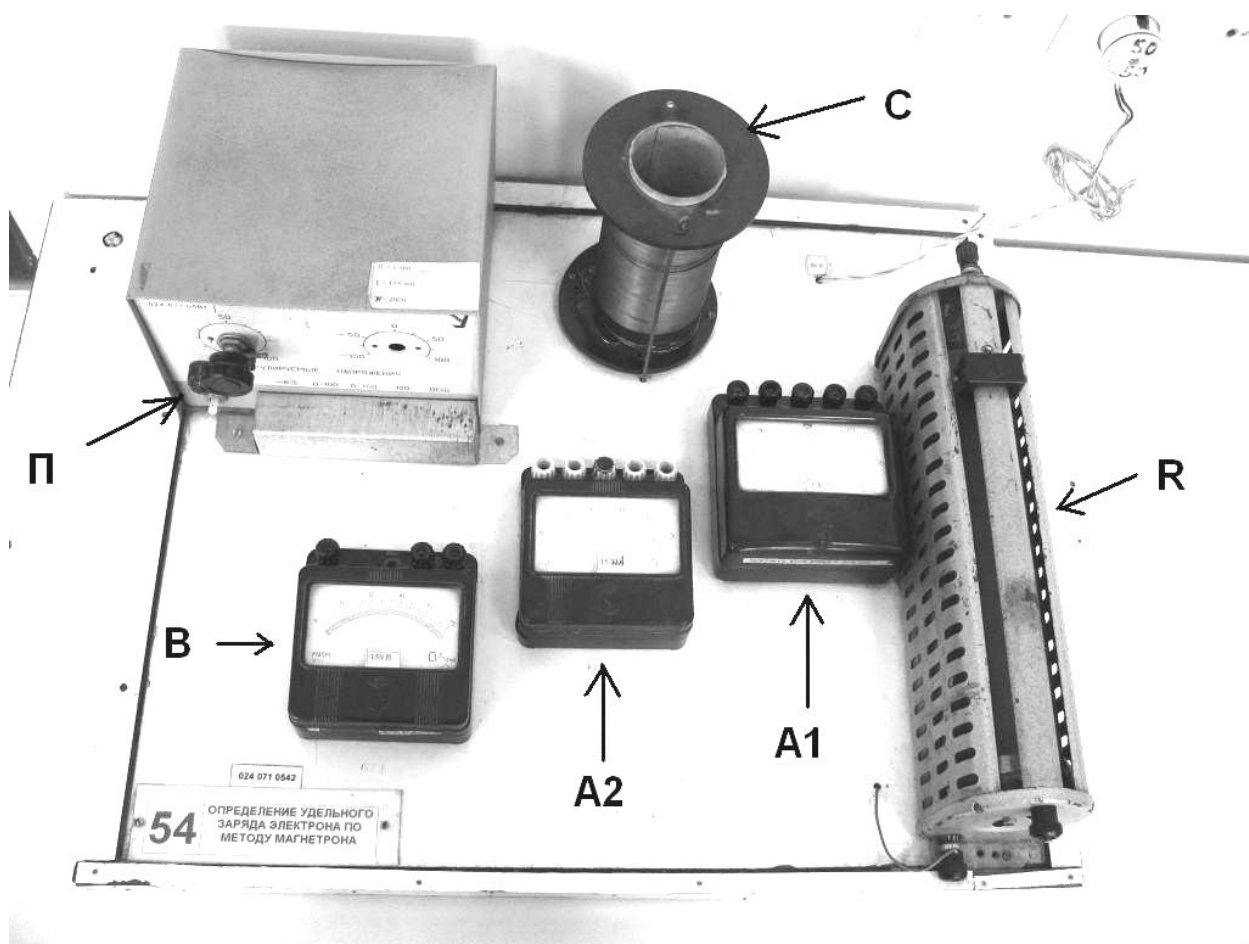


Рисунок 54.2 – Лабораторна установка

Послідовність виконання роботи

1 Встановити за допомогою потенціометра П напругу між анодом і катодом $U=90$ В.

2 Виміряти значення анодного струму I_a для таких значень струму соленоїда: $I_c = 0$ А; 0,2 А; 0,4 А; 0,6 А; 0,65 А; 0,7 А; 0,75 А; 0,8 А; 1,0 А; 1,2 А; 1,4 А. У процесі роботи підтримувати постійну анодну напругу. Значення струму соленоїда та відповідне йому значенні I_a анодного струму записати у вигляді таблиці.

3 На підставі цих даних побудувати графік залежності анодного струму I_a від струму в соленоїді I_c . Визначити з графіка значення струму в соленоїді $I_{кр}$, що відповідає точці перегину кривої $I_a(I_c)$.

- 4 За формулою (54.12) розрахувати величину критичної напруженості $B_{кр}$.
- 5 За формулою (54.11) визначити питомий заряд електрона e/m .
- 6 Розрахувати відносну і абсолютну похибки.

Контрольні питання

- 1 Що називається питомим зарядом електрона? В яких одиницях за системою СІ вимірюється питомий заряд?
- 2 Що таке магнітна складова сила Лоренца? Записати формулу для магнітної складової сили Лоренца в скалярній і векторній формах.
- 3 Як направлена магнітна складова сили Лоренца відносно напрямку магнітної індукції, швидкості зарядженої частинки?
- 4 Швидкість зарядженої частинки перпендикулярна магнітному полі. Якою траєкторією рухається частинка? Швидкість зарядженої частинки направлена під гострим чи тупим кутом до магнітного поля. Якою траєкторією рухається частинка?
- 5 Записати формулу для радіуса кола, по якому рухається заряджена частинка в магнітному полі. Як зміниться радіус кола, по якому рухається заряджена частинка в магнітному полі, якщо збільшиться величина магнітної індукції, збільшиться маса частинки, збільшиться швидкість частинки?
- 6 Знайти період обертання зарядженої частинки по колу в магнітному полі.
- 7 Що таке магнетрон? Для чого він використовується? Яку роль відіграє в роботі магнетрона сила Лоренца?
- 8 Що таке мас-спектрометр? Для чого він використовується? Яку роль відіграє в роботі мас-спектрометра сила Лоренца?
- 9 Що таке циклотрон? Для чого він використовується? Яку роль відіграє в роботі циклотрона сила Лоренца?

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули для визначення критичного магнітного поля і питомого заряду

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 I_{кр} \cdot N}{l}$$
$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{кр}^2 R_a^2}$$

2 Дані, що приведені на панелі установки
Число витків соленоїда $N =$

Довжина соленоїда $l =$ м

Радіус анода $R_a =$ м

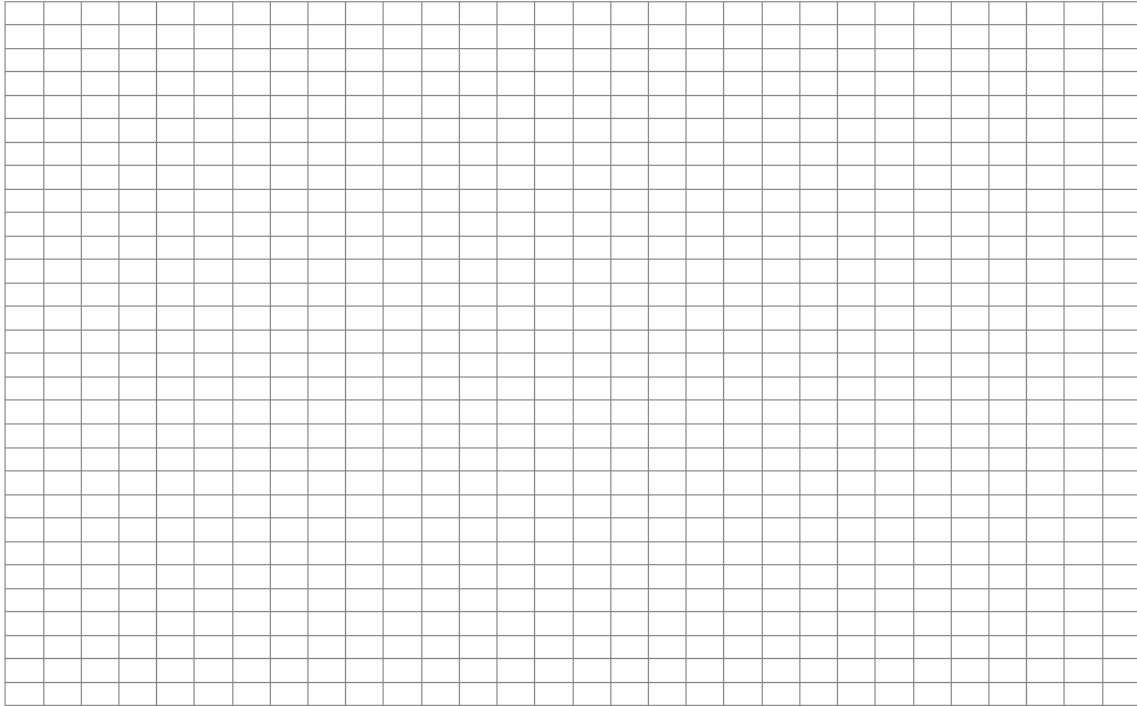
3 Значення напруги між катодом і анодом, що підтримується сталим під час вимірювань

$U =$ В

4 Результати експерименту

I_c, A	I_a, A
0	
0,2	
0,4	
0,6	
0,65	
0,7	
0,75	
0,8	
1,0	
1,2	
1,4	

5 Графік залежності $I_a(I_c)$



Значення струму I_c в точці перегину кривої

$$I_{кр} = \quad \text{А}$$

6 Розрахунок критичної магнітної індукції і питомого заряду

$$B_{кр} = \frac{\mu_0 I_{кр} \cdot N}{l}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{кр}^2 R_a^2}$$

7 Визначення відносної і абсолютної похибки

Згідно з формулами (54.11) і (54.12) похибка розраховується за формулою

$$\frac{\Delta(e/m)}{e/m} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta I_{кр}}{I_{кр}}\right)^2}.$$

ΔU і $\Delta I_{кр}$ визначаються класом точності вимірювальних приладів n_u , n_I і діапазонами вимірювання U_{\max} , I_{\max} .

$$n_u = \quad U_{\max} =$$

$$n_I = \quad I_{\max} =$$

$$\Delta U = \frac{n_u U_{\max}}{100}$$

$$\Delta I_{кр} = \frac{n_I I_{\max}}{100}$$

Відносна похибка

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta I_{кр}}{I_{кр}}\right)^2} \cdot 100\%$$

Абсолютна похибка

$$\Delta(e/m) = \frac{\varepsilon}{100\%} \frac{e}{m}.$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 55

Дослідження магнітної індукції і магнітної проникності феромагнетика

Мета роботи: вивчення кривої намагніченості феромагнетика і залежності магнітної проникності феромагнетика від напруженості магнітного поля.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для вимірювання магнітної індукції у феромагнетик у залежності від напруженості магнітного поля.

Теоретичні відомості

За своїми магнітними властивостями речовини поділяються на діамагнетики, парамагнетики і феромагнетики. Феромагнетики характеризуються великим значенням магнітної проникності (відношенням магнітної індукції в речовині до індукції у вакуумі при тому самому значенні напруженості магнітного поля). Магнітна проникність μ феромагнетика не є сталою, а залежить від напруженості магнітного поля. Відповідно магнітна індукція $B = \mu\mu_0 H$ нелінійно залежить від напруженості магнітного поля.

Нелінійність зв'язана з особливостями процесу намагнічування феромагнетика. Феромагнетик у ненамагніченому стані розбивається на домени – області, в яких речовина намагнічена до насичення. При цьому магнітні моменти різних доменів орієнтовані рівноправно в усіх напрямках і сумарна намагніченість дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле призводить, по-перше, до зміщення границь доменів і зростання розмірів тих доменів, вектори намагніченості яких складають з напрямком зовнішнього магнітного поля гострий кут, і, по-друге, до повороту магнітних моментів доменів у напрямку зовнішнього магнітного поля. Після того як всі домени орієнтуються по полю, подальше зростання намагніченості зупиняється (досягається насичення).

У даній роботі досліджується магнітна індукція і магнітна проникність заліза. Використовується тороїд (навіть у формі тора),

всередину якого поміщено залізний сердечник. Магнітні силові лінії в торі мають форму замкнених кіл, які розташовано всередині тороїда. Зовні тороїда магнітне поле дорівнює нулю. Згідно з теоремою про циркуляцію напруженості магнітного поля (циркуляція напруженості магнітного поля по контуру дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які пронизують контур) напруженість магнітного поля в тороїді дорівнює

$$H_2 = \frac{N_2 I_2}{2\pi R}, \quad (55.1)$$

де N_2 – число витків тороїда;

I_2 – сила струму в тороїді;

R – відстань від головної осі тороїда до точки спостереження.

У роботі для калібрування гальванометра використовується довгий соленоїд, який можна розглядати як нескінченно довгий. Згідно з теоремою про циркуляцію напруженості магнітного поля напруженість магнітного поля в довгому соленоїді дорівнює

$$H_1 = \frac{N_1 I_1}{L_1}, \quad (55.2)$$

де N_1 – число витків у соленоїді;

I_1 – сила струму в соленоїді;

L_1 – довжина соленоїда.

У даній роботі вимірювання магнітної індукції здійснюється на основі явища електромагнітної індукції. Явище електромагнітної індукції полягає в виникненні електричного струму в замкненому провіднику при зміні потоку магнітної індукції через контур, що утворює провідник. Такий струм називається індукційним. Згідно з законом Фарадея електрорушійна сила, яка спричиняє індукційний струм (ЕРС електромагнітної індукції), дорівнює взятій з протилежним знаком швидкості зміни потоку вектора магнітної індукції через контур

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (55.3)$$

Потік вектора магнітної індукції (магнітний потік) через плоский контур в однорідному магнітному полі дорівнює

$$\Phi = BS \cos \phi, \quad (55.4)$$

де B – величина магнітної індукції;

S – площа контура;

ϕ – кут між вектором магнітної індукції і вектором нормалі до контура. Магнітний потік вимірюється у веберах (Вб).

Потік вектора магнітної індукції через вторинну обмотку на тороїді дорівнює

$$\Phi_2 = BS_2 n_2, \quad (55.5)$$

де S_2 – площа поперечного перерізу тороїда;

n_2 – число витків вторинної обмотки тороїда.

На довгому соленоїді також є вторинна обмотка. Потік вектора магнітної індукції через цю обмотку дорівнює

$$\Phi_1 = \mu_0 H_1 S_1 n_1, \quad (55.6)$$

де S_1 – площа поперечного перерізу соленоїда;

n_1 – число витків вторинної обмотки соленоїда;

μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Опис установки

Установка зображена на рисунку 55.1. Вона містить тороїд Т, довгий соленоїд С, гальванометр G (зі шкалою S), амперметри А1 і А2, реостат R. Електричний струм подається на первинну обмотку тороїда чи соленоїда. Сила струму вимірюється міліамперметром А1 (у діапазоні до 100 мА) чи амперметром А2 (у діапазоні більше 100 мА). Реостат R дозволяє змінювати силу

струму. Перемикач $K1$ дозволяє перейти з режиму, коли струм подається на соленоїд, до режиму, коли струм подається на тороїд. Перемикач $K2$ вмикає і вимикає електричний струм через первинну обмотку соленоїда (тороїда) в залежності від положення перемикача $K1$. Перемикач $K3$ призначений для перемикання між міліамперметром і амперметром. Магнітна індукція в тороїді (соленоїді) вимірюється за допомогою гальванометра G зі шкалою S .

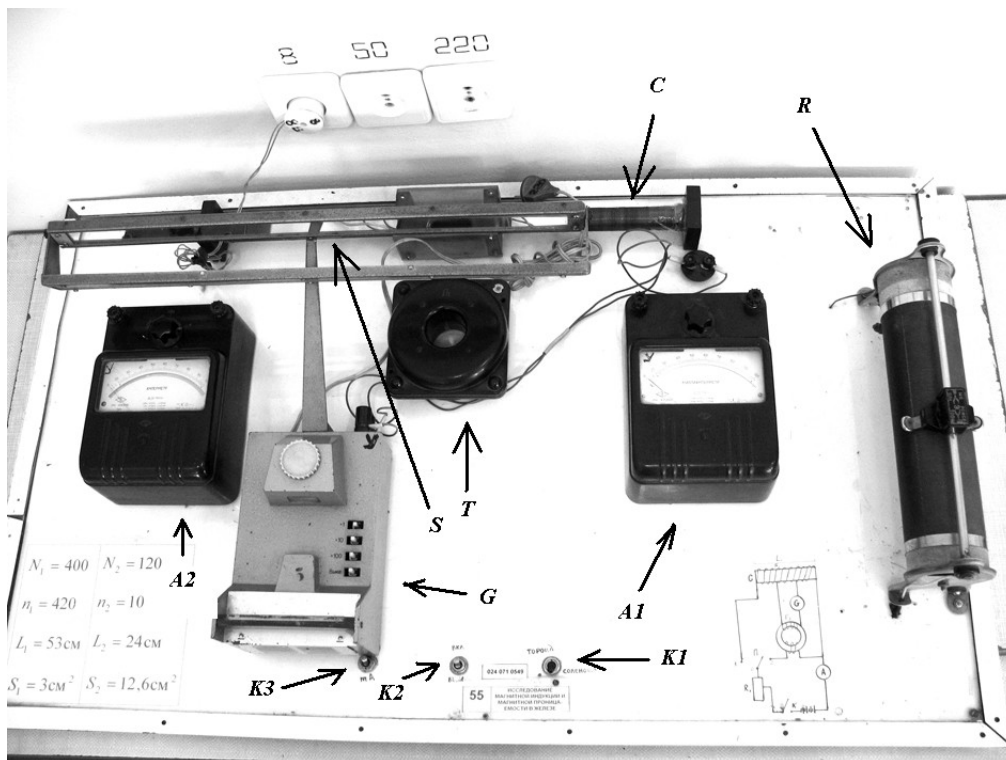


Рисунок 55.1 – Лабораторна установка

Робочі формули

Лабораторна установка зібрана таким чином, що відхилення «зайчика» гальванометра β прямо пропорційне магнітній індукції B в тороїді. Для вимірювання магнітної індукції в абсолютних одиницях потрібно знайти коефіцієнт пропорційності.

Гальванометр з'єднаний з вторинними обмотками тороїда і соленоїда в послідовний електричний ланцюг. Згідно з законом Ома струм через цій ланцюг дорівнює

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (55.7)$$

де R – повний опір кола.

Враховуючи зв'язок між струмом і зарядом $I = dq/dt$, знаходимо, що величина заряду, яка протікає через гальванометр, дорівнює (за модулем)

$$q = \frac{\Phi}{R}, \quad (55.8)$$

де Φ – магнітний потік через вторинну обмотку тороїда (соленоїда) при досягненні сили струму стаціонарного значення. Гальванометр працює таким чином, що відхилення «зайчика» гальванометра прямо пропорційне заряду q .

Для калібрування гальванометра (знаходження коефіцієнта пропорційності між B і β треба зробити одне вимірювання при пропусканні струму через довгий соленоїд. У цьому випадку відхилення «зайчика» прямо пропорційно потоку вектора магнітної індукції через вторинну обмотку довгого соленоїда:

$$\alpha \propto \Phi_1 = n_1 S_1 \mu_0 H_1,$$

де n_1 – кількість витків у вторинній обмотці соленоїда;

S_1 – площа поперечного перерізу соленоїда;

H_1 – напруженість магнітного поля всередині довгого соленоїда (55.2) (у цій формулі I_1 – сила струму в первинній обмотці соленоїда).

Якщо електричний струм подано на тороїд, то відхилення «зайчика»

$$\beta \propto \Phi_2 = n_2 S_2 B,$$

де n_2 – кількість витків вторинної обмотки тороїда;

S_2 – площа поперечного перерізу тороїду.

Складаємо пропорцію

$$\begin{aligned} \alpha &= n_1 S_1 \mu_0 H_1 \\ \beta &= n_2 S_2 B \end{aligned} \quad (55.9)$$

З пропорції випливає, що

$$B = \frac{n_1 S_1 \mu_0 H_1 \beta}{n_2 S_2 \alpha} \quad (55.10)$$

або з урахування (55.2),

$$B = \eta \beta, \quad (55.11)$$

де

$$\eta = \frac{n_1 S_1 \mu_0 N_1 I_1}{n_2 S_2 L_1 \alpha} \quad (55.12)$$

є шуканим коефіцієнтом пропорційності.

Якщо в тороїді магнітний сердечник був би відсутнім, то магнітна індукція всередині тороїда дорівнювала

$$B_0 = \mu_0 H_2 = \frac{\mu_0 N_2 I_2}{L_2}, \quad (55.13)$$

де L_2 – довжина сердечника тороїда.

Формулу (55.13) запишемо у вигляді

$$B_0 = k I_2, \quad (55.14)$$

де

$$k = \frac{\mu_0 N_2}{L_2} \quad (55.15)$$

є коефіцієнтом пропорційності між струмом і магнітною індукцією у вакуумі. Магнітна проникність матеріалу сердечника тороїда визначається за формулою

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (55.16)$$

Послідовність виконання роботи

1 За допомогою регулятора на гальванометрі встановити нуль гальванометра (положення «зайчика» на шкалі S).

2 Перемкнути перемикач К1 у положення «соленоїд», а перемикач К2 у положення «вкл».

3 За допомогою реостата R встановити струм I_1 через соленоїд С в діапазоні 0,3–0,5 А. Записати встановлене значення струму (сила струму вимірюється амперметром А2, ключ К3 в положенні «А»).

4 Вимкнути ключ К2. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент вимкнення (відхилення заміряти за модулем у сантиметрах з точністю до 0,1 см). Увімкнути ключ К2. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент увімкнення. Знайти середнє значення модуля відхилення α при вмиканні і вимиканні К2.

5 Перемкнути перемикач К1 у положення «тороїд», а перемикач К2 у положення «вкл».

6 За допомогою реостата встановити сили струму 20 мА (сила струму вимірюється міліамперметром А1, ключ К3 в положенні «мА»).

7 Вимкнути ключ К2. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент вимкнення (відхилення заміряти за модулем у сантиметрах з точністю до 0,1 см). Увімкнути ключ К2. Заміряти величину відхилення «зайчика» гальванометра в момент увімкнення. Знайти середнє значення модуля відхилення β при вмиканні і вимиканні К2.

8 Повторити пп. 5-7 для значень струму 30 мА, 40 мА, 50 мА, 60 мА, 70 мА, 80 мА, 90 мА.

9 Перемкнути ключ К3 в положення «А». Далі сила струму буде вимірюватись амперметром А2.

10 Повторити пп. 5-7 для значень струму 200 мА, 300 мА, 400 мА.

11 Одержані значення β занести в таблицю.

12 Використовуючи дані, що приведено на панелі установки, а також дані, одержані в пп. 3, 4, розрахувати коефіцієнт пропорційності η і коефіцієнт пропорційності k .

13 Для кожного значення I_2 розрахувати величини B_0 , B і μ . Результати занести в таблицю.

14 Побудувати графік залежності магнітної індукції у феромагнетика B від напруженості магнітного поля у вакуумі B_0 .

15 Побудувати графік залежності магнітної проникності феромагнетика μ від напруженості магнітного поля у вакуумі B_0 .

16 Розрахувати відносну і абсолютну похибку.

Контрольні питання

1 Що називається магнітною проникністю речовини? Записати зв'язок між магнітною індукцією і напруженістю магнітного поля в речовині.

2 Які характерні властивості магнітної проникності феромагнетика?

3 Які речовини називаються феромагнетиками? Що називається температурою Кюрі?

4 Що таке магнітні домени? Як відбувається процес намагнічування феромагнетика?

5 Нарисувати основну криву намагніченості феромагнетика. Показати на цій кривій намагніченість насичення. Пояснити, чому досягається насичення.

6 Написати формули для розрахунку напруженості магнітного поля і магнітної індукції тороїда і довгого соленоїда. В яких одиницях вимірюється напруженість магнітного поля і магнітна індукція?

7 Що називається потоком вектора магнітної індукції? В яких одиницях вимірюється потік вектора магнітної індукції?

8 У чому полягає явище електромагнітної індукції? Записати закон Фарадея для ЕРС електромагнітної індукції.

Пояснити, де в даній роботі використовується явище електромагнітної індукції.

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули

Магнітна індукція в феромагнетику

$$B = \eta \beta ,$$

де коефіцієнтом пропорційності є

$$\eta = \frac{n_1 S_1 \mu_0 N_1 I_1}{n_2 S_2 L_1 \alpha}$$

Магнітна індукція у вакуумі

-

$$B_0 = k I_2 ,$$

де коефіцієнтом пропорційності є

$$k = \frac{\mu_0 N_2}{L_2}$$

2 Дані, що приведені на панелі установки

Число витків первинної обмотки соленоїда $N_1 =$

Довжина соленоїда $L_1 =$ м

Число витків вторинної обмотки соленоїда $n_1 =$

Площа поперечного перерізу соленоїда $S_1 =$ м²

Число витків первинної обмотки тороїда $N_2 =$

Довжина сердечника тороїда $L_2 =$ м

Число витків вторинної обмотки тороїда $n_2 =$

Площа поперечного перерізу тороїда $S_2 =$ м²

3 Результати калібрувального вимірювання

Сила струму $I_1 =$ А

Відхилення «зайчика» гальванометра $\alpha =$ см

4 Розрахунок коефіцієнта пропорційності k

$$k = \frac{\mu_0 N_2}{L_2}$$

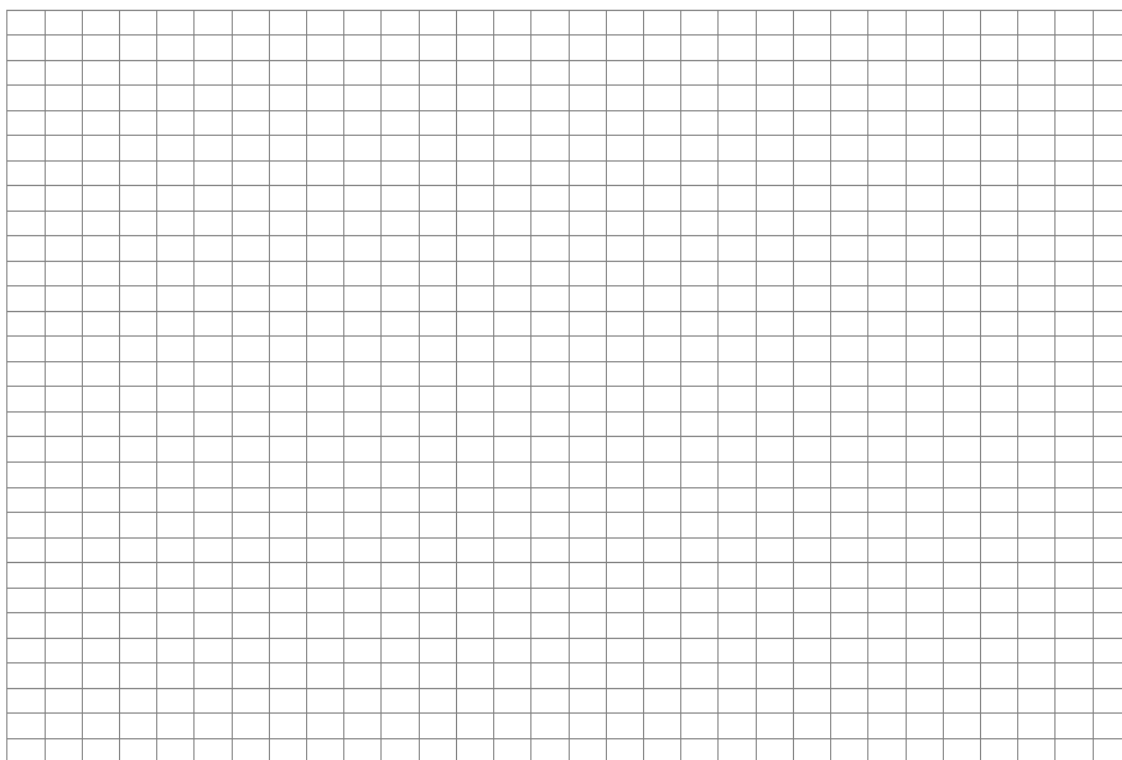
5 Розрахунок коефіцієнта пропорційності η

$$\eta = \frac{n_1 S_1 \mu_0 N_1 I_1}{n_2 S_2 L_1 \alpha}$$

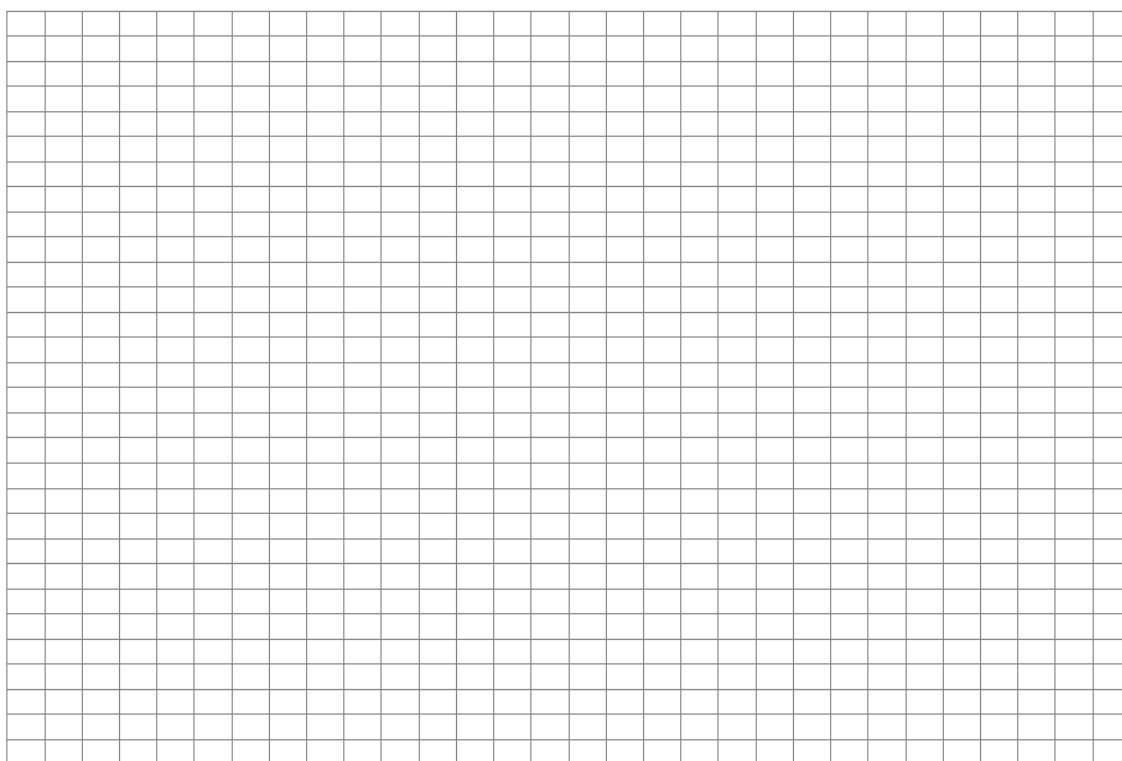
6 Результати експерименту і розрахунків B_0 , B , і μ

$I_2, 10^{-3}$ А	β , см	$B_0 = kI_2$	$B = \eta\beta$	$\mu = B/B_0$
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				
200				
300				
400				

7 Графік залежності $B(B_0)$



8 Графік залежності $\mu(B_0)$



9 Визначення відносної і абсолютної похибки

У даній роботі потрібно розрахувати похибку магнітної індукції при максимальному струмі. Згідно з формулами (55.11), (55.12)

$$\frac{\Delta B}{B} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_1}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right)^2}$$

(беремо величину β з останнього рядка таблиці).

Абсолютні похибки $\Delta \alpha$ і $\Delta \beta$ складають 0,1 см.

Абсолютна похибка ΔI_1 визначається класом точності амперметра і діапазоном вимірювання.

$$n_I = \quad I_{\max} =$$

$$\Delta I_1 = \frac{n_I I_{\max}}{100}$$

Відносна (у відсотках) і абсолютна похибка

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_1}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right)^2} \cdot 100\%$$

$$\Delta B = \frac{\varepsilon}{100\%} B$$

(беремо величину B з останнього рядка таблиці).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 56

Визначення магнітної сприйнятливості парамагнетика

Мета роботи: визначення магнітної сприйнятливості розчину хлорного заліза у воді.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для визначення магнітної сприйнятливості рідини.

Теоретичні відомості

У зовнішньому магнітному полі будь-яка речовина намагнічується (набуває намагніченості). Вектором намагніченості називається магнітний момент одиниці об'єму речовини

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V}, \quad (56.1)$$

де $\vec{P}_m = \sum \vec{p}_a$, магнітний момент зразка, є векторною сумою магнітних моментів молекул \vec{p}_a .

У досить слабких полях намагніченість прямо пропорційна напруженості магнітного поля

$$\vec{J} = \chi \vec{H}. \quad (56.2)$$

Коефіцієнт пропорційності χ між намагніченістю і напруженістю магнітного поля називається магнітною сприйнятливістю магнетика.

Магнітні моменти молекул зумовлені мікроскопічними коловими струмами. Якщо магнітні моменти молекул орієнтовані переважно в певному напрямку (завдяки чому і виникає середній магнітний момент зразка), то на поверхні зразка з'являються некомпенсовані молекулярні струми, які створюють у зразку додаткову магнітну індукцію $\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала). Повна магнітна індукція є сумою магнітної

індукції у вакуумі і додаткової індукції, зумовленої молекулярними струмами:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}. \quad (56.3)$$

З виразу (56.3) випливає, що магнітна сприйнятливість χ і магнітна проникність μ зв'язані співвідношенням

$$\mu = 1 + \chi. \quad (56.4)$$

За своїми магнітними властивостями речовини поділяються на діамагнетики, парамагнетики і феромагнетики. Діамагнетики і парамагнетики є слабо магнітними речовинами. Для них $|\chi| \ll 1$. У парамагнетиках $\chi > 0$ і напрямок вектора намагніченості співпадає з напрямком напруженості магнітного поля (тобто вони намагнічуються по полю). У діамагнетиках $\chi < 0$ і напрямок вектора намагніченості є протилежним напрямку напруженості магнітного поля (тобто вони намагнічуються проти поля).

Магнітна сприйнятливість парамагнетика зменшується при підвищенні температури. Це зв'язано з тим, що при підвищенні температури зростають температурні коливання магнітних моментів молекул і ступінь їх упорядкованості в зовнішньому полі зменшується. При досить високих температурах магнітна сприйнятливість парамагнетика обернено пропорційна термодинамічній температурі $\chi \propto \frac{1}{T}$ (закон Кюрі).

У зовнішньому неоднорідному магнітному полі на магнетик діє сила, пропорційна градієнту напруженості магнітного поля. Ця сила втягує парамагнетик в область, де поле більше. Навпаки, діамагнетик відштовхується в область, де поле менше.

Знайдемо силу, що діє на парамагнетик в неоднорідному магнітному полі. Для спрощення розрахунків уявимо, що магнітний момент молекули зумовлений струмом, що тече по контуру, який має форму квадрата зі стороною a (рисунок 56.1). Рівнодіюча сил Ампера, які діють на сторони квадрата, дорівнює

$$f_m = F_{A2} - F_{A1} = Ia(B_2 - B_1) \approx Ia^2 \frac{dB}{dz} \approx Ia^2 \mu_0 \frac{dH}{dz} = p_a \mu_0 \frac{dH}{dz}, \quad (56.5)$$

де p_a – магнітний момент однієї молекули.

Намагніченість J є магнітним моментом одиниці об'єму, і силу, що діє на одиницю об'єму, можна знайти з виразу (56.5), замінивши p_a на J ,

$$f_H = J \mu_0 \frac{dH}{dz} = \chi \mu_0 H \frac{dH}{dz}. \quad (56.6)$$

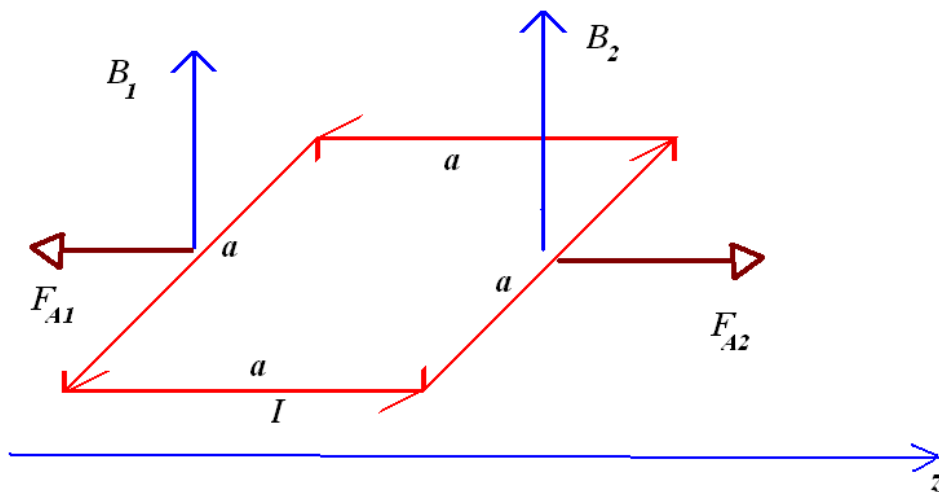


Рисунок 56.1 – Сили Ампера, що діють на молекулярний струм у напрямку градієнта магнітного поля (напрямок z)

Опис установки

Установка зображена на рисунку 56.2. Вона містить електромагніт M з полюсними наконечниками у формі зрізаних конусів. Обмотки електромагніта підключені до джерела постійного струму, величину якого можна регулювати за допомогою реостата R і амперметра A . Електромагніт вмикається і вимикається ключем K . Величина магнітної індукції визначається за допомогою калібрувального графіка G . Посередині між полюсами електромагніта знаходиться U -подібна скляна трубка з розчином хлорного заліза. Положення трубки

можна регулювати за допомогою гвинта Р. Зміна висоти рівня рідини в трубці вимірюється за допомогою шкали S.

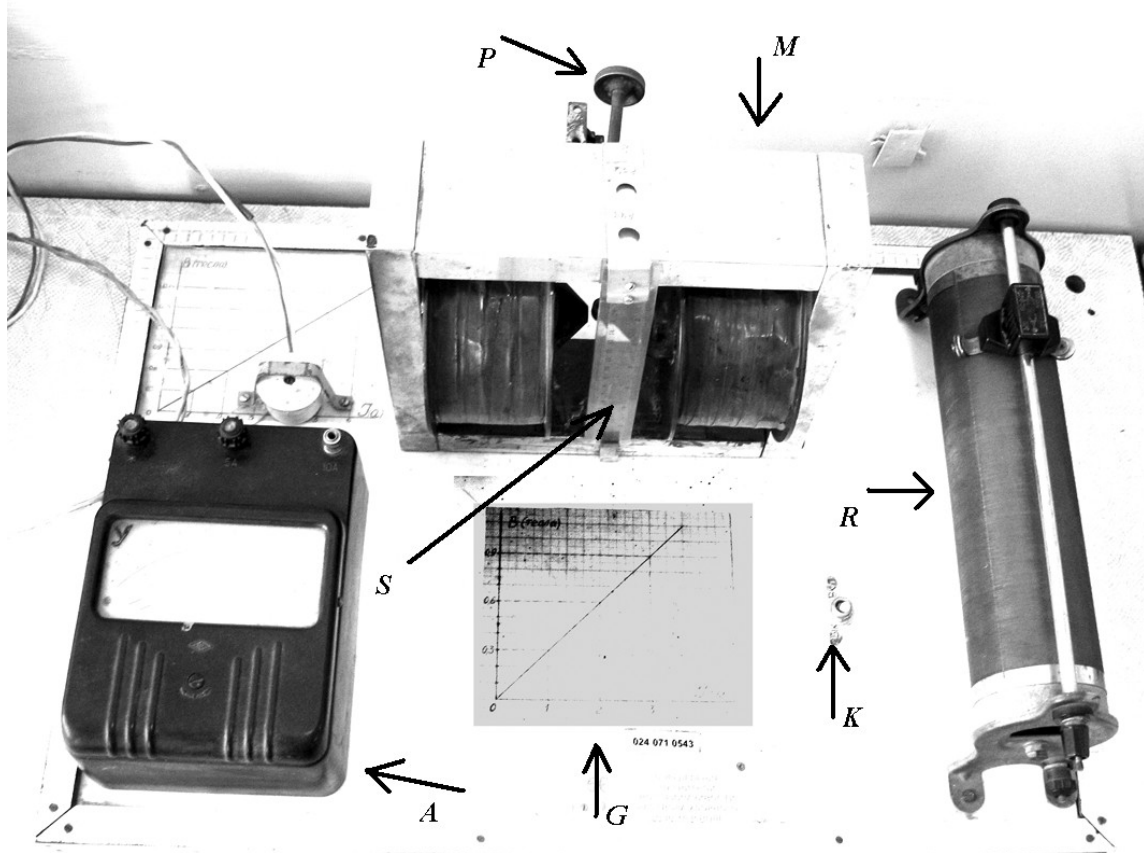


Рисунок 56.2 – Лабораторна установка

Робоча формула

Сила, що діє на рідину з боку магнітного поля, дорівнює

$$F_H = \int S f_H dz = \int S \chi \mu_0 H \frac{dH}{dz} = S \chi \mu_0 \int_0^H H dH = \frac{1}{2} S \chi \mu_0 H^2, \quad (56.7)$$

де S – площа поперечного перерізу стовпа рідини;

H – напруженість магнітного поля між полюсами електромагніту.

Ця сила викликає підйом рівня рідини. Рідина буде підніматись, доки сила (56.7) не буде урівноважена вагою піднятого стовпа рідини

$$F_g = \rho Vg = \rho Shg, \quad (56.8)$$

де g – прискорення вільного падіння;

ρ – густина рідини;

h – висота підйому рідини.

З умови $F_g = F_H$ знаходимо $\mu_0 H^2 \chi = 2\rho gh$, або з урахуванням $B \approx \mu_0 H$,

$$\chi = \frac{2\mu_0 \rho gh}{B^2}. \quad (56.9)$$

Послідовність виконання роботи

- 1 Ключем К увімкнути струм через електромагніт.
- 2 За допомогою реостата R встановити максимальний струм ($\approx 2,5$ А).
- 3 При увімкненому струмі за допомогою гвинта P встановити U-подібну трубку так, щоб рівень рідини знаходився точно на осі симетрії полюсних конусів.
- 4 Ключем К вимкнути струм. Заміряти величину h , на яку опустився рівень рідини в трубці.
- 5 Занести в таблицю встановлене значення струму і знайдену величину h .
- 6 За допомогою калібрувального графіка визначити величину магнітної індукції B , яка відповідає встановленому струму. Величину B також занести в таблицю.
- 7 Повторити експеримент (пп. 1 - 6) для двох інших значень струму: ≈ 2 А і $\approx 1,5$ А (при кожному вимірюванні заново встановлювати рівень рідини на вісь конусів).
- 8 З одержаних даних розрахувати магнітну сприйнятливість χ для кожного вимірювання. За трьома вимірюваннями знайти середнє значення χ .
- 9 Розрахувати відносну і абсолютну похибку.

Контрольні питання

- 1 Що таке сила Ампера? Чому вона дорівнює?
- 2 Чому дорівнює магнітний момент плоского контура зі струмом? В яких одиницях він вимірюється?

3 Що називається вектором намагніченості? В яких одиницях вимірюється намагніченість?

4 Що називається магнітною сприйнятливістю?

5 Записати формулу, що дає зв'язок між магнітною проникністю і магнітною сприйнятливістю. Вивести цю формулу.

6 Чим відрізняється парамагнетик від діамагнетика?

7 Як діє неоднорідне магнітне поле на парамагнетик і діамагнетик?

8 Як магнітна сприйнятливість парамагнетика залежить від температури? Поясніть якісно цю залежність.

Звіт про виконану роботу

1 Робоча формула для визначення магнітної сприйнятливості

$$\chi = \frac{2\mu_0\rho gh}{B^2}$$

2 Дані, що приведені на панелі установки

Густина рідини $\rho =$ кг/м³

3 Результати експерименту

№	I , А	B , Тл	h , м	χ
1				
2				
3				

4 Розрахунки χ

$$\chi_1 = \frac{2\mu_0\rho gh_1}{B_1^2}$$

$$\chi_2 = \frac{2\mu_0\rho gh_2}{B_2^2}$$

$$\chi_3 = \frac{2\mu_0\rho gh_3}{B_3^2}$$

Середнє значення

$$\chi_{\text{сер}} = \frac{\chi_1 + \chi_2 + \chi_3}{3}$$

5 Розрахунок відносної і абсолютної похибки

Відносна похибка величини (56.9) розраховується за формулою

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta B}{B}\right)^2} .$$

Як видно з калібрувального графіка, $B \propto I$. Відповідно

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta I}{I} .$$

Таким чином,

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta I}{I}\right)^2} .$$

Абсолютна похибка Δh складає 10^{-3} м.

Абсолютна похибка ΔI визначається класом точності амперметра і діапазоном вимірювання.

$$n_I =$$

$$I_{\max} =$$

$$\Delta I = \frac{n_I I_{\max}}{100}$$

Розрахунок похибки провести для максимального струму.

Відносна (у відсотках) і абсолютна похибка складають

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h_1}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta I}{I_1}\right)^2} \cdot 100\%$$

$$\Delta \chi = \frac{\varepsilon}{100\%} \chi_1$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 57

Вивчення петлі гістерезису феромагнетика за допомогою осцилографа

Мета роботи: вивчення законів намагнічування феромагнетика.

Прилади й матеріали: лабораторна установка для вивчення петлі магнітного гістерезису.

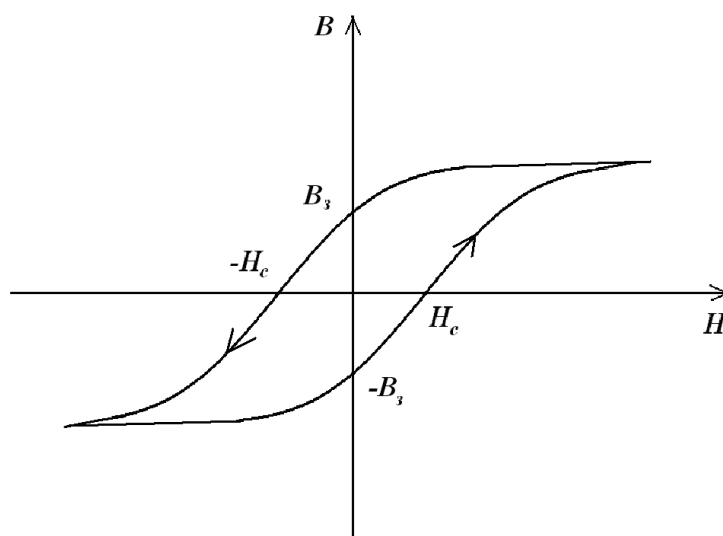
Теоретичні відомості

Феромагнетиками називаються речовини, які мають велику магнітну проникність ($\mu \gg 1$) і намагніченість яких нелінійно залежить від напруженості магнітного поля і визначається передісторією процесу намагнічування зразка. Найбільш розповсюдженим і відомим представником феромагнетиків є залізо.

Для кожного феромагнетика існує певна температура, вище якої він втрачає феромагнітні властивості і перетворюється на парамагнетик. Ця температура називається температурою Кюрі. Характерною властивістю феромагнетика є також спонтанна намагніченість – ненульова намагніченість за відсутності зовнішнього магнітного поля.

Якщо взяти ненамагнічений феромагнетик і помістити його в магнітне поле, яке зростає з часом, то, вимірюючи його намагніченість, одержимо основну криву намагнічування феромагнетика (залежність намагніченості J від напруженості магнітного поля H для первісно ненамагніченого феромагнетика). При зростанні H намагніченість спочатку зростає швидко, потім – повільніше, а наприкінці досягається магнітне насичення (зростання намагніченості зупиняється). Намагніченість насичення – це максимальне значення намагніченості, що досягається в даному феромагнетикі і лишається незмінним при подальшому зростанні напруженості поля. Якщо після намагнічування до насичення почати зменшувати зовнішнє магнітне поле, то намагніченість також почне зменшуватись, але крива намагнічування буде лежати над основною кривою намагнічування. При напруженості поля $H = 0$ намагніченість буде відмінна від нуля. Намагніченість феромагнетика, яка лишається після вимкнення зовнішнього

магнітного поля, називається залишковою намагніченістю J_3 . Зміна напрямку напруженості поля на протилежний і досягнення певного значення напруженості призведе до повного розмагнічування феромагнетика. Напруженість магнітного поля, яка потрібна для повного розмагнічування феромагнетика, називається коерцитивною силою H_c . Подальше зростання напруженості магнітного поля призведе до намагнічування феромагнетика у протилежному напрямку. Процес може бути циклічно продовжено. Замкнена крива залежності $J(H)$ при процесі циклічного перемагнічування феромагнетика називається петлею магнітного гістерезису в координатах (H, J) . Петлею магнітного гістерезису також називають залежність магнітної індукції феромагнетика B від напруженості магнітного поля H (рисунок 57.1). На цій петлі також присутні дві точки, які відповідають коерцитивній силі H_c , а замість точок залишкової намагніченості присутні точки залишкової магнітної індукції $B_3 = \mu_0 J_3$.



B_3 – залишкова магнітна індукція, H_c – коерцитивна сила
Рисунок 57.1 – Петля магнітного гістерезису в координатах (H, B)

Можна показати, що площа петлі гістерезису в координатах (H, B) дорівнює втратам енергії при перемагнічуванні феромагнетика в перерахунку на один цикл на одиницю об'єму речовини.

У залежності від вигляду петлі гістерезису відрізняють два типи феромагнетиків: жорсткі і м'які. У жорстких феромагнетиків петля гістерезису широка, а значення залишкової намагніченості і коерцитивної сили великі. У м'яких феромагнетиків петля гістерезису вузька, а значення залишкової намагніченості і коерцитивної сили малі. Жорсткі феромагнетики використовуються для виготовлення постійних магнітів, а м'які – для виготовлення сердечників трансформаторів.

Специфіка процесу намагнічування феромагнетиків пов'язана з тим, що в них існують невеликі, але макроскопічні області, що називаються доменами, лінійний розмір яких $1\text{--}10$ мкм. У середині кожного домену речовина спонтанно намагнічена до насичення. У ненамагніченому зразку магнітні моменти різних доменів орієнтовані рівноправно в усіх напрямках. При намагнічуванні переважним є напрямок вздовж зовнішнього поля. Намагнічування феромагнетика у зовнішньому магнітному полі відбувається за рахунок зміщення границь доменів і збільшення розмірів тих доменів, вектори намагніченості яких складають з напрямком зовнішнього магнітного поля гострий кут, а також за рахунок переорієнтації магнітних моментів доменів у напрямку зовнішнього магнітного поля. Після того, як всі домени будуть орієнтовані по полю, подальше зростання намагніченості зупиняється (досягається насичення).

Опис установки

Установка зображена на рисунку 57.2. Вона містить тороїд Т з феромагнітним сердечником з двома обмотками. На первинну обмотку подається змінний електричний струм, за рахунок якого феромагнетик циклічно перемагнічується. Величина струму вимірюється амперметром А і регулюється реостатом R1.

До первинної обмотки підключено також x -вхід осцилографа О. Вторинна обмотка використовується для вимірювання магнітної індукції. Вторинна обмотка з'єднана послідовно з магазином опорів R2 і конденсатором С. Паралельно конденсатору підключено y -вхід осцилографа. Петля гістерезису в координатах (H, B) відображається на екрані

осцилографа. Магазин опорів R2 дозволяє регулювати висоту зображення. Реостат R1 дозволяє регулювати максимальне значення напруженості магнітного поля в циклі перемагнічування (від якого залежить форма петлі). Ціну поділки на екрані осцилографа приведено на ручках регулювання осцилографа.

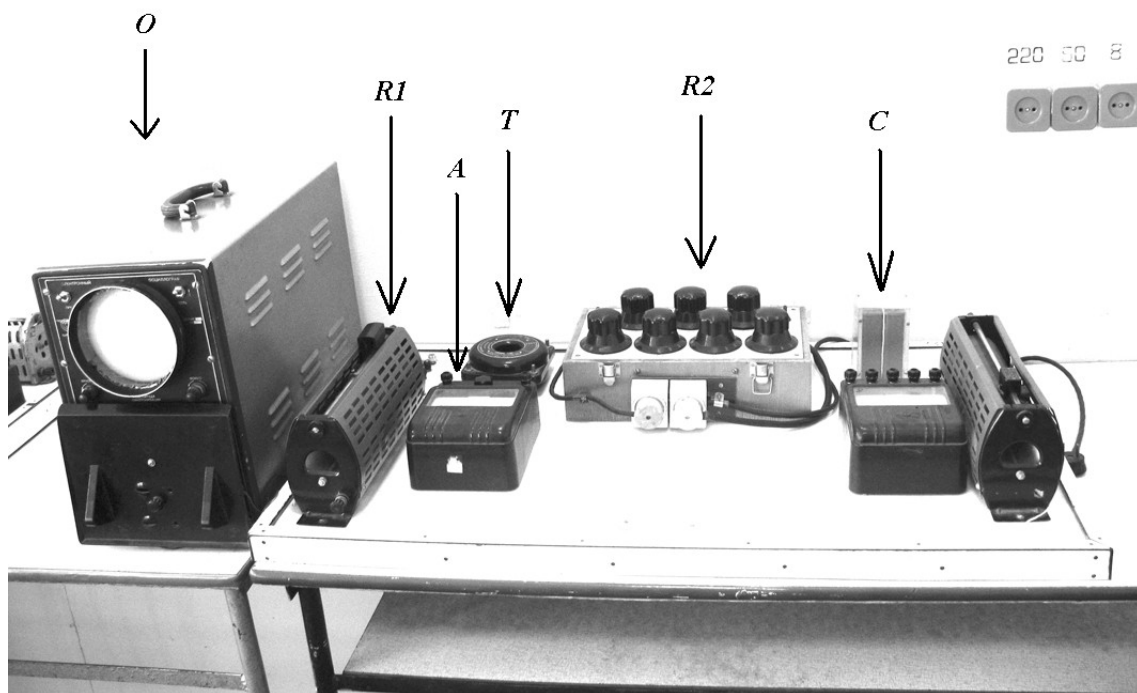


Рисунок 57.2 – Лабораторна установка

Робочі формули

Для визначення кількісних характеристик петлі гістерезису потрібно знайти масштаб, який відповідає поділці на екрані осцилографа. Принципову електричну схему установки зображено на рисунку 57.3. На x клеми осцилографа подається напруга з опору R_0 : $U_x = R_0 I_1$. Напруженість магнітного поля всередині тороїда визначається за формулою

$$H = n_1 I_1, \quad (57.1)$$

де I_1 – сила струму в первинній обмотці;

n_1 – щільність витків в обмотці.

Таким чином, $U_x \propto H$. Максимальна напруженість H_{\max} досягається при максимальному струмі $I_{\max} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{еф}}$, де $I_{\text{еф}} = I$ – ефективна сила струму (яка вимірюється амперметром). Повна ширина петлі $2H_{\max} = 2\sqrt{2} \cdot n_1 I$. Якщо повна ширина петлі складає l_x одиниць поділки, то ціна поділки по осі x

$$a_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot n_1 I}{l_x}. \quad (57.2)$$

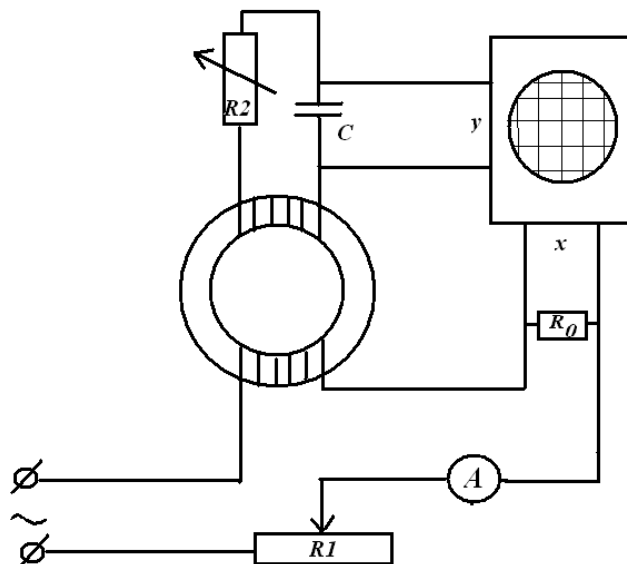


Рисунок 57.3 – Принципова електрична схема установки

Потрібно також визначити ціну поділки по осі y . Для спрощення розглянемо випадок, коли магнітна індукція на вторинній обмотці змінюється за гармонічним законом $B = B_m \cos(\omega t)$. Тоді ЕРС електромагнітної індукції дорівнює

$$\mathcal{E} = B_m S_2 N_2 \omega \sin(\omega t), \quad (57.3)$$

де S_2 – площа поперечного перерізу вторинної обмотки;

N_2 – число витків у цій обмотці.

Згідно з законами змінного струму амплітуда струму в колі вторинної обмотки (рисунок 57.3) дорівнює

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{R_2} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}, \quad (57.4)$$

де ε_m – амплітуда ЕРС, $\varepsilon_m = B_m S_2 N_2 \omega$;

R_2 – опір магістину опорів;

C – ємність конденсатора (індуктивністю обмотки нехтуємо).

Амплітуда напруги на конденсаторі дорівнює

$$U_C = R_C I_m = \frac{1}{\omega C} \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}. \quad (57.5)$$

У даній установці активний опір є значно більшим за реактивний $R_2 \gg R_C = \frac{1}{\omega C}$. Тому

$$U_C \approx \frac{\varepsilon_m}{\omega C R_2} = \frac{B_m S_2 N_2 \omega}{\omega C R_2} = \frac{B_m S_2 N_2}{C R_2}. \quad (57.6)$$

З (57.6) випливає, що магнітна індукція прямо пропорційна напрузі на конденсаторі:

$$B_m = \frac{U_C C R_2}{S_2 N_2}. \quad (57.7)$$

Повна висота петлі гістерезису $2B_m$. Ціна поділки в теслах дорівнює $a_y = 2B_m / l_y$, де l_y – висота петлі в одиницях поділки. Таким чином,

$$a_y = \frac{2B_m}{l_y} = \frac{2U_C C R_2}{l_y S_2 N_2}. \quad (57.8)$$

З іншого боку, на екрані осцилографа повна висота петлі відповідає подвійній амплітуді напруги на конденсаторі $2U_c = l_y u_y$, де u_y – ціна поділки у вольтах. З урахуванням (57.8), одержуємо остаточний вираз для ціни поділки

$$a_y = \frac{u_y CR_2}{S_2 N_2}. \quad (57.9)$$

Для визначення залишкової магнітної індукції потрібно знайти з графіка петлі гістерезису цю величину в одиницях поділки (L_{B_3}) і помножити її на ціну поділки по осі Y

$$B_3 = L_{B_3} a_y. \quad (57.10)$$

Залишкова намагніченість дорівнює

$$J_3 = \frac{B_3}{\mu_0}. \quad (57.11)$$

Для визначення коерцитивної сили потрібно знайти H_c в одиницях поділки (L_{H_c}) і помножити цю величину на ціну поділки по осі x

$$H_c = L_{H_c} a_x. \quad (57.12)$$

Магнітна проникність при максимальному H визначається за формулою

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{l_y a_y}{\mu_0 l_x a_x}. \quad (57.13)$$

Робота з перемагнічування на одиничний об'єм визначається за формулою

$$A = S_h a_x a_y, \quad (57.14)$$

де S_h – площа петлі в одиницях поділки.

Послідовність виконання роботи

1 Включити осцилограф. За допомогою реостата і магазину опорів відрегулювати зображення петлі. Петля повинна займати більшу частину екрана, але не виходити за його межі.

2 Використовуючи амперметр, знайти ефективне значення сили струму через первинну обмотку.

3 Зарисувати петлю гістерезису, додержуючись масштабу поділки на екрані (доцільно вибрати масштаб таким, що одиниці поділки на екрані відповідають декільком клітинкам на рисунку). На рисунку провести горизонтальну і вертикальну осі. Осі мають ділити петлю точно пополам. Вісь x відповідає напруженості магнітного поля, вісь y – магнітній індукції.

4 На рисунку вказати точки, які відповідають значенням залишкової магнітної індукції і коерцитивної сили (див. рисунок 57.1).

5 За формулами (57.2) і (57.9) визначити ціну поділки по осі x і y .

6 З рисунка визначити величини L_{Bz} , L_{Hc} і S_h в одиницях поділки. За формулами (57.10), (57.11), (57.12), (57.13) і (57.14) розрахувати кількісні характеристики петлі гістерезису.

Контрольні питання

1 Які речовини називаються феромагнетиками? Що називається температурою Кюрі?

2 Поясніть, чому в феромагнетику в достатньо сильних полях досягається намагніченість насичення?

3 Нарисуйте петлю гістерезису. Поясніть рисунок.

4 Що називається залишковою намагніченістю? Що називається коерцитивною силою? В яких одиницях вимірюються ці величини? Як з рисунка петлі гістерезису знайти ці величини?

5 У чому полягає різниця між жорсткими і м'якими феромагнетиками? Де використовуються жорсткі і м'які феромагнетики?

6 Що таке магнітні домени? Як відбувається процес намагнічування феромагнетика?

7 Що таке тороїд? Чому дорівнює напруженість магнітного поля в тороїді? Як направлені магнітні силові лінії в тороїді?

8 У чому полягає явище електромагнітної індукції? За якою формулою розраховується ЕРС електромагнітної індукції в обмотці, яка знаходиться в магнітному полі, що змінюється за гармонічним законом?

9 За якою формулою можна розрахувати втрати енергії з перемагнічування феромагнетика в періодичному зовнішньому магнітному полі?

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули

Ціна поділки

$$a_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot n_1 I}{l_x} \quad (\text{А/м}), \quad a_y = \frac{u_y C R_2}{S_2 N_2} \quad (\text{Тл})$$

2 Дані, що приведені на панелі установки і осцилографі

Густина витків первинної обмотки тороїда $n_1 =$ м⁻¹

Число витків вторинної обмотки тороїда $N_2 =$

Площа поперечного перерізу вторинної обмотки $S_2 =$ м²

Ємність конденсатора $C =$ Ф

Ціна поділки у вольтах $u_y =$ В

3 Результати вимірювання

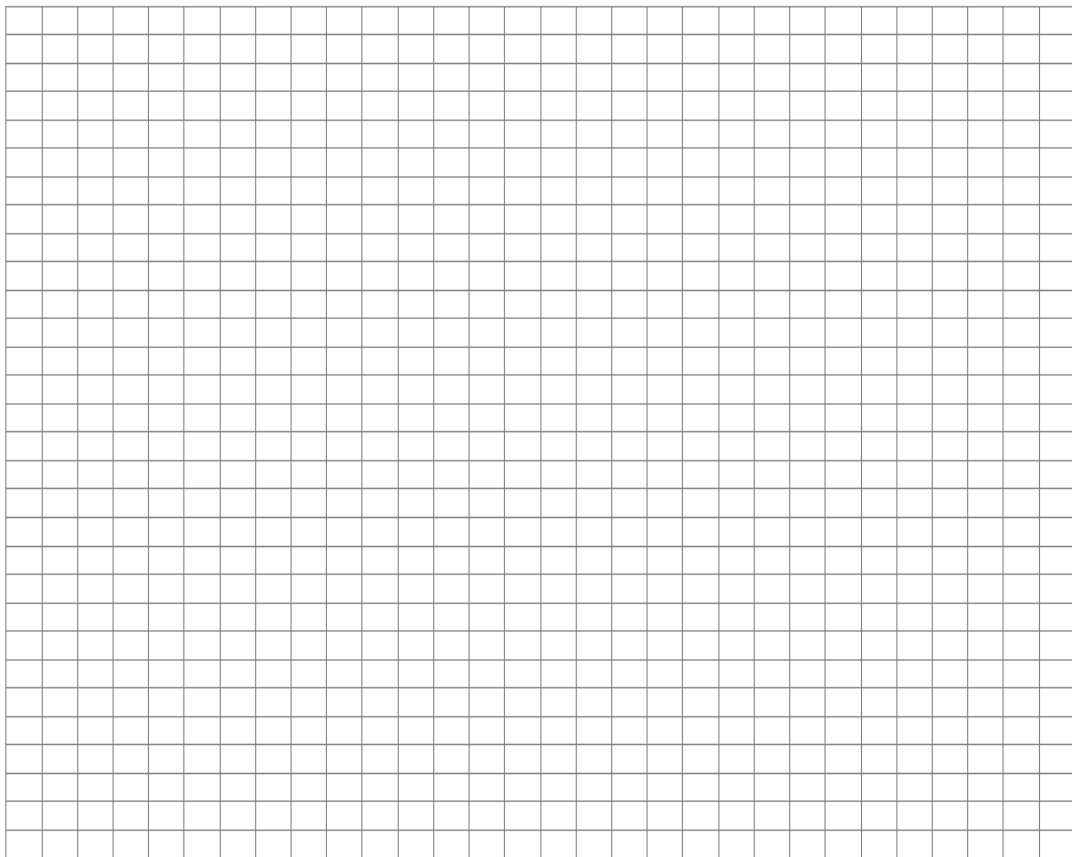
Ефективна сила струму через первинну обмотку

$$I = \quad \text{А}$$

Опір магазина опорів

$$R_2 = \quad \text{Ом}$$

4 Рисунок петлі гістерезису



5 Аналіз рисунка

$$l_x =$$

$$l_y =$$

$$L_{B_3} =$$

$$L_{H_c} =$$

$$S_h =$$

6 Розрахунок ціни поділки

$$a_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot n_1 I}{l_x}$$

$$a_y = \frac{u_y C R_2}{S_2 N_2}$$

7 Розрахунок характеристик петлі гістерезису

Залишкова магнітна індукція, Тл,

$$B_3 = L_{B_3} a_y$$

Залишкова намагніченість, А/м,

$$J_3 = \frac{B_3}{\mu_0}$$

Коерцитивна сила, А/м,

$$H_c = L_{H_c} a_x$$

Магнітна проникність

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{l_y a_y}{\mu_0 l_x a_x}$$

Робота з перемагнічування на цикл на одиницю об'єму, Дж/м³,

$$A = S_h a_x a_y$$