

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Електромеханічні та контактні явища в електричних апаратах»
для студентів спеціальності G3 – «Електрична інженерія»
всіх форм навчання, частина 1

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електромеханічні та контактні явища в електричних апаратах» для студентів спеціальності G3 – «Електрична інженерія» всіх форм навчання, частина 1. /Укл.: Л.С. Скрупська, В.В. Василевський – Запоріжжя: НУЗП, 2025.– 32с.

Укладачі: Л.С. Скрупська, ст. викл.,
В.В. Василевський, доцент. к. т. н.

Рецензент: О.І.Афанасьєв, доцент, к. т. н.

Відповідальний
за випуск: Л.С. Скрупська, ст. викл.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні та
електронні апарати»
Протокол № 1
від « 12 » 08 2025 р.

Затверджено НМК ЕТФ
Протокол № 1
від « 21 » 08 2025 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
<u>Лабораторна робота № 1. Дослідження магнітних</u> провідностей повітряних проміжків.....	6
<u>Лабораторна робота № 2. Дослідження електромагніту</u> постійного струму.....	10
<u>Лабораторна робота № 3. Дослідження електромагніту</u> змінного струму.....	14
<u>Лабораторна робота № 4. Дослідження динамічних</u> характеристик електромагніту.....	20
<u>Лабораторна робота № 5. Дослідження кривої намагнічування</u> ферромагнітного матеріалу.....	26
Список використаних джерел посилання	31

ВСТУП

Дисципліна «Електромеханічні та контактні явища в електричних апаратах» посідає важливе місце у підготовці здобувачів вищої освіти спеціальності G3 – «Електрична інженерія». Вона спрямована на формування у студентів системи знань щодо фізичних процесів, що відбуваються в електричних апаратах, закономірностей їх роботи та чинників, які визначають надійність і довговічність функціонування.

Лабораторний практикум з дисципліни є невід'ємною складовою навчального процесу та має на меті поглиблення і закріплення теоретичних знань, отриманих під час лекційних занять, а також набуття практичних навичок дослідження електромеханічних і контактних явищ у комутаційних та захисних апаратах. Виконання лабораторних робіт забезпечує:

- засвоєння методів експериментального дослідження характеристик електричних апаратів;
- формування умінь користуватися сучасними вимірювальними приладами та програмними засобами моделювання;
- розвиток навичок аналітичної обробки результатів експерименту та підготовки науково обґрунтованих висновків;
- підвищення рівня професійної компетентності майбутніх фахівців у галузі електроенергетики та електротехніки.

Методичні вказівки укладені відповідно до робочої програми дисципліни та містять: мету і завдання лабораторних робіт, перелік необхідного обладнання та програмного забезпечення, стислий виклад теоретичних положень, порядок виконання дослідів, рекомендації щодо оформлення результатів, контрольні питання для самоперевірки та підготовки до захисту.

Запропонований матеріал орієнтований на студентів усіх форм навчання та покликаний сприяти ефективному засвоєнню навчальної дисципліни, формуванню навичок експериментальної роботи та розвитку інженерного мислення.

У межах лабораторного практикуму з дисципліни «Електромеханічні та контактні явища в електричних апаратах» студенти набувають знань і практичних навичок, необхідних для дослідження фундаментальних процесів, що визначають роботу

електричних апаратів. Зокрема, у ході лабораторних занять вивчаються магнітні провідності повітряних проміжків, досліджуються особливості роботи електромагнітів постійного та змінного струму, аналізуються їхні динамічні характеристики, а також розглядається крива намагнічування феромагнітних матеріалів.

Виконання таких досліджень дозволяє студентам засвоїти методики вимірювань, опанувати сучасні засоби аналізу й моделювання, навчитися обробляти експериментальні дані та робити науково обґрунтовані висновки.

Отримані знання та вміння формують базу для подальшого професійного застосування у сфері розробки, експлуатації та вдосконалення електричних апаратів.»

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Дослідження магнітних провідностей повітряних проміжків

Мета роботи:

- Ознайомитися з основними принципами магнітних кіл із повітряними проміжками.
- Дослідити вплив розміру повітряного проміжку на магнітну провідність.
- Вивчити методи розрахунку магнітної провідності повітряного проміжку.
- Розвинути навички експериментального визначення параметрів магнітних кіл.

1. Обладнання та програмне забезпечення

а) Обладнання:

- Лабораторний стенд із магнітним контуром (феромагнітний сердечник із регульованим повітряним проміжком).
- Котушка індуктивності (з відомою кількістю витків N).
- Джерело постійного струму (регульоване, 0–5 А).
- Амперметр (для вимірювання струму в котушці).
- Вольтметр (для вимірювання напруги).
- Магнітометр або датчик магнітного поля (для вимірювання магнітної індукції B).
- Штангенциркуль (для вимірювання розміру повітряного проміжку).

б) Програмне забезпечення:

- Програма для обробки даних (наприклад, Microsoft Excel або MATLAB).

в) Додаткові матеріали:

- Міліметровий папір для побудови графіків.
- Таблиці для запису результатів вимірювань.

2. Завдання лабораторної роботи

2.1 Ознайомитися з теоретичними основами магнітних кіл із повітряними проміжками.

2.2 Провести експериментальне дослідження залежності магнітної провідності від розміру повітряного проміжку.

2.3 Розрахувати магнітну провідність повітряного проміжку за експериментальними даними.

2.4 Побудувати графік залежності магнітного потоку Φ від розміру повітряного проміжку δ .

2.5 Проаналізувати отримані результати та зробити висновки.

3. Теоретичні відомості

3.1. Основи магнітних кіл із повітряними проміжками

Магнітні кола з повітряними проміжками використовуються в багатьох електричних апаратах (трансформаторах, електромагнітах, реле). Повітряний проміжок у магнітному контурі значно впливає на магнітну провідність, оскільки магнітна проникність повітря ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$) набагато менша, ніж у феромагнітних матеріалів ($\mu_r \gg 1$).

Магнітна провідність G_m визначається як:

$$G_m = \frac{\Phi}{F},$$

де:

Φ – магнітний потік (Вб),

F – магніторушійна сила (А).

Для повітряного проміжку магнітна провідність розраховується за формулою:

$$G_m = \frac{\mu_0 S}{\delta},$$

де:

μ_0 – магнітна стала,

S – площа поперечного перерізу повітряного проміжку (м^2),

δ – довжина повітряного проміжку (м).

3.2. Магнітний потік і магнітна індукція

Магнітний потік Φ пов'язаний із магнітною індукцією B :

$$\Phi = B \cdot S,$$

де : B – магнітна індукція (Тл), яка залежить від магнітного поля H :

$$B = \mu_0 H \quad (\text{для повітря}).$$

Магніторушійна сила F створюється котушкою:

$$F = N \cdot I,$$

де:

N – кількість витків котушки,

I – сила струму в котушці (А).

3.3. Вплив повітряного проміжку

Збільшення повітряного проміжку δ зменшує магнітну провідність, що призводить до зменшення магнітного потоку Φ . Це пояснюється тим, що повітря має низьку магнітну проникність, і магнітний опір ($R_m=1/G_m$) зростає.

4. Хід виконання роботи

Крок 1: Підготовка до експерименту

- Ознайомтеся з лабораторним стендом і перевірте справність усіх приладів.

- Виміряйте площу поперечного перерізу сердечника S за допомогою штангенциркуля.

- Запишіть кількість витків котушки N .

Крок 2: Вимірювання магнітного потоку для різних розмірів повітряного проміжку

- Встановіть повітряний проміжок δ на мінімальне значення (наприклад, 0.5 мм).

- Увімкніть джерело живлення і встановіть силу струму $I=1$ А.

- Виміряйте магнітну індукцію B у повітряному проміжку за допомогою магнітометра.

Розрахуйте магнітний потік:

$$\Phi=B \cdot S.$$

- Збільшуйте повітряний проміжок δ (наприклад, 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм) і повторюйте вимірювання для кожного значення.

- Запишіть результати в таблицю.

Таблиця для запису результатів:

№	δ (мм)	I (А)	B (Тл)	Φ (Вб)	G_m (Вб/А)
1					
2					
3					

Крок 3: Розрахунок магнітної провідності

Для кожного значення δ розрахуйте магнітну провідність:

$$G_m = \frac{\Phi}{F}, \quad F = N \cdot I.$$

Порівняйте отримані значення G_m із теоретичними, розрахованими за формулою:

$$G_m = \frac{\mu_0 S}{\delta}.$$

Крок 4: Побудова графіка

- Побудуйте графік залежності магнітного потоку Φ від розміру повітряного проміжку δ .
- Використовуйте міліметровий папір або програму (Excel/MATLAB) для побудови графіка.

Крок 5: Аналіз результатів

- Проаналізуйте, як зміна δ впливає на Φ і G_m .
- Порівняйте експериментальні значення G_m із теоретичними.
- Зробіть висновки про вплив повітряного проміжку на магнітну провідність.

5. Контрольні питання

1. Що таке магнітна провідність і як вона залежить від розміру повітряного проміжку?
2. Як впливає повітряний проміжок на магнітний потік у магнітному контурі?
3. Яка роль магніторушійної сили в магнітному колі?
4. Як можна експериментально визначити магнітну індукцію B ?
5. Чому магнітна проникність повітря значно менша, ніж у феромагнітних матеріалів?
6. Як впливають повітряні проміжки на роботу електричних апаратів, таких як трансформатори чи реле?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Дослідження електромагніту постійного струму

Мета роботи - Ознайомитися з конструкцією та принципом дії електромагніту постійного струму, дослідити залежність магнітного потоку, сили тяги та індукції від струму в обмотці, а також вивчити вплив робочого зазору на характеристики електромагніту..

1. Завдання

1. Вивчити конструкцію електромагніту постійного струму та принцип його роботи.
2. Зібрати схему для дослідження електромагніту.
3. Дослідити залежність магнітного потоку (Φ) від струму в обмотці (I) при фіксованому робочому зазорі.
4. Визначити залежність сили тяги (F) від струму (I) для різних значень робочого зазору (δ).
5. Побудувати графіки залежностей $\Phi(I)$ та $F(I)$.
6. Проаналізувати вплив робочого зазору на характеристики електромагніту.

2. Теоретичні відомості

Електромагніт постійного струму – це пристрій, який створює магнітне поле за допомогою струму, що протікає через обмотку, намотану на феромагнітний осердь. Основні елементи електромагніту:

- **Осердь**: виготовляється з феромагнітного матеріалу (наприклад, електротехнічної сталі) для посилення магнітного поля.
- **Обмотка**: котушка з ізольованого проводу, через яку протікає постійний струм.
- **Якір**: рухома частина, яка притягується до осердя під дією магнітного поля.
- **Робочий зазор** (δ): повітряний проміжок між осердем і якорем, який впливає на магнітний опір і силу тяги.

Принцип дії:

Коли через обмотку протікає постійний струм I , виникає магнітне поле, яке намагнічує осердь. Магнітний потік Φ замикається через осердь, повітряний зазор і якір, створюючи силу тяги F , яка притягує якір до осердя.

Основні співвідношення

1. Магнітний потік:

$$\Phi = \frac{NI}{R_m},$$

де:

N – кількість витків обмотки,

I – струм,

R_m – магнітний опір контуру ($R_m = R_{\text{осердя}} + R_{\text{зазору}}$).

2. Магнітна індукція в зазорі:

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

де S – площа поперечного перерізу осердя.

3. Сила тяги:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0},$$

де $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, B – магнітна індукція в зазорі.

Вплив робочого зазору:

Збільшення зазору δ підвищує магнітний опір (R_m), що зменшує магнітний потік Φ і силу тяги F .

3. Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд складається з таких елементів:

3.1. *Електромагніт:*

Осердь: U-подібної форми, матеріал – електротехнічна сталь.

Обмотка: 500 витків, опір $R = 10 \Omega$.

Якір: рухома пластина з можливістю регулювання зазору δ (0–10 мм).

3.2. *Джерело живлення:* регульоване джерело постійного струму (0–5 А, 0–30 В).

3.3. *Вимірювальні прилади:*

Амперметр: діапазон 0–5 А, клас точності 0.5.

Вольтметр: діапазон 0–30 В, клас точності 0.5.

Тесламетр: для вимірювання магнітної індукції B у зазорі (0–2 Тл).

Динамометр: для вимірювання сили тяги F (0–50 Н).

3.4. *Механізм регулювання зазору*: гвинтовий механізм для зміни δ з точністю 0.1 мм.

3.5. *Схема підключення*: джерело живлення \rightarrow амперметр \rightarrow обмотка електромагніту \rightarrow вольтметр (паралельно обмотці).

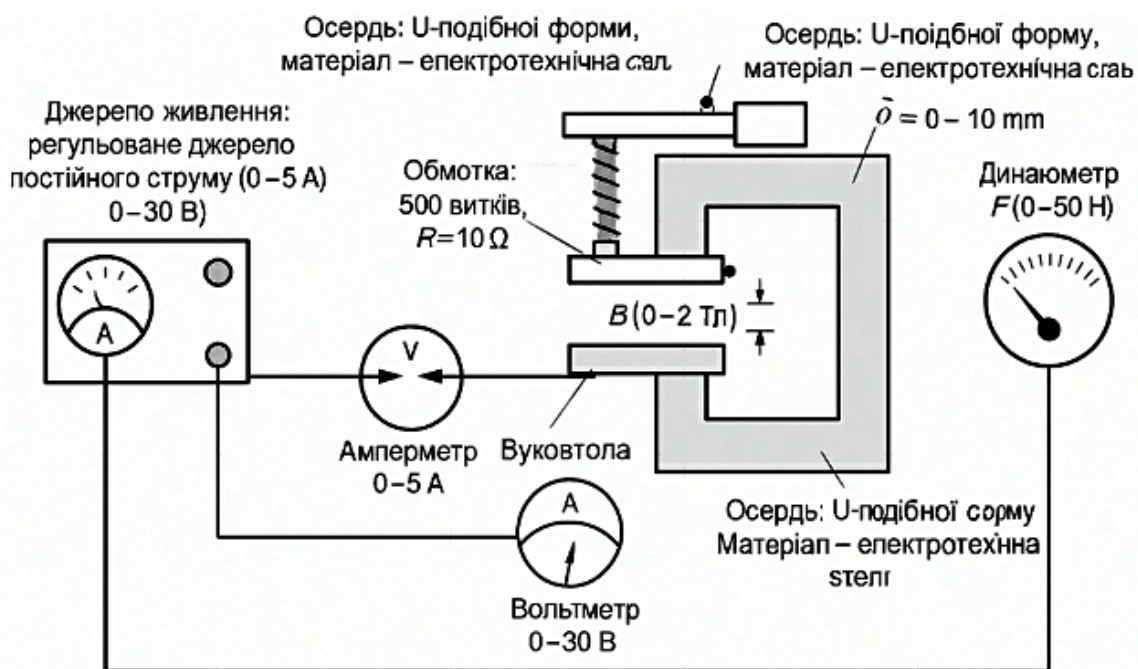


Схема підключення: джерело живлення \rightarrow амперметр \rightarrow обмотка електромагніту \rightarrow вольтметр (паралельно обмотці)

Рисунок 1 – Схема лабораторного стенду

4. Порядок виконання роботи

4.1. Підготовка до роботи

- Ознайомтеся з конструкцією електромагніту та схемою стенду.
- Перевірте справність усіх приладів (амперметр, вольтметр, тесламетр, динамометр).
- Встановіть робочий зазор $\delta=2$ мм за допомогою гвинтового механізму.
- Переконайтеся, що джерело живлення вимкнене перед початком роботи.

4.2. Дослідження залежності магнітного потоку від струму

1. Увімкніть джерело живлення та встановіть струм $I=0.5$ А.
2. За допомогою тесламетра виміряйте магнітну індукцію B у зазорі.
3. Обчисліть магнітний потік:

$$\Phi = B \cdot S,$$

де: $S=0.001\text{м}^2$ (площа перерізу осердя вказана в паспорті стенду).

4. Повторіть вимірювання для струмів $I=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{А}$.
5. Запишіть результати в таблицю 1:

Таблиця 1: Залежність магнітного потоку від струму ($\delta=2\text{мм}$)

I, А	B, Тл	$\Phi, \text{Вб}$
0,5		
1,0		

4.3. Дослідження залежності сили тяги від струму

- а) Встановіть зазор $\delta=2\text{мм}$.
- б) За допомогою динамометра виміряйте силу тяги F при струмах $I=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{А}$.
- в) Повторіть вимірювання для $\delta=4\text{мм}$ та $\delta=6\text{мм}$.
- г) Запишіть результати в таблицю 2:

Таблиця 2: Залежність сили тяги від струму для різних зазорів

I, А	F, Н ($\delta=2\text{ мм}$)	F, Н ($\delta=4\text{ мм}$)	F, Н ($\delta=6\text{ мм}$)
0,5			
1,0			
...			

4.4. Аналіз результатів

1. Побудуйте графіки:
 - $\Phi(I)$ для $\delta=2\text{мм}$.
 - $F(I)$ для $\delta=2, 4, 6\text{мм}$ на одному графіку.
2. Проаналізуйте, як змінюється магнітний потік і сила тяги зі збільшенням струму.
3. Оцініть вплив робочого зазору на силу тяги: порівняйте значення F для різних δ .

5. Вимоги до звіту

Звіт про лабораторну роботу має містити:

- Титульну сторінку з назвою роботи, ПІБ студента, групою, датою виконання.
- Мету та завдання роботи.

- Короткі теоретичні відомості (принцип дії електромагніту, основні формули).

- Схему стенду та опис приладів.

- Таблиці 1 і 2 із результатами вимірювань.

- Графіки залежностей $\Phi(I)$ та $F(I)$.

- Аналіз результатів:

Як змінюється Φ зі збільшенням I ?

Як δ впливає на F ?

Порівняння експериментальних даних із теоретичними (за формулами).

- Висновки: основні результати, відповідність меті, практичне значення.

6. Контрольні запитання

1. Яка конструкція електромагніту постійного струму та принцип його дії?

2. Як залежить магнітний потік Φ від струму I та робочого зазору δ ?

3. За якою формулою обчислюється сила тяги F ? Які фактори впливають на її значення?

4. Чому збільшення робочого зазору зменшує силу тяги?

5. Яке практичне застосування електромагнітів у електричних апаратах?

6. Як впливає намагніченість осердя на характеристики електромагніту?

7. Як можна підвищити силу тяги електромагніту без зміни струму?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження електромагніту змінного струму

Мета роботи - Ознайомитися з конструкцією та принципом дії електромагніту змінного струму, дослідити залежність магнітного потоку, сили тяги та індукції від величини струму в обмотці, а також вивчити вплив робочого зазору та частоти струму на характеристики

електромагніту, звертаючи увагу на специфічні явища, такі як вібрація якоря та втрати на вихрові струми.

1. Завдання

1. Вивчити конструкцію електромагніту змінного струму та принцип його роботи.
2. Зібрати схему для дослідження електромагніту.
3. Дослідити залежність магнітного потоку (Φ) від діючого значення струму в обмотці (I) при фіксованому робочому зазорі.
4. Визначити залежність сили тяги (F) від струму (I) для різних значень робочого зазору (δ) та частот струму (f).
5. Побудувати графіки залежностей $\Phi(I)$ та $F(I)$.
6. Проаналізувати вплив робочого зазору, частоти струму та вібрації якоря на характеристики електромагніту.

2. Теоретичні відомості

Електромагніт змінного струму – це пристрій, який створює магнітне поле за допомогою змінного струму, що протікає через обмотку, намотану на феромагнітний осердь. Основні елементи електромагніту:

- **Осердь**: виготовляється з листів електротехнічної сталі для зменшення втрат на вихрові струми.
- **Обмотка**: котушка з ізольованого проводу, через яку протікає змінний струм.
- **Якір**: рухома частина, яка притягується до осердя під дією магнітного поля.
- **Робочий зазор** (δ): повітряний проміжок між осердем і якорем, який впливає на магнітний опір і силу тяги.

Принцип дії:

Змінний струм $I(t)=I_m \sin(2\pi ft)$ в обмотці створює змінне магнітне поле, яке намагнічує осердь. Магнітний потік Φ змінюється синусоїдально з частотою f , що викликає періодичну зміну сили тяги F . Через змінний характер магнітного поля якір вібрує з частотою $2f$, що є особливістю електромагнітів змінного струму.

Основні співвідношення:

1. Магнітний потік:

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin(2\pi ft),$$

де $\Phi_m = \frac{NI_m}{R_m}$, N – кількість витків,
 I_m – амплітуда струму,
 R_m – магнітний опір.

2. Магнітна індукція в зазорі:

$$B(t) = \frac{\Phi(t)}{S},$$

де S – площа поперечного перерізу осердя.

3. Сила тяги (середнє значення):

$$F = \frac{B_m^2 S}{2\mu_0} \cdot (\text{коефіцієнт пульсації}),$$

де:

B_m – амплітуда магнітної індукції,

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, коефіцієнт пульсації враховує вібрацію якоря.

3. Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд складається з таких елементів:

а) Електромагніт змінного струму:

Осердь: U-подібної форми, зібране з листів електротехнічної сталі, товщина листа 0.5 мм.

Обмотка: 400 витків, індуктивність $L=0.1$ Гн, активний опір $R=5\Omega$.

Якір: рухома пластина з можливістю регулювання зазору δ (0–10 мм).

б) Джерело живлення: регульоване джерело змінного струму (0–5 А, 0–220 В) із можливістю зміни частоти (50 Гц, 60 Гц).

в) Вимірювальні прилади:

Амперметр: діапазон 0–5 А (діюче значення), клас точності 0.5.

Вольтметр: діапазон 0–220 В (діюче значення), клас точності 0.5.

Тесламетр: для вимірювання магнітної індукції B у зазорі (0–2 Тл).

Динамометр: для вимірювання середньої сили тяги F (0–50 Н).

Осцилограф: для спостереження вібрації якоря (через датчик вібрації).

г) Механізм регулювання зазору: гвинтовий механізм для зміни δ з точністю 0.1 мм.

Схема підключення: джерело змінного струму \rightarrow амперметр \rightarrow обмотка електромагніту \rightarrow вольтметр (паралельно обмотці).

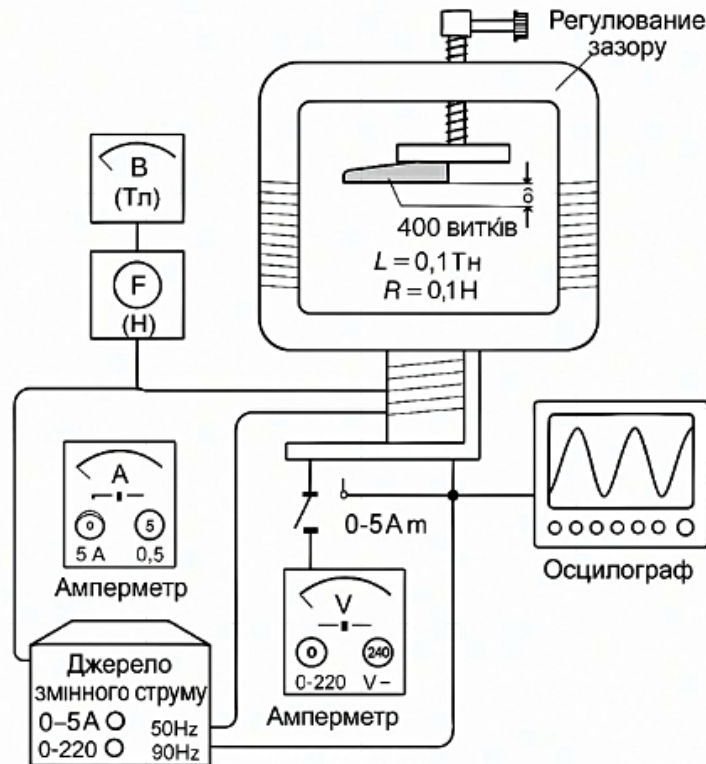


Рисунок 1 Схема лабораторного стану

4. Порядок виконання роботи

4.1. Підготовка до роботи

- Ознайомтеся з конструкцією електромагніту змінного струму та схемою стану.

- Перевірте справність усіх приладів (амперметр, вольтметр, тесламетр, динамометр, осцилограф).

- Встановіть робочий зазор $\delta = 2 \text{ мм}$ за допомогою гвинтового механізму.

- Встановіть частоту джерела живлення $f = 50 \text{ Гц}$.

- Переконайтеся, що джерело живлення вимкнене перед початком роботи.

4.2. Дослідження залежності магнітного потоку від струму

- Увімкніть джерело живлення та встановіть струм $I=0.5\text{A}$ (діюче значення).

- За допомогою тесламетра виміряйте амплітуду магнітної індукції B_m у зазорі.

- Обчисліть амплітуду магнітного потоку:

$$\Phi_m = B_m \cdot S,$$

де $S=0.001\text{m}^2$ (площа перерізу осердя вказана в паспорті стенду).

- Повторіть вимірювання для струмів $I=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{A}$.

- Запишіть результати в таблицю 1:

Таблиця 1: Залежність магнітного потоку від струму ($\delta=2\text{мм}, f=50\text{Гц}$)

I, А	B_m, Тл	Φ_m, Вб
0,5		
1,0		
...		

4.3. Дослідження залежності сили тяги від струму

- Встановіть зазор $\delta=2\text{мм}$ і частоту $f=50\text{Гц}$.

- За допомогою динамометра виміряйте середню силу тяги F при струмах

$I=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{A}$.

- Повторіть вимірювання для $\delta=4\text{мм}$ та $\delta=6\text{мм}$.

- Змініть частоту на $f=60\text{Гц}$ і повторіть вимірювання для $\delta=2\text{мм}$.

- Запишіть результати в таблицю 2:

Таблиця 2: Залежність сили тяги від струму для різних зазорів і частот

I, А	F, Н ($\delta=2\text{ мм}, f=50$ Гц)	F, Н ($\delta=4\text{ мм}, f=50$ Гц)	F, Н ($\delta=6\text{ мм}, f=50$ Гц)	F, Н ($\delta=2\text{ мм}, f=60$ Гц)
0,5				
1,0				
...				

4.4 Дослідження вібрації якоря

1. Підключіть датчик вібрації до якоря та виведіть сигнал на осцилограф.
2. Встановіть $I=2.0\text{A}$, $\delta=2\text{мм}$, $f=50\text{Гц}$.
3. Виміряйте частоту вібрації якоря та порівняйте її з теоретичним значенням ($2f=100\text{Гц}$).
4. Повторіть вимірювання для $f=60\text{Гц}$ (теоретична частота вібрації – 120Гц).

4.5. Аналіз результатів

а) Побудуйте графіки:

$\Phi_m(I)$ для $\delta=2\text{мм}$, $f=50\text{Гц}$.

$F(I)$ для $\delta=2,4,6\text{мм}$ ($f=50\text{Гц}$) та $\delta=2\text{мм}$ ($f=60\text{Гц}$) на одному графіку.

б) Проаналізуйте, як змінюється магнітний потік і сила тяги зі збільшенням струму.

в) Оцініть вплив робочого зазору та частоти на силу тяги.

г) Проаналізуйте вібрацію якоря: чи відповідає її частота теоретичному значенню?

5. Вимоги до звіту

Звіт про лабораторну роботу має містити:

- Титульну сторінку з назвою роботи, ПІБ студента, групою, датою виконання.

- Мету та завдання роботи.

- Короткі теоретичні відомості (принцип дії електромагніту змінного струму, основні формули, особливості).

- Схему стенду та опис приладів.

- Таблиці 1 і 2 із результатами вимірювань.

- Графіки залежностей $\Phi_m(I)$ та $F(I)$.

- Результати вимірювання вібрації якоря (частота, порівняння з теорією).

- Аналіз результатів:

Як змінюється Φ_m зі збільшенням I ?

Як δ і f впливають на F ?

Який вплив вібрації якоря на роботу електромагніту?

Порівняння експериментальних даних із теоретичними (за формулами).

- Висновки: основні результати, відповідність меті, практичне значення.

6. Контрольні запитання

1. Яка конструкція електромагніту змінного струму та принцип його дії?
2. Як залежить магнітний потік Φ від струму I , робочого зазору δ та частоти f ?
3. За якою формулою обчислюється сила тяги F ? Чому вона пульсує?
4. Чому виникає вібрація якоря та як її зменшити?
5. Як впливають вихрові струми на роботу електромагніту? Як зменшити ці втрати?
6. Яке практичне застосування електромагнітів змінного струму в електричних апаратах?
7. Як зміна частоти струму впливає на характеристики електромагніту?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Дослідження динамічних характеристик електромагніту

Мета роботи - Ознайомитися з динамічними характеристиками електромагніту, дослідити часові параметри його роботи (час спрацьовування та відпускання), залежність цих параметрів від струму в обмотці, робочого зазору та напруги живлення, а також вивчити вплив інерційних і демпфуючих факторів на динаміку роботи електромагніту.

1. Завдання

1. Вивчити конструкцію електромагніту та принципи його роботи в динамічному режимі.
2. Зібрати схему для дослідження динамічних характеристик електромагніту.
3. Виміряти час спрацьовування ($t_{\text{спр}}$) та час відпускання ($t_{\text{відп}}$) електромагніту при різних значеннях струму (I) та напруги (U).

4. Дослідити вплив робочого зазору (δ) на динамічні характеристики.

5. Побудувати графіки залежностей $t_{\text{спр}}(I)$, $t_{\text{відп}}(I)$, $t_{\text{спр}}(\delta)$.

6. Проаналізувати вплив інерційних і демпфуючих факторів на динаміку роботи електромагніту.

2. Теоретичні відомості

Електромагніт – це пристрій, який перетворює електричну енергію в механічну за допомогою магнітного поля. Динамічні характеристики електромагніту визначають його поведінку під час увімкнення (спрацьовування) та вимкнення (відпускання). Основні елементи електромагніту:

- *Осердь*: феромагнітний матеріал (електротехнічна сталь).
- *Обмотка*: котушка, через яку протікає струм.
- *Якір*: рухома частина, що притягується до осердя.
- *Робочий зазор* (δ): повітряний проміжок між осердем і якорем.

Динамічні характеристики:

а) *Час спрацьовування* ($t_{\text{спр}}$): час від моменту подачі напруги на обмотку до моменту, коли якір досягає кінцевого положення (повного притягнення до осердя).

б) *Час відпускання* ($t_{\text{відп}}$): час від моменту зняття напруги до моменту, коли якір повертається у вихідне положення під дією пружини.

Фактори, що впливають на динаміку:

- *Струм* (I) та *напруга* (U): більший струм швидше намагнічує осердь, зменшуючи $t_{\text{спр}}$.

- *Робочий зазор* (δ): більший зазор збільшує магнітний опір, що уповільнює рух якоря.

- *Інерція якоря*: маса якоря та механічна інерція збільшують $t_{\text{спр}}$ і $t_{\text{відп}}$.

- *Демпфування*: тертя, опір повітря та пружина впливають на швидкість руху якоря.

- *Індуктивність обмотки*: уповільнює наростання струму

$$I(t) = \frac{U}{R}(1 - e^{-t/\tau})$$

де - $\tau=L/R$).

Основні співвідношення:

1. Сила тяги:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0},$$

де :

B – магнітна індукція,

S – площа перерізу осердя,

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м.

2. Час наростання струму:

$$t_{\text{струм}} \approx 3\tau = 3\frac{L}{R}.$$

3. Рівняння руху якоря:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F(t),$$

де m – маса якоря, b – коефіцієнт демпфування, k – жорсткість пружини,

x – переміщення якоря.

3. Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд складається з таких елементів:

1. *Електромагніт:*

Осердь: U-подібної форми, матеріал – електротехнічна сталь.

Обмотка: 500 витків, опір $R=10\Omega$, індуктивність $L=0.2$ Гн.

Якір: рухома пластина, маса 0.5 кг, з пружиною для повернення (жорсткість $k=100$ Н/м).

Робочий зазор: регульований (0–10 мм).

2. *Джерело живлення:* регульоване джерело постійного струму (0–5 А, 0–30 В).

3. *Вимірювальні прилади:*

Амперметр: діапазон 0–5 А, клас точності 0.5.

Вольтметр: діапазон 0–30 В, клас точності 0.5.

Хроноскоп: для вимірювання часу спрацьовування та відпускання (точність 0.1 мс).

Датчик переміщення: для визначення положення якоря (0–10 мм).

Осцилограф: для аналізу перехідних процесів (струм, напруга, переміщення).

4. *Механізм регулювання зазору:* гвинтовий механізм для зміни δ з точністю 0.1 мм.

5. *Схема підключення:* джерело живлення → реле (для увімкнення/вимкнення) → амперметр → обмотка електромагніту → вольтметр (паралельно обмотці).

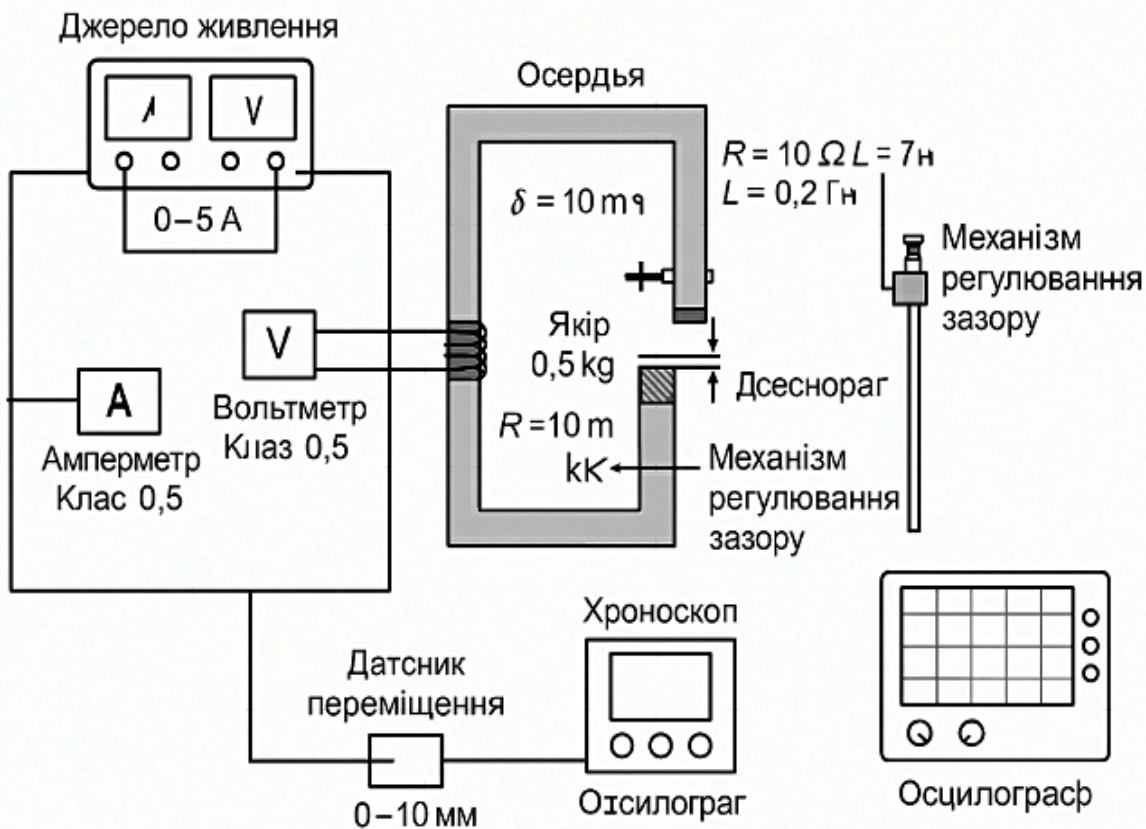


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенду

4. Порядок виконання роботи

4.1. Підготовка до роботи

- Ознайомтеся з конструкцією електромагніту та схемою стенду.
- Перевірте справність усіх приладів (амперметр, вольтметр, хроноскоп, осцилограф).
- Встановіть робочий зазор $\delta = 2 \text{ мм}$ за допомогою гвинтового механізму.
- Переконайтеся, що джерело живлення вимкнене перед початком роботи.

4.2. Вимірювання часу спрацьовування та відпускання при різних струмах

- Увімкніть джерело живлення та встановіть напругу $U=10\text{В}$ (струм $I=U/R\approx 1\text{А}$).

- Увімкніть реле та за допомогою хроноскопа виміряйте час спрацьовування ($t_{\text{спр}}$) – час від подачі напруги до повного притягнення якоря (коли датчик переміщення показує $x=\delta$).

- Вимкніть реле та виміряйте час відпускання ($t_{\text{відп}}$) – час від зняття напруги до повернення якоря у вихідне положення ($x=0$).

- Повторіть вимірювання для $U=15,20,25,30\text{В}$ (струми $I\approx 1.5,2.0,2.5,3.0\text{А}$).

Запишіть результати в таблицю 1:

Таблиця 1: Залежність часу спрацьовування та відпускання від струму ($\delta=2\text{мм}$)

U, В	I, А	$t_{\text{спр}}$, мс	$t_{\text{відп}}$, мс
10	1,0		
15	1,5		
...			

4.3. Дослідження впливу робочого зазору

- Встановіть напругу $U=20\text{В}$ (струм $I\approx 2.0\text{А}$).

- Змініть робочий зазор на $\delta=4\text{мм}$ та виміряйте $t_{\text{спр}}$ і $t_{\text{відп}}$.

- Повторіть вимірювання для $\delta=6,8\text{мм}$.

- Запишіть результати в таблицю 2:

Таблиця 2: Залежність часу спрацьовування та відпускання від робочого зазору ($I=2.0\text{А}$)

δ, мм	$t_{\text{спр}}$, мс	$t_{\text{відп}}$, мс
2		
4		
...		

4.4. Аналіз перехідних процесів

а) Підключіть осцилограф для спостереження:

Наростання струму в обмотці ($I(t)$).

Переміщення якоря ($x(t)$) через датчик переміщення.

б) Увімкніть реле при $U=20\text{В}$, $\delta=2\text{мм}$, і запишіть осцилограми $I(t)$ та $x(t)$.

в) Визначте час наростання струму до 90% від максимуму та порівняйте з теоретичним значенням ($t \approx 3\tau$).

4.5. Аналіз результатів

1. Побудуйте графіки:

$t_{\text{спр}}(I)$ та $t_{\text{відп}}(I)$ для $\delta=2\text{мм}$.

$t_{\text{спр}}(\delta)$ та $t_{\text{відп}}(\delta)$ для $I=2.0\text{А}$.

2. Проаналізуйте, як змінюються $t_{\text{спр}}$ і $t_{\text{відп}}$ зі збільшенням струму та зазору.

3. Оцініть вплив інерції якоря та демпфування (пружина, тертя) на динаміку роботи.

5. Вимоги до звіту

Звіт про лабораторну роботу має містити:

1. Титульну сторінку з назвою роботи, ПІБ студента, групою, датою виконання.

2. Мету та завдання роботи.

3. Короткі теоретичні відомості (динамічні характеристики, основні формули, фактори впливу).

4. Схему стенду та опис приладів.

5. Таблиці 1 і 2 із результатами вимірювань.

6. Графіки залежностей $t_{\text{спр}}(I)$, $t_{\text{відп}}(I)$, $t_{\text{спр}}(\delta)$, $t_{\text{відп}}(\delta)$.

7. Осцилограми $I(t)$ та $x(t)$ з аналізом перехідних процесів.

8. Аналіз результатів:

- Як змінюються $t_{\text{спр}}$ і $t_{\text{відп}}$ зі збільшенням I та δ ?

- Який вплив інерції та демпфування на динаміку?

- Порівняння експериментальних даних із теоретичними (за формулами).

9. Висновки: основні результати, відповідність меті, практичне значення.

6. Контрольні запитання

1. Що таке час спрацьовування та час відпускання електромагніту?

2. Які фактори впливають на динамічні характеристики електромагніту?

3. Як залежить час спрацьовування від струму в обмотці та робочого зазору?

4. Чому час відпускання зазвичай більший за час спрацьовування?

5. Як індуктивність обмотки впливає на перехідні процеси?
6. Яке практичне значення динамічних характеристик для електричних апаратів?
7. Як можна зменшити час спрацьовування електромагніту?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Дослідження кривої намагнічування феромагнітного матеріалу

Мета роботи - Ознайомитися з явищем намагнічування феромагнітних матеріалів, дослідити залежність магнітної індукції (B) від напруженості магнітного поля (H), побудувати криву намагнічування ($B(H)$) та петлю гістерезису, а також визначити основні магнітні характеристики матеріалу, такі як магнітна проникність (μ) і коерцитивна сила (H_c).

1. Завдання

1. Вивчити основи намагнічування феромагнітних матеріалів та явище гістерезису.
2. Зібрати схему для дослідження кривої намагнічування.
3. Виміряти магнітну індукцію (B) та напруженість магнітного поля (H) при різних значеннях струму в обмотці.
4. Побудувати криву намагнічування ($B(H)$) та петлю гістерезису.
5. Визначити магнітну проникність (μ) і коерцитивну силу (H_c) феромагнітного матеріалу.
6. Проаналізувати отримані результати та оцінити вплив гістерезису на характеристики матеріалу.

2. Теоретичні відомості

Феромагнітні матеріали (наприклад, залізо, сталь, ферити) мають високу магнітну проникність завдяки доменній структурі. При впливі зовнішнього магнітного поля домени вирівнюються, що призводить до намагнічування матеріалу.

а) Крива намагнічування:

Крива намагнічування $B(H)$ показує залежність магнітної індукції B від напруженості магнітного поля H . Вона має три основні ділянки:

- Початкова ділянка (лінійна): B зростає пропорційно H .
- Ділянка насичення: при великих H магнітна індукція B досягає максимуму ($B_{\text{нас}}$), і подальше збільшення H майже не впливає на B .
- Перехідна ділянка: між лінійною та насиченою зонами.

б) Петля гістерезису:

Якщо H змінюється циклічно (наприклад, при змінному струмі), то B відстає від H , утворюючи петлю гістерезису. Основні параметри петлі:

- *Коерцитивна сила* (H_c): напруженість поля, при якій $B=0$ після насичення.
- *Залишкова індукція* (B_r): значення B , коли $H=0$.
- *Магнітна проникність* (μ):

$$\mu = \frac{B}{H\mu_0},$$

де $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

в) Основні співвідношення:

1. Напруженість магнітного поля:

$$H = \frac{NI}{l},$$

де N – кількість витків обмотки, I – струм, l – середня довжина магнітного контуру.

2. Магнітна індукція:

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

де Φ – магнітний потік, S – площа поперечного перерізу зразка.

3. Магнітний потік визначається через ЕРС індукції у вимірювальній обмотці:

$$\Phi = \frac{1}{N_2} \int e(t) dt,$$

де $e(t)$ – ЕРС у вимірювальній обмотці, N_2 – кількість витків вимірювальної обмотки.

г) Втрати на гістерезис:

Енергія, що витрачається на перемагнічування, пропорційна площі петлі гістерезису. Ці втрати зростають із частотою перемагнічування та залежать від типу матеріалу.

3. Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд складається з таких елементів:

1. Феромагнітний зразок:

- Тороїдальний осердь із електротехнічної сталі.
- Середня довжина магнітного контуру $l=0.2\text{ м}$.
- Площа поперечного перерізу $S=0.001\text{ м}^2$.

2. Обмотки:

- Намагнічувальна обмотка: $N_1=500$ витків.
- Вимірювальна обмотка: $N_2=50$ витків.

3. Джерело живлення: регульоване джерело змінного струму (0–5 А, 0–220 В, частота 50 Гц).

4. Вимірювальні прилади:

- Амперметр: діапазон 0–5 А (діюче значення), клас точності 0.5.
- Вольтметр: діапазон 0–220 В (діюче значення), клас точності

0.5.

- Осцилограф: для вимірювання ЕРС у вимірювальній обмотці та струму в намагнічувальній обмотці.

- Інтегратор: для визначення магнітного потоку Φ шляхом інтегрування ЕРС.

5. Схема підключення: джерело змінного струму → амперметр → намагнічувальна обмотка → вольтметр (паралельно обмотці); вимірювальна обмотка підключена до осцилографа через інтегратор.

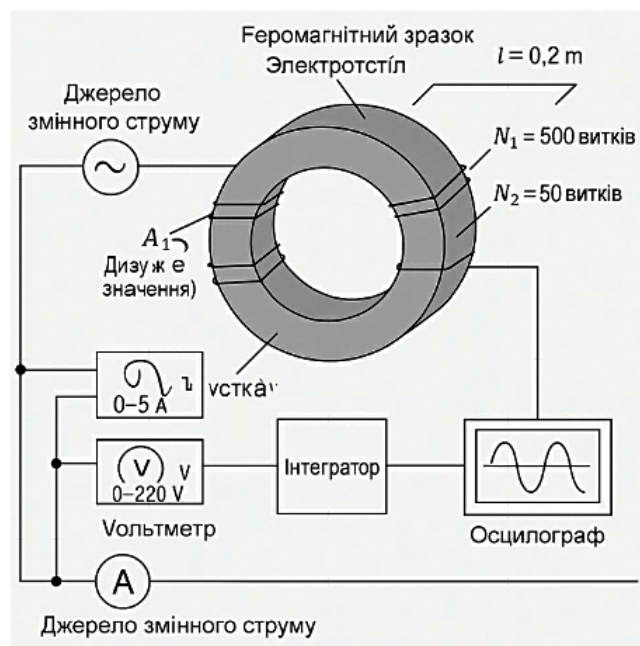


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенду

4. Порядок виконання роботи

4.1. Підготовка до роботи

- Ознайомтеся з конструкцією тороїдального осердя та схемою стенду.

- Перевірте справність усіх приладів (амперметр, вольтметр, осцилограф, інтегратор).

- Переконайтеся, що джерело живлення вимкнене перед початком роботи.

4.2. Вимірювання кривої намагнічування

а) Увімкніть джерело живлення та встановіть струм $I=0.2\text{A}$ (діюче значення).

б) Обчисліть напруженість магнітного поля:

$$H = \frac{N_1 I}{l},$$

де $N_1=500$, $l=0.2\text{м}$.

в) За допомогою осцилографа та інтегратора виміряйте магнітний потік Φ через вимірювальну обмотку:

$$\Phi = \frac{1}{N_2} \int e(t) dt,$$

де $N_2=50$

г) Обчисліть магнітну індукцію:

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

де $S=0.001\text{м}^2$.

д) Повторіть вимірювання для струмів $I=0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2\text{A}$.

ж) Запишіть результати в таблицю 1:

Таблиця 1: Залежність магнітної індукції від напруженості поля

I, А	H, А/м	Φ, Вб	B, Тл
0,2			
0,4			
...			

4.3. Побудова петлі гістерезису

1. Збільшуйте струм від 0 до 1.2 А, потім зменшуйте до 0, і знову збільшуйте до 1.2 А, щоб отримати повний цикл перемагнічування.

2. На кожному кроці (наприклад, $I=0, 0.2, 0.4, \dots, 1.2, \dots, 0$) вимірюйте H і B , як описано вище.

3. Запишіть результати в таблицю 2:

Таблиця 2: Дані для петлі гістерезису

I, А	H, А/м	B, Тл (зростання)	B, Тл (спадання)
0	0		
0,2			
...			

4.4. Визначення магнітних характеристик

1. За кривою намагнічування визначте максимальну магнітну проникність:

$$\mu_{\max} = \frac{B}{H\mu_0} \quad (\text{на лінійній ділянці}).$$

2. За петлею гістерезису визначте:

Коерцитивну силу H_c (значення H , коли $B=0$).

Залишкову індукцію B_r (значення B , коли $H=0$).

4.5. Аналіз результатів

а) Побудуйте графіки:

Крива намагнічування $B(H)$.

Петля гістерезису $B(H)$.

б) Проаналізуйте форму кривої намагнічування: визначте лінійну ділянку, область насичення.

в) Оцініть вплив гістерезису: визначте площу петлі та поясніть її зв'язок із втратами енергії.

г) Порівняйте експериментальні значення μ , H_c , B_r із типовими значеннями для електротехнічної сталі.

5. **Вимоги до звіту**

Звіт про лабораторну роботу має містити:

- Титульну сторінку з назвою роботи, ПІБ студента, групою, датою виконання.

- Мету та завдання роботи.

- Короткі теоретичні відомості (крива намагнічування, петля гістерезису, основні формули).

- Схему стенду та опис приладів.

- Таблиці 1 і 2 із результатами вимірювань.

- Графіки кривої намагнічування $B(H)$ та петлі гістерезису.

- Розрахунки μ_{\max} , H_c , B_r .

- Аналіз результатів:

Які ділянки кривої намагнічування спостерігаються?

Як гістерезис впливає на втрати енергії?

Як отримані характеристики (μ , H_c , B_r) впливають на вибір матеріалу для електромагнітів?

- Висновки: основні результати, відповідність меті, практичне значення.

6. Контрольні запитання

1. Що таке крива намагнічування та які її основні ділянки?

2. Як обчислюється напруженість магнітного поля H і магнітна індукція B ?

3. Що таке петля гістерезису? Які параметри вона характеризує?

4. Що таке коерцитивна сила (H_c) і залишкова індукція**?

5. Як визначити магнітну проникність (μ) феромагнітного матеріалу?

6. Яке практичне значення має дослідження кривої намагнічування для проектування електричних апаратів?

7. Як впливають втрати на гістерезис на роботу електромагнітів?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

Основна література

1. Грінберг, О. М., та ін. **Електричні апарати. Частина 1. Комутаційні апарати:** навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 212 с.

2. Кравчук, Б. П. **Електричні машини та апарати:** підручник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 380 с.

3. Гайдаєнко, О. М. **Електротехніка і електромеханіка: навчальний посібник.** – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 296 с.

4. Boldea, I., & Nasar, S. A. **Electromagnetic Devices.** – CRC Press, 2018. – 510 p.

5. Sen, P. C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics.** – Wiley, 2013. – 824 p.

Додаткова література

6. Харазішвілі, Ю. М. Електричні машини та трансформатори: лабораторний практикум. – Київ: НУХТ, 2017. – 144 с.
7. Коваленко, І. Д. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле: підручник. – Київ: Либідь, 2016. – 368 с.
8. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. Electric Machinery. – McGraw-Hill, 2014. – 720 p.
9. Dorf, R. C., & Svoboda, J. A. Introduction to Electric Circuits. – Wiley, 2020. – 912 p.
10. Rashid, M. H. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications. – Academic Press, 2017. – 1520 p.15. Соколовський В.І., Жукова М.О. Програмне забезпечення для моніторингу та управління енергоспоживанням. – Вінниця: ВНТУ, 2021.

Інтернет-ресурси

11. Electrical4U. **Electromagnet – Types, Working Principle, Applications.** – Режим доступу: <https://www.electrical4u.com/electromagnet>
12. All About Circuits. **Electromagnetic Devices and Principles.** – Режим доступу: <https://www.allaboutcircuits.com>
13. HyperPhysics. **Magnetization Curves and Ferromagnetism** (Georgia State University). – Режим доступу: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/magcur.html>
14. Electronics Tutorials. **Magnetism and Electromagnetism.** – Режим доступу: <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism>
15. ScienceDirect. **Magnetic Reluctance and Magnetic Circuits.** – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com>