

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 2

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 2. /Укл.: Л.С. Скрупська, В.В. Василевський – Запоріжжя: НУЗП, 2025.– 33с.

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 № 6. Дросель насичення без</u> підмагнічування.....	6
<u>Лабораторна робота № 7. Дросельний магнітний</u> підсилювач.....	11
<u>Лабораторна робота № 8. Магнітний підсилювач з</u> самонасиченням.....	16
<u>Лабораторна робота № 9. Дослідження перехідного</u> контактного опору.....	22
<u>Лабораторна робота № 10. Дослідження електродинамічних</u> зусиль в електричних апаратах .....	27
Список використаних джерел посилання .....	32

## ВСТУП

Дисципліна «Електроμηχανічні 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 електроμηχανічних 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 «Електроμηχανічні та контактні явища в електричних апаратах» студенти набувають знань і практичних навичок, необхідних для дослідження фундаментальних процесів, що визначають роботу

електричних апаратів.

У рамках лабораторних робіт студенти ознайомляться з особливостями функціонування дроселя насичення без підмагнічування, принципами роботи дросельного магнітного підсилювача та підсилювача з самонасиченням, а також дослідять перехідний контактний опір і електродинамічні зусилля, що виникають в електричних апаратах, використовуючи сучасні методи вимірювання, моделювання та аналізу.

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 № 6

### Дросель насичення без підмагнічування

**Мета роботи** - Ознайомитися з конструкцією та принципом дії дроселя насичення без підмагнічування, дослідити залежність його індуктивності від струму, визначити вплив насичення осердя на характеристики дроселя, а також вивчити нелінійну поведінку дроселя в ланцюзі змінного струму.

#### 1. Завдання

1. Вивчити конструкцію дроселя насичення без підмагнічування та принцип його роботи.
2. Зібрати схему для дослідження дроселя в ланцюзі змінного струму.
3. Виміряти залежність індуктивності ( $L$ ) дроселя від діючого значення струму ( $I$ ).
4. Дослідити залежність напруги на дроселі ( $U_L$ ) від струму ( $I$ ).
5. Побудувати графіки залежностей  $L(I)$  та  $U_L(I)$ .
6. Проаналізувати вплив насичення осердя на характеристики дроселя та його поведінку в ланцюзі.

#### 2. Теоретичні відомості

Дросель насичення – це нелінійний індуктивний елемент, індуктивність якого залежить від струму, що протікає через нього. Без підмагнічування дросель працює лише за рахунок змінного струму в основній обмотці, без додаткового джерела постійного струму для створення початкового намагнічування.

Конструкція дроселя:

**Осердь:** феромагнітний матеріал (електротехнічна сталь) у вигляді тороїда або U-подібної форми для зменшення магнітного розсіювання.

**Обмотка:** одна котушка, через яку протікає змінний струм.

Принцип дії:

Змінний струм  $I(t)=I_m\sin(2\pi ft)$  в обмотці створює змінне магнітне поле, яке намагнічує осердь. При малих значеннях струму магнітна проникність ( $\mu$ ) осердя висока, і індуктивність дроселя велика. Зі збільшенням струму осердь входить у стан насичення,  $\mu$  різко зменшується, що призводить до зниження індуктивності  $L$ .

Основні співвідношення:

а) Індуктивність дроселя:

$$L = \frac{N^2 \mu \mu_0 S}{l},$$

де  $N$  – кількість витків обмотки,  $\mu$  – відносна магнітна проникність осердя,

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала,  $S$  – площа поперечного перерізу осердя,  $l$  – середня довжина магнітного контуру.

б) Напруга на дроселі:

$$U_L = I \cdot X_L = I \cdot 2\pi f L,$$

де  $X_L$  – індуктивний опір,  $f$  – частота струму.

в) Магнітна індукція:

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

де  $B$  – магнітна індукція в осерді. При  $B > B_{\text{нас}}$  (насичення)  $\mu$  різко падає, зменшуючи  $L$ .

Особливості:

- *Нелінійність*: індуктивність  $L$  зменшується при насиченні осердя, що призводить до спотворення форми струму та напруги.

- *Втрати*: у дроселі виникають втрати на гістерезис і вихрові струми, які залежать від частоти  $f$  та типу матеріалу осердя.

- *Застосування*: дроселі насичення використовуються в системах регулювання напруги, стабілізації струму та магнітних підсилювачах.

**3. Опис лабораторного стенду**

Лабораторний стенд складається з таких елементів:

1. *Дросель насичення*:

- Осердь: тороїдальний, електротехнічна сталь, середня довжина магнітного контуру  $l=0.2$ м, площа перерізу  $S=0.001$ м<sup>2</sup>.

- Обмотка:  $N=400$  витків, активний опір  $R=5\Omega$ .

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

3. *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 спостереження форми напруги та струму.

Ватметр: для вимірювання активної потужності (враховуючи втрати).

4. Резистор у ланцюзі: опір  $R_{\text{навантаження}}=10\Omega$  для створення послідовного ланцюга.

5. Схема підключення: джерело змінного струму  $\rightarrow$  амперметр  $\rightarrow$  дросель  $\rightarrow$  резистор  $\rightarrow$  вольтметр (паралельно дроселю), осцилограф підключений для вимірювання  $U_L$  та  $I$ .

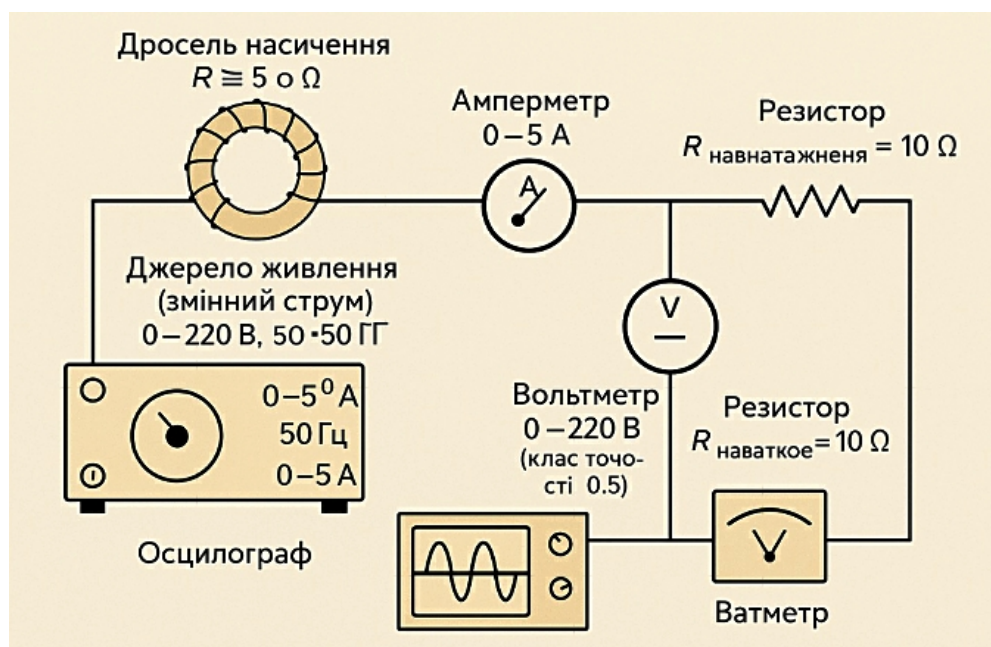


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенду

#### 4. Хід виконання роботи

##### 4.1. Підготовка до роботи

- Ознайомтеся з конструкцією дроселя насичення та схемою стенду.

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

- Переконайтеся, що джерело живлення вимкнене перед початком роботи.

##### 4.2. Вимірювання напруги та струму

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

б) Виміряйте напругу на дроселі  $U_L$  за допомогою вольтметра.

в) Виміряйте активну потужність  $P$  за допомогою ватметра.

- г) Повторіть вимірювання для струмів  $I=0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0\text{A}$ .  
 д) Запишіть результати в таблицю 1:

Таблиця 1: Залежність напруги та потужності від струму

<b>I, А</b>	<b>U<sub>L</sub>, В</b>	<b>P, Вт</b>
0,2		
0,4		
...		

#### 4.3. Визначення індуктивності

- а) Для кожного значення струму обчисліть індуктивний опір:

$$X_L = \frac{U_L}{I}$$

- б) Обчисліть індуктивність:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

де  $f=50\text{Гц}$ .

- в) Запишіть результати в таблицю 2:

Таблиця 2: Залежність індуктивності від струму

<b>I, А</b>	<b>X<sub>L</sub>, Ω</b>	<b>L, Гн</b>
0,2		
0,4		
...		

#### 4.4. Аналіз форми напруги та струму

- За допомогою осцилографа спостерігайте форму напруги  $U_L(t)$  та струму  $I(t)$  при  $I=0.2\text{A}$  (лінійний режим) і  $I=1.5\text{A}$  (режим насичення).
- Зверніть увагу на спотворення форми сигналів у режимі насичення.

#### 4.5. Аналіз результатів

- Побудуйте графіки:
  - L(I).
  - U<sub>L</sub>(I).
- Проаналізуйте, як змінюється індуктивність L зі збільшенням струму.

3. Оцініть вплив насичення осердя на  $U_L$  та  $L$ .
4. Проаналізуйте спотворення сигналів на осцилограмах: поясніть причини нелінійної поведінки.
5. Оцініть втрати в дроселі на основі вимірної потужності  $P$ .

### 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 (принцип дії дроселя насичення, основні формули).
4. Схему стенду та опис приладів.
5. Таблиці 1 і 2 із результатами вимірювань.
6. Графіки залежностей  $L(I)$  та  $U_L(I)$ .
7. Осцилограми  $U_L(t)$  та  $I(t)$  для  $I=0.2A$  та  $I=1.5A$  з аналізом.
8. Аналіз результатів:
  - Як змінюється індуктивність  $L$  зі збільшенням  $I$ ?
  - Як насичення осердя впливає на  $U_L$  та  $L$ ?
  - Які причини спотворення сигналів у режимі насичення?
  - Як втрати в дроселі залежать від струму?
9. Висновки: основні результати, відповідність меті, практичне значення.

### 6. Контрольні запитання

1. Що таке дросель насичення та як він працює без підмагнічування?
2. Як залежить індуктивність дроселя від струму? Чому вона зменшується при насиченні?
3. За якою формулою обчислюється індуктивність дроселя?
4. Як насичення осердя впливає на напругу та форму сигналів?
5. Які втрати виникають у дроселі насичення та як їх зменшити?
6. Яке практичне застосування дроселів насичення в електричних апаратах?
7. Як можна зменшити нелінійні спотворення в дроселі?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

### Дросельний магнітний підсилювач

**Мета роботи** - Ознайомитися з конструкцією та принципом дії дросельного магнітного підсилювача, дослідити його підсилювальні характеристики, залежність вихідного струму від керуючого струму, а також вивчити вплив насичення осердя на роботу підсилювача.

#### 1. Завдання

1. Вивчити конструкцію дросельного магнітного підсилювача та принцип його роботи.
2. Зібрати схему для дослідження магнітного підсилювача.
3. Дослідити залежність вихідного струму ( $I_{\text{вих}}$ ) від керуючого струму ( $I_{\text{кер}}$ ).
4. Виміряти напругу на навантаженні ( $U_{\text{нав}}$ ) при різних значеннях керуючого струму.
5. Побудувати графіки залежностей  $I_{\text{вих}}(I_{\text{кер}})$  та  $U_{\text{нав}}(I_{\text{кер}})$ .
6. Проаналізувати вплив насичення осердя на підсилювальні характеристики та визначити коефіцієнт підсилення.

#### 2. Теоретичні відомості

Дросельний магнітний підсилювач – це пристрій, який використовує нелінійні властивості феромагнітного осердя для підсилення сигналів. Він складається з двох обмоток: робочої (підключеної до змінного струму) та керуючої (підключеної до постійного струму).

##### а) Конструкція:

- *Осердя*: два феромагнітні осердя (електротехнічна сталь) для зменшення магнітного зв'язку між робочими обмотками.
- *Робочі обмотки*: дві обмотки, підключені до джерела змінного струму через навантаження, зазвичай у протифазі для компенсації парних гармонік.
- *Керуюча обмотка*: одна обмотка, через яку протікає постійний струм для керування насиченням осердя.

##### б) Принцип дії:

Магнітний підсилювач працює на основі зміни індуктивності робочих обмоток через насичення осердя. Керуючий струм  $I_{\text{кер}}$  у

керуючій обмотці створює постійне магнітне поле, яке намагнічує осердя. Змінний струм у робочих обмотках створює змінне магнітне поле. При малому  $I_{\text{кер}}$  осердя ненасичене, індуктивність робочих обмоток висока, а вихідний струм малий. Зі збільшенням  $I_{\text{кер}}$  осердя насичується, індуктивність падає, що збільшує вихідний струм  $I_{\text{вих}}$ .

в) Основні співвідношення:

1. Індуктивність робочих обмоток:

$$L = \frac{N_{\text{роб}}^2 \mu \mu_0 S}{l},$$

де  $N_{\text{роб}}$  – кількість витків робочої обмотки,  $\mu$  – магнітна проникність осердя,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,  $S$  – площа перерізу осердя,  $l$  – довжина магнітного контуру.

2. Напруженість магнітного поля від керуючого струму:

$$H_{\text{кер}} = \frac{N_{\text{кер}} I_{\text{кер}}}{l},$$

де  $N_{\text{кер}}$  – кількість витків керуючої обмотки.

3. Вихідний струм:

$$I_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{зм}}}{Z_{\text{роб}} + R_{\text{нав}}},$$

де  $U_{\text{зм}}$  – напруга джерела змінного струму,  $Z_{\text{роб}} = 2\pi f L$  – індуктивний опір робочих обмоток,  $R_{\text{нав}}$  – опір навантаження.

4. Особливості:

- *Нелінійність*: при насиченні осердя ( $B > B_{\text{нас}}$ ) магнітна проникність  $\mu$  різко падає, що зменшує  $L$  і збільшує  $I_{\text{вих}}$ .

- *Коефіцієнт підсилення*: визначається як  $K = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{кер}}}$ .

- *Втрати*: гістерезис і вихрові струми в осерді призводять до нагріву та зниження ефективності.

### 3. Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд складається з таких елементів:

1. Магнітний підсилювач:

- *Осердя*: два тороїдальних осердя з електротехнічної сталі,  $l=0.2\text{м}$ ,  $S=0.001\text{м}^2$ .

- *Робочі обмотки*: 2 обмотки по  $N_{роб}=300$  витків, активний опір кожної  $R_{роб}=4\Omega$ .

- *Керуюча обмотка*:  $N_{кер}=500$  витків, опір  $R_{кер}=10\Omega$ .

## 2. Джерела живлення:

- Змінний струм: 220 В, 50 Гц, регульоване (0–5 А).

- Постійний струм: регульоване джерело для керуючої обмотки (0–1 А, 0–10 В).

## 3. Вимірювальні прилади:

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

- Амперметр (постійний струм): діапазон 0–1 А, клас точності 0.5.

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

- Осцилограф: для спостереження форми вихідного струму.

## 4. Навантаження: резистор $R_{нав}=20\Omega$ .

## 5. Схема підключення:

- Робочі обмотки: джерело змінного струму → робочі обмотки (у протифазі) → навантаження → амперметр → вольтметр (паралельно навантаженню).

- Керуюча обмотка: джерело постійного струму → амперметр → керуюча обмотка.

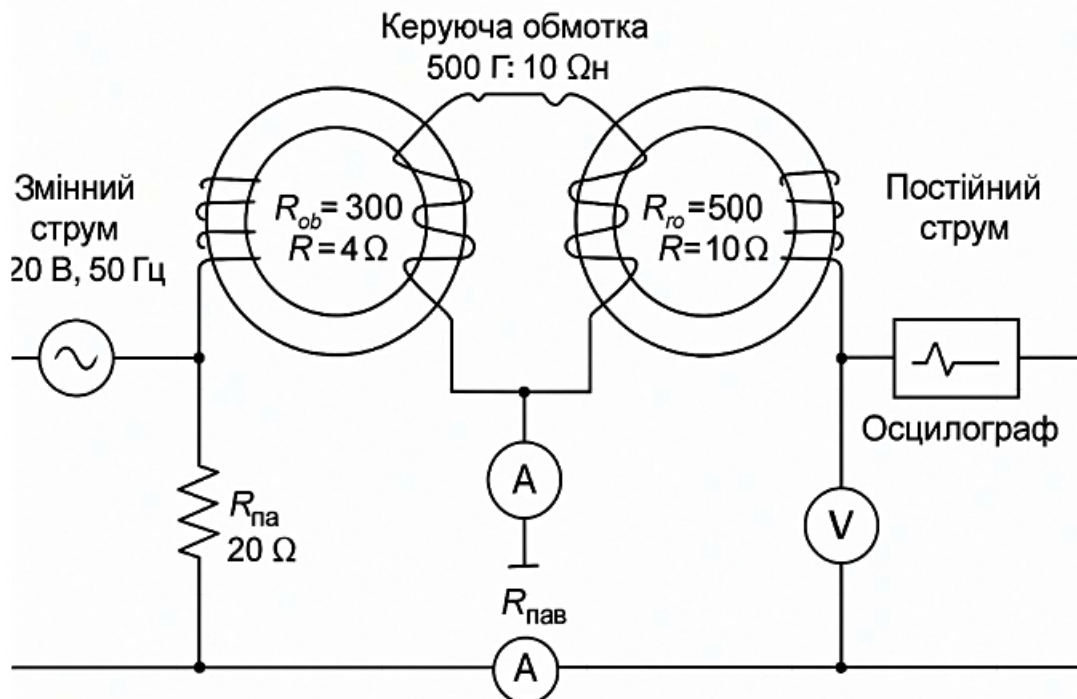


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенду

#### 4. Порядок виконання роботи

##### 4.1. Підготовка до роботи

1. Ознайомтеся з конструкцією магнітного підсилювача та схемою стенду.
2. Перевірте справність усіх приладів (амперметри, вольтметр, осцилограф).
3. Переконайтеся, що обидва джерела живлення вимкнені перед початком роботи.

##### 4.2. Вимірювання вихідного струму та напруги

- а) Увімкніть джерело змінного струму та встановіть напругу  $U_{зм}=220$  В.
- б) Увімкніть джерело постійного струму та встановіть керуючий струм  $I_{кер}=0$  А.
- в) Виміряйте вихідний струм  $I_{вих}$  у ланцюзі навантаження та напругу на навантаженні  $U_{нав}=I_{вих} \cdot R_{нав}$ .
- г) Збільшуйте  $I_{кер}$  з кроком 0.2 А (0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 А) і для кожного значення вимірюйте  $I_{вих}$  та  $U_{нав}$ .
- д) Запишіть результати в таблицю 1:

Таблиця 1: Залежність вихідного струму та напруги від керуючого струму

$I_{кер}, \text{ А}$	$I_{вих}, \text{ А}$	$U_{нав}, \text{ В}$
0,2		
0,4		
...		

##### 4.3. Аналіз форми вихідного струму

1. За допомогою осцилографа спостерігайте форму вихідного струму  $I_{вих}(t)$  при  $I_{кер}=0$  А (ненасичений режим) та  $I_{кер}=0.8$  А (режим насичення).
2. Зверніть увагу на спотворення форми сигналу в режимі насичення.

##### 4.4. Визначення коефіцієнта підсилення

На основі таблиці 1 обчисліть коефіцієнт підсилення:

$$K = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{кер}}$$

для лінійної ділянки залежності (наприклад, між  $I_{кер}=0.2$  А та  $I_{кер}=0.6$  А).

#### 4.5. Аналіз результатів

а) Побудуйте графіки:

$$I_{вих}(I_{кер}).$$

$$U_{нав}(I_{кер}).$$

б) Проаналізуйте, як змінюється  $I_{вих}$  зі збільшенням  $I_{кер}$ .

в) Оцініть вплив насичення осердя на підсилювальні характеристики.

г) Проаналізуйте спотворення сигналу на осцилограмах: поясніть причини нелінійної поведінки.

д) Оцініть коефіцієнт підсилення та його залежність від режиму роботи.

### 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 магнітного підсилювача, основні формули).

- Схему стенду та опис приладів.

- Таблицю 1 із результатами вимірювань.

- Графіки залежностей  $I_{вих}(I_{кер})$  та  $U_{нав}(I_{кер})$ .

- Осцилограми  $I_{вих}(t)$  для  $I_{кер}=0$ А та  $I_{кер}=0.8$ А з аналізом.

- Розрахунок коефіцієнта підсилення  $K$ .

- Аналіз результатів:

Як змінюється  $I_{вих}$  зі збільшенням  $I_{кер}$ ?

Як насичення осердя впливає на підсилювальні характеристики?

Які причини спотворення вихідного сигналу?

Як коефіцієнт підсилення залежить від режиму роботи?

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

### 6. Контрольні запитання

1. Що таке дросельний магнітний підсилювач та як він працює?

2. Як керуючий струм впливає на індуктивність робочих обмоток?

3. За якою формулою обчислюється вихідний струм магнітного підсилювача?
4. Як насичення осердя впливає на підсилювальні характеристики?
5. Які втрати виникають у магнітному підсилювачі та як їх зменшити?
6. Яке практичне застосування магнітних підсилювачів у електричних апаратах?
7. Як можна підвищити коефіцієнт підсилення магнітного підсилювача?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8**

### **Магнітний підсилювач з самонасиченням**

**Мета роботи** - Ознайомитися з конструкцією та принципом дії магнітного підсилювача із самонасиченням, дослідити його підсилювальні характеристики, залежність вихідного струму від керуючого струму, а також вивчити особливості роботи в режимі самонасичення та вплив випрямлячів на його поведінку.

#### **1. Завдання**

1. Вивчити конструкцію магнітного підсилювача із самонасиченням та принцип його роботи.
2. Зібрати схему для дослідження магнітного підсилювача із самонасиченням.
3. Дослідити залежність вихідного струму ( $I_{\text{вих}}$ ) від керуючого струму ( $I_{\text{кер}}$ ).
4. Виміряти напругу на навантаженні ( $U_{\text{нав}}$ ) при різних значеннях керуючого струму.
5. Побудувати графіки залежностей  $I_{\text{вих}}(I_{\text{кер}})$  та  $U_{\text{нав}}(I_{\text{кер}})$ .
6. Проаналізувати вплив самонасичення та випрямлячів на підсилювальні характеристики й визначити коефіцієнт підсилення.

#### **2. Теоретичні відомості**

Магнітний підсилювач із самонасиченням – це різновид магнітного підсилювача, у якому використовуються випрямлячі (діоди) для автоматичного насичення осердя під час кожного півперіоду змінного

струму. Це дозволяє досягти вищого коефіцієнта підсилення порівняно зі звичайним дросельним магнітним підсилувачем.

а) Конструкція:

- *Осердя:* два феромагнітні осердя (електротехнічна сталь) для розділення магнітних потоків.

- *Робочі обмотки:* дві обмотки, підключені до джерела змінного струму через навантаження та випрямлячі (діоди).

- *Керуюча обмотка:* підключена до джерела постійного струму для створення керуючого магнітного поля.

- *Випрямлячі:* діоди в ланцюзі робочих обмоток забезпечують односторонній потік струму, що сприяє самонасиченню.

б) Принцип дії:

Магнітний підсилувач із самонасиченням працює за рахунок зміни індуктивності робочих обмоток, викликаній насиченням осердя. Керуючий струм  $I_{\text{кер}}$  у керуючій обмотці створює постійне магнітне поле, яке частково намагнічує осердя. Змінний струм у робочих обмотках, проходячи через випрямлячі, тече лише в одному напрямку, що сприяє швидкому насиченню осердя під час кожного півперіоду. У ненасиченому стані індуктивність робочих обмоток висока, і вихідний струм  $I_{\text{вих}}$  малий. При насиченні (під дією  $I_{\text{кер}}$  та змінного струму) індуктивність падає, що різко збільшує  $I_{\text{вих}}$ .

в) Основні співвідношення:

1. Індуктивність робочих обмоток:

$$L = \frac{N_{\text{роб}}^2 \mu \mu_0 S}{l},$$

де  $N_{\text{роб}}$  – кількість витків робочої обмотки,  $\mu$  – магнітна проникність осердя,

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м,  $S$  – площа перерізу осердя,  $l$  – довжина магнітного контуру.

2. Напруженість магнітного поля від керуючого струму:

$$H_{\text{кер}} = \frac{N_{\text{кер}} I_{\text{кер}}}{l},$$

де  $N_{\text{кер}}$  – кількість витків керуючої обмотки.

3. Вихідний струм (середнє значення):

$$I_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{зм, випр}}}{R_{\text{наз}}},$$

де  $U_{зм, випр}$  – випрямлена напруга на навантаженні,  $R_{нав}$  – опір навантаження.

г) Особливості:

- *Самонасичення:* випрямлячі дозволяють осердю насичуватися під час кожного півперіоду, що підвищує чутливість підсилувача до малих змін  $I_{кер}$ .

- *Коефіцієнт підсилення:* визначається як  $K = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{кер}}$ , і він вищий, ніж у звичайного магнітного підсилувача.

- *Нелінійність:* у режимі насичення форма вихідного струму спотворюється через нелінійну залежність  $\mu$  від магнітного поля.

- *Втрати:* гістерезис і вихрові струми в осерді спричиняють нагрів і зниження ефективності.

### 3. Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд складається з таких елементів:

1. Магнітний підсилувач із самонасиченням:

- Осердя: два тороїдальних осердя з електротехнічної сталі,  $l=0.2\text{м}$ ,  $S=0.001\text{м}^2$ .

- Робочі обмотки: 2 обмотки по  $N_{роб}=300$  витків, активний опір кожної  $R_{роб}=4\Omega$ .

- Керуюча обмотка:  $N_{кер}=500$  витків, опір  $R_{кер}=10\Omega$ .

- Випрямлячі: два діоди (наприклад, 1N4007) для кожної робочої обмотки.

2. Джерела живлення:

- Змінний струм: 220 В, 50 Гц, регульоване (0–5 А).

- Постійний струм: регульоване джерело для керуючої обмотки (0–1 А, 0–10 В).

3. Вимірювальні прилади:

- Амперметр (змінний струм): діапазон 0–5 А (середнє значення після випрямлення), клас точності 0.5.

- Амперметр (постійний струм): діапазон 0–1 А, клас точності 0.5.

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

- Осцилограф: для спостереження форми вихідного струму.

4. Навантаження: резистор  $R_{нав}=20\Omega$ .

### 5. Схема підключення:

- Робочі обмотки: джерело змінного струму → робочі обмотки → діоди → навантаження → амперметр → вольтметр (паралельно навантаженню).

- Керуюча обмотка: джерело постійного струму → амперметр → керуюча обмотка.

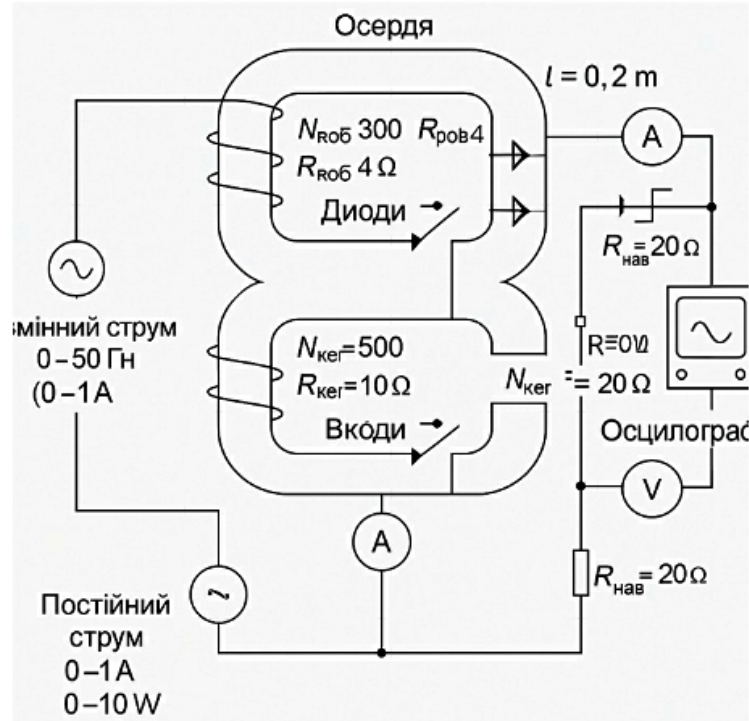


Рисунок 1 –Схема лабораторного станду

## 4. Порядок виконання роботи

### 4.1. Підготовка до роботи

- Ознайомтеся з конструкцією магнітного підсилювача із самонасиченням та схемою станду.

- Перевірте справність усіх приладів (амперметри, вольтметр, осцилограф).

- Переконайтеся, що обидва джерела живлення вимкнені перед початком роботи.

### 4.2. Вимірювання вихідного струму та напруги

1. Увімкніть джерело змінного струму та встановіть напругу  $U_{зм}=220В$ .

2. Увімкніть джерело постійного струму та встановіть керуючий струм  $I_{кер}=0А$ .

3. Виміряйте вихідний струм  $I_{вих}$  у ланцюзі навантаження (середнє

значення після випрямлення) та напругу на навантаженні  $U_{\text{нав}} = I_{\text{вих}} \cdot R_{\text{нав}}$ .

4. Збільшуйте  $I_{\text{кер}}$  з кроком 0.2 А (0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 А) і для кожного значення вимірюйте  $I_{\text{вих}}$  та  $U_{\text{нав}}$ .

5. Запишіть результати в таблицю 1:

Таблиця 1: Залежність вихідного струму та напруги від керуючого струму

$I_{\text{кер}}, \text{ А}$	$I_{\text{вих}}, \text{ А}$	$U_{\text{нав}}, \text{ В}$
0,2		
0,4		
...		

#### 4.3. Аналіз форми вихідного струму

а) За допомогою осцилографа спостерігайте форму вихідного струму  $I_{\text{вих}}(t)$  при

$I_{\text{кер}}=0\text{А}$  (ненасичений режим) та  $I_{\text{кер}}=0.8\text{А}$  (режим самонасичення).

б) Зверніть увагу на імпульсний характер струму після випрямлення та його залежність від  $I_{\text{кер}}$ .

#### 4.4. Визначення коефіцієнта підсилення

На основі таблиці 1 обчисліть коефіцієнт підсилення:

$$K = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{кер}}},$$

для лінійної ділянки залежності (наприклад, між  $I_{\text{кер}}=0.2\text{А}$  та  $I_{\text{кер}}=0.6\text{А}$ ).

#### 4.5. Аналіз результатів

1. Побудуйте графіки:

$$I_{\text{вих}}(I_{\text{кер}}).$$

$$U_{\text{нав}}(I_{\text{кер}}).$$

2. Проаналізуйте, як змінюється  $I_{\text{вих}}$  зі збільшенням  $I_{\text{кер}}$ .

3. Оцініть вплив самонасичення та випрямлячів на підсилювальні характеристики.

4. Проаналізуйте форму сигналу на осцилограмах: поясніть імпульсний характер струму та його залежність від  $I_{\text{кер}}$ .

5. Оцініть коефіцієнт підсилення та його залежність від режиму роботи.

## 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 магнітного підсилювача із самонасиченням, основні формули).
- Схему стенду та опис приладів.
- Таблицю 1 із результатами вимірювань.
- Графіки залежностей  $I_{\text{вих}}(I_{\text{кер}})$  та  $U_{\text{нав}}(I_{\text{кер}})$ .
- Осцилограми  $I_{\text{вих}}(t)$  для  $I_{\text{кер}}=0\text{А}$  та  $I_{\text{кер}}=0.8\text{А}$  з аналізом.
- Розрахунок коефіцієнта підсилення  $K$ .
- Аналіз результатів:
  - Як змінюється  $I_{\text{вих}}$  зі збільшенням  $I_{\text{кер}}$ ?
  - Як самонасичення та випрямлячі впливають на підсилювальні характеристики?
  - Які особливості форми вихідного струму в режимі самонасичення?
  - Як коефіцієнт підсилення залежить від режиму роботи?
- Висновки: основні результати, відповідність меті, практичне значення.

## 6. Контрольні запитання

1. Що таке магнітний підсилювач із самонасиченням та як він працює?
2. Яка роль випрямлячів у схемі магнітного підсилювача із самонасиченням?
3. Як керуючий струм впливає на індуктивність робочих обмоток?
4. Як самонасичення впливає на підсилювальні характеристики?
5. Які втрати виникають у магнітному підсилювачі із самонасиченням та як їх зменшити?
6. Яке практичне застосування магнітних підсилювачів із самонасиченням у електричних апаратах?
7. Чим магнітний підсилювач із самонасиченням відрізняється від звичайного дросельного магнітного підсилювача?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

### Дослідження перехідного контактного опору

**Мета роботи** - Ознайомитися з поняттям перехідного контактного опору в електричних апаратах, дослідити залежність контактного опору від сили притискання контактів, струму в ланцюзі та стану контактної поверхні, а також вивчити вплив цих факторів на електричні характеристики контактів.

#### 1. Завдання

- Вивчити природу перехідного контактного опору та фактори, що на нього впливають.
- Зібрати схему для дослідження контактний опору.
- Виміряти перехідний контактний опір ( $R_k$ ) при різних значеннях сили притискання ( $F$ ).
- Дослідити залежність контактний опору від струму ( $I$ ) в ланцюзі.
- Оцінити вплив стану контактної поверхні (чиста поверхня, окислена поверхня) на  $R_k$ .
- Побудувати графіки залежностей  $R_k(F)$  та  $R_k(I)$ .
- Проаналізувати вплив досліджених факторів на перехідний контактний опір.

#### 2. Теоретичні відомості

Перехідний контактний опір ( $R_k$ ) – це опір, що виникає в місці контакту двох провідників через обмежену площу дотику та наявність поверхневих плівок (оксидів, забруднень). Він залежить від кількох факторів: сили притискання, стану поверхні контактів, матеріалу контактів, струму в ланцюзі та температури.

##### а) Природа контактний опору:

Контакт між двома провідниками відбувається не по всій номінальній поверхні, а лише в окремих точках (а-контактах) через мікро нерівності поверхні. Загальна площа реального контакту ( $S_{\text{реал}}$ ) значно менша за номінальну ( $S_{\text{ном}}$ ), що створює додатковий опір:

- Опір стягнення: виникає через звуження ліній струму в точках контакту.
- Плівковий опір: спричинений наявністю оксидних або

забруднених плівок на поверхні контактів.

б) Основні співвідношення:

1. Перехідний контактний опір:

$$R_k = \frac{\rho}{2a} + R_{\text{плівка}},$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу контактів,  $a$  – радіус точки контакту,  $R_{\text{плівка}}$  – опір поверхневої плівки.

2. Залежність від сили притискання:

$$a \propto \sqrt[3]{\frac{F}{H}},$$

де  $F$  – сила притискання,  $H$  – твердість матеріалу контактів. Таким чином:

$$R_k \propto \frac{1}{\sqrt[3]{F}}.$$

3. Вимірювання контактної опору:

$$R_k = \frac{U_k}{I},$$

де  $U_k$  – падіння напруги на контактах,  $I$  – струм у ланцюзі.

в) Фактори впливу:

- *Сила притискання (F):* зі збільшенням  $F$  зростає кількість точок контакту, що зменшує  $R_k$ .

- *Струм (I):* при великих струмах можливе локальне нагрівання контактів, що може зменшити  $R_k$  через руйнування плівок.

- *Стан поверхні:* оксиди, забруднення або корозія збільшують  $R_k$ .

- *Матеріал:* низький питомий опір (наприклад, срібло, мідь) зменшує  $R_k$ .

### 3. **Опис лабораторного стенду**

Лабораторний стенд складається з таких елементів:

1. Контактна пара:

- Матеріал: мідь (два плоских контакти діаметром 10 мм).

- Один контакт закріплений, другий рухомий із можливістю регулювання сили притискання.

2. Джерело живлення: регульоване джерело постійного струму (0–5 А, 0–10 В).

3. Механізм притискання: гвинтовий механізм із динамометром для вимірювання сили притискання (0–50 Н).

4. Вимірювальні прилади:

- Амперметр: діапазон 0–5 А, клас точності 0.5.
- Мікрвольтметр: діапазон 0–500 мВ, клас точності 0.5 (для вимірювання падіння напруги на контактах).
- Осцилограф: для спостереження перехідних процесів (опціонально).

#### 5. Підготовка поверхні:

- Чиста поверхня: контакти зачищені та знежирені.
- Окислена поверхня: контакти піддані штучному окисленню (наприклад, нагріванням).

6. Схема підключення: джерело живлення → амперметр → контактна пара → навантаження ( $R_{\text{наб}}=1\Omega$ ) → мікрвольтметр (паралельно контактам).

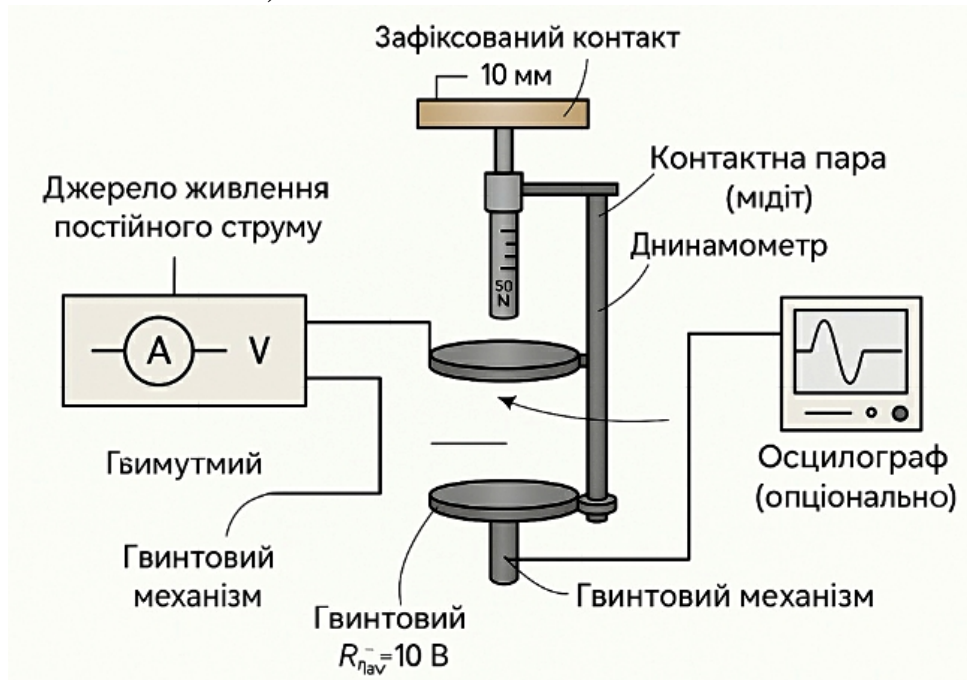


Рисунок 1 – Схема лабораторного стану

#### 4. Порядок виконання роботи

##### 4.1. Підготовка до роботи

- Ознайомтеся з конструкцією контактної пари та схемою стану.
- Перевірте справність усіх приладів (амперметр, мікрвольтметр, динамометр).
- Переконайтеся, що джерело живлення вимкнене перед початком роботи.
- Підготуйте контакти: одна пара – чиста поверхня, друга пара – окислена поверхня.

#### 4.2. Дослідження залежності контактного опору від сили притискання

- а) Встановіть чисту контактну пару в стенд.  
 б) Увімкніть джерело живлення та встановіть струм  $I=1\text{A}$ .  
 в) За допомогою гвинтового механізму встановіть силу притискання  $F=5\text{H}$ .  
 г) Виміряйте падіння напруги  $U_k$  на контактах за допомогою мікрровольтметра.  
 д) Обчисліть контактний опір:

$$R_k = \frac{U_k}{I}.$$

- ж) Повторіть вимірювання для  $F=10,20,30,40,50\text{H}$ .  
 з) Запишіть результати в таблицю 1:

Таблиця 1: Залежність контактного опору від сили притискання ( $I=1\text{A}$ )

<b>F, Н</b>	<b>U<sub>к</sub>, мВ</b>	<b>R<sub>к</sub>, мОм</b>
5,0		
10,0		
...		

#### 4.3. Дослідження залежності контактного опору від струму

- Встановіть силу притискання  $F=30\text{H}$ .
- Змініть струм у ланцюзі:  $I=0.5,1.0,2.0,3.0,4.0\text{A}$ .
- Для кожного значення струму виміряйте  $U_k$  та обчисліть  $R_k$ .
- Запишіть результати в таблицю 2:

Таблиця 2: Залежність контактного опору від струму ( $F=30\text{H}$ )

<b>I, А</b>	<b>U<sub>к</sub>, мВ</b>	<b>R<sub>к</sub>, мОм</b>
0,5		
1,0		
...		

#### 4.4. Дослідження впливу стану поверхні

- а) Повторіть експеримент із пункту 5.2, використовуючи окислену контактну пару ( $I=1\text{A}$ ,  $F=5,10,20,30,40,50\text{H}$ ).  
 б) Запишіть результати в таблицю 3:

Таблиця 3: Залежність контактного опору від сили притискання для окисленої поверхні ( $I=1\text{ A}$ )

<b>F, Н</b>	<b>U<sub>к</sub>, мВ</b>	<b>R<sub>к</sub>, МОм</b>
5		
10		
...		

#### 4.5. Аналіз результатів

##### 1. Побудуйте графіки:

$R_k(F)$  для чистої та окисленої поверхні на одному графіку.

$R_k(I)$  для  $F=30\text{H}$ .

2. Проаналізуйте, як змінюється  $R_k$  зі збільшенням сили притискання та струму.

3. Порівняйте  $R_k$  для чистої та окисленої поверхні: оцініть вплив оксидної плівки.

4. Поясніть можливі відхилення експериментальних даних від теоретичних залежностей.

#### 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 (природа контактної опору, основні формули, фактори впливу).

- Схему стенду та опис приладів.

- Таблиці 1, 2, 3 із результатами вимірювань.

- Графіки залежностей  $R_k(F)$  та  $R_k(I)$ .

- Аналіз результатів:

Як змінюється  $R_k$  зі збільшенням  $F$  та  $I$ ?

Як стан поверхні впливає на  $R_k$  ?

Які фактори найбільше впливають на контактний опір?

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

#### 6. Контрольні запитання

1. Що таке перехідний контактний опір і з чого він складається?

2. Як сила притискання впливає на контактний опір?
3. Чому контактний опір залежить від струму в ланцюзі?
4. Як стан контактної поверхні впливає на  $R_k$ ?
5. Яке практичне значення має дослідження контактного опору для електричних апаратів?
6. Як можна зменшити перехідний контактний опір у реальних апаратах?
7. Чому мідь або срібло часто використовують для контактів?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

### Дослідження електродинамічних зусиль в електричних апаратах

**Мета роботи** - Ознайомитися з природою електродинамічних зусиль, що виникають в електричних апаратах, дослідити залежність цих зусиль від величини струму, геометричних параметрів провідників та їх взаємного розташування, а також вивчити вплив електродинамічних зусиль на конструкцію електричних апаратів.

#### 1. Завдання

- Вивчити природу електродинамічних зусиль та їх значення в електричних апаратах.
- Зібрати схему для дослідження електродинамічних зусиль.
- Виміряти електродинамічні зусилля ( $F_{ед}$ ) між провідниками при різних значеннях струму ( $I$ ).
- Дослідити вплив відстані між провідниками ( $d$ ) на величину електродинамічних зусиль.
- Побудувати графіки залежностей  $F_{ед}(I)$  та  $F_{ед}(d)$ .
- Проаналізувати вплив електродинамічних зусиль на конструктивні елементи електричних апаратів.

#### 2. Теоретичні відомості

Електродинамічні зусилля виникають між провідниками зі струмом внаслідок взаємодії їхніх магнітних полів. Ці зусилля є важливим

фактором при проектуванні електричних апаратів, оскільки можуть викликати механічні деформації, вібрацію або руйнування конструктивних елементів.

а) Природа електродинамічних зусиль:

- Згідно із законом Ампера, на провідник зі струмом  $I$  у магнітному полі діє сила:

$$F = ILB \sin \theta,$$

де  $I$  – струм,  $L$  – довжина провідника,  $B$  – магнітна індукція,  $\theta$  – кут між провідником і напрямком поля.

Для двох паралельних провідників зі струмами  $I_1$  та  $I_2$ , розташованих на відстані  $d$ , електродинамічна сила на одиницю довжини визначається за формулою:

$$F_{ед} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \cdot L,$$

де  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала,  $L$  – довжина провідників,  $d$  – відстань між провідниками.

б) Особливості:

- Якщо струми в провідниках течуть у *одному напрямку*, провідники притягуються ( $F_{ед}$  додатна).

- Якщо струми течуть у *протилежних напрямках*, провідники відштовхуються ( $F_{ед}$  від'ємна).

- Зусилля пропорційні квадрату струму ( $F_{ед} \propto I^2$ , якщо  $I_1 = I_2 = I$ ).

- Зусилля обернено пропорційні відстані між провідниками ( $F_{ед} \propto 1/d$ ).

в) Практичне значення:

Електродинамічні зусилля враховуються при проектуванні шинопроводів, котушок, контакторів, автоматичних вимикачів тощо. Великі зусилля можуть викликати:

- Механічні деформації провідників.
- Розрив контактів у комутаційних апаратах.
- Вібрацію та шум.

г) Основні співвідношення:

1. Для двох паралельних провідників зі струмом  $I$ :

$$F_{ед} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi d} \cdot L.$$

2. Максимальне зусилля при короткому замиканні (піковий струм  $I_{\max}$ ):

$$F_{\text{ед, макс}} = \frac{\mu_0 I_{\text{макс}}^2}{2\pi d} \cdot L.$$

### 3. Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд складається з таких елементів:

#### 1. Модель провідників:

- Два паралельних мідних провідника довжиною  $L=0.5\text{ м}$ , діаметром  $5\text{ мм}$ .

- Один провідник закріплений, другий рухомий із можливістю зміни відстані  $d$  ( $5\text{--}50\text{ мм}$ ).

2. Джерело живлення: регульоване джерело постійного струму ( $0\text{--}50\text{ А}$ ,  $0\text{--}20\text{ В}$ ) для створення стабільного струму.

3. Механізм вимірювання зусиль: динамометр ( $0\text{--}100\text{ Н}$ ) для вимірювання електродинамічних зусиль між провідниками.

#### 4. Вимірювальні прилади:

- Амперметр: діапазон  $0\text{--}50\text{ А}$ , клас точності  $0.5$ .

- Мілівольтметр: діапазон  $0\text{--}20\text{ В}$ , клас точності  $0.5$  (для контролю напруги).

- Лінійка: для вимірювання відстані  $d$  з точністю  $0.1\text{ мм}$ .

5. Схема підключення: джерело живлення  $\rightarrow$  амперметр  $\rightarrow$  провідники (підключені послідовно для однакового струму)  $\rightarrow$  динамометр (для вимірювання зусиль між провідниками).

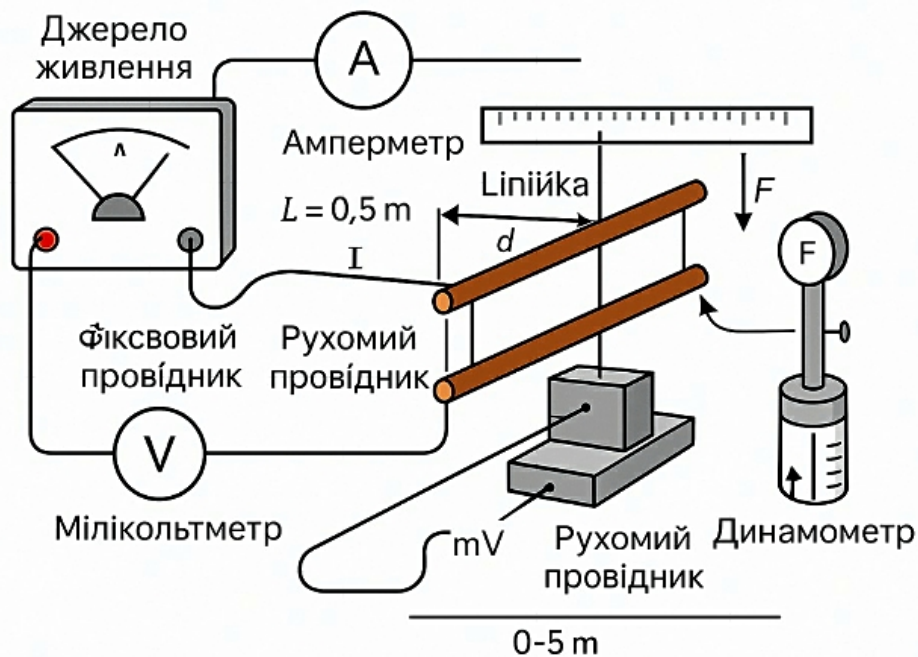


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенду

#### 4. Порядок виконання роботи

##### 4.1. Підготовка до роботи

- Ознайомтеся з конструкцією стенду та розташуванням провідників.

- Перевірте справність усіх приладів (амперметр, мілівольтметр, динамометр).

- Переконайтеся, що джерело живлення вимкнене перед початком роботи.

- Встановіть відстань між провідниками  $d=10\text{мм}$ .

##### 4.2. Дослідження залежності електродинамічних зусиль від струму

а) Увімкніть джерело живлення та встановіть струм  $I=10\text{А}$ .

б) За допомогою динамометра виміряйте електродинамічну силу  $F_{\text{ед}}$  між провідниками.

в) Повторіть вимірювання для струмів  $I=15,20,25,30,35,40\text{А}$ .

г) Запишіть результати в таблицю 1:

Таблиця 1: Залежність електродинамічних зусиль від струму ( $d=10\text{мм}$ )

<b>I, А</b>	<b><math>F_{\text{ед}}</math>, Н</b>
10	
15	
...	

##### 4.3 Дослідження залежності електродинамічних зусиль від відстані

- Встановіть струм  $I=30\text{А}$ .

- Змініть відстань між провідниками:  $d=5,10,15,20,30,40\text{мм}$ .

- Для кожної відстані виміряйте  $F_{\text{ед}}$  за допомогою динамометра.

- Запишіть результати в таблицю 2:

Таблиця 2: Залежність електродинамічних зусиль від відстані ( $I=30\text{А}$ )

<b>d, мм</b>	<b><math>F_{\text{ед}}</math>, Н</b>
5	
10	
...	

##### 4.4. Перевірка напрямку зусиль

- Змініть напрямок струму в одному з провідників (перепідключіть провідник до джерела живлення).
- Встановіть  $I=30\text{A}$ ,  $d=10\text{мм}$ .
- Виміряйте  $F_{\text{ед}}$  і визначте, чи провідники притягуються, чи відштовхуються.

#### 4.5. Аналіз результатів

1. Побудуйте графіки:

$F_{\text{ед}}(I)$  для  $d=10\text{мм}$ .

$F_{\text{ед}}(d)$  для  $I=30\text{A}$ .

2. Порівняйте експериментальні значення  $F_{\text{ед}}$  із теоретичними, розрахованими за формулою:

$$F_{\text{ед}} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi d} \cdot L,$$

де  $L=0.5\text{м}$ .

3. Проаналізуйте залежність  $F_{\text{ед}}$  від  $I$  та  $d$ .

4. Оцініть вплив зміни напрямку струму на характер зусиль (притягання чи відштовхування).

#### 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 (природа електродинамічних зусиль, основні формули).
- Схему стенду та опис приладів.
- Таблиці 1 і 2 із результатами вимірювань.
- Графіки залежностей  $F_{\text{ед}}(I)$  та  $F_{\text{ед}}(d)$ .
- Розрахунки теоретичних значень  $F_{\text{ед}}$  та порівняння з експериментальними даними.
- Аналіз результатів:
  - Як змінюється  $F_{\text{ед}}$  зі збільшенням  $I$  та  $d$ ?
  - Як напрямок струму впливає на характер зусиль?
  - Яке практичне значення мають електродинамічні зусилля для електричних апаратів?
- Висновки: основні результати, відповідність меті, практичне значення.

## **6. Контрольні запитання**

1. Що таке електродинамічні зусилля та як вони виникають?
2. За якою формулою обчислюється сила взаємодії між двома провідниками зі струмом?
3. Як залежить електродинамічна сила від струму та відстані між провідниками?
4. Чому провідники зі струмами в одному напрямку притягуються, а в протилежних – відштовхуються?
5. Яке практичне значення має врахування електродинамічних зусиль при проектуванні електричних апаратів?
6. Як електродинамічні зусилля впливають на роботу шинопроводів або контакторів?
7. Як можна зменшити вплив електродинамічних зусиль у реальних апаратах?

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

### **Основна література**

1. Кравчук Б. П. Електричні машини та апарати: підручник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 380 с.
2. Грінберг О. М., та ін. Електричні апарати. Частина 2. Захисні та регулювальні апарати: навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 236 с.
3. Khinchin A. I., Boldea I. The Saturable Reactor and Magnetic Amplifier Technology. – CRC Press, 2017. – 402 p.
4. Sen P. C. Principles of Electric Machines and Power Electronics. – Wiley, 2013. – 824 p.
5. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. D. Electric Machinery. – McGraw-Hill, 2014. – 720 p.

### **Додаткова література**

6. Коваленко І. Д. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітні процеси: підручник. – Київ: Либідь, 2016. – 368 с.
7. Rashid M. H. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications. – Academic Press, 2017. – 1520 p.
8. Blume L. F., Boyajian H. Saturated Reactors and Magnetic Amplifiers. – New York: Dover Publications, 2015. – 328 p.

9. Franklin D. E. Contact Resistance and Reliability of Electrical Connections. – Springer, 2018. – 290 p.
10. Holm R. Electric Contacts: Theory and Application. – Springer, 2013. – 484 p.

### **Интернет-ресурсы**

11. Electrical4U. Magnetic Amplifier – Working, Types and Applications. – Режим доступа: <https://www.electrical4u.com/magnetic-amplifier>
12. All About Circuits. Saturable Reactor (Magnetic Amplifier) Basics. – Режим доступа: <https://www.allaboutcircuits.com>
13. HyperPhysics (Georgia State University). Contact Resistance and Electrodynamical Forces. – Режим доступа: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>
14. ScienceDirect. Electrodynamical Forces in Electrical Equipment. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com>
15. Electronics Tutorials. Electromagnetic Force and Applications. – Режим доступа: <https://www.electronics-tutorials.ws>