



Міністерство освіти і науки України

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електропостачання та енергетичного  
менеджменту**

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи  
«Дослідження характеристик магнітних матеріалів»  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної форми навчання зі спеціальності  
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Харків  
2023**

Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електропостачання та енергетичного  
менеджменту**

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи  
«Дослідження характеристик магнітних матеріалів»  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної  
форми навчання зі спеціальності  
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Затверджено рішенням  
науково-методичної ради  
факультету енергетики,  
робототехніки та комп'ютерних  
технологій  
Протокол № 3  
від 22 лютого 2023 року

Харків  
2023

УДК 620.311

Схвалено на засіданні кафедри  
електропостачання та енергетичного менеджменту  
Протокол №7 від 8.02.2023 р.

**Рецензенти:**

*С. О. Тимчук*, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ДБТУ.

*Ю. М. Хандола*, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

Електротехнічні матеріали: Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження характеристик магнітних матеріалів» студентами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навч., спец.: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; Державний біотехнологічний університет; упоряд.: В. Г. Пазій – Харків: 2023. – 15 с.

Методичні вказівки включають відомості про магнітні матеріали, їхні властивості та застосування в техніці. Наведено методику побудови петлі гістерезису феромагнітного зразка, заходи безпеки при виконанні роботи, формули для розрахунку та вимоги для оформлення звіту. Виконання лабораторної роботи допоможе майбутнім фахівцям використовувати отримані знання на практиці.

Видання призначене для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**УДК 620.311**

Відповідальний за випуск: **В. Г. Пазій**

© Пазій В.Г. 2023.

© ДБТУ, 2023

## МЕТА РОБОТИ

Дослідження властивостей та характеристик електротехнічної сталі.

## ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчити загальні відомості про магнітні матеріали та ознайомитись з їх основними характеристиками.
2. Скласти схему випробування.
3. Записати в звіт паспортні дані приладів та апаратів.
4. Дослідити електротехнічну сталь трансформатора.
5. Дослідити пермалой трансформатора струму.
6. За отриманими даними вимірювань, побудувати відповідні графічні залежності.
7. Зробити висновок по роботі та оформити звіт.

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Якщо між полюсами магніту або всередині соленоїда, по якому тече струм, помістити якийсь матеріал, то магнітні силові лінії дещо перерозподіляться в порівнянні з тим їх розподілом, коли між полюсами магніту або всередині соленоїда нічого немає. Під впливом магнітного поля всі речовини намагнічуються. Це означає, що кожен елемент об'єму тіла веде себе як магнітик, а магнітний момент всього тіла є векторна сума магнітних моментів всіх елементів об'єму.

Магнітні властивості матеріалів зумовлені внутрішніми прихованими формами руху електричних зарядів, що являють собою елементарні колові струми. Такими коловими струмами є: обертання електронів навколо власних осей – *електронні спіни* і орбітальне обертання електронів в атомах. Явище феромагнетизму пов'язано з утворенням всередині деяких матеріалів таких кристалічних структур, за яких в межах макроскопічних областей, що називаються *магнітними доменами*, електронні спіни виявляються орієнтованими паралельно один одному і однаково направлені. Таким чином, характерним для феромагнітного стану речовини є наявність в ній довільної (спонтанної) намагніченості без прикладення зовнішнього магнітного поля. Проте, хоча у феромагнетику і утворюються довільно намагнічені області, але

напрямок магнітних моментів окремих атомів виявляється різним, як це впливає з закону про мінімум вільної енергії системи. Магнітний потік такого тіла буде рівним нулю. Можливі розміри доменів для деяких матеріалів складають близько  $0,001 \dots 10 \text{ мм}^3$  при товщині прикордонних шарів між ними в кілька десятків-сотень міжатомних відстаней. В особливо чистих речовин розміри доменів можуть бути і більші.

Існування доменів вдалось показати експериментально. При дуже повільному перемагнічуванні феромагнітного зразка в телефоні, приєднаному через підсилювач до котушки, що охоплює зразок, можна розрізнити окремі клацання, безпосередньо пов'язані зі стрибкоподібною зміною індукції.

На полірованій поверхні намагнічуваного зразка феромагнетика можна виявити появу типових візерунків, що утворюються шляхом осідання тонкого феромагнітного порошку на границях окремих доменів (*фігури Акулова*).

За магнітними властивостями матеріали діляться на *слабوماгнітні* (діамагнетики та парамагнетики) і *сильномагнітні* (феромагнетики).

*Діамагнетики* – це речовини з магнітною проникністю  $\mu < 1$ , значення якої не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля (мідь, цинк, срібло, золото, ртуть, сурма і т.д.)

До *парамагнетиків* належать речовини з магнітною проникністю  $\mu > 1$ , що не залежать від напруженості зовнішнього магнітного поля (кисень, солі заліза, кобальту, нікелю і т.д.).

У сильно магнітних матеріалів  $\mu \gg 1$  і залежить від напруженості магнітного поля. Всі сильномагнітні матеріали (магнітні матеріали) діляться за своїми основними характеристиками на дві основні групи: магнітом'які та магнітотверді.

*Магнітом'які матеріали* відрізняються малими втратами на гістерезис (вузький цикл гістерезису), малою коерцитивною силою, відносно великими значеннями магнітної проникності, великою індукцією насичення. Магнітом'які матеріали застосовуються для виготовлення осердь трансформаторів, двигунів, магнітопроводів, деталей реле, осердь електромагнітів, що працюють у змінних магнітних полях.

*Магнітотверді матеріали* застосовуються для виготовлення постійних магнітів, а також при виробництві стрічок для магнітних носіїв інформації.

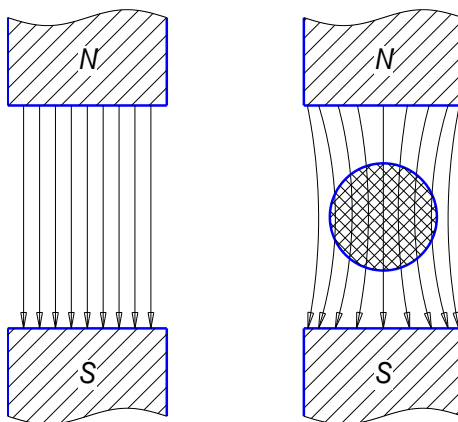


Рисунок 5.1 – Взаємодія речовин з зовнішнім магнітним полем

В залежності від магнітної структури матеріали поділяються на такі види:

**Ферромагнетик** – кристалічна речовина, в якій результуючі магнітні моменти кожного з доменів відмінні від нуля.

**Антиферромагнетик** – кристалічна речовина, в якій результуючі магнітні моменти кожного з доменів дорівнюють нулю.

**Ферримагнетик** – кристалічна речовина, магнітну структуру якої можна представити у вигляді двох чи більше підрешіток, причому результуючі магнітні моменти кожного з доменів відмінні від нуля.

В техніці, в якості магнітних матеріалів найбільшого застосування набули *ферромагнітні* речовини і *ферромагнітні* хімічні сполуки (*ферити*).

Оцінкою, що характеризує відношення матеріалу до зовнішнього магнітного поля є *відносна магнітна проникність*  $\mu$ .

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

де  $B$  – магнітна індукція, Тл;

$H$  – напруженість магнітного поля, А/м;

$\mu_0$  – магнітна стала, що характеризує магнітне поле у вакуумі ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Усі ферромагнітні речовини є кристалічними. Відомо також, що ферромагнітні властивості металу зникають при нагріванні до деякої

температури  $\theta$ , що одержала назву *точки Кюрі*.

Монокристали феромагнітних речовин характеризуються магнітною анізотропією, що виражається у відмінності намагнічування вздовж різних осей. Наприклад, для кристалів заліза найлегше намагнічування буде відбуватись вздовж ребра кристалу, а найважче – вздовж діагоналі. В кристалі нікелю – навпаки. В тому випадку, коли анізотропія в полікристалічних магнетиках виражена досить різко, то прийнято говорити, що феромагнетик має *магнітну текстуру*. Отримання заданої магнітної текстури має велике значення і використовується в техніці для створення в певному напрямі підвищених магнітних характеристик матеріалу.

Під час намагнічування феромагнітних монокристалів спостерігається зміна їхніх лінійних розмірів. Це явище називається *магніострикцією*.

## **Процес намагнічування**

Феромагнітні властивості мають порівняно невеликий клас речовин. До них належать залізо, нікель, кобальт, їхні сплави, мало розповсюджений метал гадоліній, а також деякі кисневі сполуки заліза і нікелю (ферити). Крім того, феромагнітними є сплави міді, марганцю і так звані сплави Гейслера, хоча самі по собі окремі елементи, що входять до складу сплаву, немагнітні.

*Процес намагнічування* феромагнітного матеріалу під впливом зовнішнього магнітного поля зводиться:

1) до росту тих доменів, магнітні моменти яких становлять найменший кут з напрямком поля, і до зменшення розмірів інших доменів (процес зміщення границь доменів);

2) до повороту магнітних моментів в напрямку зовнішнього поля (процес орієнтації). Магнітне насичення досягається тоді, коли ріст доменів припиниться і магнітні моменти всіх спонтанно намагнічених мікрокристалічних ділянок виявляться орієнтованими в напрямку поля. Схема орієнтації спінів у доменах приведена на рис. 5.2.

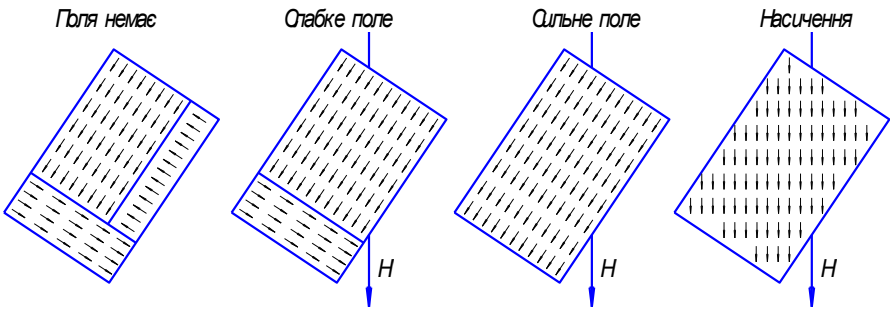


Рисунок 5.2 – Схема орієнтації спінів у доменах при намагнічуванні феромагнетика

Протікання процесів намагнічування матеріалу практично характеризують кривими намагнічування  $B(H)$ , що мають подібний характер для всіх феромагнетиків.

Магнітну проникність  $\mu_{r n}$  при  $H \approx 0$  називають *початковою*, визначаючи її при дуже слабкій полях близько 0,1 А/м. Найбільше значення магнітної проникності називається *максимальною проникністю* і позначається  $\mu_{r \text{ макс.}}$ . При сильних полях в області насичення магнітна проникність наближається до 1.

Магнітна проникність феромагнітних матеріалів залежить від температури, проходячи через максимум поблизу  $t_c$  Кюрі. Для чистого заліза  $t_c$  становить 768 °С. При температурах вище  $t_c$  Кюрі області спонтанного намагнічування порушуються тепловим рухом і матеріал перестає бути магнітним.

### Петля гістерезису

Якщо повільно проводити намагнічування феромагнетика у зовнішньому магнітному полі, а потім, починаючи з довільної точки зменшувати напруженість поля, то індукція буде також зменшуватись, але не за основною кривою, а з відставанням, внаслідок явища *гістерезису*. При збільшенні поля протилежного напрямку зразок може бути розмагнічений, перемагнічений і при новій зміні напрямку магнітного поля індукція знову може повернутись у вихідну точку, тобто буде описана крива, що являє собою *петлю гістерезисного циклу перемагнічування*.





а)

б)

Рисунок 5.3 – Петлі гістерезису

В залежності від різниці значень напруженості зовнішнього магнітного поля можна побудувати сім'ю петель гістерезису. З таких циклів найбільш характерним буде цикл, при якому намагнічування матеріалу доходить до насичення. При зниженні напруженості магнітного поля до нуля ( $H = 0$ ) магнітна індукція приймає деяке залишкове значення  $B_r$ . Для того, щоб зменшити індукцію від значення  $B_r$  до нуля необхідно прикласти деяку напруженість поля  $H_c$ , але зі зворотнім знаком, яка називається *коерцитивною силою*.

Крива  $O_{ab}$  називається основною кривою намагнічування. Узявши по цій кривій для кожної її точки значення  $B$  і  $H$ , можна обчислити по них відповідні значення  $\mu = \frac{B}{H}$  і побудувати криву  $\mu = f(H)$  (рис. 5.4).

Максимальне значення  $\mu_m$  на кривій  $\mu=f(H)$  є характерною точкою для магнітного матеріалу і називається максимальною проникністю.

На гістерезисній петлі (рис. 5.3, а) можна помітити чотири області, що більш-менш чітко виділяються.

1. Ділянка  $Oa$  основної кривої намагнічування, близька до прямої лінії. Ця ділянка, головним чином, використовується в техніці слабких струмів, особливо в підсилювальній техніці. Усяка нелінійна залежність між напруженістю намагнічуючого поля, і індукцією  $B$  веде до небажаних спотворень переданого сигналу. Магнітна проникність у цій частині кривої майже постійна.

2. Ділянка  $ab$  використовується в електромашинобудуванні, де працюють при великих магнітних індукціях. Одночасно матеріал повинен мати і малі магнітні втрати.

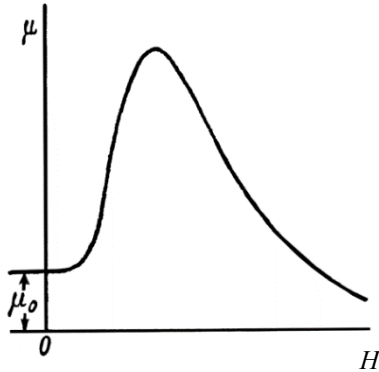


Рисунок 5.4 – Залежність магнітної проникності в залежності від напруженості поля

3. Ділянку *бв*, де проникність близька до максимальної, використовує релейна техніка. Споживання магнітних матеріалів у цій області відносно невелике і тут економічно застосовувати високоякісні магнітні матеріали, з особливо великими значеннями магнітної проникності.

4. Ділянка кривої, що відповідає зміні напруженості поля від нуля до значення  $H_c$  (лівий верхній квадрант на рис. 5.3), використовується в постійних магнітах.

### Магнітні втрати

Якщо феромагнітний матеріал знаходиться в змінному магнітному полі, то частина енергії поля, зосередженої в матеріалі, переходить у тепло, тобто циклічне перемагнічування матеріалу відбувається з певною втратою енергії.

В наш час добре вивчені два джерела втрат:

1) *втрати на вихрові струми*, що виникають у будь-якому провіднику, що знаходиться в змінному магнітному полі.

2) *втрати на гістерезис*, властиві тільки феромагнітним матеріалам.

При роботі у змінному полі питомі втрати на гістерезис, що вимірюються, як правило, у Вт/кг при індукції до 0,1 Тл прямопропорційні частоті, при індукції від 0,1 до 1 Тл – пропорційні  $B^{1,6}$ , а при індукції понад 1 Тл – пропорційні  $B^2$ .

Величина магнітних втрат пропорційна площі петлі гістерезису. Площа гістерезисного циклу може бути досить різною при однаковій величині максимальної магнітної індукції  $B_s$ .

Для роботи в машинах і трансформаторах магнітний матеріал повинен мати велику магнітну проникність і досить велику індукцію насичення. Він повинен мати, крім того, малу площу гістерезисного циклу і підвищений питомий опір для того, щоб у ньому були малі втрати на вихрові струми.

Для магнітних кіл котушок реле потрібен матеріал, у якому можна було б створити велику індукцію при слабкому полі, тобто при малих ампервитках; такий матеріал повинний мати велику початкову магнітну проникність.

## ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Скласти схему згідно рис. 5.5.
2. З дозволу викладача ввімкнути осцилограф та лабораторний стіл.
3. За допомогою автотрансформатора встановити напругу 220 В, зняти покази вимірювальних приладів і записати їх до табл. 5.2.
4. Змінюючи підсилення осцилографа по X та Y, отримати на екрані петлю гістерезису та перемалювати її.
5. Зменшуючи напругу кожного разу на 10 В (210 В, 200 В, 190 В...), зняти покази приладів та занести їх до таблиці. Дослід продовжувати до напруги 150 В.
6. Не змінюючи підсилення осцилографа по X та Y, намалювати петлю гістерезису при 150 В.

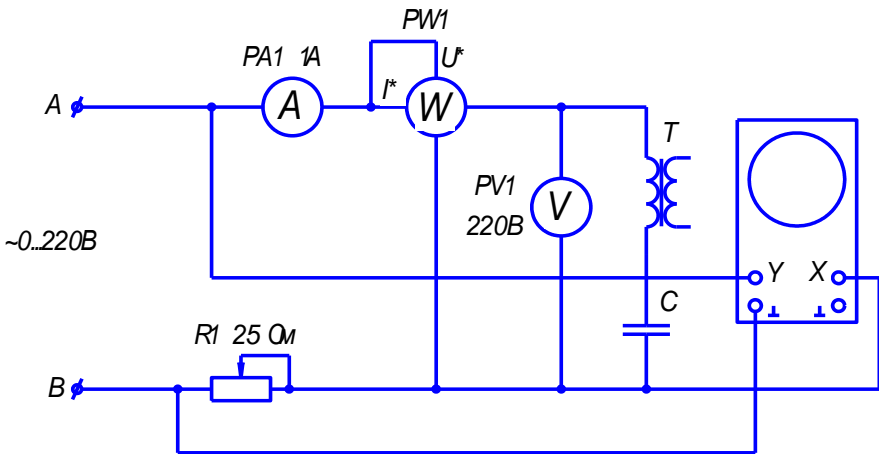


Рисунок 5.5 – Схема установки для дослідження характеристик електротехнічної сталі

7. За результатами вимірювань обчислити:

1) Магнітну індукцію:

$$B = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot W \cdot F}, \text{Тл}$$

де  $U$  – напруга трансформатора, В;

$f$  – частота струму, Гц;

$W$  – кількість витків обмотки трансформатора ( $W = 300$ );

$F$  – площа поперечного перерізу осердя трансформатора ( $F = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ).

2) Напруженість магнітного поля:

$$H = I \cdot W, \text{ А} \cdot \text{вит.},$$

де  $I$  – струм в обмотці трансформатора, А.

3) Відносну магнітну проникність:

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

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

4) Питомі втрати:

$$P_{\text{пит}} = \frac{P}{V \cdot g}, \text{ Вт/кг}$$

де  $P$  – активна потужність втрат, Вт;

$V$  – об'єм осердя трансформатора, м<sup>3</sup> ( $V = 1,3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>);

$g$  – густина електротехнічної сталі, кг/м<sup>3</sup> ( $g = 7,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

5) Питому намагнічуючу потужність:

$$S_{\text{пит}} = \frac{U \cdot I}{V \cdot g}, \frac{\text{ВА}}{\text{кг}}$$

Результати розрахунків занести до табл. 5.2.

8. Побудувати графіки залежностей  $B = f(H)$ ,  $\mu = f(B)$ ,  $P_{\text{ном}} = f(B)$ ,  $S_{\text{ном}} = f(B)$ .

9. За результатами роботи оформити звіт по лабораторній роботі.

10. Дати відповідь на контрольні питання.

## ПЛАН СКЛАДАННЯ ЗВІТУ

Звіт до лабораторної роботи виконується на аркушах формату А4 з одного боку і повинен містити такі дані:

1. Титульний лист встановленого зразка з темою роботи і прізвищами виконавців.
2. Мета та програма роботи.
3. Паспортні дані вимірювальних приладів, що використовуються в роботі (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Паспортні дані вимірювальних приладів

Позначення на схемі	Назва приладу	Марка приладу	Система	Заводський номер	Номінальні величини	Клас точності
<i>PVI</i>	Вольтметр					
...						

4. Принципова електрична схема установки для дослідження характеристик електротехнічної сталі (рис. 5.5). Схема викреслюється обов'язково вручну (ксерокопія не допускається) з дотриманням розмірів і стандартів умовних позначень елементів.

5. Таблиця з внесеними вимірними даними та даними розрахунків.

Таблиця 5.2 – Дані вимірювань та розрахунків характеристик магнітних матеріалів

Виміряно			Обчислено				
$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$B, Тл$	$H, А \cdot вит$	$\mu$	$P_{num}, Вт/кг$	$S_{num}, ВА/кг$
220							
...							

6. Формули для розрахунків з поясненнями.
7. Графіки залежностей  $B = f(H)$ ,  $\mu = f(B)$ ,  $P_{num} = f(B)$ ,  $S_{num} = f(B)$ .
8. Висновки по роботі.

У висновках необхідно проаналізувати отримані практичні результати, порівняти їх з теоретичними даними.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Як поділяються магнітні матеріали за магнітними властивостями?
2. Які матеріали належать до феромагнетиків, їх властивості?
3. Які матеріали називаються магнітом'якими? Приклади.
4. Які матеріали називаються магнітотвердими? Приклади.
5. Що таке магнітні домени?
6. Що таке магнітна текстура?
7. Як відбувається процес намагнічування феромагнітного матеріалу?
8. Процес перемагнічування феромагнітного матеріалу. Петля гістерезису.
9. Що таке магнітні втрати? Їх види та умови виникнення.
10. Де застосовується електротехнічна сталь?
11. Хімічний склад та властивості пермалоїв?

Навчальне видання

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

**Дослідження характеристик магнітних матеріалів**

Автор - укладач:

**ПАЗІЙ** Володимир Григорович

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman  
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.  
Ум. друк. арк. 0,6. Наклад 100 пр.

Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44