

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
"Дніпровська політехніка"**



Кафедра електротехніки



**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Електротехнічні матеріали»
(Розділ «Магнітні матеріали»)
для студентів спеціальності
141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Дніпро
2021**

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
"Дніпровська політехніка"**



Кафедра електротехніки



**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Електротехнічні матеріали»
(Розділ «Магнітні матеріали»)
для студентів спеціальності
141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Дніпро
2021**

Рекомендовано до видання навчально-методичним відділом (протокол № від за поданням науково-методичної комісії зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (протокол № 21/22-01 від 30.08.2021р.)

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни Електротехнічні матеріали (Розділ “Магнітні матеріали”) для студентів спеціальності 141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Упорядники: Циценков Д.В., Гребенюк А.М., Бобров О.В., Колб А.А., Лябагова Т.В. – Дніпро: НТУ “ДП”, 2022. – 48 с.

Автори:

Циценков Д.В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри електротехніки НТУ «ДП»
Гребенюк А.М., к.т.н., доцент каф. економічної та інформаційної безпеки ДДУВС
Бобров О.В., к.т.н., доцент кафедри електротехніки НТУ «ДП»
Колб А.А., к.т.н., доцент, доцент с
Лябагова Т.В., асистент к.т.н., доцент кафедри електротехніки НТУ «ДП»

Методичні вказівки призначено для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електротехнічні матеріали» (розділ «Діелектричні матеріали») студентами спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

ВСТУП

Метою виконання студентами лабораторних робіт є вивчення методів випробування матеріалів та одержання ряду залежностей, що характеризують властивості матеріалів і фізичні процеси, які в них відбуваються.

Приступаючи до виконання лабораторної роботи, студенти повинні чітко уявляти поставлене перед ними завдання та ті фізичні явища, яке доведеться дослідити. Їм слід зрозуміти, якими способами здійснюються ці дослідження та добре знати будову приладів і апаратів, якими доведеться користуватися при виконанні роботи.

Виходячи з цього, студентам треба завчасно підготуватися до занять. Для полегшення цієї підготовки опису кожної лабораторної роботи в посібнику передують короткі теоретичні відомості про досліджуване явище, процес та спосіб дослідження. Наведені теоретичні відомості придатні лише для попереднього ознайомлення з об'єктом дослідження і свідомого виконання роботи. Для ґрунтовного ж вивчення досліджуваного явища або процесу необхідно користуватися підручниками.

Опис кожної лабораторної роботи завершується контрольними запитаннями, необхідними для самоперевірки набутих знань. В кожній роботі є вказівки відносно складу звіту. Окрім зазначеного, до звіту, на свій розсуд, студенти можуть включати і додатковий матеріал. Звіт по кожній лабораторній роботі кожен студент виконує індивідуально, акуратно, відповідно до поставлених вимог (з ними студенти знайомляться в лабораторії) і обов'язково подає викладачеві перед початком наступного заняття. При здачі (захисті) лабораторної роботи студент повинен знати:

- 1) розділи теоретичної частини дисципліни стосовно даної роботи;
- 2) схему, призначення її окремих елементів та принцип дії установки, яка використовується в роботі;
- 3) методика проведення експерименту та правила техніки безпеки;
- 4) властивості та галузі застосування досліджуваних електротехнічних матеріалів.

Правила техніки безпеки під час роботи в лабораторії

А. Організаційні

1. До роботи в лабораторії допускаються студенти, які прослухали інструктаж з техніки безпеки (ТБ), засвоїли правила ТБ і розписалися про це в спеціальному журналі.

2. Із складу бригади студентів призначається бригадир, відповідальний за виконання студентами правил безпеки. Тільки бригадир під час проведення дослідів вмикає та вимикає електроживлення схеми або установки.

3. Перше вмикання установки під напругу робиться тільки після перевірки викладачем зібраної схеми і в його присутності.

4. Бригада студентів протягом часу роботи в лабораторії повинна перебувати на відведеному робочому місці.

5. Після закінчення роботи бригада наводить порядок на робочому місці, про що повідомляє викладача.

Б. Технічні

1. Складання схем необхідно виконувати так, щоб не було перехрещення проводів, натягнутого їх стану, не допускати різких згинів та змотування проводів в мозки. Контакти в місцях з'єднання елементів схеми повинні бути надійними.

2. Вимірювальні прилади за апарати управління слід розміщувати на робочому столі так, щоб було зручно ними користуватися і спостерігати за показом приладів.

3. Починаючи роботу, треба переконатися, що на робочому місці немає напруги, для чого всі вимикачі, рубильники, тумблери поставити в положення "вимкнено".

4. Перед поданням напруги слід переконатися, що всі регулюючі апарати знаходяться в необхідному початковому положенні. Після вимкнення напруги відновити початкове положення на всіх регульованих апаратах.

5. Якщо до, або в ході роботи виявлена несправність устаткування, то слід припинити роботу, вимкнути напругу і повідомити викладача або лаборанта про такий факт. **Усувати неполадки своїми силами заборонено.**

6. Встановлення та заміну запобіжників слід виконувати при вимкненому автоматичному вимикачеві (автоматі) мережі живлення і з дозволу викладача.

7. Розбір схеми (за необхідністю) слід виконувати тільки після вимкнення електроживлення та знятих запобіжників.

8. Під час робіт на високовольтній установці слід переконатися в її надійному заземленні, справності систем сигналізації та блокіровок. Необхідно ознайомитись із спеціально складеною для високовольтної установки інструкцією з техніки безпеки, яка є в лабораторії.

9. Під час високовольтних випробувань треба виконувати, стоячи на гумовому килимку, в гумових рукавицях та ботах.

Забороняється:

- а) торкатися неізольованих місць схеми, яка знаходиться під напругою;
- б) виконувати будь-які зміни в схемі під напругою або залишати схему під напругою без догляду;
- в) виконувати будь-які вмикання на головному розподільному щиті в лабораторії;
- г) виконувати лабораторну роботу одному студенту.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТМ – 2/1

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи:

Ознайомлення зі зразками, вивчення властивостей та сфер застосування магнітних матеріалів, перелік яких пропонує викладач.

Програма роботи

1. Ознайомитись зі зразками магнітних матеріалів, звернувши увагу на їх зовнішні ознаки.
2. Вивчити властивості та сфери застосування магнітних матеріалів.
3. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Вивчення зразків магнітних матеріалів за їх зовнішніми ознаками

Ознайомитись зі зразками магнітних матеріалів, що є в лабораторії. Звернути увагу на структуру зразків магнітних матеріалів, їх колір, твердість, форму, будову поверхні та інші ознаки, за якими можна визначитись з назвами матеріалів та їх походженням.

Етап 2. Вивчення властивості та галузі застосування магнітних матеріалів

Основні властивості, характеристики, сфери застосування магнітних матеріалів та початкові матеріали для їх виготовлення, необхідно описати за формою таблиці 1.1, користуючись методичними вказівками до даної роботи та рекомендованою літературою.

Етап 3. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву, мету і програму роботи.
2. Заповнену табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Основні властивості магнітних матеріалів

Матеріал	Характерні зовнішні дані, механічні властивості	Склад, спосіб одержання	Основні магнітні властивості						Робочий діапазон частот,	Сфера застосування
			Відносна магнітна проникливість		H_c , А/м	B_m , Тл	p , Вт/кг	ρ , мкОм·м		
			μ_{rp}	μ_{rm}						
Альсифер	Світлий, на зламі зернистий, крихкий	Склад сплаву: 9,5% Si, 5,6% Al, 84,9% Fe	35000	120000	1,8	1,1	-	0,8	Постійний струм	Магнітні екрани, корпуси вимірювальних приладів; для одержання магнітоді-електриків

Де μ_{rp} – початкова відносна магнітна проникливість;

μ_{rm} – максимальна відносна магнітна проникливість;

H_c – коерцитивна сила;

B_m – максимальна магнітна індукція;

p – питомі магнітні втрати;

ρ – питомий електричний опір.

Методичні вказівки

До етапів 1, 2 і 3

Загальні відомості про магнітні властивості феромагнетиків

В якості магнітних матеріалів використовують феромагнітні речовини (феромагнетики) та феромагнітні хімічні сполуки (ферити). Явище феромагнетизму пов'язане із спонтанним утворенням в деяких металах (Fe , Ni , Co) макроскопічних областей – магнітних доменів, в границях яких електронні спіни орієнтовані взаємно паралельно. Можливі розміри доменів складають $(0,001 \dots 10)$ мм³ при товщині границь між ними в декілька десятків або сотень ангстрем.

Монокристали феромагнітних речовин відзначаються магнітною анізотропією, яка виявляє себе в неоднаковій мірі намагнічування уздовж різних осей в монокристалі. При намагнічуванні монокристала феромагнетика має місце зміна його лінійних розмірів. Це явище називається **магнітострикцією**. У монокристалі заліза магнітострикція неоднакова для різних напрямків у кристалі.

Процес намагнічування феромагнітних матеріалів характеризують *кривою намагнічування $B(H)$* (рис.1.1).

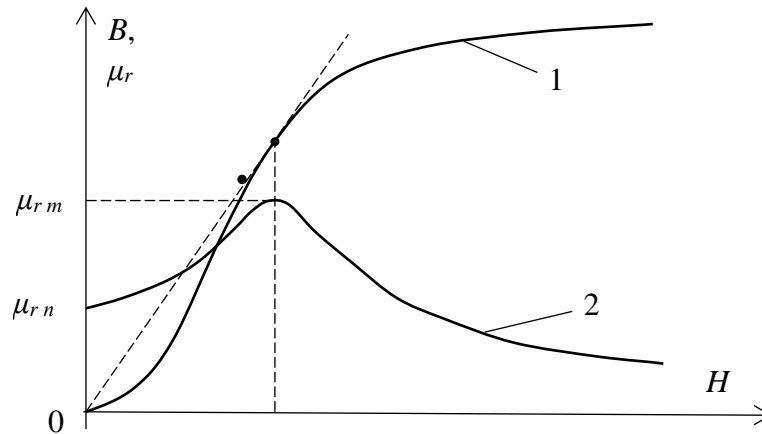


Рисунок 1.1 – Основна крива намагнічування (1) та залежність магнітної проникливості від напруженості магнітного поля (2)

Абсолютне значення магнітної проникливості μ_a , що характеризує здатність речовини до намагнічування, визначається за основною кривою намагнічування як відношення індукції B до напруженості магнітного поля H в даній точці кривої:

$$\mu_a = \frac{B}{H} \quad (1.1)$$

На практиці зручніше користуватись відносною магнітною проникливістю μ_r , яка означає, у скільки разів абсолютна магнітна проникливість μ_a даного магнітного матеріалу перевищує абсолютну магнітну проникливість вакууму чи повітря:

$$\mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_0} \quad (1.2)$$

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

Початкову магнітну проникливість μ_{rn} визначають при магнітній напруженості $H < 0,1$ А/м, тобто в дуже слабких полях. Найбільше значення магнітної проникливості μ_{rm} називається **максимальною магнітною проникливістю** (рис. 1.1). У сильних магнітних полях (у зоні насичення) значення μ_r наближається до одиниці.

Під час роботи феромагнетиків у змінних магнітних полях їх властивості визначаються **динамічною магнітною проникливістю $\mu_{r\sim}$** , яка є відношенням амплітудних значень індукції і напруженості магнітного поля. З підвищенням частоти перемагнічування величина $\mu_{r\sim}$ зменшується, що пояснюється інерційністю магнітних процесів.

При циклічному перемагнічуванні феромагнетиків графік залежності $B(H)$ має вигляд *гістерезисної петлі*. Змінюючи напруженість магнітного поля, можна одержати ряд петель гістерезису, як це показано на рис. 1.2.

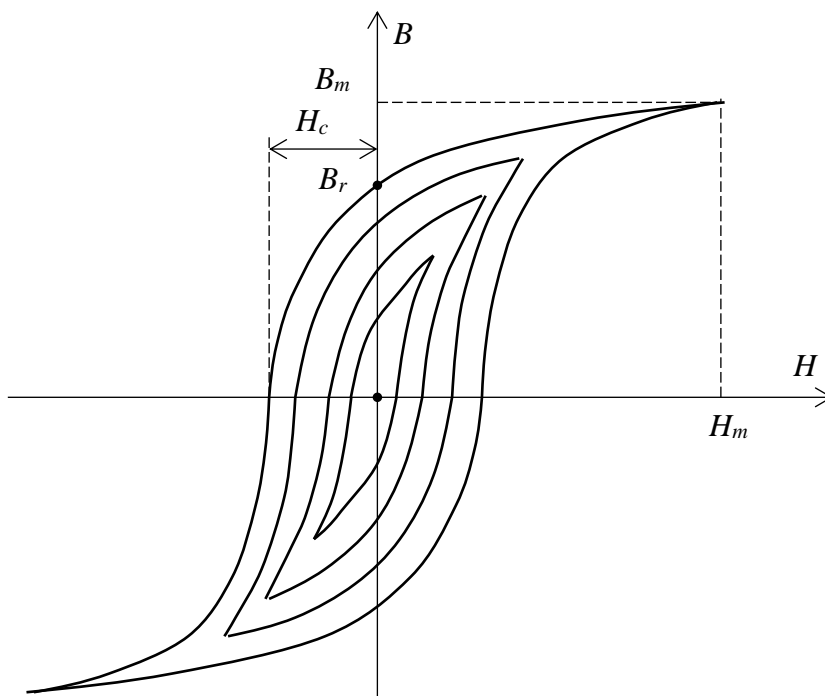


Рисунок 1.2 – Гістерезисні петлі при різних граничних значеннях напруженості магнітного поля

Петля гістерезису при максимальній індукції $B = B_m$ називається *граничною*. Значення B при $H = 0$, яке одержане в процесі розмагнічування матеріалу зі стану насичення, називається *залишковою індукцією* B_r . Для доведення індукції від значення B_r до нуля необхідно прикласти до зразка зворотну за напрямом дії напруженість H_c , яка зветься *коерцитивною силою*.

Матеріали з малим значенням H_c та великою магнітною проникливістю називають *магнітом'якими магнітними матеріалами*. Їх застосовують для виготовлення магнітопроводів електричних машин, трансформаторів та інших пристроїв, в яких використовуються змінний магнітний потік. Матеріали з великою коерцитивною силою та порівняно малою проникливістю мають назву *магнітотвердих*. Їх використовують в якості постійних магнітів.

Процес перемагнічування феромагнетиків у змінному магнітному полі супроводжується втратами енергії, які призводять до нагрівання матеріалу. Ці втрати зумовлені гістерезисом та вихровими струмами в об'ємі феромагнетика. Втрати на гістерезис для кожного матеріалу можуть бути визначені за площею петлі гістерезису, одержаної при повільному перемагнічуванні, з урахуванням масштабів по осях B і H та частоти перемагнічування. Потужність втрат на гістерезис може бути визначена за формулою:

$$P_{\Gamma} = \eta \cdot B_m^n \cdot f \cdot V \quad (1.3)$$

де η – коефіцієнт, залежний від структури матеріалу;

B_m – амплітуда магнітної індукції;

f – частота перемагнічування;

V – об'єм феромагнетика;

n – показник ступеню ($n = 1,6 \dots 2$).

Потужність втрат на вихрові струми зменшується у разі збільшення питомого електричного опору феромагнетика і може бути визначена за формулою:

$$P_{\epsilon} = \xi \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot V \quad (1.4)$$

де ξ – коефіцієнт, залежний від властивостей феромагнетика та його форми (зокрема, він пропорційний квадрату товщини матеріалу та обернено пропорційний густині і його питомому електричному опору). Із порівняння формул (1.3) і (1.4) виходить, що при високих частотах f слід звертати увагу в першу чергу на втрати від вихрових струмів.

Магнітом'які низькочастотні матеріали

Технічно чисте залізо, яке ще називають АРМКО-залізом (від абр. *ARMCO* — скороченої назви американської фірми *American Rolling Mill Corporation*), одержують переплавленням сталюого брухту або рафінуванням чавуну в мартенівських печах чи конверторах. Воно містить в собі невелику кількість (менше 0,1 %) домішок вуглецю, сірки, марганцю, кремнію та інших елементів, які погіршують його магнітні властивості. Ці властивості такі: $\mu_{rп} = 250$; $\mu_{rм} = 7000$; $H_c = 64$ А/м; $B_m = 2,15$ Тл. Через порівняно низький питомий опір ($\rho = 0,1$ мкОм·м) та відносно великі втрати при промисловій частоті ($p_{1/50} = 2,7 \dots 3,5$ Вт/кг), технічно чисте залізо використовують тільки у випадку постійних магнітних полів (магнітопроводи електричних машин постійного струму, полюсні наконечники електромагнітів, електровимірювальні прилади тощо).

Кремниста електротехнічна сталь – це сплав заліза з кремнієм. Присутність кремнію підвищує питомий електричний опір, що зменшує втрати на вихрові струми. Крім того, кремній сприяє виділенню вуглецю у вигляді графіту, а також майже повному розкисленню сталі, тобто переведенню кисню на шлак (кремнезем). Це призводить до збільшення $\mu_{rп}$, зменшення H_c та до зниження втрат на гістерезис порівняно з технічно чистим залізом. З іншого боку, наявність

кремнію призводить до зменшення індукції насичення B_m та погіршення механічних властивостей (підвищується твердість та крихкість). Тому концентрація кремнію в сталі не повинна перевищувати 4,8%.

Листи кременистої сталі виготовляють прокаткою заготовок в нагрітому чи холодному стані. Тому розрізняють гарячекатану та холоднокатану кременисті сталі. У процесі холодної прокатки (з великим обтиском та особливою термічною обробкою) одержують текстуровану сталь крупнокристалічної будови, в листах якої кристали орієнтовані осями легкого намагнічування у напрямку прокатки (рис. 1.3).

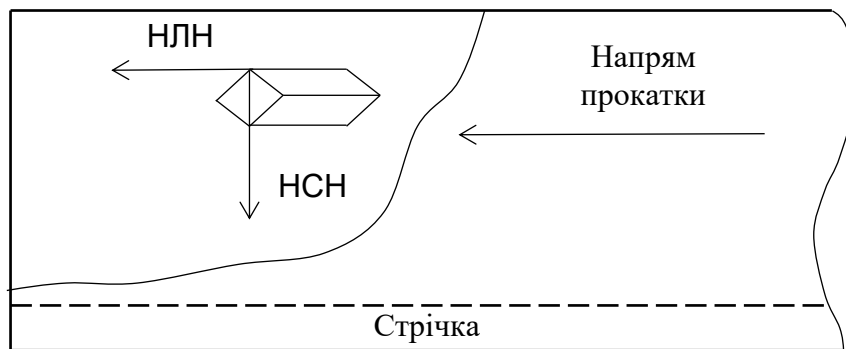


Рисунок 1.3 – Орієнтація монокристалів заліза в холоднокатаній текстурованій сталі: НЛН – напрямок легкого намагнічування; НСН – напрямок середнього намагнічування

Магнітні властивості такої сталі в напрямку прокатування значно кращі порівняно з гарячекатаною. Застосування холоднокатаних текстурованих сталей вимагає такої конструкції магнітопроводу, в якій магнітний потік проходить у напрямку найкращих магнітних властивостей, тобто в напрямку прокатки. Цій умові відповідають виті магнітопроводи, виготовлені із стрічки, або магнітопроводи із зігнутих смуг, змонтованих у стик.

Сталь електротехнічна тонколистова (завтовшки 0,1...1мм), випускається у вигляді листів, рулонів, стрічок, маркірується чотирма цифрами (XXXX).

Перша цифра означає клас, тобто структурний стан та вид прокатки:

- 1 – гарячекатана ізотропна;
- 2 – холоднокатана ізотропна;
- 3 – холоднокатана анізотропна з ребровою текстурою;
- 5 – холоднокатана ізотропна з площинною кубічною текстурою.

Друга цифра означає приблизну концентрацію кремнію:

- | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0 – до 0,4%; | 1 – 0,4...0,8%; | 2 – 0,8...1,8%; |
| 3 – 1,8...2,8%; | 4 – 2,8...3,8%; | 5 – 3,8...4,8%. |

Третя цифра означає нормовані магнітні характеристики:

- 0 – питомі втрати p при $B = 1,7$ Тл та частоті $f = 50$ Гц ($p_{1,7/50}$);
- 1 – питомі втрати p при $B = 1,5$ Тл та $f = 50$ Гц ($p_{1,5/50}$);
- 2 – питомі втрати p при $B = 1,0$ Тл та $f = 400$ Гц ($p_{1,0/400}$);

4 – питомі втрати p при $B = 0,5$ Тл та $f = 3000$ Гц;

6 – магнітну індукцію B в слабких магнітних полях при напруженості поля $H = 0,4$ А/м ($B_{0,4}$);

7 – магнітну індукцію B в середніх магнітних полях при напруженості поля $H = 10$ А/м ($B_{1,0}$).

Четверта цифра (від 1 до 8) визначає порядковий номер типу сталі з поліпшенням магнітних властивостей у міру зростання цього номера.

Максимальна відносна магнітна проникливість μ_{rm} гарячекатаних сталей (клас 1) перебуває у межах 3000...10000, холоднокатаних (клас 3) – 40000 і більше. Питомі магнітні втрати в сталі завтовшки 0,35 мм: класу 1 (сталь 1513) – $p_{1,5/50} = 2,5$ Вт/кг; класу 2 (сталь 2411) – $p_{1,5/50} = 3,0$ Вт/кг; класу 3 (сталь 3414) – $p_{1,5/50} = 1,1$ Вт/кг. Електротехнічну сталь застосовують в магнітних системах електричних машин, апаратів та приладів, що працюють на змінному струмі промислової частоти (50 Гц), при підвищеній частоті (400 Гц, 800 Гц) та при середніх та сильних магнітних полях.

Пермалой – це сплав заліза з нікелем. Відзначаються високою магнітною проникливістю в слабких магнітних полях та малою коерцитивною силою, Високонікелеві пермалої мають вміст нікелю 70...80%, а низьконікелеві – 40...50%. У марках пермалоїв, наприклад, 79НМ, 80НХС число означає процентний вміст нікелю, буква Н визначає нікель, М – марганець, Х – хром, С – кремній, К – кобальт, Д – мідь, П – з прямокутною петлею гістерезису. Низьконікелеві пермалої (45Н, 50Н, 50НХС) мають такі властивості: $\mu_{rn} = 1700...3200$; $\mu_{rm} = 15000...35000$; $H_c = (8...32)$ А/м; $B_m = (1,0...1,5)$ Тл; $\rho = (0,45...0,9)$ мкОм·м.

Високонікелеві пермалої (79НМ, 80НХС, 76НХД) мають такі властивості: $\mu_{rn} = 16000...35000$; $\mu_{rm} = 5000...22000$; $H_c = (1,0...5,2)$ А/м; $B_m = 0,65$ Тл; $\rho = 0,55$ мкОм·м.

Пермалої поряд з хорошими магнітними властивостями мають недоліки – містять дефіцитний нікель, потребують складної термообробки, під дією механічного напруження магнітні властивості відпалених зразків помітно погіршуються. Сплави виготовляють у вигляді холоднокатаних стрічок (0,02...2,5) мм, гарячекатаних та кованих прутків діаметром (8...10) мм. Застосовують пермалої для виготовлення осердь малогабаритних трансформаторів (у тому числі силових), дроселів, імпульсних трансформаторів, магнітних підсилювачів, магнітних екранів. Основна особливість у тому, що цей матеріал використовується для отримання високої індукції в малих магнітних полях. Його застосовують як для постійного струму, так і для струмів звукової частоти до 15 кГц.

Альсифер – сплав заліза з кремнієм та алюмінієм. Оптимальний склад: 9,5% Si, 5,6% Al, 84,9% Fe. Його основні властивості: $\mu_{rn} = 35000$; $\mu_{rm} = 120000$; $H_c = 1,8$ А/м; $B_m = 1,8$ Тл; $\rho = 0,8$ мкОм·м, тобто не поступаються властивостям високонікелевих пермалоїв. Через труднощі одержання точного складу

компонентів промислові альсифери мають значно гірші показники. Сплав відзначається твердістю та крихкістю, виготовляють литвом з товщиною стінки виробу не менше 2мм. Литий альсифер застосовують при постійному струмі в якості магнітних екранів, корпусів приладів і т. п. Завдяки крихкості альсифер відносно легко розмелюється на порошок і застосовується в такому стані для виготовлення високочастотних матеріалів (магнітодіелектриків) шляхом пресування.

Аморфні сплави, які ще називають металічним склом, вміщують як основну складову один або декілька перехідних металів (Fe, Ni, Co) – у кількості 75...85% та металоїд – склоутворювач (B, C, Si, P) у кількості 15...20%. Крім цього, аморфні сплави містять в собі легувальні метали – Cr, Ta, V, Mn та інші, що надають сплавам деяких специфічних властивостей. У цих сплавах відсутня властива кристалічному стану періодичність при розміщенні атомів. Тому що, їх сплави формують при такій високій швидкості охолодження, за якою частинки не встигають вишикуватися в правильну кристалічну структуру. Практично їх одержують швидким гартуванням розплавів – "виплюскуванням" розплаву на холодну підкладку, яка швидко переміщується.

Електромагнітні властивості аморфних сплавів близькі до властивостей пермалоїв, але менш підвладні впливу механічних напружень, мають високу корозійну стійкість, міцність та твердість при збереженні пластичності. При цьому питомий електричний опір аморфних сплавів в 2...3 рази більший, ніж у пермалоїв, що значно зменшує втрати на вихрові струми. Завдяки відносній простоті технології виготовлення, магнітом'які аморфні сплави мають дуже широке застосування.

Магнітом'які високочастотні матеріали

Магнітодіелектрик – це пластична маса, в якій зв'язуючим є діелектрик (полістирол, бакеліт, нітролаки, скло тощо), а наповнювачем – магнітом'який феромагнетик у вигляді порошку із розмеленого альсиферу, пермалою, карбонільного заліза, магнетиту. Одержують їх пресуванням. Завдяки ізоляції між феромагнітними частинками магнітодіелектрики мають великий питомий електричний опір і тому їх використовують при високих частотах (0,1...100 МГц). З іншого боку, наявність проміжків між частинками різко знижує магнітну проникливість матеріалу (у магнітодіелектриків $\mu_r = 10...250$), але робить її практично незалежною від напруженості магнітного поля.

З магнітодіелектриків виготовляють кільцеві, циліндричні, броньові осердя для роботи в слабких магнітних полях звукових та надзвукових частот (індукція насичення магнітодіелектриків не вища 0,3...0,4 Тл), до яких ставиться вимога високої магнітної стабільності. Наприклад, магнітодіелектрики використовуються для виготовлення вимірювальних трансформаторів, апаратури високочастотної телефонії, радіоапаратури можуть бути як магнітно-твердими матеріалами, так і магнітно-м'якими матеріалами. Магнітно-м'які М. отримують в осн. з тонких

порошків карбонільного заліза, молібденового пермалою і алсіфера; їх застосовують для виготовлення сердечників котушок індуктивності, фільтрів, дроселів та ін радіотехні. пристроїв, що працюють при частотах 104-108 Гц. Магнітно-тверді М. виготовляють на основі порошків із сплавів алні (Fe – Ni – Al – Cu), Алніко (Fe – Ni – Al – Co), феритів.

Ферити – це хімічні сполуки оксиду заліза Fe_2O_3 з оксидами деяких двовалентних або одновалентних металів відповідно до формули $MeO \cdot Fe_2O_3$, де Me – символ двовалентних металів Mn, Ni, Zn, Co та інших. Ферити – іонні кристалічні речовини, що поєднують хороші магнітні властивості з надзвичайно високим питомим електричним опором, який на 5...16 порядків більш високий порівняно з металевими феромагнетиками. При виготовленні феритових виробів попередньо одержують порошок із тонкоподрібнених, перемішаних і попередньо обпалених оксидів відповідних металів. До порошку додають пластифікатор, наприклад, парафін, а із одержаної маси пресують під великим тиском вироби потрібної форми. Далі, вироби обпалюють при температурі 1100...1400°C. При цьому у феритах відбувається спікання і утворення твердих розчинів. Спікання необхідно проводити в окислювальному середовищі (звичайно, у повітрі) щоб не відбулося відновлення оксидів. Ферити – тверді та крихкі матеріали, які обробляються тільки шліфуванням. Початкова магнітна проникливість феритів коливається від декількох одиниць до 20 тисяч, максимальна магнітна проникливість досягає 35000, коерцитивна сила – 0,24...120000 А/м, індукція насичення – 0,08...0,5 Тл. Втрати потужності у феритах оцінюють величиною тангенса кута магнітних втрат $tg\delta$ від 0,005 до 0,1. Питомий електричний опір феритів $0,001...10^{10}$ Ом·м, тобто відносно великий, і тому магнітні втрати від вихрових струмів дуже малі і ними можна знехтувати. Ферити також мають малі втрати на гістерезис.

Найбільш поширені у використанні ферити: марганцево-цинкові, нікелево-цинкові, літєво-цинкові. Маркірування феритів (наприклад, 20000НМ, 600НН, 20ВЧ2): перша цифра – початкова магнітна проникливість, подальші букви позначають частотний діапазон роботи. Буква Н – низькочастотні ферити, гранична частота яких для різних марок змінюється від 0,1 до 50 МГц, ВЧ – високочастотні ферити, їх граничні частоти – від 50 до 600 МГц. Далі буквами позначається склад фериту: М – марганцево-цинковий, Н – нікелево-цинковий і т.п. Подальші цифри означають різновид фериту.

Магнітом'які ферити використовують для виготовлення осердь високочастотних котушок індуктивності, трансформаторів, магнітних антен, магнітних головок, деталей відхиляючих систем телевізійних трубок і багатьох інших пристроїв високочастотної (більше 1000 Гц) та імпульсної техніки.

Для виготовлення постійних магнітів використовують магнітотверді ферити, найчастіше – ферити барію.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні властивості феромагнетиків та поясніть їх сутність.
2. Поясніть причини втрат потужності у феромагнетиках.
3. Наведіть формули для розрахунку різних видів втрат потужності у феромагнетиках.
4. Вкажіть склад та властивості електротехнічної сталі.
5. Розшифруйте маркірування електротехнічної сталі.
6. Вкажіть склад пермалоїв та їх основні магнітні властивості.
7. Як маркірують пермалої?
8. Який оптимальний склад альсиферу?
9. Наведіть значення магнітних характеристик альсиферу.
10. Наведіть структуру аморфних сплавів та поясніть їх основні властивості.
11. Яку будову мають магнітодіелектрики та сфери їх застосування?
12. Поясніть склад, властивості і маркірування феритів, сфери їх застосування.
13. Опишіть технологію виготовлення феритів.
14. Охарактеризуйте вимоги, що ставляться до магнітом'яких матеріалів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТМ – 2/2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОСЦИЛОГРАФА

Мета роботи:

Експериментально визначити магнітну проникливість та питомі втрати магнітних матеріалів за допомогою електронного осцилографа на прикладі тороїдного зразку з електротехнічної сталі.

Програма роботи

1. Вивчення властивостей феромагнетиків у змінних магнітних полях.
2. Вивчення принципу і технічних засобів вимірювання магнітної проникливості та питомих втрат магнітних матеріалів.
3. Вимірювання магнітної проникливості та питомих втрат магнітних матеріалів.
4. Обробка експериментальних даних.
5. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Вивчення властивостей феромагнетиків у змінних магнітних полях

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної лабораторної роботи, вивчити загальні властивості феромагнетиків при роботі їх у змінних магнітних полях. Звернути особливу увагу на динамічну криву намагнічування матеріалів (гістерезисну петлю), магнітну проникливість та питомі втрати магнітних матеріалів.

Етап 2. Вивчення принципу і технічних засобів вимірювання магнітної проникливості та питомих втрат магнітних матеріалів

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної лабораторної роботи, вивчити принцип та технічні засоби вимірювання магнітної проникливості та питомих втрат магнітних матеріалів. Ознайомитись з електричною схемою вмикання вимірювальних приладів (рис. 2.1), принципом роботи електронного осцилографа та інших вимірювальних приладів. З'ясувати призначення та властивості елементів електричної схеми, зокрема, резистора R_0 та інтегратора, які задіяні на двох входах електронного осцилографа.

Етап 3. Вимірювання магнітної проникливості та питомих втрат магнітних матеріалів

Вимірювання магнітної проникливості та питомих втрат магнітних матеріалів проводити у такій послідовності:

- ознайомитись зі схемою досліду (рис 2.1) і усвідомити призначення всіх її елементів та вимірювальної апаратури;
- звернути увагу на форму і конструкцію досліджуваного зразка та занести в табл. 2.1 дані про нього;

Таблиця 2.1

Дані про зразки

Матеріал	Форма	Діаметр		Висота b	Товщина листів δ	Опір первинної обмотки $R_{об1}$	Число витків обмоток	
		внутр. d_1	зовн. d_2				W_1	W_2
		мм	мм				мм	мм

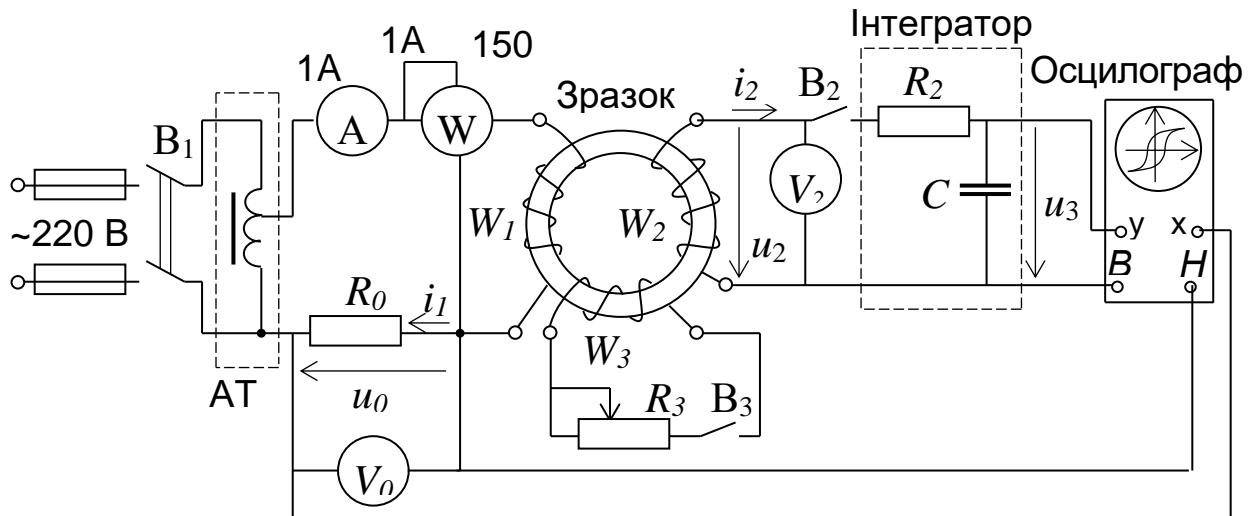


Рисунок 2.1 – Схема визначення магнітних характеристик матеріалів

- зібрати схему згідно з рис. 2.1 і після перевірки схеми викладачем ввімкнути вимикачі B_1 та B_2 , попередньо поставивши ручку автотрансформатора АТ в початкове (нульове) положення;
- збільшуючи за допомогою автотрансформатора намагнічуючий струм (а значить і напруженість магнітного поля), одержати на екрані осцилографа петлю, яка відповідає магнітному насиченню зразка (граничну гістерезисну петлю) та записати показання приладів в табл. 2.2;
- ручками вертикального та горизонтального підсилення осцилографа відрегулювати зображення петлі так, щоб було зручно її змалювати, прикласти до екрана листок паперу (бажано міліметровий або в клітинку) і змалювати граничну петлю (при подальших вимірюваннях ручок вертикального та горизонтального підсилень вже не торкатися, щоб зберегти масштаб постійним);
- не віднімаючи паперу від екрана осцилографа, зменшувати за допомогою автотрансформатора намагнічуючий струм до мінімуму для отримання декількох гістерезисних петель та позначити крапкою на папері праву вершину кожної петлі;
- з'єднуючи плавною лінією вершини всіх гістерезисних петель, отримати основну криву намагнічування (див. зразок на рис. 2.2);
- після отримання кривої намагнічування збільшити струм у обмотці W_1 до значення, відповідного граничній гістерезисній петлі, замкнути вимикач B_3 . та звернути увагу на зміну форми і розміру петлі і показань ватметра в залежності від величини опору резистора R_3 ;
- при певному значенні опору резистора R_3 змалювати петлю на той же листок паперу та записати в табл. 2.2 показання ватметра.

Таблиця 2.2

Результати вимірів та обчислень (частота 50 Гц)

Виміряно								Вибрано	Обчисл.	При- мітка
I_1		U_0		P		U_2		R_0	I_m	
поділ.	А	поділ.	В	поділ.	Вт	поділ.	В	Ом	А	
										В ₃ вимк.
										В ₃ увімк.

Етап 4. Обробка експериментальних даних

Обробку експериментальних даних можна проводити у такій послідовності:

- визначити масштаби по осях координат для магнітної індукції m_B і для напруженості магнітного поля m_H згідно з формулами (2.7)...(2.12), керуючись координатами вершини граничної гістерезисної петлі (рис.2.2) і експериментальними даними (табл.2.1 і 2.2);

- визначити максимальну $\mu_{r m}$ та диференціальну $\mu_{r \partial}$ магнітні проникності, користуючись основною кривою намагнічування (рис.2.2) і масштабами m_B і m_H згідно з формулами (2.1)...(2.2);

- визначити з граничної петлі гістерезису (рис.2.2) коерцитивну силу матеріалу зразка H_c та залишкову індукцію B_r згідно з формулами (2.13)...(2.14);

- визначити площу граничної петлі гістерезису S_2 у випадку, коли B_3 розімкнений, та підрахувати питомі магнітні втрати p' (Вт/кг) для досліджуваного зразка магнітного матеріалу згідно з формулою (2.15);

- для контролю правильності визначення питомих магнітних втрат скористатись показаннями ватметра у схемі рис.2.1 та підрахувати питомі магнітні втрати p'' (Вт/кг) згідно з формулою (2.16).

Результати розрахунків занести в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Результати розрахунків (частота 50 Гц)

Масштаби		B_r	H_c	Магнітна проникність		Питомі втрати	
m_b	m_H			$\mu_{r m}$	$\mu_{r \partial}$	p'	p''
Тл/мм	(А/м)/мм	Тл	А/м	—	—	Вт/кг	Вт/кг

Етап 5. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву, мету і програму роботи.
2. Схему рис. 2.1 та ескіз поперечного перерізу зразка.
3. Заповнені табл. 2.1, 2.2, 2.3.

4. Граничну гістерезисну петлю при розімкненому і замкненому стані вимикача ВЗ.
5. Основну криву намагнічування.
6. Розрахунок масштабів.
7. Розрахунок величин магнітної проникності, залишкової магнітної індукції B_r , коерцитивної сили H_c та питомих магнітних втрат матеріалу.
8. Висновок стосовно впливу вихрових струмів на магнітні характеристики.

Методичні вказівки

До етапу 1

В змінних магнітних полях всередині магнітного матеріалу виникають вихрові струми, які перешкоджають рівномірному розподілу магнітного потоку по перерізу зразка та зменшують магнітну індукцію. Через це магнітні характеристики матеріалів в змінних магнітних полях будуть відрізнятися від таких, що визначенні в постійних полях. Тому в змінних магнітних полях використовують магнітом'які матеріали.

При намагнічуванні матеріалу змінним полем магнітний стан описується складною замкненою кривою, яку називають **динамічною петлею гістерезису** (рис. 2.2).

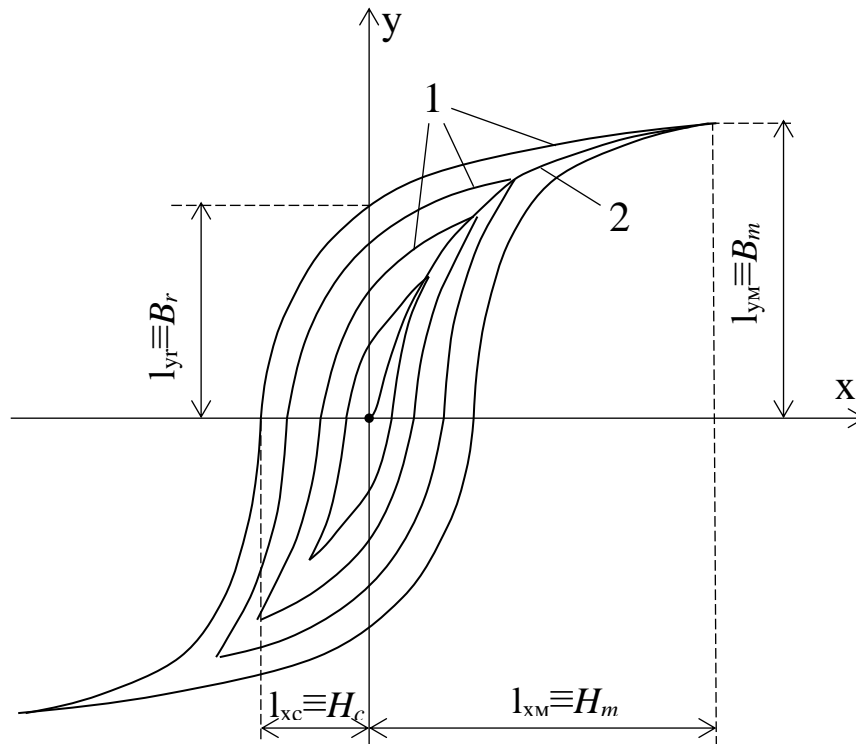


Рисунок 2.2 – Динамічні петлі гістерезису (1) та основна крива намагнічування (2)

Площа петлі пропорційна витратам енергії у зразку за 1 цикл перемагнічування. На відміну від статичної петлі, одержаної при повільному перемагнічуванні, динамічна петля має більшу площу, величина якої залежить не тільки від втрат енергії на гістерезис, а й на вихрові струми. Втрати на вихрові струми залежать від електропровідності магнітного матеріалу, від розмірів зразка, товщини листів, з яких він зібраний, а також від частоти змінного струму. Тому всі виміряні у змінних полях характеристики належать до певної конструкції зразка та певної частоти струму.

Втратами на вихрові струми при малих частотах можна знехтувати порівняно з втратами на гістерезис. З підвищенням частоти вплив вихрових струмів зростає. Геометричне місце вершин симетричних динамічних петель гістерезису, одержаних при зміні напруженості магнітного поля називають **основною кривою намагнічування** (рис.2.2). Для зразків, зібраних з окремих, ізолюваних одна від одної пластин, динамічна крива при частоті 50Гц практично не відрізняється від статичної петлі, одержаної при повільному перемагнічуванні зразка.

Крива намагнічування дає можливість визначити відносну **магнітну проникливість** як важливий параметр, що характеризує здатність матеріалу намагнічуватися та сприяти збільшенню магнітного потоку чи магнітної індукції в ньому за інших однакових умов. Відносна магнітна проникливість μ_r показує, у скільки разів індукція в матеріалі більша, ніж у вакуумі при однаковій напруженості поля. У феромагнетиках магнітна проникливість нелінійно залежить від напруженості поля. Максимальну відносну магнітну проникливість можна визначити з формули

$$\mu_{rm} = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{m_B}{m_H} \operatorname{tg} \alpha_m, \quad (2.1)$$

де B_m , H_m – амплітуда магнітної індукції та напруженості у зразку магнітного матеріалу;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютна магнітна проникливість вакууму;

α_m – кут між дотичною, проведеною з початку осей координат до верхнього згину кривої намагнічування, і віссю x (рис. 2.3);

m_B – масштаб по осі ординат (масштаб магнітної індукції), Тл/мм;

m_H – масштаб по осі абсцис (масштаб магнітної напруженості), А/м/мм.

Інколи магнітні матеріали використовують при одночасному намагнічуванні постійним та змінним магнітними полями з величинами напруженості відповідно H_0 і H_{\sim} , при чому, як правило, $H_{\sim} < H_0$ (рис. 2.3). У цьому випадку перемагнічування змінним полем характеризується частинним гістерезисним циклом, в якому амплітуді напруженості H_{\sim} згідно з кривою намагнічування відповідає амплітуда B_{\sim} магнітної індукції. Властивості феромагнетиків у такому режимі характеризують диференціальною магнітною проникливістю:

$$\mu_{r\partial} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{\sim}}{H_{\sim}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{m_B \cdot \Delta l_y}{m_H \cdot \Delta l_x}. \quad (2.2)$$

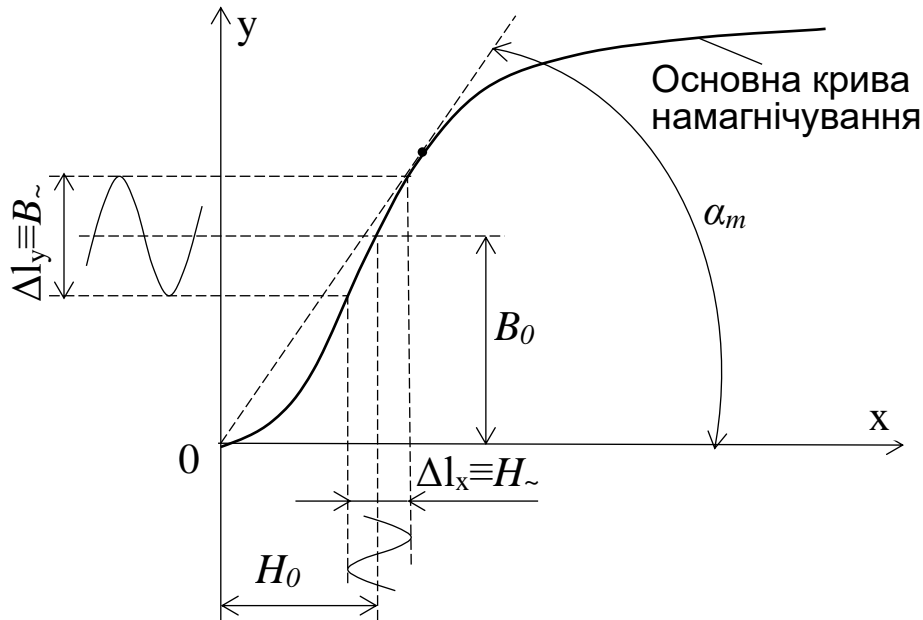


Рисунок 2.3 – До визначення максимальної та диференціальної магнітної проникливості

До етапів 2 і 3

При дослідженні матеріалів часто використовується осцилографічний спосіб завдяки простоті, наочності та можливості візуально спостерігати динамічні петлі гістерезису. Спосіб передбачає використання суцільного (без повітряного зазору) зразка феромагнетика тороїдальної форми. На зразок зверху шару ізоляції намотують обмотки – первинну (намагнічуючу) з числом витків W_1 , вторинну (вимірювальну) з числом витків W_2 та ще одну вторинну обмотку з числом витків W_3 , з допомогою якої можна імітувати вплив вихрових струмів на магнітні характеристики (рис. 2.1). Виходячи із закону повного струму для замкненого магнітного кола для вибраної конструкції зразка магнітного матеріалу ($H \cdot l_{cp} = i_1 \cdot W_1$), можна визначити напруженість магнітного поля H в зразку:

$$H = \frac{i_1 \cdot W_1}{l_{cp}}, \quad (2.3)$$

де i_1 – струм первинної обмотки, А;

$l_{cp} = \pi \frac{d_1 + d_2}{2}$ – довжина середньої магнітної силової лінії в зразку, м.

До пластин X горизонтального відхилення променю електронно-променевої трубки через підсилювач осцилографа підводиться напруга u_0 , яку знімають із зразкового резистора R_0 (рис. 2.1)

$$u_0 = i_1 \cdot R_0 = \frac{l_{cp} \cdot R_0}{w_1} \cdot H. \quad (2.4)$$

Отже, відхилення променю осцилографа по горизонталі пропорційне напруженості магнітного поля у зразку.

У вторинній обмотці виникає електрорушійна сила (ЕРС):

$$e_2 = u_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -W_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (2.5)$$

де S – площа поперечного перерізу зразка (перпендикулярно магнітним силовим лініям), m^2 ;

dB/dt – похідна магнітної індукції B в часі t .

Щоб одержати сигнал u_3 , пропорційний магнітній індукції B , необхідно проінтегрувати ЕРС e_2 , наприклад, за допомогою електричного інтегратора (RC – ланцюжка). Напруга на виході такого інтегратора пропорційна магнітній індукції в зразку ($K_i = \frac{1}{R_2 C}$):

$$u_3 = \frac{1}{R_2 C} \int_0^t e_2 dt = -\frac{1}{R_2 C} \int_0^B W_2 \cdot S \cdot dB = -K_i W_2 \cdot S \cdot B. \quad (2.6)$$

Ця напруга прикладена через підсилювач до вертикально відхилюючих пластин осцилографа. Похибка інтегрування зменшується в разі збільшення значень R_2 та C .

При одночасному прикладенні напруг u_0 та u_3 до входів осцилографа на його екрані виникає крива – динамічна залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля, тобто гістерезисна петля.

За допомогою автотрансформатора AT можна регулювати струм частотою 50 Гц в первинній обмотці (рис. 2.1), у тому числі в зразковому резисторі R_0 з опором 2...5 Ом. Нажаль, діюче значення цього струму, яке вимірюється амперметром, не дозволяє визначити його амплітуду i , відповідно, масштаб m_H по осі абсцис осцилографа через відхилення форми кривої струму $i_1(t)$ від синусоїди внаслідок нелінійності кривої намагнічування зразка. Тому для визначення амплітуди струму в первинній обмотці I_m в схемі рис. 2.1 використовується електронний вольтметр V_0 з амплітудним детектором.

Ватметр показує активну потужність, яку споживає дослідний зразок. Зміна величини опору R_3 при ввімкненому вимикачу B_3 дає змогу спостерігати вплив вихрових струмів на магнітні характеристики зразків – на показання ватметра і площу гістерезисної петлі.

До етапу 4

Для розрахунку магнітних параметрів зразків за одержаними кривими (петлі гістерезису та основної кривої намагнічування) необхідно визначити масштаби по осях координат. Для цього зручно використати вершину граничної петлі гістерезису з координатами B_m , H_m (рис.2.2). Електрорушійна сила (діюче значення), яка наводиться в вимірювальній обмотці W_2 магнітним потоком $\Phi = S \cdot B_m$:

$$E_2 = U_2 = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot S \cdot B_m, \quad (2.7)$$

де f – частота перемагнічування.

Звідси амплітуда магнітної індукції

$$B_m = \frac{U_2}{4,44 f \cdot W_2 \cdot S}, \text{ Тл.} \quad (2.8)$$

Масштаб по осі ординат:

$$m_B = \frac{B_m}{l_{ym}}, \text{ Тл/мм,} \quad (2.9)$$

де l_{ym} – відхилення променя осцилографа відповідно індукції B_m , мм.

Максимальне значення напруженості магнітного поля в цьому ж зразку можна обчислити за формулою

$$H_m = \frac{I_m \cdot W_1}{l_{cp}}, \text{ А/м,} \quad (2.10)$$

де I_m – амплітуда намагнічуючого змінного струму $i_1(t)$ в первинній обмотці W_1 та в зразковому резисторі R_0 , А.

Змінний струм $i_1(t)$ відхиляється від синусоїдального закону через нелінійний характер кривої намагнічування зразка. Тому для визначення амплітуди цього струму I_m можна скористатись показаннями U_0 електронного вольтметра V_0 з амплітудним детектором (рис. 2.1):

$$I_m = \frac{\sqrt{2} \cdot U_0}{R_0}. \quad (2.11)$$

Масштаб по осі абсцис:

$$m_H = \frac{H_m}{l_{xm}}, \quad (2.12)$$

де l_{xm} – відхилення променя осцилографа відповідно напруженості H_m , мм.

Положення ручок підсилення осцилографа доцільно залишити незмінним протягом всього часу випробуванні, щоб масштаби були також незмінними.

Максимальну та диференціальну магнітні проникливості можна визначити, користуючись основною кривою намагнічування (рис. 2.2 і рис. 2.3) та відповідними масштабами. Оскільки ці криві одержані в координатах l_x , l_y , то для переходу до магнітних величин необхідно використати масштаби відповідно до формул (2.1) і (2.2).

Коерцитивна сила H_c та залишкова індукція B_r матеріалу зразка визначаються за граничною петлею гістерезису (рис.2.2):

$$H_c = l_{xc} \cdot m_H \quad (2.13)$$

$$B_r = l_{yr} \cdot m_B, \quad (2.14)$$

де l_{xc} , l_{yr} – відхилення променя осцилографа (в мм), відповідне H_c та B_r .

Питомі магнітні втрати p' (Вт/кг) для досліджуваного зразка магнітного матеріалу визначаються за величиною площі граничної петлі гістерезису S_r у випадку, коли вимикач B_3 розімкнений, тобто коли не імітується збільшення магнітних втрат під впливом вихрових струмів:

$$p' = \frac{S_r \cdot f \cdot m_B \cdot m_H}{\gamma}, \quad (2.15)$$

де S_r – площа петлі, мм²;

γ – питома вага матеріалу (для електротехнічної сталі $\gamma = 7700$ кг/м³);

f – частота струму ($f = 50$ Гц).

Для контролю правильності обчислення питомих магнітних втрат використовують показання ватметра у схемі рис.2.1. Елементи схеми, що ввімкнені в коло вторинної обмотки, мають великий опір, тому ватметр на них практично не реагує і вимірює тільки втрати потужності P в первинному колі – втрати на гістерезис та вихрові струми в зразку, а також електричні втрати в опорі первинної обмотки. Тому питомі магнітні втрати можна обчислити за формулою:

$$p'' = \frac{P - I_1^2 R_{об.1}}{G}, \quad (2.16)$$

де $G = S \cdot l_{cp} \cdot \gamma$ – маса зразка, кг.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються магнітні характеристики матеріалів при їх роботі в постійних та змінних магнітних полях?

2. Як за допомогою осцилографа одержати динамічну криву намагнічування?
3. Поясніть відміну динамічної кривої намагнічування від основної.
4. Яку властивість матеріалу характеризує величина магнітної проникливості?
5. Які ви знаєте види магнітної проникливості?
6. Як визначити максимальну магнітну проникливість?
7. В яких випадках використовують диференціальну магнітну проникливість та як вона визначається?
8. Як визначаються питомі магнітні втрати в матеріалі?
9. Чим пояснити втрати потужності феромагнетиків у змінних магнітних полях?
10. Як впливає зміна частоти перемагнічування на магнітні характеристики феромагнетиків?
11. Поясніть ідею осцилографічного способу дослідження магнітних характеристик.
12. Поясніть призначення інтегратора в схемі.
13. Як визначаються масштаби за осями координат?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТМ – 2/3

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО МАГНІТНОГО ОПОРУ ФЕРОМАГНЕТИКІВ

Мета роботи:

Експериментально визначити складові питомого магнітного опору феромагнетика.

Програма роботи

1. Ознайомлення з основними теоретичними положеннями про комплексну величину магнітного опору.
2. Вивчення принципу та технічних засобів вимірювання комплексного питомого магнітного опору феромагнетика.
3. Проведення експерименту.
4. Обробка експериментальних даних.
5. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Ознайомлення з основними теоретичними положеннями про комплексну величину магнітного опору

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної лабораторної роботи, ознайомитись з основними теоретичними положеннями про комплексний магнітний опір. Звернути особливу увагу на еквівалентну заміну несинусоїдального закону зміни струму намагнічування синусоїдальним законом, а також на еквівалентну заміну динамічної кривої намагнічування матеріалу, що має вигляд гістерезисної петлі, динамічною кривою намагнічування у вигляді еліпсу. Ознайомитись з електричною схемою заміщення та векторною діаграмою котушки з феромагнітним осердям.

Етап 2. Вивчення принципу та технічних засобів вимірювання комплексного питомого магнітного опору феромагнетика

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної лабораторної роботи, вивчити принцип та технічні засоби вимірювання комплексного магнітного опору феромагнетика. Ознайомитись зі схемою вмикання вимірювальних приладів для проведення експерименту (рис. 3.1). З'ясувати призначення та властивості кожного елементу електричної схеми.

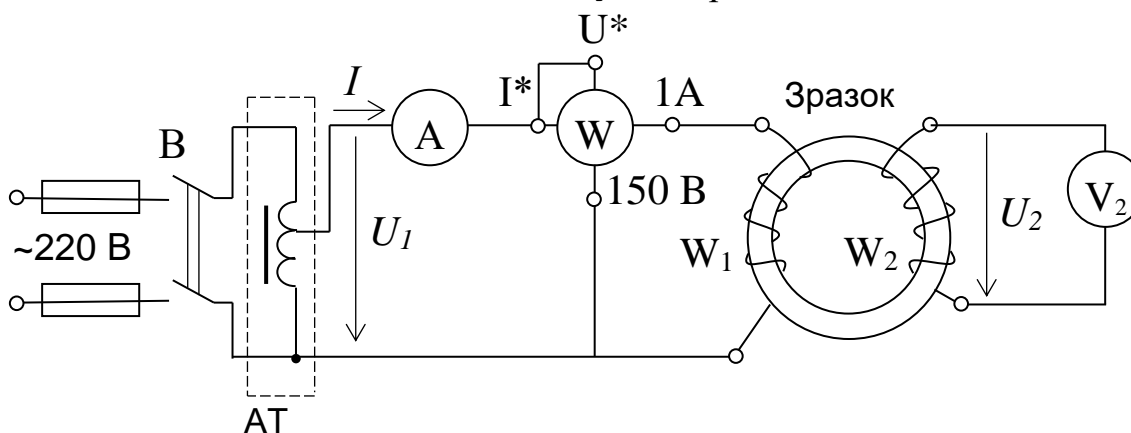


Рисунок 3.1 – Схема проведення експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Вимірювання комплексного питомого магнітного опору феромагнетика проводити у такій послідовності:

- ознайомитись зі схемою дослідів (рис 3.1) і усвідомити призначення всіх її елементів та вимірювальних приладів;
- звернути увагу на форму і конструкцію досліджуваного зразка магнітних матеріалів та занести в табл. 3.1 дані про зразок;

Таблиця 3.1

Дані про зразок магнітного матеріалу

Матеріал	Форма зразка	Діаметри		n	δ	Число витків		r_l
		d_1	d_2			W_1	W_2	
—	—	мм	мм	—	мм	—	—	Ом

- обчислити за формулою (3.10) діюче значення електрорушійної сили (ЕРС) E_{2H} , яка виникає у вимірювальній обмотці W_2 при індукції насичення для досліджуваного зразка матеріала $B_H = (1,4...1,5)$ Тл,

- зібрати схему (рис. 3.1) і після перевірки схеми викладачем ввімкнути вимикач B , попередньо поставивши ручку автотрансформатора АТ в початкове (нульове) положення;

- збільшити за допомогою автотрансформатора АТ струм в намагнічуючій обмотці W_1 до значення, за якого напруга на виході вимірювальної обмотки приблизно дорівнюватиме E_{2H} , тобто намагнітити зразок до стану насичення, і занести показання приладів в табл. 3.2;

- поступово, зменшуючи за допомогою автотрансформатора АТ струм в намагнічуючій обмотці W_1 до мінімального значення 0,0375 А, одержати до 10 експериментальних точок і занести показання приладів в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Результати вимірювань та обчислень

Виміряно			Обчислено					
I	U_2	P	P_m	H_{me}	B_m	ρ_Z	ρ_X	ρ_R
А	В	Вт	Вт	А/м	Тл	м/Гн	м/Гн	м/Гн

Етап 4. Обробка експериментальних даних

Обробку експериментальних даних проводити у такій послідовності:

- користуючись формулами (3.11)...(3.16) методичних вказівок з даної лабораторної роботи, обчислити для всіх експериментальних точок магнітні втрати в зразку P_m , еквівалентні амплітуди напруженості H_{me} і магнітної індукції B_m , модуль комплексного питомого магнітного опору ρ_Z та його складові ρ_X і ρ_R та занести результати обчислень в табл. 3.2;

- за даними табл.3.2. побудувати на одному рисунку залежності B_m та ρ_Z від величини H_{me} , а на другому – залежності ρ_X і ρ_R від B_m , а також зробити висновки стосовно характеру одержаних графічних залежностей.

Етап 5. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву, мету і програму роботи.
2. Схема рис. 3.1.
3. Заповнені таблиці 3.1 і 3.2 та приклади розрахунків величин табл. 3.2.
4. Графіки залежностей $B_m = f(H_{me})$, $\rho_Z = f(H_{me})$, $\rho_X = f(B_m)$, $\rho_R = f(B_m)$.
5. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 1

Процес перемагнічування феромагнетиків можна описати залежністю $B=f(H)$, яку називають *петлею гістерезису* (рис. 3.2). Залежність ця нелінійна. Тому, якщо до котушки, розміщеної на феромагнітному осерді, прикласти синусоїдальну напругу, то магнітний потік та індукція в осерді також будуть синусоїдальними, а намагнічуючий струм та напруженість магнітного поля – несинусоїдальними. Для спрощення розрахунків магнітних кіл несинусоїдальні процеси в них та їх характерні величини замінюють еквівалентними синусоїдальними. Тоді зв'язок між B і H можна виразити рівнянням еліпса 2, площа якого у відповідному масштабі дорівнює втратам енергії в осерді за один повний цикл перемагнічування, тобто площі реальної петлі гістерезису 1 (рис. 3.2).

Амплітуди еквівалентних синусоїд визначають, виходячи з таких міркувань. При синусоїдальній напрузі, коли магнітна індукція в осерді також синусоїдальна, за еквівалентну амплітуду B_{me} природно вибрати дійсну амплітуду B_m , а еквівалентну амплітуду напруженості магнітного поля H_{me} можна вибрати, виходячи з рівності магнітних втрат в осерді при дійсній H_m та еквівалентній H_{me} амплітудах (рис. 3.2).

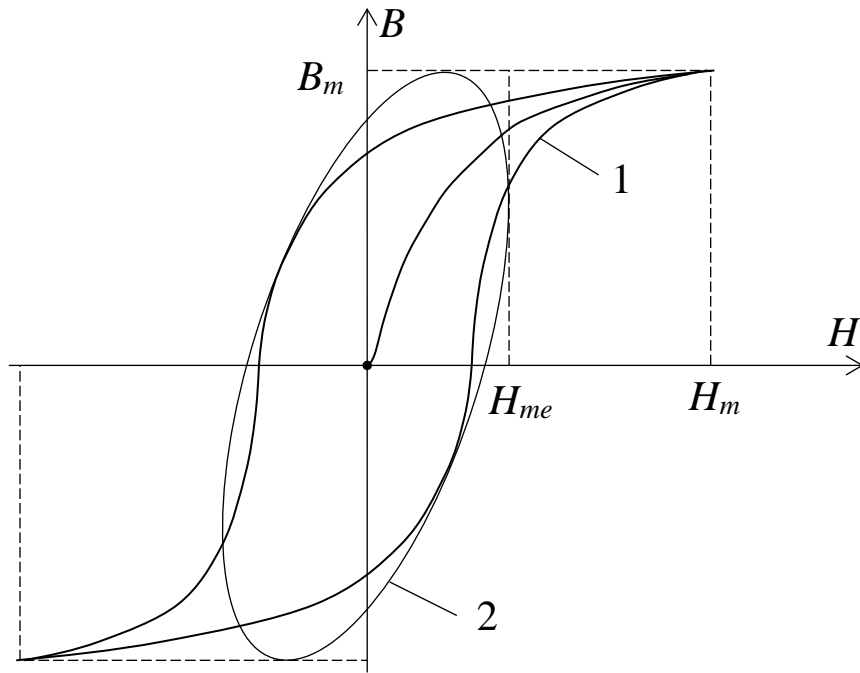


Рисунок 3.2 – Петля гістерезису (1) та еквівалентний еліпс (2)

Після введення еквівалентних синусоїд електричне коло котушки з феромагнітним осердям можна вважати лінійним для конкретної незмінної за величиною напруги. Це дає право записати для неї рівняння напруг у комплексній формі, побудувати векторну діаграму котушки і представити її еквівалентну схему – схему заміщення (рис. 3.3).

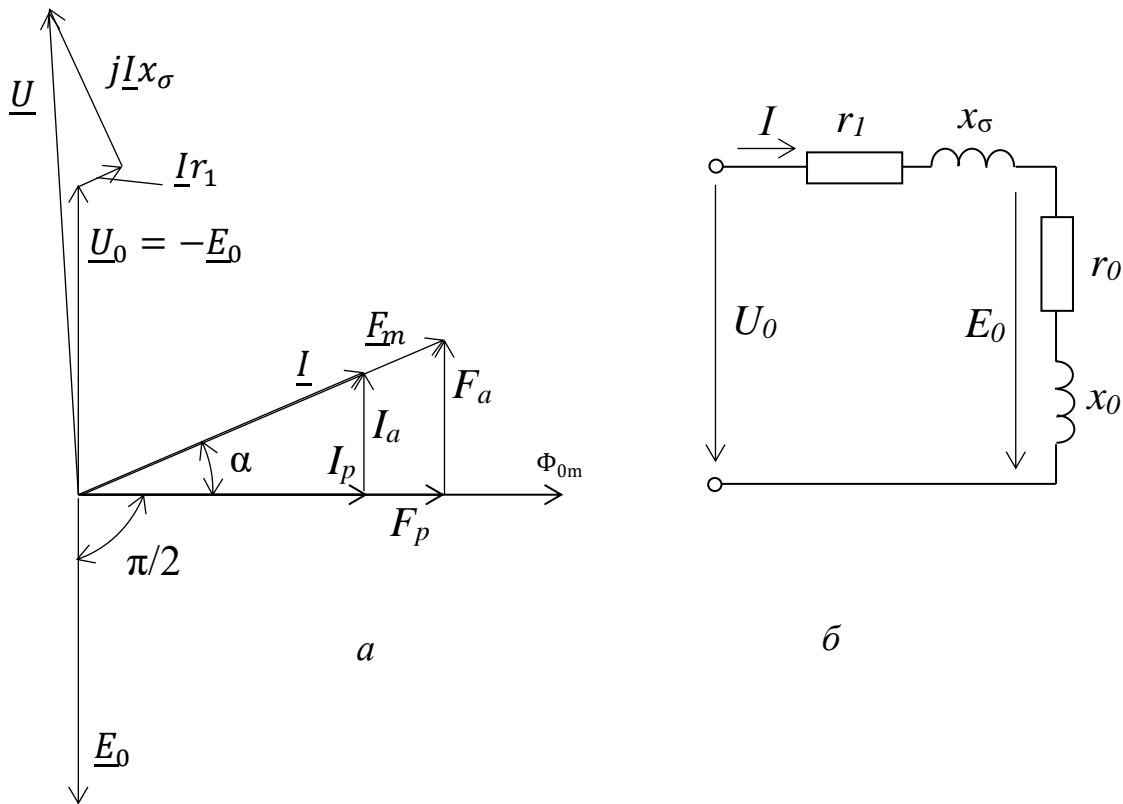


Рисунок 3.3 – Котушка з феромагнітним осердям:
 а) векторна діаграма; б) схема заміщення

Основний магнітний потік Φ_0 (його амплітуда позначена на векторній діаграмі як Φ_{0m}) проходить по феромагнітному осерддю і викликає в намагнічуючій обмотці електрорушійну силу (ЕРС) E_0 . Деяка частина загального магнітного потоку проходить іншим шляхом, у тому числі повітрям, яка називається потоком розсіювання Φ_σ . Прикладена до котушки напруга U має три складові:

U_0 – зрівноважує ЕРС E_0 ;

$jI x_\sigma$ – зрівноважує ЕРС, що індукується в котушці потоком розсіювання Φ_σ (x_σ – індуктивний опір розсіювання);

$I r_1$ – враховує спад напруги на активному опорі r_1 котушки.

При наявності втрат потужності P_M в осердді (на гістерезис та вихрові струми) струм I в котушці, крім реактивної складової I_p , має також активну складову I_a , яка співпадає по фазі з напругою U_0 (на векторній діаграмі I_a співпадає за напрямом з вектором U_0 – рис.3.3, а). Це означає, що в схемі заміщення котушки з феромагнітним осердям (рис.3.3, б) окрім індуктивного опору x_0 , яким враховано основний магнітний потік Φ_0 , необхідно використати активний опір r_0 для врахування магнітних втрат в феромагнітному осердді цієї котушки. Таким чином, магнітні втрати P_M можна визначити за формулою:

$$P_M = U_0 \cdot I_a = I^2 \cdot r_0. \quad (3.1)$$

З формули (3.1) випливає значення активного опору r_0 :

$$r_0 = \frac{P_M}{I^2} \quad (3.2)$$

З векторної діаграми (рис.3.3, а) видно, що основний магнітний потік Φ_{0m} відстає по фазі на кут α від струму \underline{I} , а значить і від магніторушійної сили (МРС) \underline{F}_m . Цю особливість котушки з феромагнітним осердям можна врахувати з допомогою закону Ома для магнітних кіл:

$$Z_M = \frac{F_m}{\Phi_{0m}} = |Z_M|e^{j\alpha} = R_M + jX_M, \quad (3.3)$$

де $F_m = I_{m.e} \cdot W_1 = I_{me} \cdot w_1$ – магніторушійна сила (МРС), А;

$I_{m.e} = \sqrt{2} \cdot I$ – еквівалентна амплітуда струму в котушці, А;

I – діюче значення струму в котушці (показання амперметра), А;

W_1 – число витків намагнічуючої обмотки;

α – фазовий кут, на який магнітний потік Φ_{0m} в осерді відстає від струму \underline{I} і від магніторушійної сили \underline{F}_m (рис.3.3, а);

Z_M – комплексний магнітний опір, 1/Гн;

R_M – дійсна складова магнітного опору, яка співпадає за напрямом зі струмом I_p і основним магнітним потоком Φ_{0m} , 1/Гн;

X_M – уявна складова магнітного опору, яка зумовлена втратами потужності P_M і співпадає за напрямом зі струмом I_a , 1/Гн.

Якщо осердя котушки магнітно замкнене (суцільне кільце), то амплітуда основного магнітного потоку

$$\Phi_{0m} = B_m \cdot S, \quad (3.4)$$

де B_m – амплітуда магнітної індукції, Тл;

S – площа поперечного перетину осердя, м².

Величина магніторушійної сили (МРС), згідно з законом повного струму:

$$F_m = I_{me} \cdot W = H_{me} \cdot l, \quad (3.5)$$

де l – середня довжина магнітної силової лінії осердя котушки, м.

З урахуванням (3.4) і (3.5), формула (3.3) для комплексного магнітного опору отримує вигляд

$$Z_M = \frac{H_{me} \cdot l}{B_m \cdot S} = \rho_Z \cdot \frac{l}{S} = (\rho_R + j\rho_X) \frac{l}{S} = R_M + jX_M, \quad (3.6)$$

де $\rho_Z = \frac{H_{me}}{B_m} = \frac{1}{\underline{\mu}_a}$ – комплексний питомий магнітний опір, м/Гн;

$\underline{\mu}_a$ – комплексна абсолютна магнітна проникливість феромагнетика;

ρ_R і ρ_X – складові питомого магнітного опору, м/Гн;

$$R_M = \rho_R \frac{l}{S}; X_M = \rho_X \frac{l}{S}, 1/\text{Гн}.$$

Значення складових питомого опору ρ_R і ρ_X залежить від температури феромагнетика, напруженості та частоти магнітного поля.

Користуючись поняттям комплексного магнітного опору, можна легко і порівняно просто обчислити параметри магнітних кіл електричних апаратів та приладів змінного струму. Зокрема, МРС котушки можна представити у такому вигляді:

$$\underline{F}_m = Z_M \cdot \Phi_{0m} = R_M \cdot \Phi_{0m} + jX_M \cdot \Phi_{0m} = F_p + jF_a, \quad (3.7)$$

де $F_p = \sqrt{2} \cdot I_p \cdot W$ – реактивна складова МРС, А;

$F_a = \sqrt{2} \cdot I_a \cdot W$ – активна складова МРС;

$$F_m = \sqrt{F_p^2 + F_a^2}, \text{ А}$$

Таким чином, за відомими складовими значеннями магнітного опору осердя R_M і X_M і магнітного потоку Φ_{0m} можна визначити МРС F_m і, відповідно, еквівалентну амплітуду струму в котушці $I_{m.e} = F_m/W$.

І навпаки, знаючи реактивну складову МРС котушки F_p , яка близька за значенням до F_m , можна визначити магнітний потік в осерді:

$$\Phi_{0m} = \frac{F_p}{R_M} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_p W}{R_M} \approx \frac{\sqrt{2} \cdot IW}{R_M}, \quad (3.8)$$

Потужність магнітних втрат в осерді феромагнетика можна визначити з формули:

$$P_M = \pi \cdot f \cdot \Phi_{0m}^2 \cdot X_M. \quad (3.9)$$

До етапу 2

Зразок має вигляд тороїда (рис. 3.1) і в магнітному відношенні являє собою замкнене коло. На зразок, поверх шару ізоляції, намотані дві обмотки \square намагнічуюча та вимірювальна з числом витків відповідно W_1 і W_2 . Для визначення питомого комплексного магнітного опору феромагнетика, виходячи із схеми заміщення котушки з феромагнітним осердям (рис. 3.3, б), вимірюють діюче

значення намагнічуючого струму I , електрорушійну силу (ЕРС) E_2 , яка виникає у вимірювальній обмотці W_2 (E_2 практично дорівнює напрузі U_2 , тобто показанням вольтметра V_2), та активну потужність P у намагнічуючому колі.

До етапу 3

Діюче значення електрорушійної сили (ЕРС) E_{2H} , яка виникає у вимірювальній обмотці W_2 при індукції насичення, можна обчислити за формулою:

$$E_{2H} \approx U_{2H} = 4,44B_H f W_2 S_{зр}, \quad (3.10)$$

де f - частота перемагнічування;

$S_{зр} = n\delta(d_2 - d_1)/2$ – площа перерізу зразка, м²;

$B_H = (1,4 \dots 1,5)$ Тл – індукції насичення для досліджуваного зразка матеріалу.

До етапу 4

Показання ватметра за схемою рис.3.1 визначаються сумою магнітних втрат P_m та електричних втрат в намагнічуючій обмотці W_1 . Тому магнітні втрата P_m можна визначити за формулою:

$$P_m = P - I^2 \cdot r_1, \quad (3.11)$$

де r_1 – активний опір намагнічуючої обмотки W_1 , Ом (див. табл.3.1).

Еквівалентна амплітуда напруженості магнітного поля в зразку визначається діючим значенням струму I в намагнічуючій обмотці W_1 :

$$H_{me} = \frac{\sqrt{2}IW_1}{l}, \text{ А/м} \quad (3.12)$$

де $l = \pi(d_1 + d_2)/2$ – довжина середньої магнітної лінії, м.

Використовуючи значення U_2 , розраховують амплітуду магнітної індукції в зразку:

$$B_m = \frac{U_2}{4,44fW_2S_{зр}}, \text{ Тл}, \quad (3.13)$$

Модуль комплексного магнітного опору:

$$\rho_Z = \frac{H_{me}}{B_m}, \text{ м/Гн}. \quad (3.14)$$

Уявна складової комплексного магнітного опору, згідно з (3.6) і (3.9), визначається за величиною магнітних втрат:

$$\rho_X = X_m \frac{S_{зр}}{l} = \frac{P_m}{\pi f \Phi_{0m}^2} \cdot \frac{S_{зр}}{l} = \frac{P_m}{\pi f S_{зр} l B_m^2}, \text{ м/Гн} \quad (3.15)$$

Дійсна складова комплексного магнітного опору, згідно з (3.6):

$$\rho_R = \sqrt{\rho_Z^2 - \rho_X^2} \quad (3.16)$$

Для звичайних магнітом'яких матеріалів діапазон значень ρ_X та ρ_R становить (100...1000) м/Гн.

Контрольні запитання та завдання

1. Намалюйте схему заміщення котушки з феромагнітним осердям.
2. Які елементи схеми заміщення зумовлені наявністю феромагнітного осердя?
3. Запишіть закон Ома для магнітного кола.
4. Які властивості феромагнетика характеризують складові комплексного магнітного опору?
5. Вкажіть на зв'язок між складовими електричної провідності в схемі заміщення та складовими комплексного магнітного опору.
6. Вкажіть на зв'язок між величиною магнітних втрат в осерді та складовою комплексного магнітного опору.
7. Як змінюється комплексний магнітний опір та його складові з ростом напруженості магнітного поля?
8. Охарактеризуйте значення комплексного магнітного опору при насиченні феромагнетика.
9. Як практично застосовується комплексний магнітний опір та його складові?
10. Поясніть суть методу визначення складових комплексного магнітного опору.
11. З яких міркувань виходять при визначенні амплітуд еквівалентних синусоїд магнітних величин?
12. Поясніть, яким чином в лабораторній роботі визначають амплітуди H_{me} та B_m .
13. Чому перед вимірюванням магнітних характеристик необхідно розмагнічувати зразки феромагнетиків?
14. В яких випадках при вимірюванні магнітних характеристик розмагнічувати зразки не треба?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТМ – 2/4

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАСТИНЧАТИХ ЗРАЗКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФЕРОМЕТРА

Мета роботи:

Експериментальне визначення магнітної напруженості, магнітної індукції, залишкової індукції, коерцитивної сили та магнітної проникливості пластинчатих зразків за допомогою ферометра.

Програма роботи

1. Ознайомлення з методикою експерименту та апаратурою.
2. Проведення експерименту.
3. Обробка експериментальних даних.
4. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Ознайомлення зі методикою експерименту та апаратурою

Ознайомитися з методикою визначення характеристик магнітних матеріалів, принципом дії ферометра та схемою експерименту (рис. 4.1) і усвідомити призначення всіх її елементів. Вивчити конструкцію приставки (пермеаметра) для дослідження пластинчастих зразків.

Відомості про пермеаметр та зразки занести в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Відомості по пермеаметр та зразки

Матеріал та його марка	Зразки					Пермеаметр			
	b	δ	n	$S_{зр}$	l	Число витків			S_H
						W_I	W_H	W_B	
	мм	мм	шт.	м ²	м	-	-	-	м ²

У табл. 4.1 позначено: b , δ – ширина і товщина пластини; n – загальне число пластин (у двох пакетах); $S_{зр}$ – площа перерізу зразка; l – довжина частини пакета, що знаходиться в зоні дії магнітного поля; W_I – число витків намагнічуючої обмотки; S_H – площа перерізу плоскої вимірювальної обмотки W_H . Пластини магнітного матеріалу збирають у два пакети і рівномірно затискують їх в пази з торцевих сторін. Кількість витків намагнічуючої обмотки W_I бажано вибрати максимальною для зменшення величини струму I в ній.

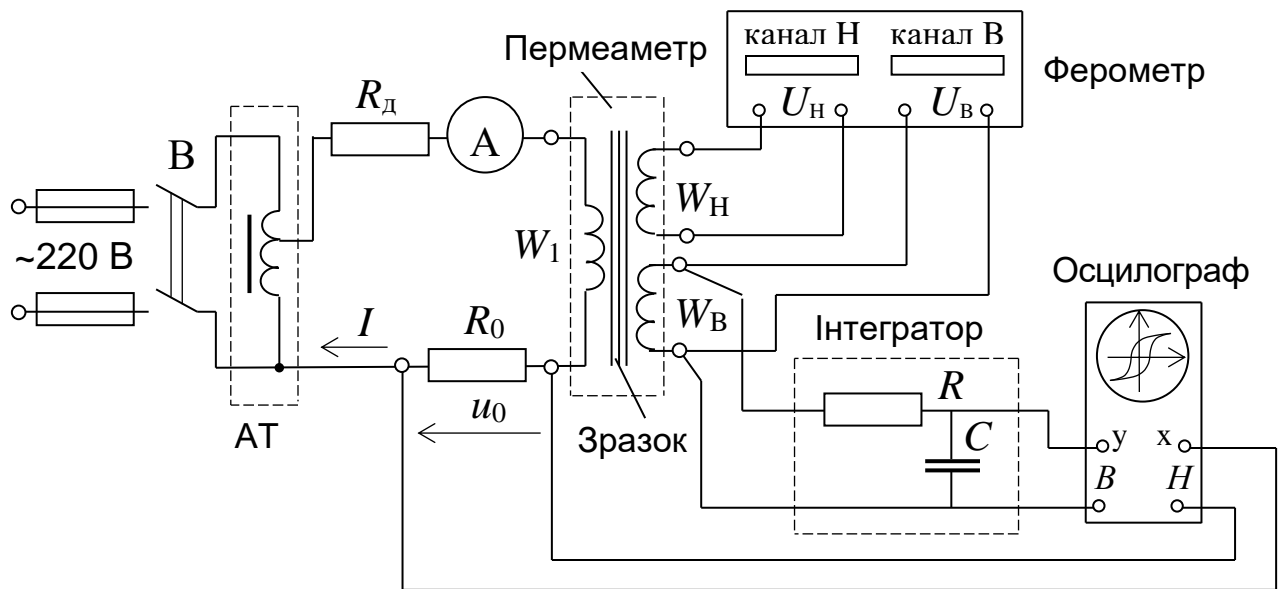


Рисунок 4.1 – Схема проведення експерименту

Резистор R_d має опір значно більший загального опору намагнічуючої обмотки. Завдяки цьому вплив нелінійності характеристики намагнічуючої обмотки стає незначним, і тому намагнічуючий струм I і напруженість магнітного поля H мають синусоїдальний характер.

Зразковий резистор R_0 має опір 2...5 Ом. Падіння напруги на ньому $U_0 = \sqrt{2} \cdot I \cdot R_0$ пропорційне напруженості магнітного поля в зразку згідно із законом повного струму:

$$\sqrt{2} \cdot I \cdot W_1 = H_m \cdot l,$$

де H_m – амплітуда напруженості магнітного поля;

l – довжина частини зразка в зоні дії магнітного поля.

Виходи вимірювальних обмоток W_n і W_b пермеаметра, в яких виникають електричні напруги U_n і U_b в залежності від напруженості H та індукції B магнітного поля, підключають до входів відповідних каналів ферометра. Кількість витків цих обмоток вибирають такою, щоб величини наведених в них електрорушійних сил (ЕРС) при максимальних значеннях H і B не перевищували границь виміру ферометра.

До виходу вимірювальної обмотки W_b увімкнений також інтегратор, за допомогою якого одержують напругу, пропорційну магнітній індукції B в зразку. Електронний осцилограф дозволяє одержати на його екрані зображення динамічних петель гістерезису завдяки тому, що на входи його каналів X та Y подані напруги, пропорційні відповідно напруженості магнітного поля H та магнітній індукції B в зразку.

Етап 2. Проведення експерименту

Зібрати схему, наведену на рис. 4.1.

Виставити автотрансформатором мінімальну напругу на його виході. Після перевірки схеми викладачем ввімкнути вимикач B та живлення ферометра і осцилографа.

Провести калібрування ферометра, керуючись інструкцією. Далі, збільшуючи за допомогою автотрансформатора АТ намагнічуючий струм, одержати на екрані осцилографа граничну петлю гістерезису, що відповідає режиму магнітного насичення зразка. При необхідності збільшити кількість витків вимірювальних обмоток.

На передній панелі ферометра натиснути кнопки “ U_H ”, “ U_B ” та “ $U_c(H_c)$ ”. Після встановлення показань на цифрових табло записати в табл. 4.2 показання цифрового табло каналу H – це напруга або електрорушійна сила $E_{cp}(H_c)$, величина якої пропорційна коерцитивній силі зразка H_c .

Далі, натиснути кнопку “ $U_r(B_r)$ ” і також записати показання цифрового табло каналу B – це напруга або електрорушійна сила $E_{cp}(B_r)$, величина якої пропорційна залишковій магнітній індукції B_r .

Таблиця 4.2

Результати визначення коерцитивної сили і залишкової індукції

Виміряно		Обчислено				
$E_{cp}(H_c)$	$E_{cp}(B_r)$	H_c	B_r	$\sqrt{2} \cdot I \cdot W_1$	$H_m \cdot l$	$\Delta U_{\text{магн}}$
В	В	А/м	Тл	А	А	А

Натиснути кнопку “ $U_{cp}(I_m)$ ” на передній панелі ферометра. На цифрових табло ферометра мають бути показання $E_{cp}(H)$, $E_{cp}(B)$, що в даному випадку пропорційні амплітудам магнітної напруженості H_m та магнітної індукції B_m . Виміряти величину намагнічуючого струму I .

Зменшувати ступінчато намагнічуючий струм I , вимірювати на кожній ступені напругу та величину струму в обмотках і одержати таким чином до 10 експериментальних точок, у тому числі 3-4 точки в зоні слабких магнітних полів. Остання точка повинна відповідати значенню $E_{cp}(B) = (2 \dots 3)$ мВ. Результати вимірів занести в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Результати визначення амплітуд магнітної напруженості та індукції

№ пп	Виміряно			Обчислено		
	I А	$E_{cp}(H)$ В	$E_{cp}(B)$ В	H_m А/м	B_m Тл	μ_r -
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Етап 3. Обробка експериментальних даних

Користуючись експериментальними даними табл. 4.3 і формулами (4.8), (4.9), (4.10), обчислити та занести в табл.4.3 усі значення амплітуди напруженості магнітного поля H_m , амплітуди магнітної індукції B_m і відносної магнітної проникливості μ_r .

Користуючись експериментальними даними табл. 4.2 та формулами, аналогічними формулам (4.8) і (4.9), обчислити та занести в табл.4.2 значення коерцитивної сили H_c та залишкової індукції B_r , які відповідають режиму магнітного насичення зразка (граничній петлі гістерезису).

Побудувати в декартовій системі координат залежності $B_m = \varphi_1(H_m)$ і $\mu_r = \varphi_2(H_m)$, прийнявши спільною для них вісь абсцис H_m .

Вибрати на прямолінійній ділянці кривої намагнічування $B_m = \varphi_1(H_m)$ точку, для якої обчислити падіння магнітної напруги в зразку $U_{\text{магн}} = H_m \cdot l$. Для тієї ж точки визначити магніторушійну силу (МРС)

$$F = \sqrt{2} \cdot I \cdot W_1,$$

де I – значення струму, що відповідає H_m .

Розрахувати різницю між магніторушійною силою і магнітною напругою $\Delta U_{\text{магн}} = \sqrt{2} \cdot I \cdot W_1 - H_m \cdot l$ та записати результат в табл. 4.2.

Етап 4. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву, мету і програму роботи.
2. Схему рис. 4.1.
3. Заповнені таблиці 4.1, 4.2 і 4.3 та приклади виконаних розрахунків.
4. Графіки залежностей $B_m = \varphi_1(H_m)$ і $\mu_r = \varphi_2(H_m)$.
5. Висновки стосовно отриманих залежностей та появи $\Delta U_{\text{магн}}$.

Методичні вказівки

До етапів 1 і 2

Пластинчасті зразки магнітних матеріалів для забезпечення вимірювань їх характеристик розміщують у спеціальному пристрої – пермеаметрі (рис.4.2). Пермеаметр складається з ярма, яке разом із зразком утворює замкнене магнітне коло, та обмоток – намагнічуючої і двох вимірювальних. Ярмо виготовлене із сплаву з великою магнітною проникливістю і має значно більшу площу перерізу порівняно із зразком, завдяки чому магнітний опір ярма значно менше опору зразка. Зразок із двох пакетів пластин притискають до ярма гвинтами (рис.4.2, а). Намагнічуюча обмотка W_1 розміщена у вільному просторі ярма так, що обидва пакети пластин містяться в центральній частині цієї обмотки (рис.4.2, б).

Усередині намагнічуючої обмотки W_1 в центральній частині пермеаметра намотана вимірювальна обмотка W_B , що охоплює зразок (рис.4.2,б). Вона служить для вимірювання магнітної індукції в зразку. Електрорушійна сила, що виникає в цій обмотці згідно з законом електромагнітної індукції:

$$e_B = -W_B \cdot S_{\text{зр}} \frac{dB}{dt}, \quad (4.1)$$

де W_B – число витків обмотки;

$S_{\text{зр}}$ – площа перерізу зразка, м²;

B – магнітна індукція в зразку, Тл.

Якщо магнітна індукція змінюється в часі за синусоїдним законом, то згідно (4.1) електрорушійна сила e_B відстає за фазою від індукції B на 90° . Тобто, e_B відстає в часі від індукції B на чверть періоду T .

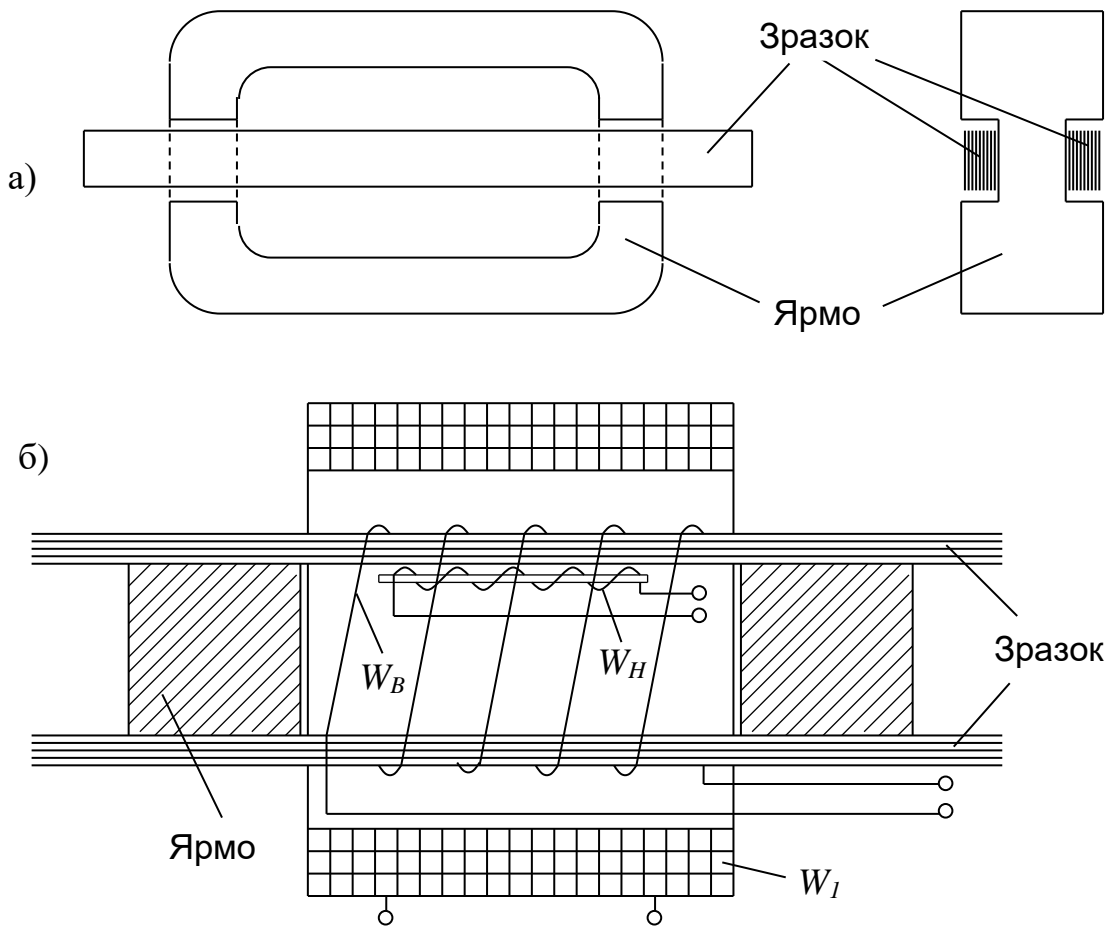


Рисунок 4.2 – Пристрій для випробування пластинчастих зразків – пермеаметр:
 а) ярмо пермеаметра із зразком; б) намагнічуюча (W_1) та вимірювальні (W_B , W_H) обмотки.

Вимірювання напруженості магнітного поля H в зразку ґрунтоване на властивості дотичної (уздовж пластин) складової напруженості залишатися незмінною при переході з одного середовища в інше. Отже, на поверхні зразка та безпосередньо в середині зразка напруженість магнітного поля буде однаковою. Тому, якщо до поверхні зразка притиснути плоску вимірювальну обмотку W_H , яка намотана на пластинці із електроізоляційного матеріалу (рис. 4.2,б), то її буде пронизувати магнітний потік Φ_H , утворений дотичної складовою напруженості поля:

$$\Phi_H = S_H \cdot B_H = \mu_0 \cdot S_H \cdot H, \quad (4.2)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютна магнітна проникливість вакууму;

S_H – площа перерізу плоскої обмотки.

Магнітний потік Φ_H , як і напруженість магнітного поля H чи струм в намагнічуючій обмотці W_1 , змінюється в часі практично за синусоїдним законом, і тому згідно з законом електромагнітної індукції в плоскій вимірювальній обмотці W_H з'являється електрорушійна сила:

$$e_H = -W_H \cdot \frac{d\Phi_H}{dt} = -\mu_0 \cdot W_H \cdot S_H \frac{dH}{dt}. \quad (4.3)$$

Згідно (4.3) електрорушійна сила e_H , як і у випадку вимірювання магнітної індукції, відстає за фазою від напруженості H на 90° .

Ферометр дозволяє визначити середнє значення сигналу на виході кожної вимірювальної обмотки за половину періоду T його зміни, починаючи з деякого моменту часу t_1 і закінчуючи моментом $t_1 + T/2$. Зокрема, середнє значення електрорушійної сили e_B в обмотці W_B , яка використовується для вимірювання магнітної індукції:

$$E_{cp}(B) = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} e_B dt = \frac{-2}{T} W_B S_{зп} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} dB = \frac{2W_B S_{зп}}{T} \left[B(t_1) - B\left(t_1 + \frac{T}{2}\right) \right], \quad (4.4)$$

де $B(t_1)$, $B\left(t_1 + \frac{T}{2}\right)$ – миттєві значення індукції в моменти часу t_1 та $t_1 + \frac{T}{2}$.

Якщо індукція в зразку – періодична функція та симетрична відносно осі часу (що і має місце при відсутності підмагнічування зразка магнітним полем), то $B(t_1) = B\left(t_1 + \frac{T}{2}\right)$ – рис.4.3.

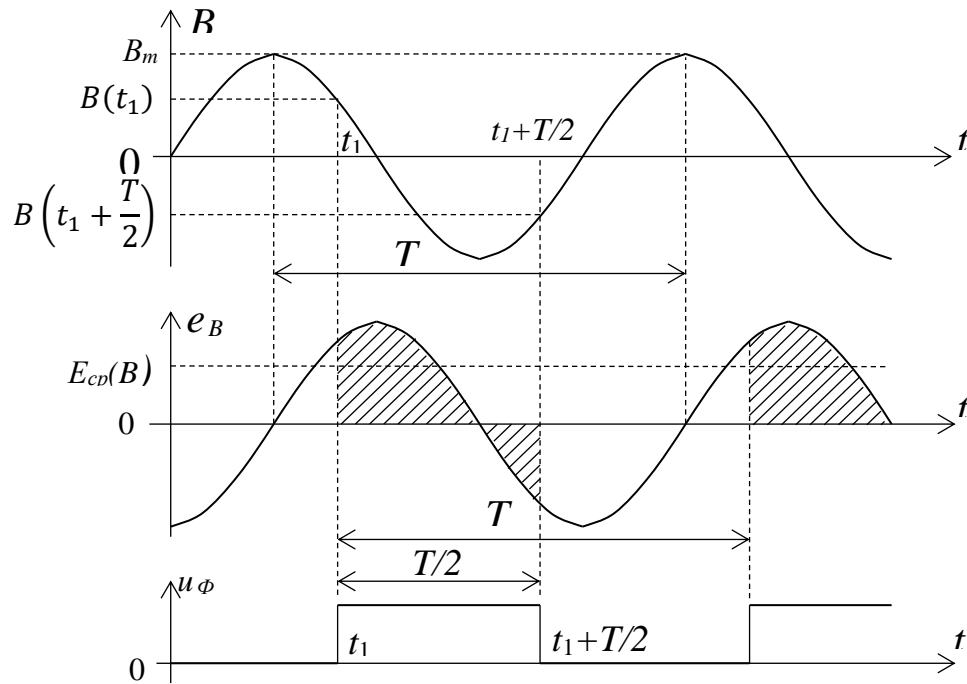


Рисунок 4.3 – До з'ясування принципу дії ферометра.

Вираз (4.4) приймає вигляд:

$$E_{cp}(B) = 4W_B f S_{зп} B(t_1), \quad (4.5)$$

де $f = 1/T$ – частота зміни магнітної індукції.

Отже, середнє значення електрорушійної сили E_{cp} вимірювальної обмотки W_B за половину періоду прямо пропорційне миттєвому значенню магнітної індукції $B(t_1)$ в зразку в будь-який момент часу t_1 (рис.4.3).

За аналогією, середнє значення сигналу (електрорушійної сили або напруги) плоскої вимірювальної обмотки W_H за половину періоду T , починаючи з деякого моменту часу t_1 і закінчуючи моментом $t_1 + \frac{T}{2}$

$$E_{cp}(H) = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} e_H dt = \frac{2\mu_0 W_H S_H}{T} \left[H(t_1) - H\left(t_1 + \frac{T}{2}\right) \right], \quad (4.6)$$

де $H(t_1)$, $H\left(t_1 + \frac{T}{2}\right)$ – миттєві значення напруженості магнітного поля в зразку в моменти часу t_1 та $t_1 + \frac{T}{2}$.

Оскільки $H(t_1) = -H\left(t_1 + \frac{T}{2}\right)$, маємо

$$E_{cp}(H) = 4\mu_0 W_H f S_H H(t_1). \quad (4.7)$$

Отже, середнє значення сигналу (електрорушійної сили або напруги) вимірювальної обмотки W_H за половину періоду прямо пропорційне миттєвому значенню напруженості магнітного поля $H(t_1)$ в зразку в будь-який момент часу t_1 – аналогічно вимірюванню миттєвого значення магнітної індукції.

Середні значення електрорушійних сил $E_{cp}(B)$ та $E_{cp}(H)$ визначаються за допомогою керованого випрямляча в кожному з двох вимірювальних каналів ферометра, причому процес випрямлення починається в момент t_1 , а закінчується через половину періоду, тобто в момент $t_1 + \frac{T}{2}$. У нижній частині рис. 4.3 наведена форма імпульсів u_ϕ , що керують кожним випрямлячем. При наявності імпульсу u_ϕ випрямляч пропускає струм, створений електрорушійною силою e_B або e_H , причому момент початку цього імпульсу t_1 регулюється за допомогою фазообертача, що є в ферометрі. Це дає змогу визначити магнітну індукцію та напруженість у будь який момент t_1 і за одержаними даними побудувати динамічну петлю гістерезису. Зокрема, якщо імпульси u_ϕ збігаються за фазою з електрорушійною силою e_B або e_H , тобто якщо момент часу t_1 вибрати відповідно нульовому значенню електрорушійної сили, то згідно з (4.5) або (4.7) середнє значення електрорушійної сили $E_{cp}(B)$ або $E_{cp}(H)$ буде прямо пропорційне амплітудному значенню магнітної індукції B_m або H_m . При визначенні B_m або H_m випрямляч може працювати по суті в некерованому режимі, враховуючи те, що крива $e_B(t)$ або $e_H(t)$ сама визначає початок і кінець процесу випрямлення.

Якщо ж момент часу t_1 вибрати відповідно нульовому значенню напруженості магнітного поля H , то $E_{cp}(B)$ буде прямо пропорційне залишковій магнітній

індукції B_r , а якщо t_1 вибрати відповідно нульовому значенню індукції B , то $E_{cp}(H)$ буде прямо пропорційне коерцитивній силі H_c (рис. 4.4.).

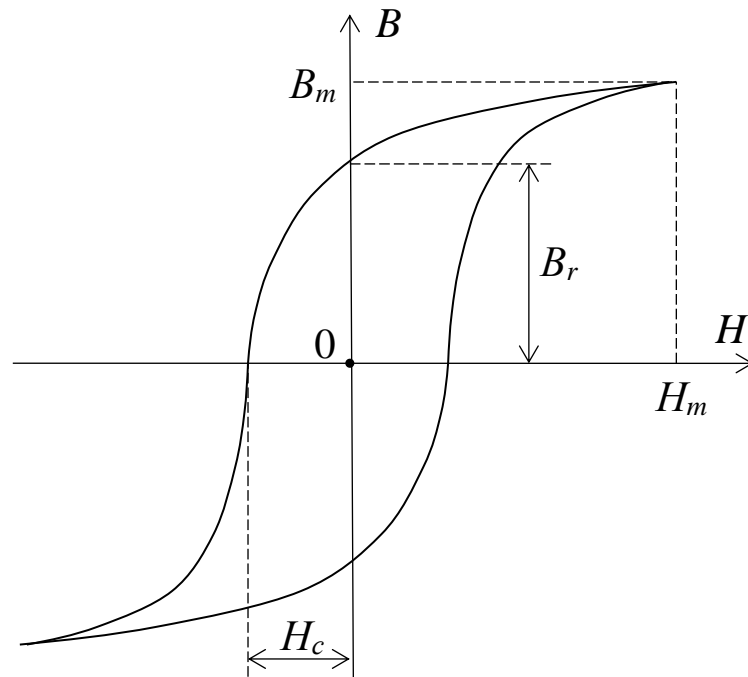


Рисунок 4.4 – Динамічна петля гістерезису, яку можна отримати на екрані осцилографа

При вимірюванні B_r та H_c зміна фази керуючих імпульсів u_ϕ здійснюється автоматично за допомогою компаратора, який вмикається до відповідного каналу перемикачем П (рис. 4.5).

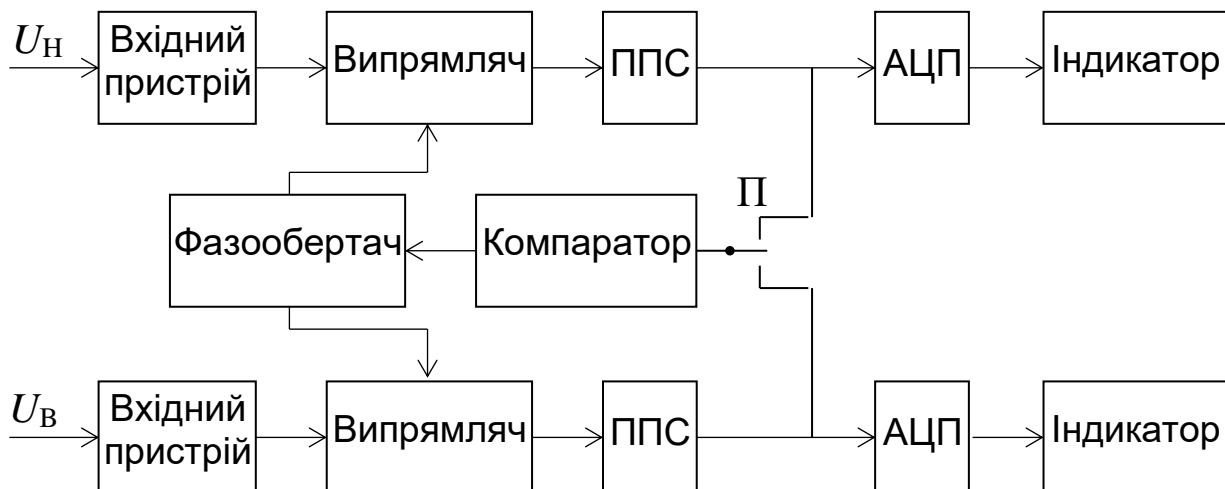


Рисунок 4.5 – Структурна схема двоканального цифрового ферометра Ф5063

Ферометр Ф5063, який використовується в лабораторії, призначений для визначення динамічних петель гістерезису магнітних матеріалів та основних

параметрів цих петель (B_m, H_m, B_r, H_c) у діапазоні частот від 50 до 1000 Гц. Він має два вимірювальні канали U_B і U_H (рис.4.5), в яких відбувається перетворення змінної напруги (електрорушійної сили) на постійну (середню за значенням) напругу, прямо пропорційної вимірюваним магнітним параметрам, і далі на цифровий код. У кожному каналі є:

- вхідний пристрій, в якому підсилюється сигнал змінного струму до потрібного рівня;
- випрямляч для перетворення змінної напруги на постійну;
- підсилювач постійного струму (ППС), який забезпечує потрібний рівень вихідної напруги;
- аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який змінює сигнал постійного струму на цифровий код;
- цифровий індикатор.

Імпульси u_ϕ (рис.4.3) для керування випрямлячами формуються в електронному фазообертачу. При вимірюванні B_r та H_c фази імпульсів u_ϕ змінюються автоматично під впливом компаратора, який вмикається до відповідного каналу перемикачем П. Компаратор – це підсилювач постійного струму, вихідний сигнал якого змінює початок t_1 імпульсу u_ϕ так, щоб вихідна напруга відповідного вимірювального каналу була рівною нулю. Наприклад, в момент, коли в першому каналі $E_{cp}(H) = 0$, тобто коли $H = 0$, у другому каналі визначається $B = B_r$. У фазообертачу передбачена також плавне регулювання фази напруги u_ϕ по відношенню до вимірювальної електрорушійної сили вручну в діапазоні від 0 до 240°.

До етапу 3

Формули для обчислення амплітудних значень напруженості магнітного поля H_m та магнітної індукції B_m впливають з (4.7) та (4.5), якщо скористатись експериментальними даними $E_{cp}(H)$ і $E_{cp}(B)$ табл.4.3:

$$H_m = \frac{E_{cp}(H)}{4\mu_0 W_H f S_H}, \text{ А/м}; \quad (4.8)$$

$$B_m = \frac{E_{cp}(B)}{4\mu_0 W_H f S_{\Sigma p}}, \text{ Тл}. \quad (4.9)$$

Формула для обчислення відносної магнітної проникливості μ_r впливає з (4.8) та (4.9):

$$\mu_r = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{W_H S_H}{W_B S_{\Sigma p}} \cdot \frac{E_{cp}(B)}{E_{cp}(H)}. \quad (4.10)$$

Контрольні запитання та завдання

- 1 Яке призначення та будову має пермеаметр?
- 2 Чим відрізняються обмотки, завдяки яким вимірюють магнітну індукцію та напруженість магнітного поля в зразку?
- 3 Поясніть принцип дії ферометра.
- 4 Яка сутність вимірювання амплітуд магнітних величин за допомогою ферометра?
- 5 Як за допомогою ферометра визначають коерцитивну силу та залишкову індукцію?
- 6 Поясніть призначення інтегратора та резистора R_d в схемі рис. 4.1.
- 7 Поясніть особливості залежностей $B_m = \varphi_1(H_m)$; $\mu_r = \varphi_2(H_m)$.
- 8 Яка різниця між магніторушійною силою намагнічуючої обмотки та падінням магнітної напруги в зразку?

СПИСОК ОСНОВНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с.
2. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 320 с.
3. Журавльова Л.В., Бондар В.М. Електроматеріалознавство: Підручник. – К.: Грамота, 2006. – 312 с.

СПИСОК ДОДАТКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Колесов С.Н., Колесов И.С. Электротехнические и конструкционные материалы: Учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей. – К.: Транспорт Украины, 2002. – 384 с.
2. Электрорадиоматериалы/ Под ред. Б.М. Тареева. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.
3. Материалы микроэлектронной техники/ Под ред. В.М.Андреева. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
4. Казарновский Д.М., Тареев Б.М. Испытание электроизоляционных материалов. 3-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1980. – 214 с.
5. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. – М.: Высш. шк., 1981. – 335 с.
6. Курносое А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: Высш. шк., 1975. – 342 с.
7. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х томах/ Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.; 1987. – 464 с.; 1988. – 728 с.

З М І С Т

ВСТУП	3
Лабораторна робота ЕТМ – 2/1 Вивчення властивостей магнітних матеріалів	5
Лабораторна робота ЕТМ – 2/2 Дослідження властивостей магнітних матеріалів за допомогою осцилографа	14
Лабораторна робота ЕТМ – 2/3 Визначення питомого магнітного опору феромагнетиків	24
Лабораторна робота ЕТМ – 2/4 Дослідження магнітних властивостей пластинчатих зразків за допомогою ферометра	34
Список основної літератури	45
Список додаткової літератури	45

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Електротехнічні матеріали»
(Розділ “ Магнітні матеріали”)
для студентів спеціальності
141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Автори:
Ципленков Дмитро Володимирович
Гребенюк Андрій Миколаєвич
Бобров Олексій Володимирович
Колб Андрій Антонович
Лябагова Тетяна Валеріївна

Підготовлено до виходу в світ
у Національному технічному університеті
«Дніпровська політехніка».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842

4960050, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19