

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фізико-математичний факультет

Лабораторна робота № 2-11

**ЗНІМАННЯ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ ТА
ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ ФЕРОМАГНЕТИКІВ У
ЗМІННОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ**

Виконана студ. групи _____

Київ-2025

Лабораторна робота № 2-11

Знімання кривої намагнічування та петлі гістерезису ферромагнетиків у змінному магнітному полі

Мета роботи: дослідити процеси намагнічування та перемагнічування ферромагнетиків у змінному магнітному полі.

Прилади та пристрої: тороїдальний трансформатор, електронний осцилограф типу НЗОІЗ, джерело струму УІП-2, потенціометр.

Теоретичні відомості

Усі речовини за своїми магнітними властивостями поділяються на слабо- й сильномагнітні. До перших відносяться в основному, пара- та діамагнетики, до других – ферромагнетики. Пара- та діамагнетики за відсутності магнітного поля завжди не намагнічені. У слабких полях їх намагніченість лінійно залежить від напруженості зовнішнього поля $\mathbf{J} = \chi\mathbf{H}$, причому стала χ не залежить від H .

Ферромагнетиками називаються такі тверді тіла, які можуть мати відмінну від нуля намагніченість навіть за відсутності поля. Необхідна ознака ферромагнетиків – наявність сталих (що не залежать від H) спінових або орбітальних магнітних моментів електронних оболонок атомів чи іонів, з яких складається ферромагнетик (залізо, кобальт, нікель та ін.). Для ферромагнетиків залежність $J(H)$ (або $B(H)$) має складний характер. На рис.11.1 показано залежність $J(H)$ для початково не намагніченого ферромагнетика (основна або нульова крива намагнічування). Видно, що при певній напруженості поля H_m намагніченість сягає насичення J_s . Основна крива намагнічування в координатах B, H зображена на рис.11.2.

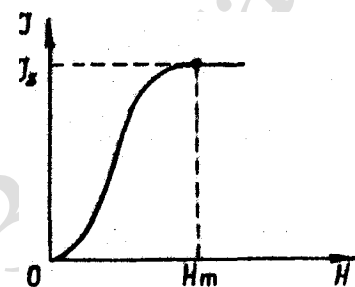


Рис. 11.1

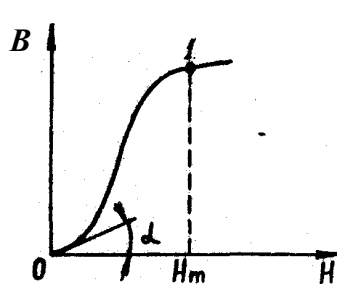


Рис. 11.2

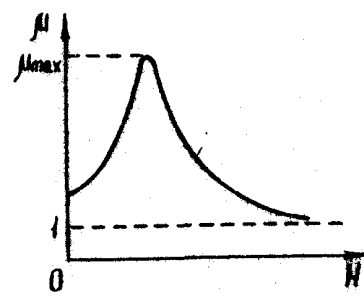


Рис. 11.3

Індукція \mathbf{B} зв'язане з напруженістю \mathbf{H} співвідношенням $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{J})$ або $\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H}(1 + \chi) = \mu\mu_0\mathbf{H}$, де μ магнітна проникність: $\mu = 1 + \chi$. Після досягнення насичення (точка 1 на рис.11.2), індукція \mathbf{B} продовжує зростати за лінійним законом $B = \mu_0 H + \text{const}$, де $\text{const} = \mu_0 J_s$.

Оскільки для ферромагнетиків зв'язок між J та H (або B та H) є нелінійним, то і магнітна сприйнятливість χ та магнітна проникність μ не є сталими величинами –

вони є функціями напруженості поля H . На рис.11.3 зображено типову для феромагнетиків залежність $\mu(H)$. Видно, що при $H=0$ магнітна проникність більша від одиниці. Це так звана початкова магнітна проникність. Зі збільшенням H функція $\mu(H)$ зростає і досягає максимуму (максимальна магнітна проникність), а потім у сильних магнітних полях, коли настає стан насичення, μ прямує до одиниці. Для більшості феромагнетиків при звичайних температурах μ у максимумі має значення порядку сотень і тисяч одиниць. Це є характерною ознакою цього класу магнітних матеріалів.

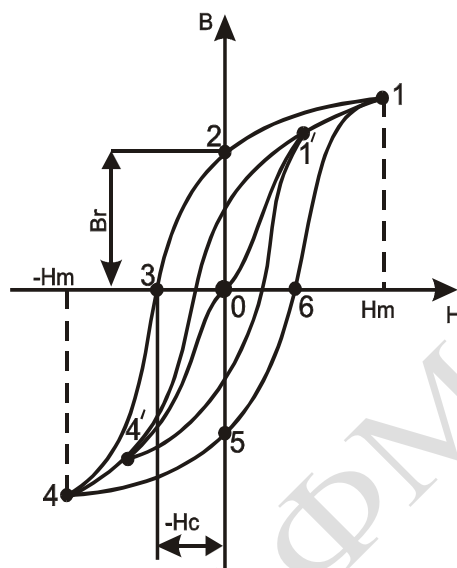


Рис.11.4

Особливістю феромагнетиків є також те, що для них залежність $B(H)$ (або $J(H)$) не є однозначною, вона визначається попереднім станом зразка. Це явище називається магнітним гістерезисом. Інакше кажучи, магнітний гістерезис полягає в необоротності магнітних властивостей феромагнетика під впливом тих магнітних процесів, які на нього раніше мали вплив. Так, якщо довести попередньо ненамагнічений феромагнетик до насичення (рис.11.4, точка 1), а потім зменшувати зовнішнє магнітне поле H , то індукція B поля у феромагнетику зменшуватиметься необоротно, тобто не буде йти кривою 1-0. При зменшенні зовнішнього поля індукція зразка B буде більшою (крива 1-2), ніж при тих самих значеннях H основної кривої намагнічування. За умови $H=0$ (точка 2) намагнічення характеризується деякою величиною індукції B_r , яка називається залишковою індукцією (або відповідною залишковою намагніченістю J_r , якщо розглядається залежність $J(H)$).

Щоб позбутися залишкової індукції (намагнічення), потрібно прикласти поле H протилежного напрямку і величиною H_c , яке називають коерцитивною силою (точка 3). Якщо поле протилежного напрямку збільшувати, то намагніченість феромагнетика знову сягає насичення (точка 4). При наступному зменшенні цього поля, а потім зі зміною його напрямку, процес повторюється, але іншим шляхом (крива 4-5-6-1). Таким чином, під час дії на феромагнетик змінного магнітного поля індукція змінюється замкненою кривою 1-2-3-4-5-6-1, яка називається петлею гістерезису. Якщо напруженість зовнішнього поля H змінюється в діапазоні значень, що не забезпечують насичення, то петля гістерезису буде не максимальною. Вона знаходитиметься

всередині максимальної петлі й називатиметься частковим циклом (див. рис.11.4).

Початкова й максимальна магнітна проникність, а також залишкова намагніченість і коерцитивна сила є основними характеристиками феромагнітного матеріалу і залежать від його хімічного складу та внутрішньої будови.

За величиною коерцитивної сили магнітні матеріали поділяються на жорсткі та м'які. Якщо коерцитивна сила велика і петля гістерезису широка і її форма наближається до прямокутної, то феромагнетик називають жорстким. Феромагнетик з малою коерцитивною силою та вузькою петлею гістерезису називається м'яким.

При циклічному перемагнічуванні феромагнітного зразка внаслідок необоротного характеру процесів перемагнічування відбуваються втрати енергії магнітного поля, так звані втрати на гістерезис. Енергія, витрачена на перемагнічування феромагнетика, перетворюється на теплоту, внаслідок чого феромагнетик нагрівається. Це нагрівання є додатковим до нагрівання, зумовленого вихровими струмами. Втрати на гістерезис є пропорційними площі петлі гістерезису і в розрахунку на один цикл перемагнічування визначаються інтегралом

$$Q = \oint \mathbf{H} d\mathbf{V}.$$

Площа й форма петлі гістерезисна можуть суттєво змінюватися під дією зовнішніх факторів: температури, деформації, механічної та термічної обробок тощо.

Магнітні властивості феромагнетиків залежать від власних (спінових) або орбітальних сталей (що не залежать від H) магнітних моментів електронів.

За певних умов внаслідок виникнення так званих обмінних сил, магнітні моменти електронів у певній області кристала можуть бути орієнтовані паралельно один до одного. Внаслідок цього утворюються області спонтанного намагнічення – домени. У початковому розмагніченому стані феромагнетик не дуже малих розмірів складається з окремих доменів, намагнічених до насичення J_s , але напрями векторів \mathbf{J}_s у кожному домені такі, що у цілому феромагнетик не намагнічений (рис. 11.5).

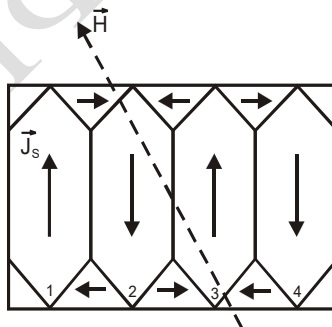


Рис. 11.5

Результуючі магнітні моменти сусідніх доменів напрямлені так, що утворюють замкнений магнітне коло, оскільки це енергетично вигідно. Контакт двох доменів з великою різницею орієнтації вектора намагніченості є енергетично невигідним. Це призводить до утворення між такими доменами перехідного прикордонного шару з поступовою переорієнтацією магнітних моментів атомів. Такі шари називаються доменними стінками Блоха. Під час намагнічування й перемагнічування феромагнетика у зовнішньому полі H відбуваються два процеси.

По-перше, спочатку ростуть ті домени, чий магнітні моменти \mathbf{J}_s утворюють невеликий кут із полем \mathbf{H} (домени 1, 3 на рис.11.5). Це зростання відбувається за рахунок доменів, у яких цей кут більший (домени 1,4). Такий процес веде до зменшення енергії феромагнетика в магнітному полі і тому є енергетично вигідним. Він

називається процесом зміщення. У слабких полях процес є оборотним.

По-друге, при збільшенні магнітного поля відбувається орієнтація вектора спонтанної намагніченості домена у напрямі поля. Це - так званий процес обертання. Незворотність процесу намагнічування феромагнетика пов'язана, зокрема, із „затримками” у зміщенні меж доменів, що викликаються різного роду дефектами кристалічної ґратки феромагнетика (включення, неоднорідні внутрішні напруги тощо). Такий у загальних рисах механізм магнітного гістерезису у феромагнетиках із багатодоменною структурою.

Якщо феромагнітний зразок має дуже малі розміри (наприклад, феромагнітний порошок), то утворення у ньому багатодоменної структури утруднене. У таких феромагнетиках при намагнічуванні спостерігається лише обертання векторів \mathbf{J}_s . Оскільки кристалічний зразок у загальному випадку має магнітну анізотропію, тобто залежність намагніченості від напрямку в кристалі, то процес обертання векторів \mathbf{J}_s за перемагнічування зразка буде необоротним. Це призводить до необоротності процесу перемагнічування, тобто до магнітного гістерезису в однодомених феромагнітних частинках. Таким чином, магнітний гістерезис проявляється як у багато-, так і в однодомених структурах.

Ще однією характерною особливістю феромагнетиків є наявність певної температури T_K , точки (температури) Кюрі, вище якої феромагнетик перетворюється на парамагнетик. Це зумовлене тим, що при температурі Кюрі області спонтанної намагніченості (домени) розпадаються і феромагнетик утрачає свої характерні властивості. Магнітна сприйнятливості такого парамагнетика при температурах вищих, ніж температура Кюрі підпорядковується закону Кюрі - Вейса:

$$\chi = \frac{C}{T - T_K},$$

де C - стала, що залежить від роду речовини.

Опис експериментальної установки

Для одержання петлі гістерезисна у змінному магнітному полі використано установку, принципова схема якої зображена на рис. 11.6.

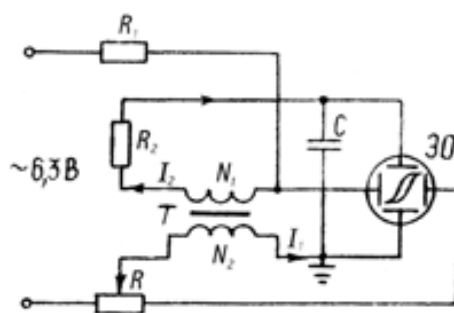


Рис. 11.6

Досліджуваним феромагнетиком є осердя трансформатора T . Первинна обмотка трансформатора живиться від джерела змінного струму і має N_1 витків. Джерелом струму є УИП-2 (вихід "6,3 В"), але може бути використане і будь-яке інше джерело живлення. Первинна обмотка трансформатора служить для створення змінного магнітного поля H , що намагнічує осердя трансформатора. Величина H пов'язана зі

спадом напруги U_x на резисторі R_1 у колі первинної обмотки наступним співвідношенням

$$H = \frac{N_1}{l_1} i_1 = \frac{U_x}{R_1} n_1 = \frac{n_1}{R_1} U_x = k_1 U, \quad (11.1)$$

де l_1 – довжина первинної обмотки; i_1 – сила намагнічуючого струму; n_1 – число витків намагнічуючої обмотки на одиницю довжини; $k_1 = n_1/R_1$ – коефіцієнт.

Напруга з резистора R_1 подається на вхід горизонтального підсилювача електронного осцилографа. Таким чином, на вхід X осцилографа подається напруга, пропорційна напруженості магнітного поля H .

Магнітний потік, створений струмом у первинній обмотці, пронизує витки вторинної обмотки і індукує в ній ЕРС, величина якої за законом електромагнітної індукції дорівнює

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\psi}{dt}.$$

Повний магнітний потік $\psi = BN_2S$ (S – площа поперечного перерізу котушки, що охоплюється її витками; N_2 – кількість витків вторинної обмотки). Таким чином, маємо,

$$|\mathcal{E}_i| = N_2S \frac{dB}{dt} \Rightarrow \frac{dB}{dt} = \frac{|\mathcal{E}_i|}{N_2S}.$$

Для визначення B з останнього виразу його слід інтегрувати по часу, при цьому індукція пропорційна ЕРС у вторинній обмотці:

$$B = \frac{1}{N_2S} \int |\mathcal{E}_i| dt.$$

Для виконання операції інтегрування сигналу в електричних колах використовують так званий інтегруючий ланцюжок, що складається з опору та конденсатора (RC -ланцюжок, яким у схемі на рис. 11.6 є R_2C).

При протіканні змінного струму в електричному колі напруга на ділянці, що складається з послідовно з'єднаних котушки індуктивності, конденсатора та резистора визначається виразом (21.25) (V21-04-2.htm). Вважаючи, що опір вторинної обмотки трансформатора (внутрішній опір) є малим, можна прийняти напругу на колі вторинної обмотки такою, що дорівнює ЕРС. У такому разі

$$\mathcal{E}_i = U_2 = i_2 R_2 = i_2 \sqrt{R_2^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad (11.2)$$

де R_2 – повний опір кола вторинної обмотки; i_2 , R_2 – струм і активний опір у колі вторинної обмотки.

У формулі (11.2) враховано, що число витків вторинної обмотки невелике, тому можна знехтувати ЕРС самоіндукції у вторинній обмотці. Активний опір R_2 і ємність C добирають такими, щоб індуктивний і ємнісний опори були малими порівняно з активним опором. Тоді можна вважати, що $\mathcal{E}_i = i_2 R_2$. У такому разі

$$B = \frac{R_2}{N_2S} \int i_2 dt. \quad (11.3)$$

Оскільки $\int i_2 dt = q$ – це величина заряду на обкладках конденсатора ($q = CU$), з формули (11.3) отримаємо співвідношення між U_Y і B :

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_Y = k_2 U_Y, \quad (11.4)$$

де $k_2 = R_2 C / N_2 S$ – коефіцієнт пропорційності. Таким чином, напруга на конденсаторі C , яка подається на вхід Y осцилографа, виявляється пропорційною індукції магнітного поля B у феромагнітному осерді.

Якщо подавати на горизонтально відхиляючі пластини напругу U_X , а на вертикально відхиляючі – U_Y , то відбувається додавання двох взаємно перпендикулярних коливань електронного променя відносно положення рівноваги – центра екрана осцилографа. У результаті за повний період коливань промінь створить на екрані осцилографа в деякому масштабі петлю гістерезиса, як це й впливає з рівнянь (11.1) і (11.4). Отримана петля може бути основою для вивчення магнітних характеристик феромагнетика.

Для обчислення B і H напруги U_X та U_Y можна подати через величини, що визначаються експериментально, – чутливість C_X горизонтального і C_Y вертикального каналів осцилографа:

$$U_X = \frac{x}{C_X}; \quad U_Y = \frac{y}{C_Y}, \quad (11.5)$$

де x, y – кількість поділок сітки екрана, на яке відхилився електронний промінь вздовж осей x та y від центра. З урахуванням співвідношення (11.5) рівняння (11.1) і (11.4) матимуть такий вигляд:

$$H = k_1 \frac{x}{C_X} = \alpha \cdot x \quad \left(\alpha = \frac{k_1}{C_X} \right); \quad (11.6)$$

$$B = k_2 \frac{y}{C_Y} = \beta \cdot y \quad \left(\beta = \frac{k_2}{C_Y} \right). \quad (11.7)$$

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути осцилограф і блок живлення в мережу та дати їм прогрітись 5...7 хв.
2. Ручку потенціометра R встановити в крайню ліву позицію, що відповідає відсутності струму у намагнічуючій обмотці трансформатора.
3. Ручками керування променем осцилографа встановити в центр екрана світлову пляму. Ручки "УСИЛЕНИЕ Х" і "УСИЛЕНИЕ Y" повинні бути виведені в крайні ліві позиції (підсилення рівне нулю).
4. За допомогою потенціометра R встановити в намагнічуючій обмотці струм, потрібний для насичення феромагнетика. У цьому ж режимі, за допомогою ручки "УСИЛЕНИЕ", домогтися того, щоб петля гістерезису мала правильну форму й займала всю площу екрана. (Ці операції виконуються під керівництвом викладача або лаборанта).
5. Повернути ручку потенціометра R у крайню ліву позицію.
6. Потенціометром R поступово збільшувати амплітуду струму в колі намагнічування і при кожному значенні цього струму фіксувати координати x та y крайніх точок (1 і 4

на рис. 11.4) часткової кривої гістерезису. Вимірювання виконати для десяти значень струму, доводячи криву гістерезису до граничної. Силу намагнічуючого струму бажано збільшувати так, щоб напруженість зростала на однакову величину. Результати записати в табл. 11.1.

7. Перекреслити граничну петлю гістерезису з екрана осцилографа на міліметровку. Відкласти на осях величину ціни поділки сітки екрана осцилографа.
8. Після закінчення роботи, не змінюючи позиції ручки "УСИЛЕНИЕ" осцилографа, під керівництвом викладача або лаборанта виконати калібрування каналів X та Y для визначення чутливостей C_x та C_y .

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного значення намагнічуючого струму обчислити середнє значення координат x_i та y_i :

$$\langle x_i \rangle = \frac{|+x_i| + |-x_i|}{2}; \quad \langle y_i \rangle = \frac{|+y_i| + |-y_i|}{2}.$$

2. За значеннями величин n_1, R_1, C_1, n_2, S , а також C_x і C_y обчислити коефіцієнти k_1, k_2, α, β .
3. За формулами (11.6), (11.7) обчислити H_i та B_i для всіх дослідів і результати занести до табл. 11.1.
4. За формулою $B = \mu\mu_0 H$ і одержаними значеннями H_i, B_i розрахувати проникність μ_i для всіх дослідів. Дані розрахунків записати у табл. 11.1.
5. На одному графіку побудувати основну криву намагнічування $B(H)$ і залежність магнітної проникності від напруженості поля $\mu(H)$. З графіка $\mu(H)$ визначити максимальне значення магнітної проникності μ_{\max} .
6. З побудованої основної кривої намагнічування визначити графічним методом (див. рис. 11.2) порядок величини початкової магнітної проникності $\mu_H = (1/\mu_0) \operatorname{tg} \alpha$. Урахувати це значення, побудувати графік кривої $\mu(H)$.
7. Skorиставшись перекресленою на міліметровці петлею гістерезису, знайти середнє значення координат точок H_C та B_r у поділках сітки осцилографа:

$$\langle x_C \rangle = \frac{|+x_C| + |-x_C|}{2}; \quad \langle y_r \rangle = \frac{|+y_r| + |-y_r|}{2}.$$

Дані занести до табл. 11.1.

8. За формулами (11.6), (11.7) визначити коерцитивну силу H_C і залишкову індукцію речовини феромагнетика (осердя) B_r . Результати обчислень занести до табл. 11.1.
9. Отримані експериментально або обчислені за формулами значення $\mu_{\max}, \mu_H, H_C, B_r$ занести до табл. 11.2 і порівняти з довідниковими.
10. Розрахувати абсолютну й відносну похибки вимірювань μ_{\max}, μ_H, B_r .

Таблиця 11.1

Експерим. точки	У режимі до насичення									У режимі насич.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$ +x_i $										
$ -x_i $										
$\langle x_i \rangle$										
H_i										
$ +y_i $										
$ -y_i $										
$\langle y_i \rangle$										
B_i										
μ_i										
$ +x_c $	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$ -x_c $	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$\langle x_c \rangle$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$ +y_r $	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$ -y_r $	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$\langle y_r \rangle$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
H_c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
B_r	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Таблиця 11.2

Величина	μ_{\max}	μ_H	H_C	B_r
Дані експериментальні				

Контрольні запитання

1. Чим породжується магнітне поле? Як проявляється наявність у просторі магнітного поля? Якими параметрами характеризують магнітне поле?
2. Як зв'язані індукція та напруженість електричного поля?
3. Що таке процес намагнічування магнетика? Який фізичний смисл вектора намагнічування?
4. Які існують види магнетиків? Які властивості діа- та парамагнетиків?
5. Що таке феромагнетик? У чому полягає явище магнітного гістерезису?
6. Яка природа феромагнетизму? Що таке точка Кюрі для феромагнетика?
7. У чому полягає явище електромагнітної індукції? Як формулюється закон Фарадея для електромагнітної індукції?
8. Як формулюється закон Ома для змінного струму? Запишіть його формулу.

9. У чому полягає попереднє настроювання та регулювання електронного осцилографа?
10. Що таке чутливість осцилографа за напругою?
11. Який вигляд має принципова схема експериментальної установки для вивчення гістерезису і який принцип її роботи?

Література

1. Бушок Г. В. Венгер. Курс фізики : у 3 кн. Кн. 2. Електрика і магнетизм: Навч. посіб. – К: Вища школа, 2003.
https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2015/Byshok_P2_2003_278.pdf. §56 с.147 – 148; §66 с.165 – 168; §§70 – 75 с.180 – 194; §80 с.206 – 207; §82 с.208 – 211.
2. [Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.2 Електрика і магнетизм. К.:Техніка, 2001 р. §9.10 с. 334](#)
3. [D. Griffith. Introduction to Electrodynamics. P. 274-284.](#)
4. Charles Kittel. Introduction to Solid State Physics. Chapter 11, 12.
<http://metal.elte.hu/~groma/Anyagtudomany/kittel.pdf>