

Міністерство освіти і науки України  
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет  
імені Василя Стефаника»  
Фізико-технічний факультет  
Кафедра фізики і методики викладання

**Лабораторна робота № 10 (ФПЕ-07м)**

## **ВИВЧЕННЯ ГІСТЕРЕЗИСУ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ**

## м. Івано-Франківськ

**Мета роботи:** вивчення гістерезису феромагнітних матеріалів, розрахунок і графічна побудова основної кривої намагнічення, розрахунок роботи перемагнічування і коерцитивної сили.

### **Загальні відомості**

Всі речовини володіють магнітними властивостями, тобто є магнетиками. Магнітні властивості речовин визначаються величиною і орієнтацією магнітних моментів молекул, іонів чи атомів. Магнітний момент плоского контура площею  $S$ , по якому тече струм  $I$ , визначається за формулою

$$\vec{p} = IS \vec{n}$$

Де  $\vec{n}$  - одинична нормаль, напрям якої визначається за правилом правого гвинта. В магнітному полі з індукцією  $B$  на замкнутий контур із струмом діє момент сил

$$\vec{M}_M = \left[ \vec{p} \vec{B} \right] = pB \sin(\vec{p}, \vec{B})$$

який прагне повернути контур так, щоб напрям  $\vec{p}$  і  $\vec{B}$  співпадали. Контур із струмом створює також власне магнітне поле з індукцією  $B_I$ , що співпадає за напрямом з магнітним моментом  $\vec{p}$  контура. Коли  $M_M = 0$ , вектор індукції результуючого поля  $\vec{B} = \vec{B} + \vec{B}_I$  у будь-якій точці площини всередині контура завжди більше вектора індукції  $B$  зовнішнього магнітного поля. Збільшення індукції  $B$  усередині контура із струмом в магнітному полі якісно пояснює збільшення індукції у феромагнетику, поміщеному в зовнішнє магнітне поле.

Намагнічення речовини пояснюється наявністю у складових його атомів, молекул, іонів мікроскопічних магнітних моментів: електронного орбітального  $\vec{p}_\ell$ , власного електронного (спінового)  $\vec{p}_s$  ядерного  $\vec{p}_c$ . Орбітальний магнітний момент має електрон, рухаючись навколо ядра атома (рис.1).

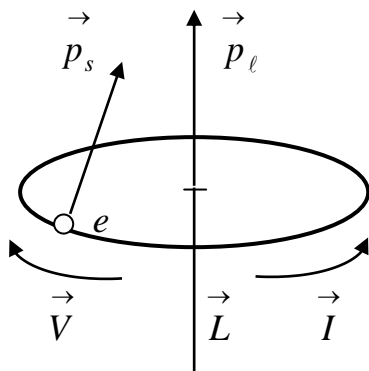


Рис.1

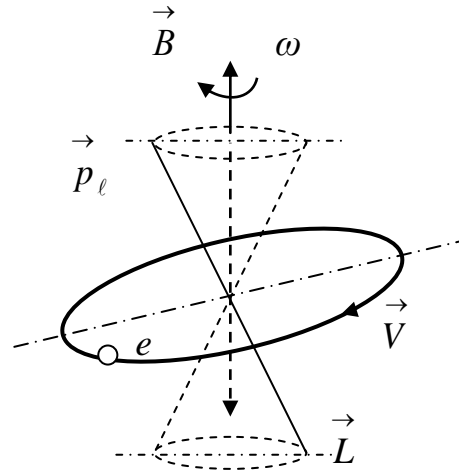


Рис.2

Такий рух електрона можна змодельовати коловим струмом  $I = e\nu$ , що має магнітний момент:

$$\vec{p}_\ell = IS \vec{n} = e\nu\pi r^2 \vec{n},$$

де  $e$  – заряд електрона  $\nu$  - частота обертання,  $r$  – радіус круговий орбіти.

Напрямок магнітного моменту  $\vec{p}_\ell$  протилежний напрямку механічного моменту імпульсу  $\vec{L} = \left[ \vec{r} m_e \vec{V} \right]$  (рис.2)  $\vec{p}_\ell$  і  $\vec{L}$  пов'язані співвідношенням

$$\vec{p}_\ell = \frac{e}{2m_e} \vec{L}$$

Магнітний спіновий момент  $\vec{p}_s$  (рис.1) є невід'ємною властивістю електрона. Одиницею магнітного моменту є магнетон Бора:

$$\mu_B = \frac{eh}{2m_e} = 9.27 \cdot 10^{-24}, \text{ А} \cdot \text{ м}^2$$

де  $h$  - стала Планка.

Ядерний магнітний момент  $\vec{p}_c$  або рівний нулю, або на три – чотири порядки менший  $\mu_B$  і його впливом можна нехтувати. За відсутності зовнішнього поля можна вважати, що магнітний момент атома

$$\vec{p}_{aT} = \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{\ell_i} + \sum_Z \vec{p}_{s_i}$$

де  $Z$  - число електронів в атомі.

Магнітний момент молекули

$$\vec{p}_{mol} = \sum_{k=1}^N \vec{p}_{aT_k}$$

де  $N$  - число атомів в молекулі. В зовнішньому магнітному полі на електрон атома, як на замкнутий контур із струмом, діє момент сил  $M$  (див. рис. 2). Під дією цього моменту сил електрон, подібно гіроскопу має прецесію, при цьому вектори  $\vec{p}$  і  $\vec{L}$  описують конус навколо напрямку поля з постійною кутовою швидкістю. Цей додатковий рух електрона приводить до появи у нього магнітного момента прецесії  $\vec{p}_n$  проти магнітного поля. Це явище носить назву діамагнітного ефекту. За наявності зовнішнього магнітного поля магнітний момент атома

$$\vec{p}_{aT} = \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{\ell_i} + \sum_Z \vec{p}_{s_i} + \sum_{i=1}^Z \vec{p}_m$$

Намагніченість  $\vec{M}$  рівна магнітному моменту одиниці об'єму магнетика:

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_{\text{мол}}}{\Delta V}$$

де  $\Delta V$  - малий об'єм магнетика;  $\sum \vec{p}_{\text{мол}}$  - сума магнітних моментів всіх молекул в об'ємі  $\Delta V$ . Намагніченість  $\vec{M}$  пов'язана з напруженістю магнітного поля:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

де  $\chi$  - коефіцієнт пропорційності, зв'язаний магнітною сприйнятливістю речовини. Магнітні властивості речовини характеризуються також магнітною проникністю  $\mu$ .  $\chi$  і  $\mu$  пов'язані співвідношенням

$$\mu = 1 + \chi$$

Залежно від знаку і величини магнітної сприйнятливості всі речовини діляться на три групи:

Діамагнетики - речовини (наприклад, інертні гази), в яких за відсутності зовнішнього магнітного поля орбітальні  $\vec{p}_\ell$  і спінові  $\vec{p}_s$  моменти атомів чи молекул компенсуються. В зовнішньому магнітному полі в результаті прецесії з'являються індуковані магнітні моменти  $\vec{p}_{aT} = \sum \vec{p}_n$  направлені проти поля, а магнітна сприйнятливість від'ємна  $\chi = -(10^{-6} \dots 10^{-8})$

Парамагнетики - речовини, в яких за відсутності зовнішнього поля  $\vec{p}_{aT} \neq 0$  або  $\vec{p}_{\text{мол}} \neq 0$ , а  $M = 0$  внаслідок хаотичної орієнтації магнітних моментів. В зовнішньому магнітному полі під дією обертаючого моменту сил  $M_M$  магнітні моменти ( $\vec{p}_{aT}$  або  $\vec{p}_{\text{мол}}$ ) речовини прагнуть обернутися у напрямі поля, внаслідок чого  $M > 0$  і  $\chi > 0$ ,  $\chi = 10^{-4} \dots 10^{-6}$ .

Феромагнетики - це речовини, в яких магнітні моменти окремих іонів  $p_u \neq 0$ .

У феритів елементарні комірки кристала утворюють іони різного типу, у феромагнетиків - одного типу. Як показали досліди Ейнштейна і де Гааза, а також досліди Н.Ф. Йоффе і П.Л. Капіци, магнітний момент іона феромагнетика обумовлений впорядкованою орієнтацією магнітних моментів спінів. Частина феромагнетика, в якій всі магнітні моменти за відсутності зовнішнього поля встановлюються в одному напрямі за рахунок обмінної взаємодії, називається доменом (рис.3,а), домен володіє магнітним моментом  $p_d$ . Розміри доменів складають  $10^{-6} \dots 10^{-8} \text{ м}$ .

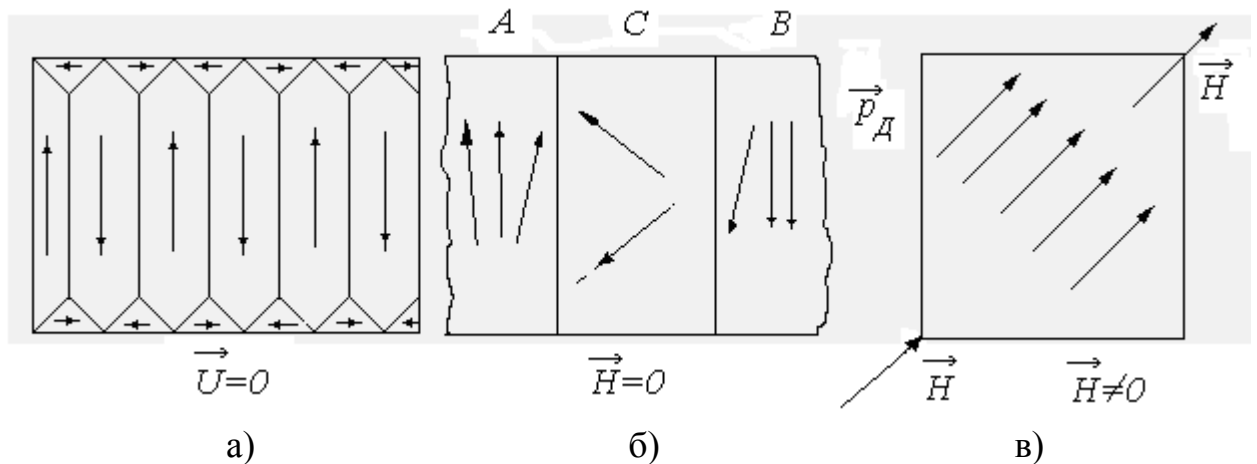


рис. 3

За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітний момент феромагнетика

$$p = \sum p_d = 0$$

Між доменами А і В є перехідні шари шириною  $10^{-8} \dots 10^{-9} \text{ м}$ . Усередині перехідного шару магнітні моменти спінів іонів повертаються до тих пір, поки не приймуть потрібного напрямку. В зовнішньому магнітному полі перехідні шари руйнуються. Магнітні моменти окремих доменів повертаються за напрямом магнітного поля (рис.3, в).

Залежність намагніченості  $M$  магнетиків від напруженості  $H$  зовнішнього магнітного поля зображена на рис.4.



рис. 4

Нелінійна область I відображає процес орієнтації доменів у феромагнетиках у напрямі зовнішнього поля при зростанні напруженості  $H$ . В сильних полях (область II) настає магнітне насичення, і намагніченість практично не залежить від напруженості поля  $H$ . Крива  $M = f(H)$  носить назву основної кривої намагнічення. Для пара- і діамагнетиків залежність  $M = f(H)$  лінійна. У феромагнетиків і феритів має місце магнітний гістерезис, в якому виявляється залежність намагніченості від попереднього стану. При циклічних змінах величини і напрямку напруженості зовнішнього поля  $H$  ця залежність характеризується кривою, званою петлею гістерезису (рис.5, криві 1, 2, 3).

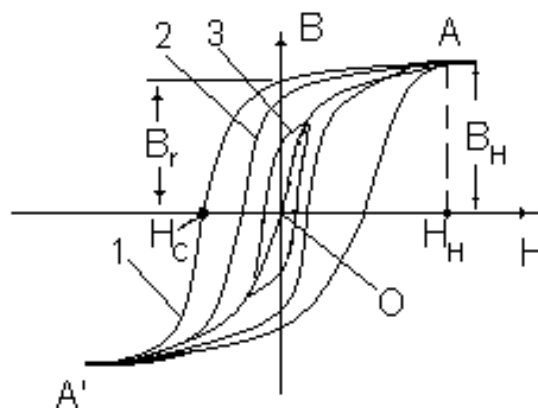


рис. 5

Якщо феромагнетик був спочатку розмагнічений ( $B=0$ ,  $H=0$ ), то його намагнічення відбувається по основній кривій намагнічення ОА. В точці А напруженість  $H$  і індукція  $B_n$  відповідають станам магнітного насичення. Його розмагнічування відбувається по кривій І. При  $H=0$  намагніченість феромагнетика не зникає  $B=B_r$ . Цей стан називається залишковим намагніченням. Напруженість  $(-H_c)$ , при якій зникає залишкова намагніченість ( $B=0$ ,  $H=H_c$ ), прийнято називати коерцитивною силою. Якщо при циклічному намагніченні  $H_{max} \geq H_n$ , то ми одержуємо максимальну петлю гістерезису І. Криві 2 і 3 це окремі цикли, коли  $H_{max} < H_n$ . Максимуми  $B$  і  $H$  приватних циклів лежать на основній кривій намагнічення ОА. Умовно прийнято вважати феромагнетики жорсткими, якщо  $H_c > 100 \text{ А/м}$ . Якщо  $H_c < 100 \text{ А/м}$  феромагнетики вважаються м'якими. Магнітна сприйнятливість  $\mu$  феромагнетика залежить від напруженості магнітного поля  $H$  (рис.6).

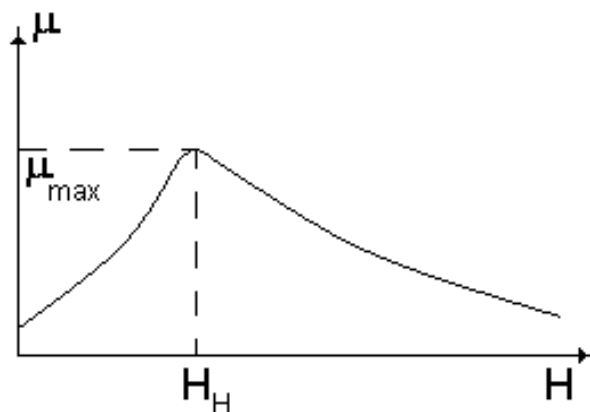


Рис. 6

Магнітна проникність  $\mu = B / \mu_0 H$  досягає максимуму, коли напруженість  $H$  зовнішнього поля стає рівною напруженості  $H$ , при якій домени максимально орієнтуються за напрямом поля (див. рис.3, в), при цьому досягається магнітне насичення зразка. В табл. 1 приведені характеристики деяких феромагнетиків і феритів.

Таблиця 1.

Речовина	$\mu_{\text{макс}}$	$H$ , А/м	$B_r$ , Тл	$B_n$ , Тл
Залізо технічне	5000	80	0.05	2.1
Супермаллой	1000000	0.16	-	0.79



Ферит нікель-цинковий	7500	4	-	0.2
-----------------------	------	---	---	-----

### Метод вимірювання

Принципова схема установки приведена на рис.1. досліджуваний зразок виконаний у вигляді тороїдального трансформатора  $T$ , первинна обмотка якого містить  $N_1$  витків, а вторинна -  $N_2$  витків.

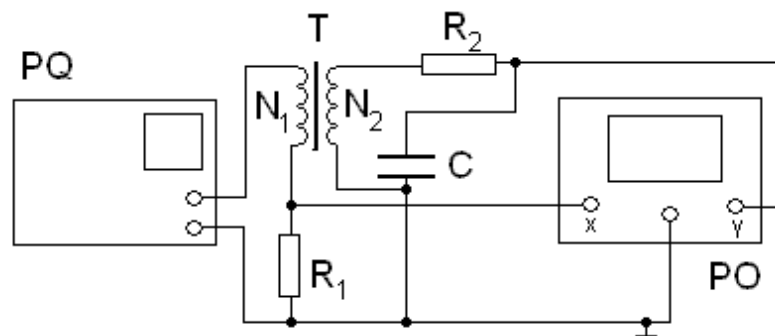


рис. 1

Напруга на первинну обмотку трансформатора подається від генератора PQ через опір  $R_1$ . Вторинна обмотка трансформатора послідовно сполучена з опором  $R_2$  і конденсатором  $C$ . За допомогою опору  $R_1$  на вхід підсилювача горизонтальної розгортки осцилографа PO подається напруга  $U_x$ , пропорційна напруженості магнітного поля  $H$ . На вхід "Y" осцилографа з конденсатора  $C$  подається напруга  $U_y$ , пропорційна індукції магнітного поля  $B$ . При радіусі витка обмотки  $r_B \ll r_r$  радіусу тороїда напруженість  $H$  в тороїді

$$H = \frac{N_1}{2\pi r_1} I_1, \quad (8)$$

де

$$r_r = \frac{r_1 + r_2}{2}, \quad r_1 = \frac{d_1}{2}, \quad r_2 = \frac{d_2}{2}$$

Оскільки спад напруги на опорі  $R_1$   $U_x = I_1 R_1$ , то з врахуванням (8)

одержуємо

$$U_x = \frac{2\pi r_1 R_1}{N_1} H \quad (9)$$

$U_x$  визначається за коефіцієнтом відхилення електронного променя по горизонтальній осі  $k_x$  :

$$U_x = k_x x \quad (10)$$

Враховуючи (10) вираз для  $H$  може бути записане у вигляді

$$H = \frac{N_1 k_x x}{2\pi R_1 r_r} = \alpha k_x x \quad (11)$$

За законом Фарадея ЕРС індукції у вторинній обмотці

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{dB}{dt} S_2 \quad (12)$$

де  $\Phi$  - потік вектора магнітної індукції через один виток;  $S_2$ - площа поперечного перерізу тороїда.

За законом Ома для вторинної обмотки одержуємо

$$\varepsilon_i = U_c + I_2 R_2 + L \frac{dI_2}{dt} \quad (13)$$

де  $U_c$  - напруга на конденсаторі;  $I_2$  - струм у вторинній обмотці;  $L$  - індуктивність вторинної обмотки.

Оскільки  $L$  дуже мале, а  $I_2 R_2 \gg U_c$ , а рівняння (13) може бути записано з врахування (12) в наступному вигляді:

$$-N_2 \frac{dB}{dt} S_2 = I_2 R_2$$

звідки

$$I_2 = -\frac{N_2 S_2}{R_2} \frac{dB}{dt} \quad (14)$$

Враховуючи (14) знайдемо напругу  $U_y$ , рівну напрузі на конденсаторі

$$U_y = U_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I_2 dt = -\frac{N_2 S_2}{R_2 C} \int_0^t dB = -\frac{N_2 S_2}{R_2 C} B \quad (15)$$

де  $Q$  - заряд на конденсаторі.

Якщо відомий коефіцієнт відхилення променя  $K_y$  по вертикалі, то

$$U_y = k_y y \quad (16)$$

З виразів (15) і (16) одержуємо

$$B = \frac{R_2 C U_y}{N_2 S_2} = \frac{R_2 C k_y y}{N_2 S_2} = \beta k_y y \quad (17)$$

Подавши одночасно напруги  $U_y$  і  $U_x$  на вертикально і горизонтально відхилюючі пластини, одержимо на екрані осцилографа петлю гістерезису.

За площею петлі можна знайти роботу перемагнічування, одиниці об'єму магнетика. Мала зміна об'ємної густини енергії магнітного поля  $W_M = \frac{\mu_0 H^2}{2}$  у циклі перемагнічування визначається формулою

$$d\omega_M = Hd(\mu\mu_0 H) = HdB \quad (18)$$

Робота  $dA$  витрачається на зміну внутрішньої енергії одиниці об'єму феромагнетика. За повний цикл перемагнічування

$$A = \oint HdB \quad (19)$$

враховуючи (11) і (17), одержуємо

$$A = \frac{N_1 R_2 C k_x k_y}{2\pi R_1 N_2 S_2} S_n \quad (20)$$

де  $S_n$  - площа петлі гістерезису;

$$S_2 = \frac{r_1 - r_2}{b}$$

### **Порядок виконання роботи**

#### **Завдання 1. Визначення основної кривої намагнічення.**

1. Ознайомитися з описом установки і методом вимірювання.
2. Встановити регулятор амплітуди синусоїдальної напруги на касеті ФПЕ на мінімальне значення (обертання ручки проти годинникової стрілки до упору). Запустити програму ФПЕ. Включити живлення касети ФПЕ. На екрані віртуального осцилографа повинна спостерігатися фігура Ліссажу.

Встановити максимальну петлю гістерезису в межах екрану, відповідну магнітному насиченню зразка. Зменшуючи величину вихідної напруги,

одержати сімейство петель гістерезиса (див. рис.4) - не менше 5 петель. Для кожної петлі зняти координати "x" і "y" її вершин, визначити значення  $U_x$  і  $U_y$  і записати їх в таблицю.

№ п/п	x	y	$U_x$	$U_y$	H, А/м	B, Тл	$\mu$
1							
2							
3							
4							
5							

3. За формулами (11) и (17) обчислити значення напруженості  $H$  і індукції  $B$  вершин кожної петлі гістерезису і записати їх в таблицю. Значення необхідних параметрів вказані в паспорті касети ФПЕ.

4. Розрахувати значення магнітної проникності по формулі

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \text{ де } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

5. Побудувати графіки залежності  $B = f(H)$  и  $\mu = f(H)$ .

6. Оцінити похибку визначення значень  $H$  і  $B$ .

**Завдання 2.** Оцінка роботи переманічування  $A$  за один повний цикл.

1. Одержати на екрані віртуального осцилографа максимальну петлю гістерезису.

2. Роздрукувавши на принтері або замалювати на міліметровому папері дану криву, визначити її площу.

3. Розрахувати роботу переманічування за один цикл використовуючи формулу (20).

$$N_1=N_2=100; S_2=12,5 \text{ мм}^2; r_1=5 \text{ мм}; r_2=8 \text{ мм}; R_1=20 \text{ Ом}; R_2=680 \text{ Ом}; \\ C=4,7 \text{ мкФ}$$

**Завдання 3.** Визначення коерцитивної сили.

1. По максимальній петлі гістерезису знайти координату  $x_c$ , відповідну коерцитивній силі  $H_c$ .
2. За формулою (9) розрахувати  $H_c$ .
3. Визначити групу феромагнетика (магнітом'який або магнітожорсткий).  
Оцінити похибку вимірювання коерцитивної сили.

### **КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

1. Як поводить ся контур із струмом в магнітному полі?
2. Які властивості парамагнетиків, діамагнетиків, феромагнетиків?
3. Які причини спонтанної намагніченості доменів у феромагнетиках?
4. Як поведуться домени при збільшенні напруженості зовнішнього магнітного поля? Що означає насичення феромагнетиків?
5. У чому полягає явище магнітного гістерезису?