

1. Речовина в стаціонарному магнітному полі. Діа- та парамагнетики. Вектор намагнічення
2. Вектор напруженості магнітного поля. Умови на межі двох магнетиків
3. Феромагнетики. Петля гістерезису*

1. Речовина в стаціонарному магнітному полі. Діа- та парамагнетики. Вектор намагнічення

Магнітне поле навколо провідника зі струмом було виявлено за його механічною дією на магнітну стрілку. Нагадаємо, що в досліді Ерстеда вона відхилялася від попереднього свого напрямку. Отже, поведінка речовини в зовнішньому магнітному полі з самого початку цікавила експериментаторів. Нехай зовнішнє магнітне поле, в якому перебуває речовина є стаціонарним, тобто незалежним від часу: $\vec{B}_0 = \vec{B}_0(\vec{r})$, а речовина є ізотропною та однорідною.

Проте, індукція магнітного поля поза межами речовини $\vec{B}_0 = \vec{B}_0(\vec{r})$ та індукція магнітного поля у речовині $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r})$ не однакові, тому що намагнічення речовини створює внутрішнє поле з індукцією $\vec{B}_m(\vec{r})$, яке існує лише у межах речовини і є реакцією на зовнішнє поле $\vec{B}_0(\vec{r})$. Згідно з принципом суперпозиції результуюче магнітне поле у речовині в кожній точці є сумою цих двох полів:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \vec{B}_0(\vec{r}) + \vec{B}_m(\vec{r}) \quad (3.8.1)$$

Для пояснення намагнічування тіл Ампер запропонував гіпотезу про те, що у молекулах та атомах речовини циркулюють колові струми (так звані **молекулярні струми**). Кожен такий струм має певний магнітний момент $\vec{p}_m$ і створює в оточуючому середовищі деяке магнітне поле $d\vec{B}(\vec{r})$.

З причини хаотичної орієнтації магнітних моментів окремих молекул сумарний магнітний момент тіла дорівнює нулю. Під дією зовнішнього поля магнітні моменти молекул набувають певної переважної орієнтації в одному напрямку, внаслідок чого магнетик намагнічується – його сумарний магнітний момент стає відмінним від нуля. Магнітні поля окремих молекулярних струмів в такому випадку вже не точно компенсують одне одного і виникає поле реакції магнетика $\vec{B}_m(\vec{r})$.

Намагнічування магнетика характеризуватимемо **магнітним моментом одиниці об'єму** – **намагніченістю J**:

$$\vec{J}(\vec{r}) = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}_m \quad (3.8.2)$$

де ΔV - фізично малий об'єм, взятий в околі досліджуваної точки, $\vec{p}_m$ - магнітний момент окремої молекули.

Одиницею вимірювання намагніченості є ампер на метр: $[J] = A/m$.

Векторна сума проводиться по всім молекулам в фізично малому, проте макроскопічному (великому порівняно з атомними масштабами) об'ємі ΔV .

Вектор намагніченості просто пов'язаний з усередненим полем відгуку

$$\vec{B}_m(\vec{r}) = \mu_0 \vec{J}(\vec{r}) \quad (3.8.3)$$

Як видно з останнього виразу вектори індукції поля реакції та намагніченості є пропорційними один одному з коефіцієнтом $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, тобто так званою магнітною сталою.

Зрозуміло, що поміж векторами, що входять до (3.8.3) та вектором зовнішнього поля $\vec{B}_0$ має існувати певний зв'язок: чим більшим є зовнішнє поле, тим більшим є намагніченість речовини та її реакція на це поле:

$$\vec{B}_m(\vec{r}) = \chi \vec{B}_0(\vec{r}) \quad (3.8.4)$$

Коефіцієнт магнітної сприйнятливості χ може відрізнятися знаком:

- $\chi > 0$ характеризує так звані **парамагнетики**, які підсилюють зовнішнє поле:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \vec{B}_0(\vec{r}) + \chi \vec{B}_0(\vec{r}) = (1 + \chi) \vec{B}_0(\vec{r}) > \vec{B}_0(\vec{r}) \quad (3.8.5)$$

- $\chi < 0$ характеризує так звані **діамагнетики**, які послаблюють зовнішнє поле:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \vec{B}_0(\vec{r}) + \chi \vec{B}_0(\vec{r}) = (1 + \chi) \vec{B}_0(\vec{r}) < \vec{B}_0(\vec{r}) \quad (3.8.6)$$

Поле реакції спрямоване так само як зовнішнє поле у парамагнетиках, і протилежно зовнішньому — у діамагнетиках.

Величину $1 + \chi = \mu$ називають **магнітною проникливістю речовини**. Зрозуміло, що для парамагнетиків $\mu > 1$, тоді як для діамагнетиків $\mu < 1$.

Табл.3.6.1 Магнітні проникливості деяких речовин

Речовина	ДІАМАГНЕТИКИ			ПАРАМАГНЕТИКИ			
	Вода	Скло	Вісмут	Повітря	Вольфрам	Платина	Рідкий кисень
μ	0,9991	0,99874	0,98249	1,00004	1,0176	1,0360	1,3400

Отже, для ізотропних та однорідних речовин магнітну проникливість можна визначити як відношення модулів результуючого та зовнішнього магнітного поля:

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (3.8.7)$$

Зауважимо, що величина μ для цих двох класів магнетиків є незалежною від величини зовнішнього поля, тобто постійною величиною: $\mu = const$.

2. Вектор напруженості магнітного поля. Умови на межі двох магнетиків

Оскільки індукція магнітного поля в речовині та поза її межами неоднакова $\vec{B}(\vec{r}) \neq \vec{B}_0(\vec{r})$, зрозуміло, що на межі вакуум-речовина вектор індукції магнітного

поля стрибком змінює свою величину (а в анізотропних середовищах навіть і напрям). Так само ситуація виглядає і на межі двох різних речовин (середовищ).

Виникає природне запитання: чи не можна вказати таку векторну силову характеристику магнітного поля, котра не змінювалася б на кордоні двох речовин? Така характеристика існує і має назву напруженості магнітного поля $\vec{H}(\vec{r})$. Причому:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{\vec{B}(\vec{r})}{\mu\mu_0} \quad (3.8.8)$$

Розглянемо поведінку вектора напруженості магнітного поля на межі речовина-вакуум. На цій межі відбувається стрибок нормальної до неї компоненти вектора індукції від значення $\vec{B}_0(\vec{r})$ (вакуум, магнітна сприйнятливості якого точно дорівнює $\mu = 1$), до значення $\vec{B}(\vec{r})$ (у речовині з магнітною сприйнятливостю $\mu \neq 1$). Проте, нормальна до межі двох речовин складова вектору напруженості, як неважко перекоонатися, не змінюється:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{\vec{B}(\vec{r})}{\mu\mu_0} = \frac{\vec{B}_0(\vec{r})}{\mu_0} = \vec{H}_0(\vec{r}) \quad (3.8.9)$$

Висновок (3.8.9)справедливий не лише на межі вакуум-речовина, але й для будь-яких двох речовин. Напруженість магнітного поля не змінює нормальної до межі компоненти при переході через неї, тоді як вектор індукції демонструє на межі двох середовищ розрив першого роду (стрибок).

Одиниця вимірювання вектора напруженості $[H] = A/m$, тобто Ампер/метр. Ця одиниця співпадає з одиницею вимірювання вектора намагніченості речовини.

3. Феромагнетики. Петля гістерезису

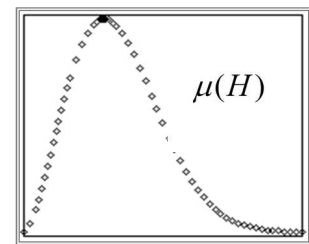
Сильні і своєрідні магнітні властивості спостерігаються у таких речовинах,— причому лише в твердому стані, — які складаються переважно з атомів із незабудованими внутрішніми електронними оболонками. Це, насамперед, феромагнітні матеріали: залізо Fe , кобальт Co , нікель Ni та їхні сплави. Атоми феромагнетиків мають некомпенсовані власні магнітні моменти, які внаслідок внутрішніх квантових взаємодій можуть набувати певної впорядкованої просторової орієнтації, тобто забезпечувати намагніченість речовини навіть у макромасштабах. Речовини, які за певних умов мають самовільну (спонтанну, невимушену) намагніченість, магнітна проникливість котрих залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля та попередньої історії намагнічування, називають **феромагнетиками**.

Особливістю феромагнетиків є те, що вони можуть мати макроскопічну намагніченість навіть у відсутності зовнішнього магнітного поля. В цьому відношенні магнітні властивості феромагнетиків значною мірою подібні до електричних властивостей сегнетоелектриків. Магнітна проникливість феромагнетиків може сягати значно більших від одиниці величин: $\mu \approx 10^2 - 10^4$. Отже, зовнішнє магнітне поле всередині феромагнетиків підсилюється в сотні разів.

Серйозні дослідження феромагнетиків почалися з експериментальних робіт російського фізика О.Г.Столетова (1871р.). Перші ж ідеї про механізм намагнічування цих речовин висловлював ще у 1892р. російський фізик Б.Л.Розінг, втім першу кількісну теорію розробив французький фізик П.Вейсс (1907р.) Явище гістерезису, характерне для перемагнічування феромагнетиків, вперше спостерігав у 1880р. Варбург.

За теорією Вейсса, котра пізніше підтвердилася експериментально, внаслідок наявності внутрішнього молекулярного поля в стані повного розмагнічення феромагнетика розпадаються на велику кількість фізично малих, розмірами від тисячних до десятих долів міліметра, але макроскопічних областей спонтанного намагнічення (так званих **доменів** або **областей Вейсса**), кожна з яких намагнічена до насичення. Магнітний момент типових доменів в середньому в 10^{15} разів більший від магнітного моменту окремого атома.

Якщо зовнішнього магнітного поля немає, магнітні моменти різних доменів напрямлені в просторі хаотично, з однаковою ймовірністю у різні сторони. Тому феромагнетик в цілому за таких умов є не намагніченим (векторна сума моментів доменів дорівнює нулю). Наявність доменів у феромагнетиках підтверджується експериментально: за допомогою магнітних порошоків, які після нанесення на поліровану поверхню феромагнетика осідають переважно на межах доменів, окреслюючи їхні розміри і форму. Намагнічення феромагнетиків у зовнішньому полі полягає в переорієнтації векторів намагніченості окремих доменів у напрямі прикладеного поля.



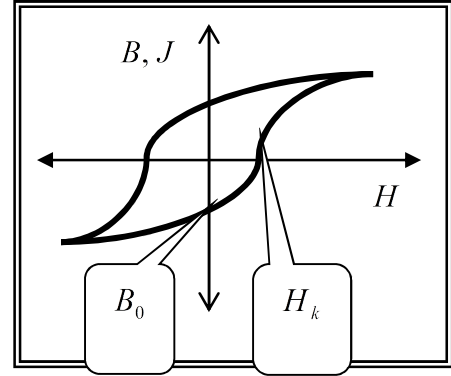
Намагніченість $\vec{J}$ та індукція $\vec{B}$ мають нелінійний характер залежності від $\vec{H} = \vec{H}_0$. Тому для феромагнетиків магнітна проникність $\mu(H)$ не є сталою величиною, а залежить від напруженості поля $\vec{H}$. Типовий вигляд такої залежності показаний на Мал.3.8.1.

Криві намагнічення феромагнетиків залежать не лише від фізичних властивостей матеріалів і зовнішніх умов, а й від послідовності проходження різних магнітних станів, тобто від попередньої історії намагнічення зразків. Це явище називають магнітним **гістерезисом**(Мал.3.8.2), і воно повністю аналогічно гістерезису сегнетоелектриків (які також називають фероелектриками) під час процесу реполяризації.

Важливою характеристикою феромагнетиків є наявність для кожного з них своєї критичної температури, при якій відбувається фазовий перехід другого роду: **феромагнетик-парамагнетик**.

В результаті такого переходу феромагнетик перетворюється на парамагнетик, або, навпаки, залежно від того, в якому напрямі йде процес зміни температури. Цю властивість феромагнетиків вперше вивчив експериментально П. Кюрі. Тому температуру подібного фазового переходу називають **температурою** або **точкою Кюрі** T_K . Феромагнітні властивості речовини можуть зберігатись лише при $T < T_K$.

Домашнє завдання: Електротехніка з основами промислової електроніки, А.М.Гуржій, Київ «Форум»2002, конспект &4.1—4.2, Самостійно опрацювати «Електромагніти» стр.86



Тест на оцінку (відповідь в вайбер)

1. Силовою характеристикою магнітного поля є...
 - а) магнітна проникність б) вектор магнітної індукції
 - в) магнітний потік г) сила Лоренца
2. Фізична величина, що характеризує магнітні властивості речовини, називається...
 - а) діелектричною проникністю середовища б) магнітною проникністю середовища
 - в) магнітною індукцією г) магнітним потоком
3. Сила Лоренца - це сила, з якою магнітне поле діє на...
 - а) електричний заряд, що рухається б) провідник зі струмом
 - в) постійний магніт г) нерухомий електричний заряд
4. Коли магнітне поле змінюється, виникає...
 - а) електричне поле б) вихрове електричне поле
 - в) додатний електричний заряд
5. Вихрове електричне поле виникає при...
 - а) проходженні постійного струму по замкнутому контуру
 - б) змінах магнітного поля
 - в) взаємодії двох електричних струмів г) взаємодії двох нерухомих заряджених частинок
6. За одиницю індуктивності в СІ прийнято...
 - а) генрі б) фарад
 - в) тесла г) вебер
7. Якщо розімкнути ключ у колі живлення потужного електромагніту , спостерігається сильна іскра. Її викликає...
 - а) ЕРС джерела струму б) ЕРС самоіндукції в котушці електромагніту
 - в) хаотичний рух вільних електронів у провідниках
 - г) електричне поле
8. Індукційний струм виникає в будь-якому замкнутому провідному контурі, якщо...
 - а) контур перебуває в однорідному магнітному полі
 - б) контур рухається поступально в однорідному магнітному полі
 - в) змінюється магнітний потік, що пронизує контур