

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІ-  
ШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни  
**«Основи електрики та електроніки, електричні  
вимірювання та їх стандартизація»**  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт  
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

**за темою № 6 - Магнітні властивості речовини. Електромагнітна індукція**

**Кременчук 2023**

## **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

## **СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного уні-  
верситету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

## **ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

**Розробник:** викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

### **Рецензенти:**

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

### **План лекції:**

1. Магнітні моменти атомів та молекул
2. Діамагнетизм
3. Парамагнетизм
4. Феромагнетизм
5. Явище електромагнітної індукції
6. Взаємна індукція
7. Енергія магнітного поля

### **Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті**

#### **Основна:**

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О. , Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків: Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

#### **Допоміжна:**

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті**

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

## Текст лекції

**1. Магнітні моменти атомів та молекул**

Згідно з уявленнями класичної фізики, електрони в атомах рухаються замкнутими орбітами. Отже, кожен електрон створює замкнутий мікрострум, магнітне поле якого, а також взаємодія його із зовнішнім полем можна охарактеризувати магнітним моментом. Магнітний момент, обумовлений рухом електрона орбітою, називається орбітальним магнітним моментом електрона.

Модуль орбітального магнітного моменту електрона

$$p_m = iS,$$

де  $i$  – абсолютне значення струму, створюваного електроном;  $S$  – площа орбіти.

Електрон, що рухається по орбіті, має орбітальний момент імпульсу, орбітальний механічний момент, модуль якого

$$L = mvr.$$

Відношення модулів векторів орбітального магнітного та орбітального механічного моментів називається орбітальним гіромагнітним відношенням електрона:

$$\frac{p_m}{L} = g.$$

Власний момент імпульсу  $\vec{L}_s$  електрона називається спином, а власний магнітний момент  $\vec{p}_{ms}$  – спіновим магнітним моментом.

Спином і спіновим магнітним моментом мають не тільки електрони, але й багато інших елементарних частинок.

Таким чином, магнітний момент атома складається з орбітальних і спінових магнітних моментів всіх електронів атома, а також зі спінових моментів протонів і нейтронів, що входять до складу атомного ядра. Спини електронів, протонів та нейтронів за абсолютною величиною однакові. Спінові магнітні моменти у протонів і нейтронів значно менші, ніж у електронів відповідно у 660 та 960 разів. Тому часто магнітні моменти ядер можна нехтувати.

**2. Діамагнетизм**

Усі речовини в магнітному відношенні поділяються на діамагнетики, парамагнетики та магнетики з упорядкованою магнітною структурою – феромагнетики.

З точки зору макроскопічної теорії діамагнетики – це речовини, що мають негативну магнітну сприйнятливість та меншу одиниці магнітну проникність:

$$\chi < 0; \quad \mu < 1.$$

Діамагнетиками є інертні гази, багато органічних сполук, деякі метали ( $Bi$ ,  $Zn$ ,  $Au$ ,  $Cu$ ,  $Ag$ ,  $Hg$ ) смоли, молекулярний водень, скло, мармур та ін.

Вектор намагніченості в діамагнетиках антипаралельний полю намагнічення  $\vec{B}_0$ , тому результуюче поле в діамагнетиках завжди слабше зовнішнього поля  $\vec{B}_0$ . Сприйнятливість діамагнетиків не залежить від температури і поля, що

намагнічує (у не дуже сильних полях) і дуже мала. Так, у міді  $\chi = -8,4 \cdot 10^{-7}$ , у вісмуту  $\chi = -1,7 \cdot 10^{-4}$ .

З точки зору мікроскопічної теорії, діамагнетики – це речовини, молекули яких без зовнішнього магнітного поля не мають магнітних моментів.

Основний механізм намагнічування діамагнетиків – атомний діамагнетизм (діамагнетизм пов'язаних електронів).

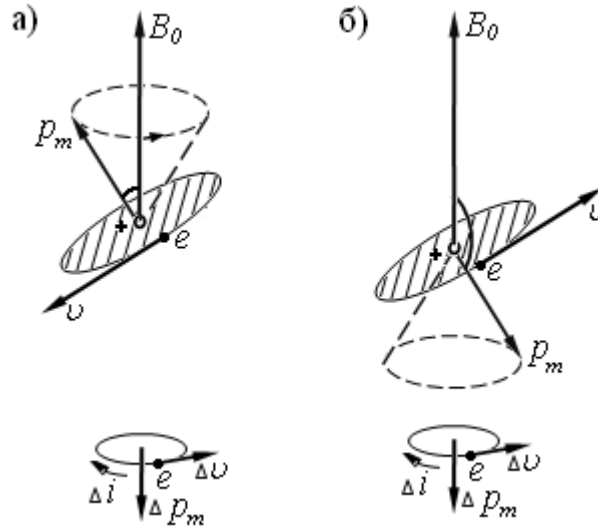


Рисунок 1

Електрон, що рухається по круговій орбіті, подібний до дзиги. Зокрема, якщо електронна орбіта не перпендикулярна до магнітного поля, то під дією поля вона прецесує – здійснює такий рух, при якому орбітальний магнітний момент  $\vec{p}_m$  описує конус, віссю якого служить напрямок  $\vec{B}_0$ . Прецесія орбіти обумовлює додатковий рух електрона у площині, перпендикулярній  $\vec{B}_0$ . За рахунок цього руху виникає магнітний момент  $\vec{p}_m$ , спрямований проти поля.

Цей ефект має місце у всіх без винятку речовинах.

### 3. Парамагнетизм

Якщо власний магнітний момент атомів відмінний від нуля, речовина виявляється парамагнітною. Магнітне поле прагне встановити магнітні моменти атомів уздовж  $\vec{B}_0$ , а тепловий рух прагне розорієнтувати їх рівномірно в усіх напрямках. В результаті встановлюється деяка переважна орієнтація моментів уздовж поля, тим більша, чим більше  $\vec{B}_0$ , і тим менша, чим вища температура.

З точки зору макроскопічної теорії парамагнетики - це речовини, для яких  $\chi$  (як і у діамагнетиків) невелика, але позитивна, а  $\mu$  дещо більше одиниці:

$$\chi > 0, \quad \mu > 1.$$

Парамагнетиками є Na, K, Rb, Cs, Mg, Al, Mn, Pt, O, розчини солей заліза та ін. Сприйнятливість парамагнетиків при звичайних температурах лежить в межах від  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$ . Так у алюмінію  $\chi = 2 \cdot 10^{-5}$ , у платини  $\chi = 3 \cdot 10^{-4}$ .

Кюрі експериментально встановив закон, згідно з яким магнітна сприйнятливості парамагнітної речовини

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

де  $C$  - постійна Кюрі, яка залежить від роду речовини. Закон Кюрі справедливий за не дуже низьких температур.

#### 4. Феромагнетизм

Феромагнетики – речовини, здатні дуже сильно намагнічуватися, внутрішнє поле в таких речовинах може в  $10^2 - 10^6$  разів перевищувати зовнішнє магнітне поле:

Феромагнетиками є Fe, Co, Ni, Gd, сплави та сполуки цих елементів, деякі сплави та сполуки Mn та Cr з неферомагнітними елементами та ін.

Феромагнетики, крім здатності сильно намагнічуватися, мають ряд властивостей, які істотно відрізняють їх від інших магнетиків.

1. Залежність намагніченості  $\vec{J}$ , а отже, і індукції результуючого поля  $\vec{B}$  від зовнішнього поля  $\vec{B}_0$ , у феромагнетиках нелінійна.

Зазвичай на графіках зображують залежність намагніченості та індукції у феромагнетиках не від  $B$ , а від  $H$ .

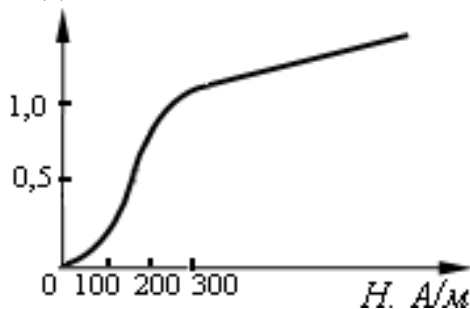


Рисунок 2

На рис. 2 як приклад зображено графік залежності  $B$  від  $H$  у феромагнетиці (залізо), магнітний момент якого спочатку дорівнював нулю.

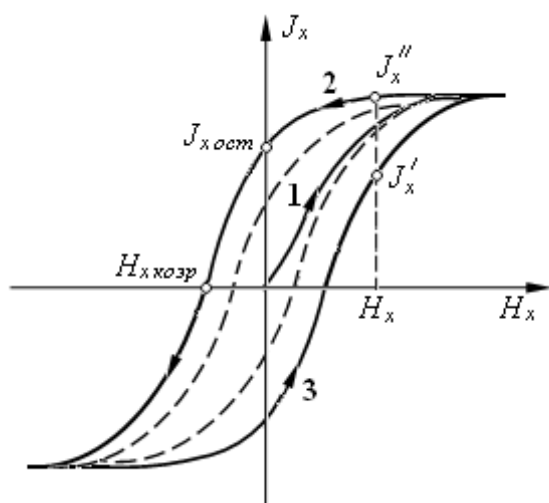


Рисунок 3

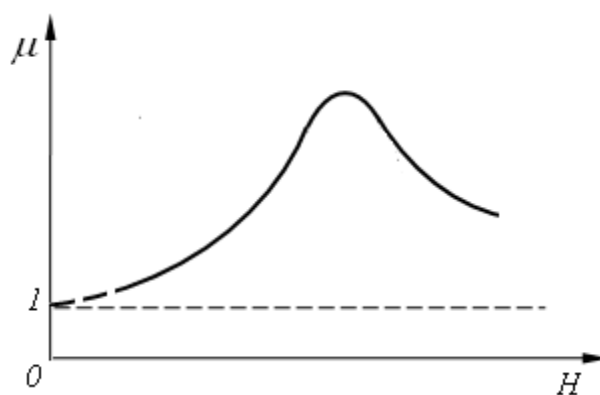


Рисунок 4

2. Залежність намагніченості феромагнетика при даній напруженості поля, що намагнічує від попередніх станів називається магнітною гістерезисом.

Якщо феромагнетик намагнітити до насичення, а потім зменшувати напруженість поля, що намагнічує, то намагніченість  $J_x$  буде слідувати не початковою кривою 1 (називається основною кривою намагнічування), а новою кривою 2. (рис. 3). Намагніченість  $J_{ост}$ , яку феромагнетик має у відсутності зовнішнього магнітного поля, називається залишковою. Поле  $H_{коер}$  зворотного напрямку, що повністю знімає залишкову намагніченість, називається *коерцитивною силою*. При подальшому збільшенні зворотного поля, що намагнічує, знову відбувається магнітне насичення. При циклічній зміні модуля і напрямки поля, що намагнічує, виходить *петля гістерезису*. Т. ч. залежність  $\vec{B}$  від  $\vec{H}$  у феромагнетиках неоднозначна – залежить від зовнішнього поля (рис. 4).

3. При певній температурі, яка називається точкою Кюрі, феромагнетик втрачає свої особливі властивості і стає парамагнетиком. Точка Кюрі для чистого заліза становить 1043 К (770 ° С), для нікелю 663 К (360 ° С), кобальту 1422 К (1149 ° С).

## 5. Явище електромагнітної індукції

Явище електромагнітної індукції (відкрито М. Фарадеєм в 1831 р.) формулюється наступним чином: *при будь-якій зміні магнітного потоку, зчепленого з провідним контуром, у контурі виникає ЕРС індукції*.

Е. Х. Ленц встановив правило, згідно з яким *індукційний струм завжди має такий напрям, що створюваний ним магнітний потік через поверхню, що спирається на контур, протидіє змін того магнітного потоку, який викликає цей індукційний струм*. З цього випливає, що знаки ЕРС індукції та швидкості зміни іншого потоку протилежні:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Абсолютне значення ЕРС індукції дорівнює модулю швидкості зміни магнітного потоку, зчепленого з контуром.

Струм, що протікає в ланцюзі, створює магнітне поле, магнітний потік якого через поверхню, що спирається на контур ланцюга, пропорційний цьому струму:

$$\Phi = Li, \quad (2)$$

де  $L$  – коефіцієнт пропорційності, що називають індуктивністю ланцюга.

Потік (2) називається потоком зчеплення самоіндукції.

Індуктивність залежить від форми, розмірів ланцюга, магнітної проникності середовища і не залежить (без феромагнетиків) від струму в ланцюгу.

Явище самоіндукції полягає у виникненні додаткової ЕРС (ЕРС самоіндукції) та обумовленого нею струму (струму самоіндукції) у ланцюзі при зміні потокозчеплення самоіндукції.

ЕРС самоіндукції залежить від швидкості зміни потокозчеплення самоіндукції. При  $L = const$

$$\varepsilon_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{di}{dt}. \quad (3)$$

Самоіндукція в електромагнетизм грає таку ж роль, як і інерція в механіці. Внаслідок самоіндукції встановлення та зникнення струму в ланцюзі, а також будь-яка його зміна відбувається не миттєво, а поступово.

## 6. Взаємна індукція

Розглянемо два розташовані поруч провідні контури 1 і 2 (рис. 5). За наявності струму в контурі 2 ( $i_2$ ) контур 1 пронизуватиметься деяким магнітним потоком  $\Phi_{12}$ , званим потоком зчеплення взаємної індукції. Поле, що створює цей потік, зображено на малюнку пунктирними лініями:

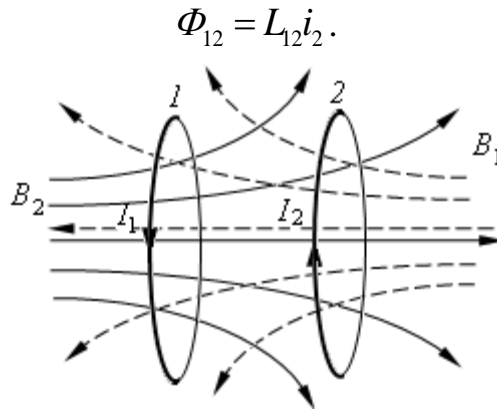


Рисунок 5

При будь-якій зміні цього потоку в контурі 1 виникає ЕРС

$$\varepsilon_{i1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = \frac{d}{dt}(L_{12}i_2).$$

Аналогічно потік, створюваний струмом і зчеплений з контуром 2, пропорційний струму  $i_1$

$$\Phi_{21} = L_{21}i_1.$$

Аналогічно за наявності в контурі струму 1 в контурі 2 виникає ЕРС, якщо цей струм змінюється або змінюється взаємна індуктивність.

Таким чином, потокозчеплення взаємної індукції є потоком зчеплення одного контуру, обумовлене струмом в іншому контурі. Т.ч. між контурами є магнітний зв'язок. Коефіцієнти пропорційності  $L_{12} = L_{21}$  називаються взаємною індуктивністю ланцюгів.

*Взаємна індуктивність – фізична величина, що характеризує властивість двох (або більше) ланцюгів утворювати загальні потокозчеплення, коли по одному з них тече струм.*

*Явище взаємної індукції полягає у виникненні ЕРС у контурі за зміни потокозчеплення взаємної індукції цього контуру.*

## 7. Енергія магнітного поля

Знайдемо роботу струму під час зникнення при відключенні котушки від джерела. Елементарна робота за час  $dt$

$$dA = \varepsilon idt = -L \frac{di}{dt} idt = -Lidi,$$



Проінтегрувавши цей вираз  $I$  від  $I_0$  до 0, отримаємо повну роботу, виконану струмом за час, протягом якого зникає магнітне поле:

$$A = - \int_{I_0}^0 L i di = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Носієм енергії, за рахунок якої здійснюється робота, є магнітне поле. Таким чином, енергія магнітного поля  $W$  створена струмом  $i$ , що тече в ланцюгу з індуктивністю  $L$ , дорівнює

$$W = \frac{Li^2}{2}$$