

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія економіки, соціально-гуманітарних та
фундаментальних дисциплін**

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

**з навчальної дисципліни «Фізика»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти**

**272Авіаційний транспорт
Оператор безпілотних літальних апаратів**

за темою - Електромагнетизм

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 22.02.2024 №2

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного
коледжу Харківського
національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 17.01.2024 №6

ПОГОДЖЕНО

Секцією науково-методичної ради
ХНУВС з гуманітарних та соціально-
економічних дисциплін
Протокол від 22.02.2024 №2

Розглянуто на засіданні циклової комісії економіки, соціально-гуманітарних та фундаментальних дисциплін, протокол від 05.01.2024 №14

Розробник:

Викладач циклової комісії економіки, соціально-гуманітарних та фундаментальних дисциплін, Пузир М.С.

Рецензенти:

1.Доцент кафедри автомобілів та тракторів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, кандидат технічних наук, доцент Черниш А.А.

2.Начальник відділу організації наукової роботи та гендерних питань КЛК ХНУВС, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Владов С.І.

План лекції

1. Електрична і магнітна взаємодії.
2. Сила Ампера.
3. Момент сил, що діє на прямокутну рамку зі струмом у магнітному полі.
4. Магнітні властивості речовини.

Рекомендована література:

Основна

1. Дмитрієва В. Ф. Фізика : навчальний посібник / В. Ф. Дмитрієва. – К.: Техніка, 2008. – 608 с.

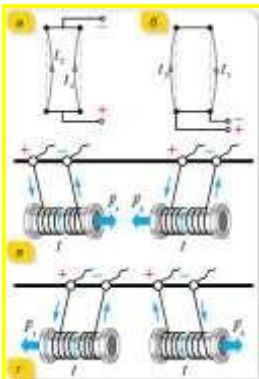
Додаткова

1. Курс фізики : навчальний посібник / [Зачек І. Р., Кравчук І. М., Романишин Б. М., Габа В. М., Гончар Ф. М.]. – Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2002. – 376 с.
2. Волков О. Ф. Курс фізики ; у 2-х т. – Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм : навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів / О. Ф. Волков, Т. П. Лумпієва. – Донецьк : ДонНТУ, 2009. – 224 с.
3. Волков О. Ф. Курс фізики ; у 2-х т. – Т.2: Коливання і хвилі. Хвильова і квантова оптика. Елементи квантової механіки. Основи фізики твердого тіла. Елементи фізики атомного ядра : навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів / О. Ф. Волков, Т. П. Лумпієва. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – 208 с.
4. Збірник задач з фізики : навчальний посібник / [Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Серeda В. М., Крушельницька Т. Д., Українець Н. А.]. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 124с.

Текст лекції

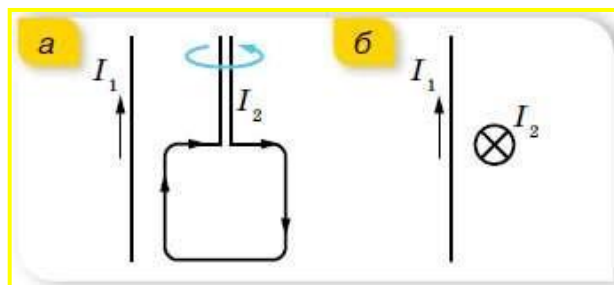
1.Електрична та магнітна взаємодії.

Як ми знаємо, нерухомі електричні заряди взаємодіють між собою через електричне поле. Рухомі — через електричне й магнітне. Якщо по двох паралельних гнучких провідниках проходять струми в одному напрямку (мал. а), то провідники притягуються один до одного. Якщо струми протилежних напрямків — провідники відштовхуються (мал. б). Взаємодіють між собою, притягуючись або відштовхуючись,



не лише прямолінійні провідники зі струмом, а й провідники довільної форми, по яких протікає струм, наприклад, провідники у вигляді прямокутних рамок, витків. Така сама взаємодія відбувається й між котушками зі струмом (мал. в, г).

Взаємодія провідників зі струмом не завжди обмежується притяганням або відштовхуванням. Якщо прямокутну рамку, по якій тече електричний струм, розташувати поблизу прямолінійного провідника зі струмом, то рамка повернеться та розташується так, щоб її площина перебувала у площині провідника (мал. а). Ще



один приклад. Два прямолінійні провідники зі струмом, розташовані так, як показано на малюнку б (у провіднику 2 струм напрямлений від нас), взагалі не взаємодіють. Описані взаємодії між електричними струмами (тобто рухомими електричними зарядами) не можна пояснити, виходячи із законів електростатики. Такий тип взаємодії називають *магнітною*. Сили, з якими провідники зі струмом діють один на одний, називають *магнітними силами*.

Індукція магнітного поля. Під час з'ясування природи взаємодії провідників зі струмом постає таке саме питання, як у випадку вивчення взаємодії заряджених тіл. Яким чином передається взаємодія на відстані? Як у просторі, що оточує нерухомі електричні заряди, виникає електричне поле, так у просторі, що оточує рухомі електрично заряджені частинки, виникає, крім електричного поля, ще й магнітне. І тому, розглядаючи взаємодію струмів, маємо не просто говорити, що один струм діє на інший, а що електричний струм в одному з провідників створює навколо себе магнітне поле, яке діє на елемент струму в другому провіднику.

Магнітне поле (стаціонарне) — форма матерії, окремий вияв електромагнітного поля. Породжується рухомими електричними зарядами (струмами).

Дослідження, присвячені взаємодії струмів, доводять, що магнітні поля різних струмів відрізняються силою своєї дії. До того ж поле одного й того самого струму на різних відстанях від нього різне. Це спонукає до введення фізичної величини, яка б кількісно описувала магнітне поле. Пригадаймо, вивчаючи електростатичне поле, ми ввели силову характеристику — *напруженість* E цього поля, яка визначається відношенням сили, з якою поле діє на позитивний пробний заряд у певній точці поля, до значення цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

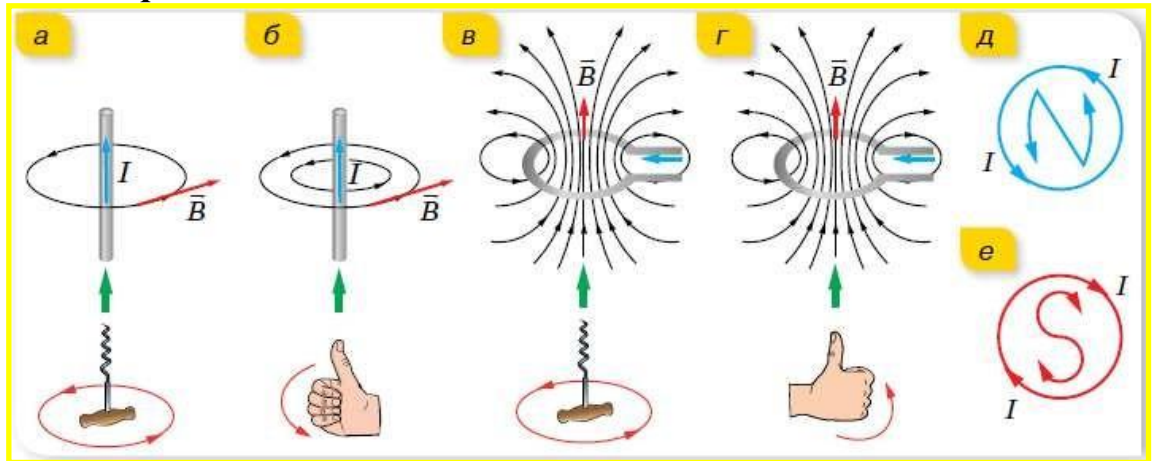
Провівши аналогічні дослідження магнітного поля, було введено силову характеристику, яка називається *індукцією магнітного поля*. Позначають вектор магнітної індукції літерою \vec{B} . Оскільки сила F магнітного поля діє на елемент струму Idl , модуль вектора магнітної індукції визначається співвідношенням

$$B = \frac{F}{I \Delta l}$$

Магнітна індукція — \vec{B} це фізична величина, яка характеризує силову дію магнітного поля й вимірюється відношенням сили, з якою магнітне поле діє на елемент струму, розташований у деякій точці простору, до величини цього елемента струму.

Одиниця магнітної індукції — тесла, її названо на честь сербського вченого, електротехніка Ніколи Тесли, $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}$.

Наочну картину магнітного поля можна отримати, якщо побудувати **силові лінії поля (лінії магнітної індукції)**. Це лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються за напрямком з вектором магнітної індукції \vec{B} . Важливою особливістю ліній магнітної індукції є те, що вони не мають ні початку, ні кінця. Вони завжди замкнені. Поля із замкненими силовими лініями, як ви вже знаєте, називають **вихровими**.



Індукція магнітного поля, так само як і напруженість електричного поля, — векторна величина. На відміну від вектора напруженості електричного поля, який напрямлений так само, як і сила, що діє на позитивний заряд, розміщений у цьому полі, напрямок вектора індукції магнітного поля не збігається з напрямком вектора сили, що діє на елемент струму в магнітному полі. Для визначення напрямку вектора \vec{B} існують певні правила (сформулюйте їх, розглядаючи малюнок 62). Залежно від форми провідників, індукція створюваних ними магнітних полів визначається за такими формулами:

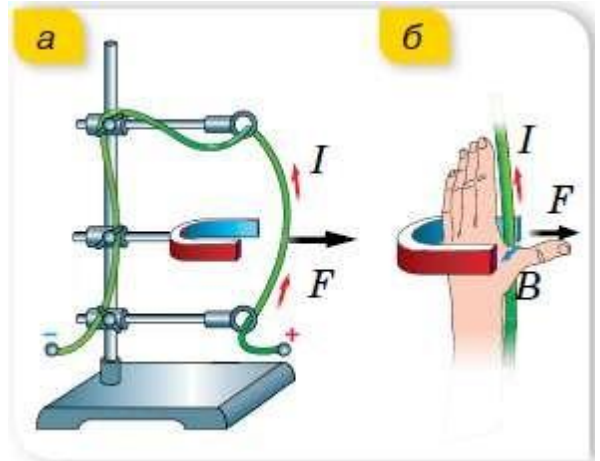
Індукція прямолінійного провідника зі струмом: $B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}$	Індукція в центрі колового витка радіусом r , по якому тече струм I , $B = \mu\mu_0 \frac{I}{2r}$	Індукція всередині катушки: $B = \mu\mu_0 \frac{IN}{l}$, тут N — кількість витків, а l — її довжина
---	--	---

Для складного магнітного поля, як і для електростатичного, виконується **принцип суперпозиції**:

індукція магнітного поля, створеного кількома струмами, дорівнює векторній сумі індукцій магнітних полів, створених кожним із цих струмів окремо, $\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$.

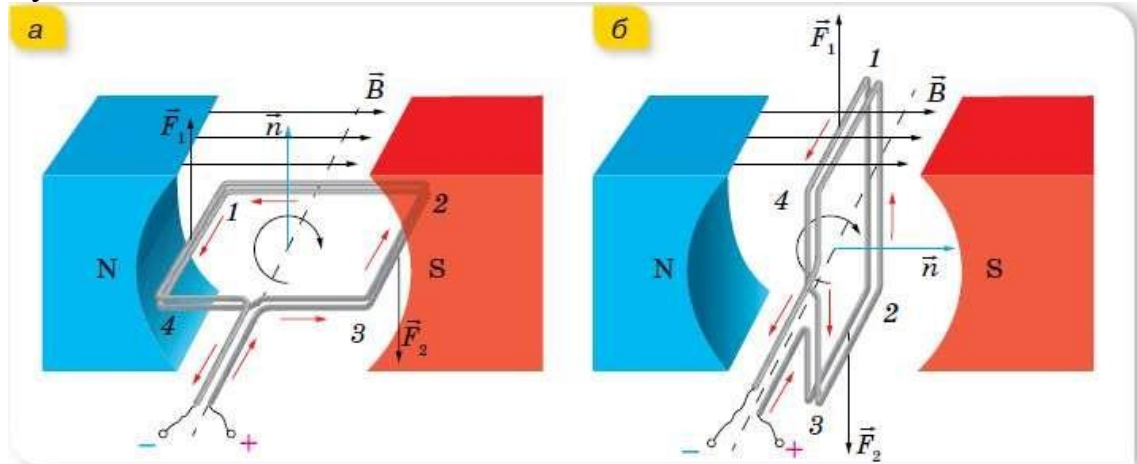
2. Сила Ампера.

Якщо прямий провідник розмістити між полюсами постійного магніту та пропустити по провіднику струм, то він почне відхилятися від початкового положення (мал. а). Рух провідника пояснюється взаємодією двох полів: магнітного поля, що створюється струмом, і поля постійного магніту. У 9 класі ми вже дослідили, від чого залежить сила, яка діє на провідник зі струмом, що міститься в однорідному магнітному полі (її називають силою Ампера). Пригадаймо. **Сила Ампера**, що діє на провідник у магнітному полі, тим більша, що більший струм проходить провідником і що сильнішим є магнітне поле, в якому він розміщений. Також сила Ампера залежить від довжини провідника зі струмом і його розташування в магнітному полі. До речі, пригадаймо, що ділянку магнітного поля між полюсами магніту можна вважати однорідним магнітним полем, силові лінії якого паралельні. У випадку однорідного магнітного поля сила Ампера визначається за формулою $F_A = BIl \sin \alpha$, тут α — кут між напрямком струму I в провіднику та індукцією магнітного поля. Максимальне значення сила Ампера має, коли провідник розташований перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля, $F_{\max} = BIl$. Напрямок сили Ампера визначають за правилом **лівої руки** (мал. б): якщо розмістити ліву руку вздовж провідника так, щоб чотири пальці вказували напрямок струму в ньому, а лінії магнітної індукції входили в долоню, то відігнутий великий палець покаже напрямок сили, яка діє на провідник зі струмом.



3Обертання прямокутної рамки зі струмом у магнітному полі. Розглянемо прямокутний контур (рамку), що може обертатися навколо горизонтальної осі (мал. 65, а). У початковий момент площина рамки паралельна лініям індукції однорідного магнітного поля постійного магніту. У більшості випадків розглядають орієнтацію рамки, вказуючи, як розташована нормаль n до рамки щодо ліній індукції магнітного поля. Пропустимо електричний струм рамкою (напрямок струму вказано червоними стрілочками). Цей струм створює магнітне поле, вектор індукції якого можна визначити за правилом свердлика. Оскільки цей напрямок збігається з вектором нормалі до площини рамки, то на малюнку показано тільки його позначення. У провідниках 1–4 і 2–3 магнітні сили F_1 і F_2 утворюють пару сил, які обертають рамку. У нашому випадку — за годинниковою стрілкою. У положенні б ці сили вже не обертають рамку, а

деформують її.



Обертання рамки зі струмом у магнітному полі використовують в електричних двигунах.

Рух зарядженої частинки в однорідному магнітному полі.
Голландський учений Гендрік Лоренц пояснив існування сили Ампера тим, що магнітне поле діє на рухомі заряди в провіднику зі струмом. Оскільки ці заряди вирватися з провідника не можуть, загальна сила, яка діє на них, прикладена до всього провідника. Таким чином, сила Ампера є сумою сил, які діють на вільні заряди в провіднику зі струмом. Це припущення дає змогу визначити силу, що діє на один рухомий заряд у магнітному полі. Цю силу називають *силою Лоренца*.

Сила Лоренца F_L — сила, що діє з боку магнітного поля на рухома заряджену частинку.

Одержимо вираз для визначення сили Лоренца з виразу для сили Ампера, підрахувавши кількість рухомих заряджених частинок у провіднику.

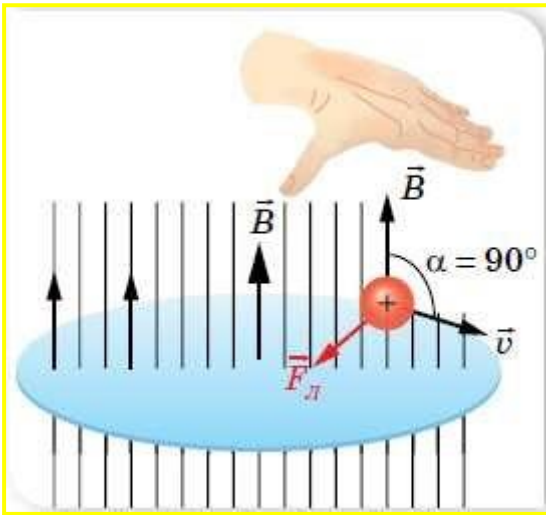
Нехай N — загальна кількість вільних зарядів у провіднику зі струмом. У металі такими зарядами є електрони і, як відомо, $I = vneS$, де e — заряд електрона, v — модуль швидкості його руху, S — площа поперечного перерізу провідника, n — концентрація вільних електронів.

Тоді

$$F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{BIl}{N} \sin \alpha = \frac{BvneSl}{N} \sin \alpha = \frac{BvneV}{N} \sin \alpha$$

Ураховуючи, що $nV = N$, отримуємо вираз для обчислення сили Лоренца $F_L = eBv \sin \alpha$, тут α — кут між векторами швидкості v та індукції B . У загальному випадку (для довільних заряджених частинок) вираз для обчислення сили Лоренца має вигляд $F_L = qBv \sin \alpha$, де q — електричний заряд частинки.

Напрямок сили Лоренца визначають за правилом *лівої руки* (мал.).

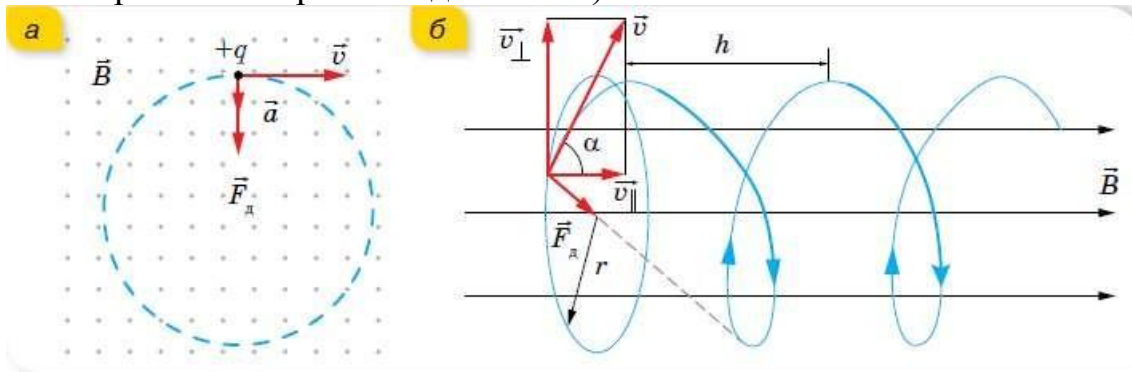


Застосовуючи його, слід пам'ятати, що коли в магнітному полі рухається *позитивно заряджена частинка*, то чотири пальці треба спрямувати в бік її руху, якщо ж рухається негативно заряджена частинка, то витягнуті чотири пальці треба спрямувати проти вектора швидкості.

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна векторам \vec{v} та \vec{B} , а отже, напрямку переміщення частинки, вона не виконує роботи й не може змінювати кінетичну енергію частинки.

Сила Лоренца лише викривляє траєкторію руху частинки, тобто є доцентровою силою.

Припустимо, що заряджена частинка, заряд якої q і маса m , влітає зі швидкістю v в однорідне магнітне поле індукцією \vec{B} ($\vec{v} \perp \vec{B}$) (мал. а). (Крапки на малюнку вказують на те, що лінії магнітної індукції перпендикулярні до площини сторінки й напрямлені до читача.)



Тоді $qBv = \frac{mv^2}{r}$. У цьому разі заряд

рухатиметься по колу радіусом $r = \frac{m}{qB} v$.

Якщо швидкість частинки напрямлена під кутом α до ліній індукції, то заряд рухатиметься по гвинтовій траєкторії навколо ліній індукції поля (мал. б). Дійсно, вектор v можна розкласти на складові v_{\parallel} (уздовж ліній індукції) та v_{\perp} (перпендикулярно до ліній індукції). v_{\perp} визначає радіус витка r , а v_{\parallel} з часом не змінюється (у цьому напрямку не діє сила).

Якщо заряджена частинка зробить один виток протягом часу T , то вздовж ліній індукції за цей час вона зміститься на відстань $h = v_{\parallel} T$ ($v_{\parallel} = v \cos \alpha$, $v_{\perp} = v \sin \alpha$, а h є кроком гвинтової лінії).

4 Магнітне поле в речовині

Експериментальні дослідження показали, що всі речовини в більшій чи меншій мірі мають магнітні властивості. Якщо два витки із струмами помістити в яку-небудь середовище, то сила магнітної взаємодії між струмами змінюється. Цей досвід показує, що індукція магнітного поля, що створюється електричними струмами в речовині, відрізняється від індукції магнітного поля, що створюється тими ж струмами у вакуумі. Фізична величина, що показує, в скільки разів індукція магнітного поля у однорідному середовищі *відрізняється* по модулю від індукції магнітного поля у вакуумі, називається магнітною проникністю:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

Магнітні властивості речовин визначаються магнітними властивостями атомів або елементарних часток (електронів, протонів і нейтронів), що входять до складу атомів. В даний час встановлено, що магнітні властивості протонів і нейтронів майже в 1000 разів слабші за магнітні властивості електронів. Тому магнітні властивості речовин в основному визначаються електронами, що входять до складу атомів.

Однією з найважливіших властивостей електрона є наявність у нього не лише електричного, але і власного магнітного поля. Власне магнітне поле електрона називають **спіном** (*spin – обертання*). Електрон створює магнітне поле також і за рахунок орбітального руху навколо ядра, яке можна уподібнити круговому мікроструму. Поля спинів електронів і магнітні поля, обумовлені їх орбітальними рухами, і визначають широкий спектр магнітних властивостей речовин.

Речовини вкрай різноманітні по своїх магнітних властивостях. У більшості речовин ці властивості виражені слабо. **Слабо-магнітні речовини** діляться на дві великі групи – **парамагнетики** і **діамагнетіки**. Вони відрізняються тим, що при внесенні до зовнішнього магнітного поля парамагнітні зразки намагнічуються так, що їх власне магнітне поле виявляється направленим по зовнішньому полю, а діамагнітні зразки намагнічуються проти зовнішнього поля. Тому у парамагнетиків $\mu > 1$, а у діамагнетиків $\mu < 1$.

Відмінність μ у пара- і діамагнетиків від одиниці надзвичайно мала. Наприклад, у алюмінію, який відноситься до парамагнетиків $\mu - 1 \approx 2,1 \cdot 10^{-5}$, у хлористого заліза (FeCl_3) $\mu - 1 \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$. До парамагнетиків відносяться також **платина, повітря** і багато інших речовин. До діамагнетиків відносяться мідь ($\mu - 1 \approx -3 \cdot 10^{-6}$), вода ($\mu - 1 \approx -9 \cdot 10^{-6}$), вісмут ($\mu - 1 \approx -1,7 \cdot 10^{-3}$) і інші речовини. Зразки з пара- і діамагнетіка, поміщені в неоднорідне магнітне поле між полюсами електромагніту, поведуться по-різному – парамагнетики втягуються в область сильного поля, діамагнетіки – виштовхуються.

Пара- і діамагнетизм пояснюється поведінкою електронних орбіт в зовнішньому магнітному полі.

У атомів діамагнітних речовин у відсутність зовнішнього поля власні магнітні поля електронів і поля, що створюються їх орбітальним рухом, повністю

компенсуються. Виникнення діамagnetизму пов'язане з дією сили Лоренца на електронні орбіти. Під дією цієї сили змінюється характер орбітального руху електронів і порушується компенсація магнітних полів. Власне магнітне поле атома, що виникає при цьому, виявляється направленим **проти** індукції зовнішнього поля.

У атомах парамагнітних речовин магнітні поля електронів компенсуються не повністю, і атом виявляється подібним до маленького кругового струму. У відсутність зовнішнього поля ці кругові мікроструми орієнтовані довільно, так що сумарна магнітна індукція дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле надає орієнтуюча дія – мікроструми прагнуть зорієнтуватися так, щоб їх власні магнітні поля виявилися направленими по індукції зовнішнього поля. Із-за теплового руху атомів орієнтація мікрострумів ніколи не буває повною. При посиленні зовнішнього поля орієнтаційний ефект зростає, так що індукція власного магнітного поля парамагнітного зразка росте прямо пропорційно індукції зовнішнього магнітного поля. Повна індукція магнітного поля в зразку складається з індукції зовнішнього магнітного поля і індукції власного магнітного поля, що виникло в процесі намагнічення. Механізм намагнічення парамагнетиків дуже схожий на механізм **поляризації полярних діелектриків**. Діамagnetизм не має аналога серед електричних властивостей речовини.

Речовини, здатні сильно намагнічуватися в магнітному полі, називаються **феромагнетиками**. Магнітна проникність феромагнетиків по порядку величини лежить в межах 10^2 – 10^5 . Наприклад, у сталі $\mu \approx 8000$ у сплаву заліза з нікелем магнітна проникність досягає значень 250000.

До групи феромагнетиків відносяться чотири хімічні елементи: залізо, нікель, кобальт, Гадоліній. З них найбільшою магнітною проникністю володіє залізо. Тому вся ця група отримала назву феромагнетиків.

Феромагнетиками можуть бути різні сплави, що містять феромагнітні елементи. Широке застосування в техніці отримали керамічні феромагнітні матеріали – ферити.

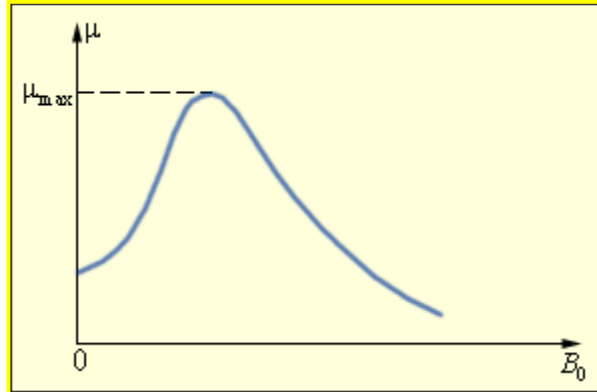
Для кожного феромагнетика існує певна температура (так звана **температура або точка Кюрі**), вище за яку феромагнітні властивості зникають, і речовина стає парамагнетиком. У заліза, наприклад, температура Кюрі дорівнює $770\text{ }^{\circ}\text{C}$, у кобальту $1130\text{ }^{\circ}\text{C}$, у нікелю $360\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Феромагнітні матеріали діляться на дві великі групи – на магніто-м'які і магніто-жорсткі матеріали. Магніто-м'які феромагнітні матеріали майже повністю розмагнічуються, коли зовнішнє магнітне поле стає рівним нулю. До магніто-м'яких матеріалів відноситься, наприклад, чисте залізо, електротехнічна сталь і деякі сплави. Ці матеріали застосовуються в приладах змінного струму, в яких відбувається безперервне перемагнічування, тобто зміна напрямку магнітного поля (трансформатори, електродвигуни і т. п.).

Магніто-жорсткі матеріали зберігають значною мірою свою намагніченість і після видалення їх з магнітного поля. Прикладами магніто-жорстких матеріалів можуть бути вуглецева сталь і ряд спеціальних сплавів. Магніто-жорсткі метериали використовуються в основному для виготовлення

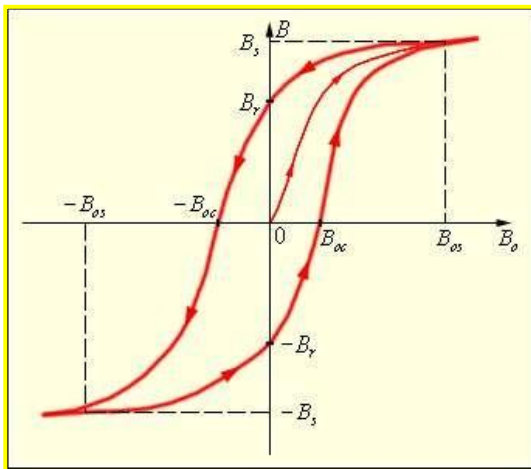
постійних магнітів.

Магнітна проникність μ феромагнетиків **не є постійною величиною**; вона сильно залежить від індукції B_0 зовнішнього поля. Типова залежність $\mu(B_0)$ приведена на мал. 2. У таблицях зазвичай приводяться значення максимальної магнітної проникності.



Типова залежність магнітної проникності феромагнетика від індукції зовнішнього магнітного поля.

Непостійність магнітної проникності приводить до складної нелінійної залежності індукції B магнітного поля у феромагнетик у від індукції B_0 зовнішнього магнітного поля. Характерною особливістю процесу намагнічення феромагнетиків є так званий



гістерезис тобто залежність намагнічення від "передісторії" зразка. Крива намагнічення $B(B_0)$ феромагнітного зразка є петлею складної форми, яка називається **петлею гістерезису**

З мал. видно, що настає магнітне насичення – намагніченість зразка досягає максимального значення.

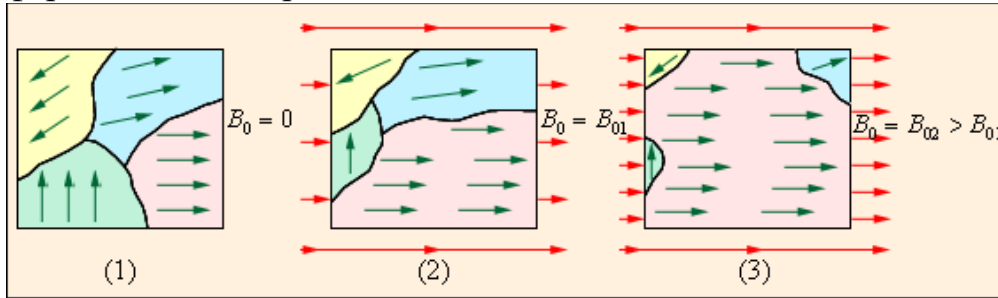
Якщо тепер зменшувати магнітну індукцію B_0 зовнішнього поля і довести її знов до нульового значення, то феромагнетик збереже **залишкову намагніченість** – поле усередині зразка буде рівне B_r . Залишкова намагніченість зразків дозволяє створювати постійні магніти. Для того, щоб повністю розмагнітити зразок, необхідно, змінивши знак зовнішнього поля, довести магнітну індукцію B_0 до значення $-B_{0c}$. Далі процес перемагнічування може бути продовжений, як це вказано стрілками на мал.

У магніто-м'яких матеріалів значення B_{0c} невелике – петля гістерезису таких матеріалів достатньо «вузька». Матеріали, що мають «широку» петлю гістерезису, відносяться до магніто-жорстких.

При відсутності зовнішнього магнітного поля вектори індукції магнітних

полів в різних доменах орієнтовані у великому кристалі хаотично. Такий кристал в середньому виявиться ненамагніченим. При накладенні зовнішнього

магнітного поля відбувається зсув меж доменів так, що об'єм доменів, орієнтованих по зовнішньому полю, збільшується. Із збільшенням індукції зовнішнього поля зростає магнітна індукція намагніченої речовини. У дуже сильному зовнішньому полі домени, в яких власне магнітне поле збігається по напрямку із зовнішнім полем, поглинають решту всіх доменів, і настає магнітне насичення. Мал. може служити якісною ілюстрацією процесу намагнічення феромагнітного зразка.



**Намагнічення
феромагнітного
зразка:**

- (1) $B_0 = 0$;**
- (2) $B_0 = B_{01}$;**
- (3) $B_0 = B_{02} > B_{01}$.**