Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Лекції

МАГНЕТИЗМ

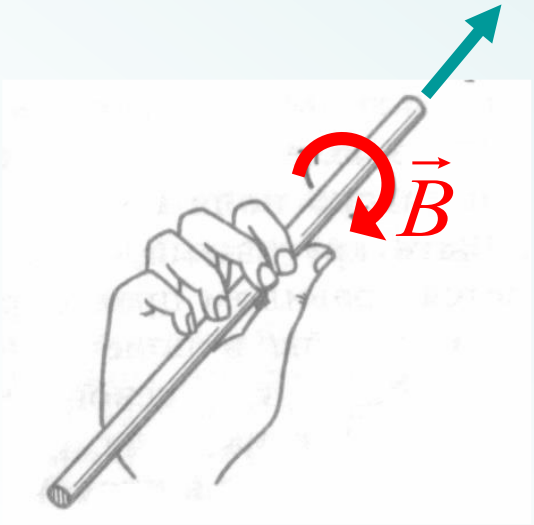
Викладач – проф. Шкурдода Ю.О.

Суми 2022

Магнітне поле у вакуумі та речовині

Вектор магнітної індукції – це векторна величина, що показує, яка максимальна сила діє з боку магнітного поля на елемент провідника зі струмом, що дорівнює одиниці

$$B = \frac{F_{max}}{I\Delta l} \qquad [B] = \frac{1H}{1A \cdot 1м} = 1Тл$$



Напрямок вектора магнітної індукції визначається за правилом правого гвинта: напрямок вектора $\vec{B}$ збігається з напрямком, у якому буде переміщуватися рукоятка гвинта із правою нарізкою, якщо він буде при цьому рухатися по напрямку струму в провіднику.

Магнітне поле називається **однорідним,** якщо $\vec{B} = const$

Напруженість магнітного поля характеризує магнітне поле у вакуумі і пов'язана з вектором магнітної індукції співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \qquad [H] = \frac{А}{м}$$

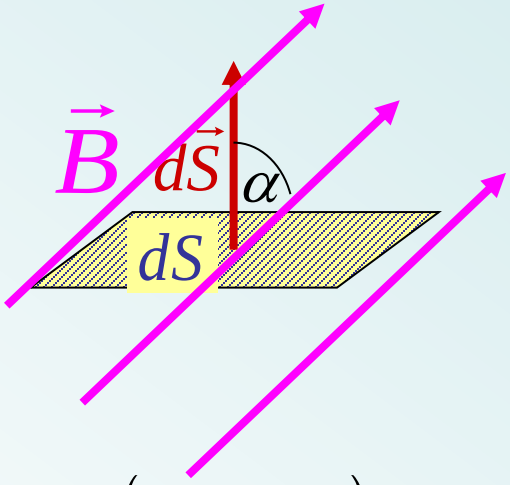
ТЕОРЕМА ГАУСА ДЛЯ ПОТОКУ ВЕКТОРА ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У ВАКУУМІ

Для графічного зображення напрямку вектора індукції магнітного поля у різних точках простору використовують силові лінії індукції магнітного поля.

Силова лінія вектора індукції магнітного поля – це лінія, дотична до якої в кожній точці співпадає з напрямком вектора магнітної індукції.

Потік вектора індукції магнітного поля

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B dS \cos\alpha$$



$\left(d\vec{S} = dS\vec{n}\right)$

де α кут між векторами $\vec{B}$ і $d\vec{S}$

$$\left[\Phi_B\right] = 1Тл \cdot м^2 = 1Вб$$

Теорема Гауса для потоку вектора магнітної індукції у вакуумі в інтегральній формі: потік вектора магнітної індукції через будь-яку замкнуту поверхню дорівнює нулю

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Зробимо заміну відповідно до теореми Остроградського - Гауса

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = \int_V \mathrm{div}\vec{B} dV = 0$$

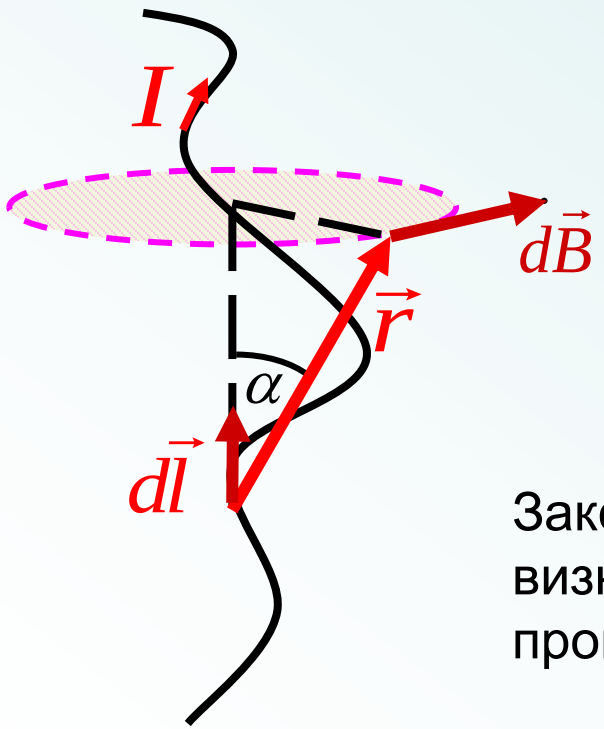
Теорема Гауса в диференціальній формі

$$\mathrm{div}\vec{B} = 0$$

Фізичний зміст наведеної теореми полягає у твердженні про відсутність „магнітних” зарядів у природі. Лінії індукції магнітного поля – замкнуті. Це означає, що магнітне поле є **вихровим.**

ЗАКОН БІО –САВАРА –ЛАПЛАСА

дозволяє визначити магнітне поле $d\vec{B}$, створюване елементом провідника dl із струмом I в точці О на відстані r від елемента струму dl



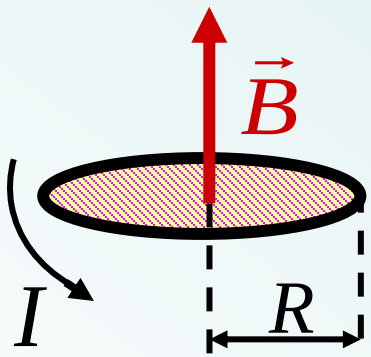
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\left[d\vec{l}, \vec{r}\right]}{r^3}$$

У скалярній формі закон Біо-Савара-Лапласа має вигляд:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\alpha}{r^2}$$

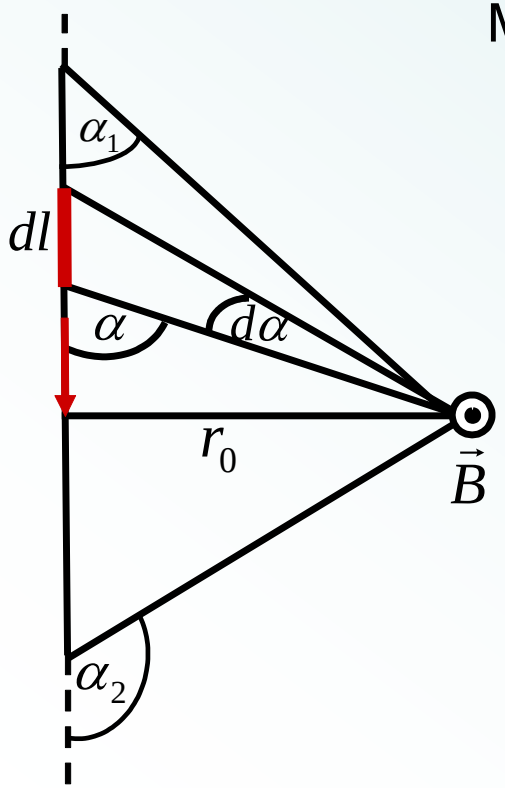
Закон Біо-Савара-Лапласа дозволяє легко визначити поле струму геометрично простих провідників.

Магнітне поле колового струму



$$B = \frac{\mu_0}{2}\frac{I}{R}$$

Магнітне поле прямого струму



$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{r_0}\left(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\right)$$

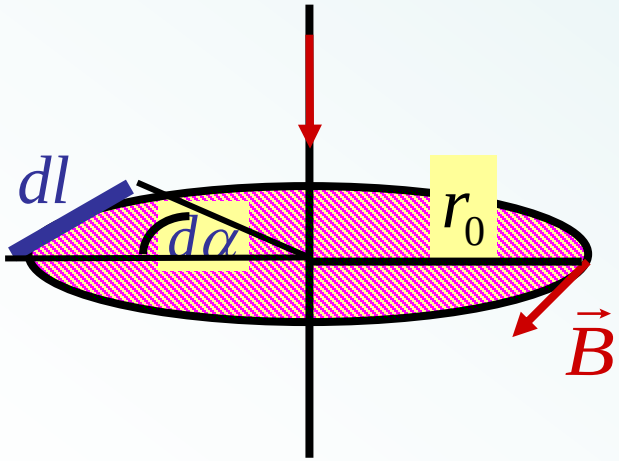
Коли **провідник нескінченний**, $\alpha_1 = 0,\ \alpha_2 = \pi$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I}{r_0} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r_0}$$

Закон повного струму.
Циркуляція і ротор магнітного поля

Знайдемо циркуляцію вектора $\vec{B}$: $\oint\limits_L \vec{B}d\vec{l}$

Найпростіше визначити цей інтеграл у випадку поля прямого струму.
У цьому випадку $dl = r_0 d\alpha$



Індукція магнітного поля прямого струму

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I}{r_0} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r_0}$$

$$Bdl = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I}{r_0} r_0 d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi} d\alpha$$

$$\oint d\alpha = 2\pi$$

$$\oint\limits_L \vec{B}d\vec{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\oint d\alpha = \mu_0 I$$

Закон повного струму в інтегральній формі

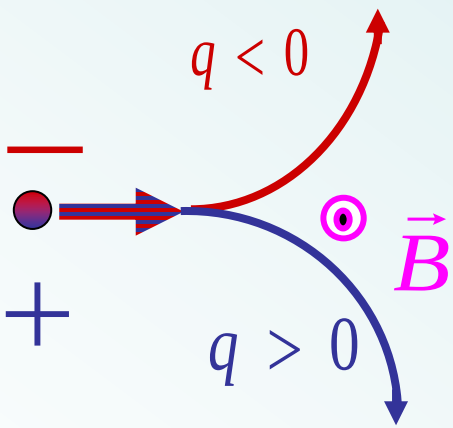
$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 I \qquad \text{або} \qquad \oint_L \vec{H}d\vec{l} = I \qquad \left(I = \int jdS\right)$$

Закон **повного струму в диференціальній формі**

$$\mathrm{rot}\vec{B} = \mu_0 \vec{j} \qquad \mathrm{rot}\vec{H} = \vec{j}$$

Поле, в якому ротор відмінний від нуля, є вихровим і соленоїдальним.

СИЛА ЛОРЕНЦА



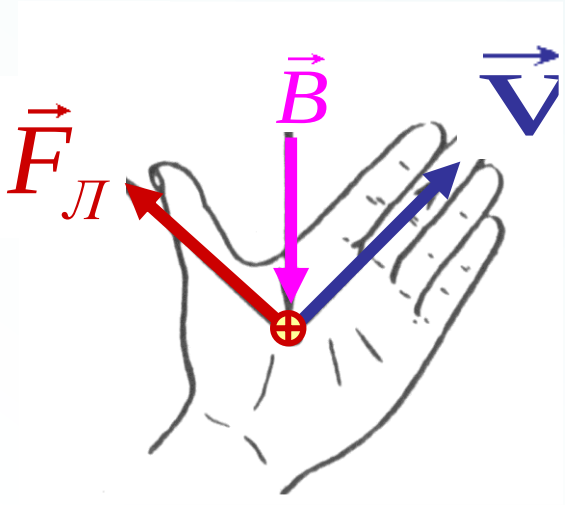
На заряд, що рухається, у магнітному полі діє **сила Лоренца**

$$\vec{F}_л = q\left[\vec{v}\vec{B}\right]$$

Модуль сили Лоренца

$$F_л = qvB\sin\alpha$$

Напрямок сили Лоренца визначається **правилом лівої руки** для позитивних зарядів.



<u>Сила Лоренца:</u>

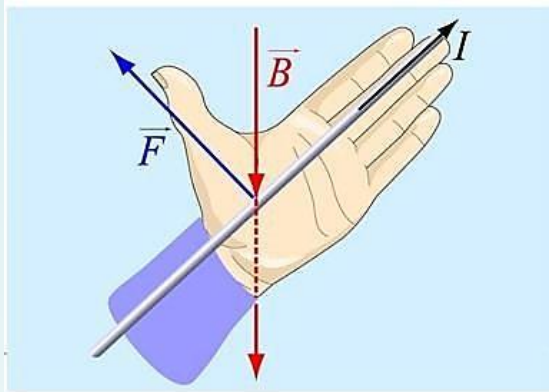
- направлена перпендикулярно швидкості частинки (не виконує роботи), а викликає лише скривлення траєкторії частинки.

Заряджена частинка, що влетіла в магнітне поле перпендикулярно вектору, рухається по колу. Якщо вона влітає в магнітне поле під кутом, то її рух буде відбуватися по гвинтовій лінії.

СИЛА АМПЕРА

На провідник із струмом, вміщеним в однорідне магнітне поле, діє **сила Ампера**, пропорційна довжині відрізка провідника, силі струму , який проходить по провіднику, та індукції магнітного поля

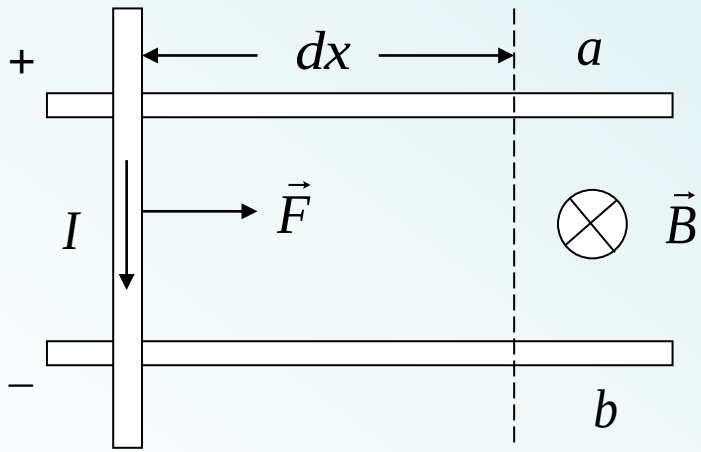
$$d\vec{F}_A = I\left[d\vec{\ell}\vec{B}\right]$$



Модуль сили Ампера $dF_A = IBd\ell\sin\alpha$

Напрямок сили Ампера визначається **правилом лівої руки**. Якщо розташувати долоню лівої руки так, щоб вектор $\vec{B}$ входив у долоню, а чотири витягнутих пальці збігалися з напрямком електричного струму в провіднику, то відставлений великий палець вкаже напрямок сили Ампера, що діє на провідник у магнітному полі.

Робота струму при зміні магнітного потоку, зчепленого з контуром



З $\delta A = Fdx$ і $F = IlB$ можна одержати:

$$\delta A = IlBdx = IBdS = Id\Phi$$

$$A = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} Id\Phi = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I\Delta\Phi$$

Отриману формулу можна поширити на загальний випадок, коли провідник має довільну форму (аж до замкнутого контуру), як завгодно розташований стосовно силових ліній поля; а поле є неоднорідним.

ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

- **Потік вектора індукції магнітного поля (магнітний потік)**

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B dS \cos\alpha$$

- У випадку однорідного магнітного поля $\vec{B} = const$

$$\Phi_B = BS\cos\alpha$$

- **Закон електромагнітної індукції** Фарадея (1831):

  в будь-якому замкнутому контурі при зміні магнітного потоку через поверхню, обмежену цим контуром, виникає електрорушійна сила, величина якої пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:

$$\xi = -\frac{d\Phi}{dt}$$

У контурі з провідника існування ЕРС індукції приводить до появи індукційного струму.

Знак "мінус" у формулі відповідає **правилу Ленца: індукційний струм завжди напрямлений так, що його дія протилежна дії причини, яка викликає цей струм.**

Явище виникнення індукованого струму в колі, внаслідок зміни в ньому струму, називається **самоіндукцією.**

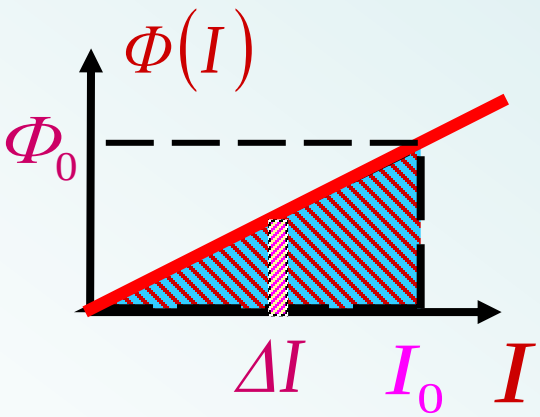
Розглянемо, від чого залежить ЕРС самоіндукції. Магнітне поле, створюване струмом у контурі (або котушці), у будь-якій точці пропорційне силі струму. Тому і **магнітний потік** , що пронизує цей контур, пропорційний струму: $\Phi = LI$

Коефіцієнт пропорційності L **називається індуктивністю контуру, або коефіцієнтом самоіндукції**. Індуктивність контуру залежить від його розмірів і форми, а також від магнітних властивостей середовища, у якому він знаходиться.

Використовуючи закон електромагнітної індукції, одержимо **закон електромагнітної індукції для самоіндукції**

$$\xi = -L\frac{dI}{dt}$$

ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ



Магнітне поле є носієм енергії.
Підрахуємо **енергію магнітного поля**, аналізуючи зменшення струму в котушці при розмиканні кола, зображеного на рисунку.

Із закону збереження енергії очевидно, що в розглянутому нами досліді вся енергія магнітного поля зрештою виділиться у виді джоулева тепла на опорі *R:*

$$dQ = I^2 R dt$$

За законом Ома струм I дорівнює

$$I = \frac{\xi}{R} = -\frac{L}{R}\frac{dI}{dt}$$

тоді $$dQ = I\left(-\frac{L}{R}\frac{dI}{dt}\right)Rdt = -LIdI$$

$$\Delta Q = -\int_I^o LIdI = \frac{LI^2}{2}$$

Енергія магнітного поля, який створюється струмом у котушці з індуктивністю *L*:

$$W_M = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\Phi I = \frac{\Phi^2}{2L}$$

Розглянемо магнітне поле довгого соленоїда з неферомагнітним осереддям. Індуктивність такого соленоїда

$$L = \mu\mu_0 n^2 V$$

$$B = \mu\mu_0 nI \Rightarrow I = \frac{B}{\mu\mu_0 n}$$

$$W = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}V$$

Об'ємна густина енергії

$$w_M = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

У загальному випадку енергія магнітного поля

$$W = \int_V w_M dV = \int_V \frac{BH}{2} dV$$

Дякую за увагу!