МАГНІТНЕ ПОЛЕ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

ЛЕКЦІЯ 8

ПЛАН

1. Магнітне поле. Магнітна індукція та напруженість магнітного поля.
2. Закон Біо-Савара-Лапласа та його застосування (магнітне поле прямолінійного провідника зі струмом, колового струму, тощо).
3. Закон повного струму. Вихровий характер магнітного поля.
4. Магнітний потік. Теорема Гаусса для магнітного поля.

На самостійне опрацювання:

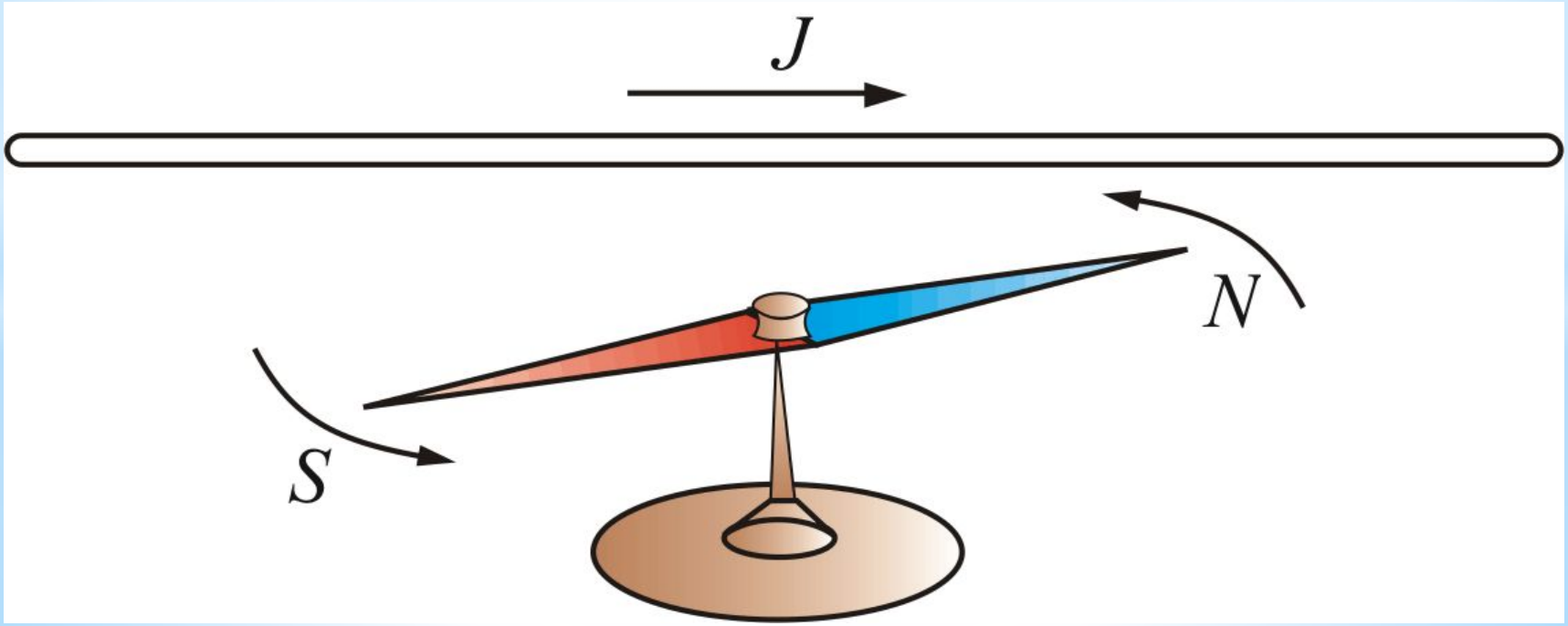
1. Опрацювати зміст лекції та відповідні розділи у підручниках.

2. Застосування закону Біо-Савара-Лапласа (Б-С-Л) для знаходження магнітної індукції у центрі та на осі витка зі струмом.

Магнітне поле

У просторі , шо оточує струми та постійні магніти, виникає силове поле, яке називається **магнітним.**

Назву “магнітне поле” пов’язують з орієнтацією магнітної стрілки під дією поля, створюваного струмом, яку вперше виявив дат.фіз. Х. Ерстед.



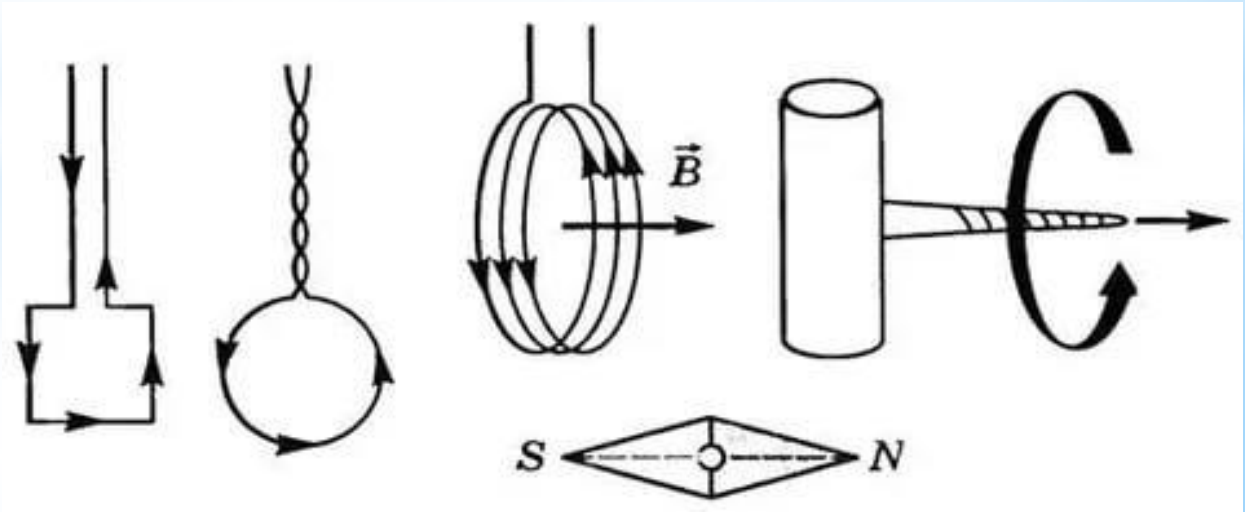
Магнітне поле

Магнітне поле – це силове поле в просторі, що оточує електричні струми і постійні магніти. Воно створюється лише рухомими зарядами і діє тільки на рухомі електричні заряди, що в ньому рухаються.

Вплив магнітного поля на струм різний – він залежить від форми провідника, по якому протікає струм, його розташування, напрямку струму.

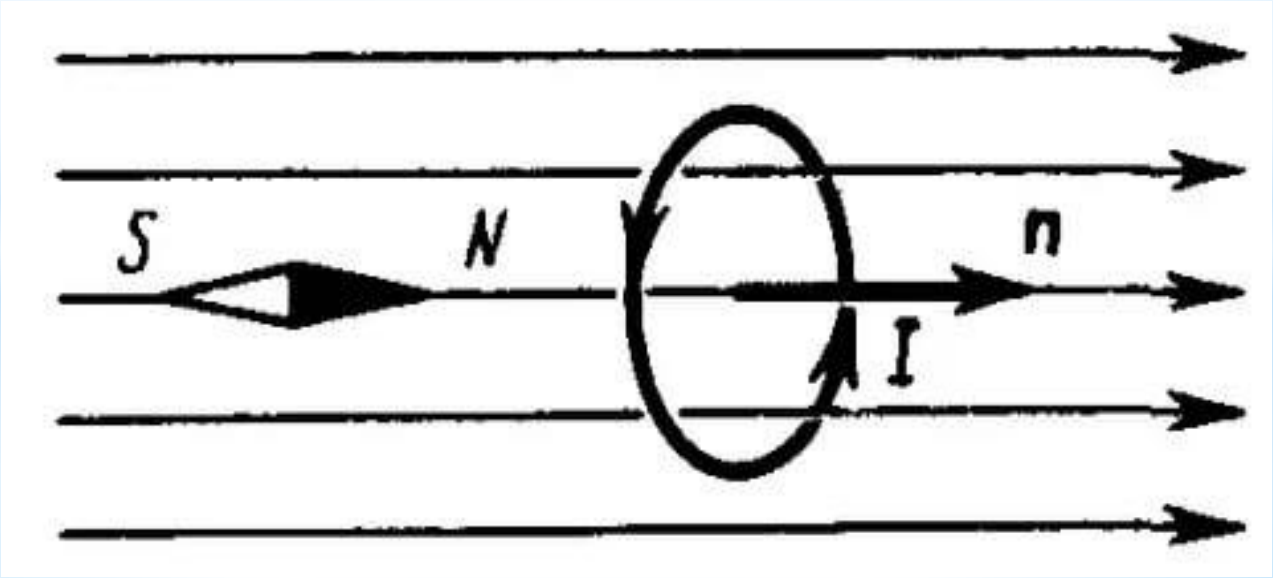
Замкнений плоский контур зі струмом

Для дослідження магнітного поля використовується замкнений плоский контур зі струмом (***рамка зі струмом***), розміри якого малі порівняно з відстанню до струмів, що утворять магнітне поле. Орієнтація контуру в просторі характеризується напрямком нормалі до нього, причому за додатний напрям нормалі приймається напрям, пов'язаний зі струмом правилом правого гвинта.

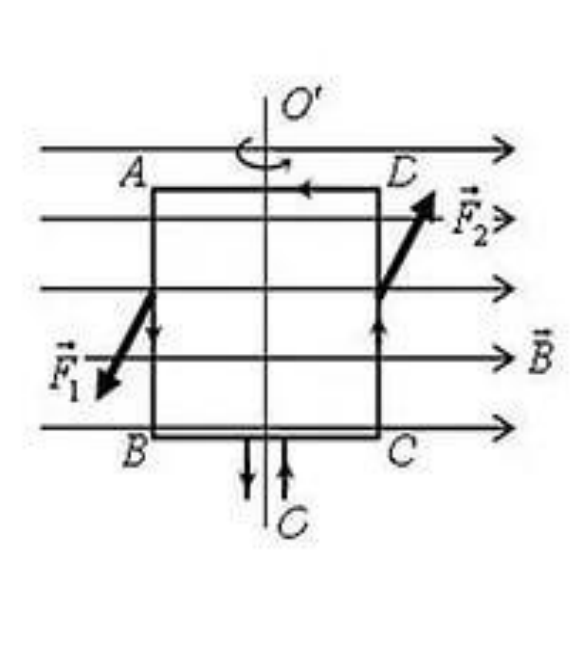


Вибір напрямку магнітного поля

За напрям магнітного поля в даній точці приймається напрям, вздовж якого розташовується додатна нормаль до вільно підвішеної рамки зі струмом або напрям, що співпадає з напрямом сили, яка діє на північний полюс магнітної стрілки, поміщеної в дану точку.



Кількісний опис магнітного поля



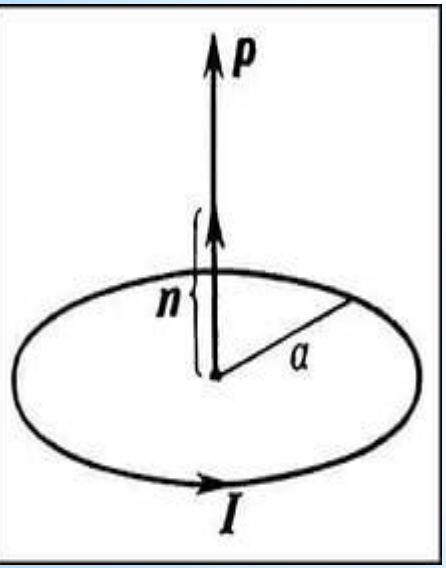
Сили магнітного поля орієнтують рамку з струмом, на неї діє пара сил і їх обертальний момент залежить від властивостей поля в даній точці та від властивостей такої рамки

$$\overrightarrow{\boldsymbol{M}} = \vec{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{m}} \times \overrightarrow{\boldsymbol{B}}$$

де $\overrightarrow{\boldsymbol{B}}$ - вектор магнітної індукції,

$\overrightarrow{\boldsymbol{M}}$ - вектор магнітного моменту рамки із струмом.

Магнітний момент рамки зі струмом



* Для плоского контуру з струмом магнітний момент – це векторна величина, яка дорівнює добутку сили струму , що протікає в контурі, на його площу та нормаль до контуру

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

де S - площа поверхні контуру (рамки), $\vec{n}$ - одиничний вектор нормалі до поверхні рамки(його напрям співпадає з напрямом додатньої нормалі).

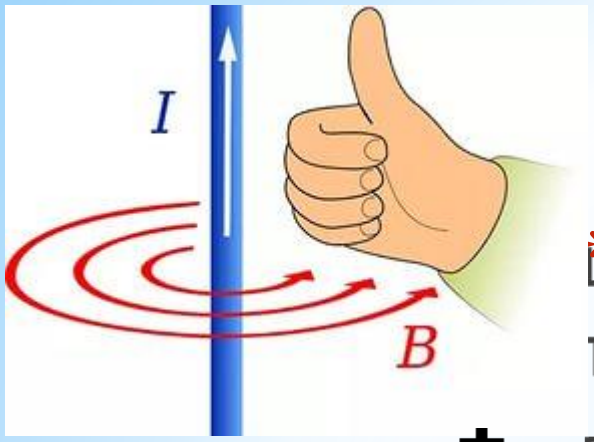
Вектор магнітної індукції

На рамки з різними магнітними моментами в даній точці магнітного поля діятимуть різні обертальні моменти, проте відношення максимального обертального моменту до магнітного моменту рамок виявляється сталим, тому саме його використовують для характеристики магнітного поля.

Магнітна індукція - це векторна величина, що дорівнює відношенню максимального обертального моменту, який діє на рамку із струмом в магнітному полі, до величини магнітного моменту рамки

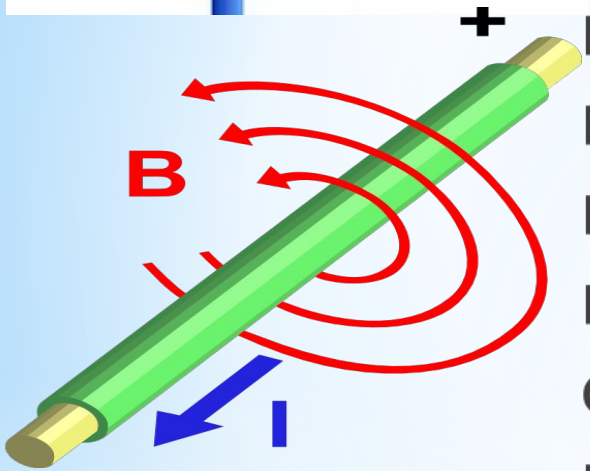
$$B = \frac{M_{max}}{p_m}$$

Одиниця виміру в системі в СІ $[\mathbf{B}] = \mathbf{1}\frac{\text{Н}}{\text{А·м}} = \mathbf{1}\text{Тл}.$

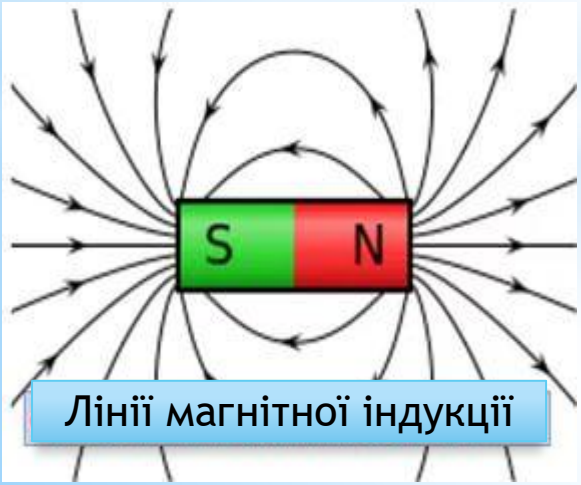


Лінії магнітної індукції -

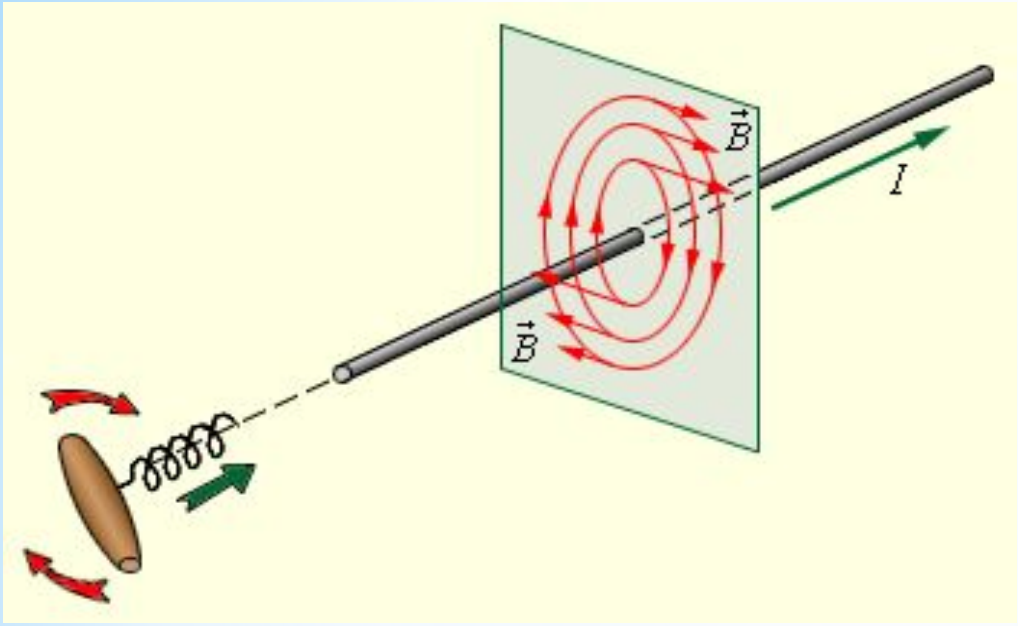
це лінії , дотичні до яких в кожній точці співпадають з напрямом вектора $\vec{B}$. Напрям ліній визначається за правилом правого гвинта : якщо поступальний рух вістря гвинта співпадає з напрямом струму, то напрям обертання ручки гвинта вказує напрям ліній магнітної індукції.



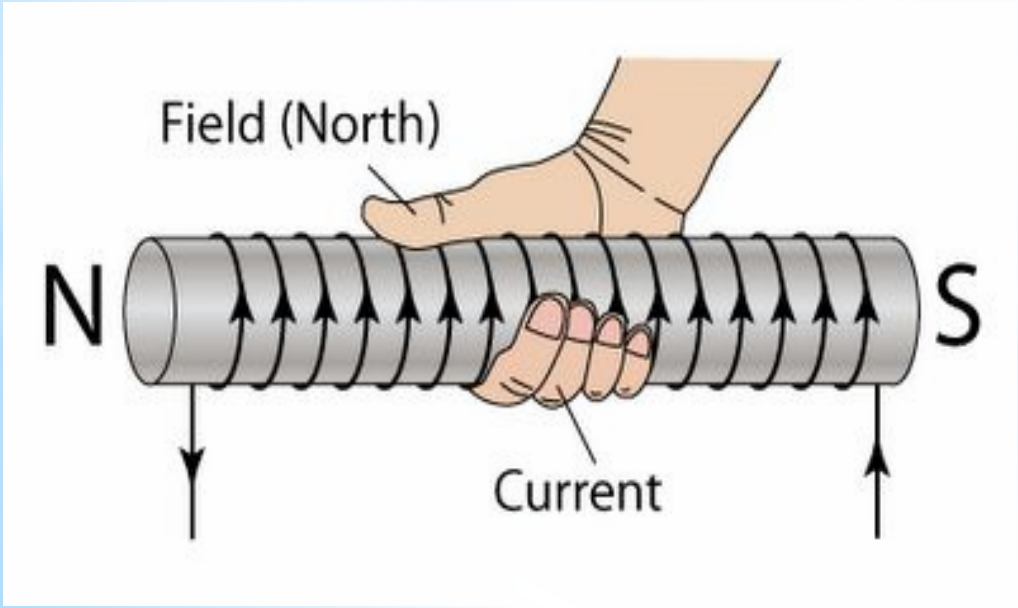
На відміну від ліній напруженості електростатичного поля, лінії магнітної індукції завжди замкнені і охоплюють провідники із струмом.



Лінії магнітної індукції


B
B
I

I
a


Field (North)
N
S
Current

Напруженість магнітного поля

Якщо поблизу будь-якого тіла розташувати провідник із струмом (макрострум), то під дією його магнітного поля мікроструми у всіх атомах певним чином орієнтуються, створюючи у тілі додаткове магнітне поле. Вектор $\vec{B}$ характеризує результуюче магнітне поле, створене всіма макро- і мікрострумами, тобто в різних середовищах матиме різне значення.

Магнітне поле макрострумів описується вектором напруженості $\vec{H}$. Для однорідного ізотропного середовища справедливе співвідношення:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \qquad (\text{для ЕСП } \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E})$$

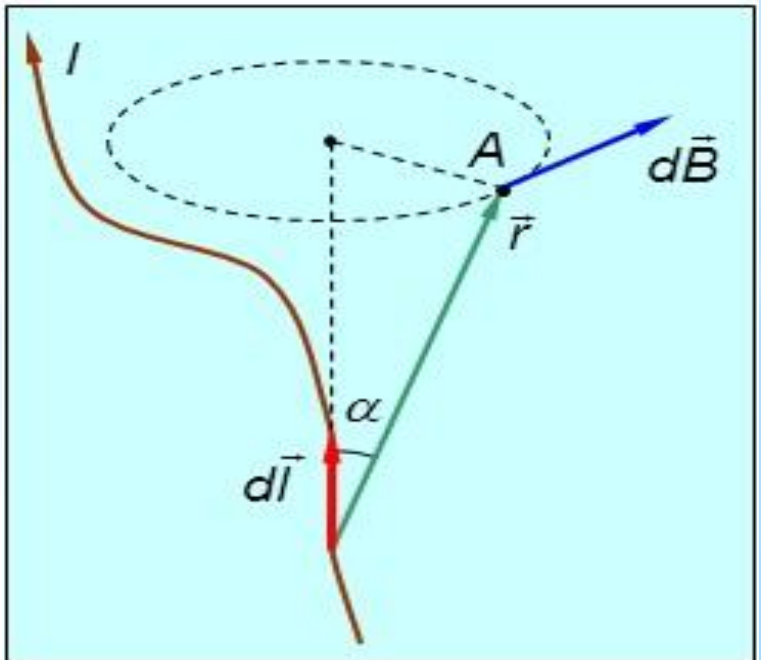
Закон Біо-Савара-Лапласа

*Магнітне поле постійних струмів вивчалось французькими вченими Ж.Біо і Ф.Саваром, а результати проведених дослідів були узагальнені П.Лапласом та сформульовані наступним чином:

елемент магнітної індукції $d\vec{B}$, яка створюється елементом провідника $d\vec{l}$ із струмом I в деякій точці, визначається

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I\,d\vec{l}\times\vec{r}}{r^3}$$

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



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

Закон Біо-Савара-Лапласа

μ – магнітна проникність середовища(показує у скільки разів магнітне поле макрострумів збільшується за рахунок поля мікрострумів середовища);

$\boldsymbol{\mu_0} = 4\pi \cdot 10^{-7}\ {}^{\text{Гн}}/_{\text{м}} = 1{,}26 \cdot 10^{-6}\ {}^{\text{Гн}}/_{\text{м}}$ - магнітна стала;

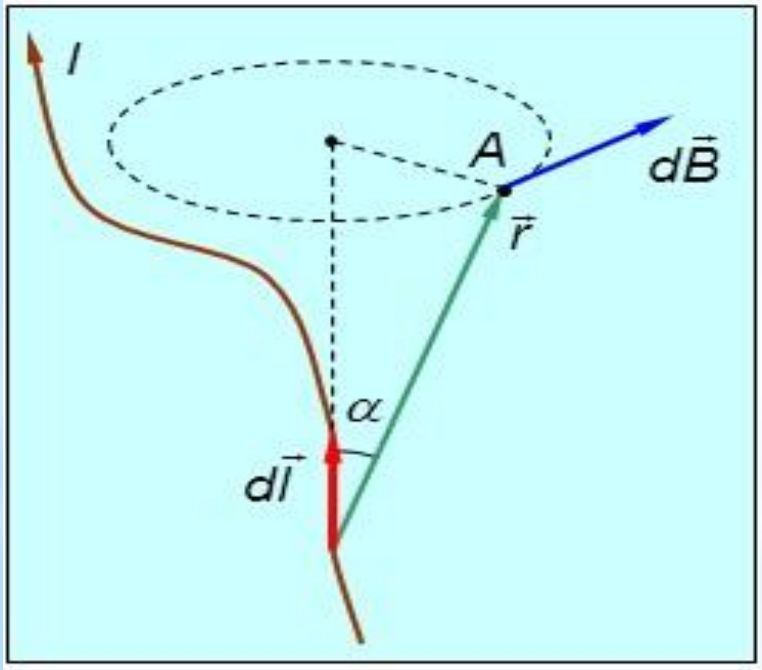
$\boldsymbol{I}$ – сила струму у провіднику;

$\boldsymbol{r}$ – відстань від елемента струму $\boldsymbol{dl}$ до точки, магнітну індукцію у якій визначаємо;

α - кут між векторами $\boldsymbol{d\vec{l}}$ і $\vec{\boldsymbol{r}}$.

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

Напрям вектора магнітної індукції

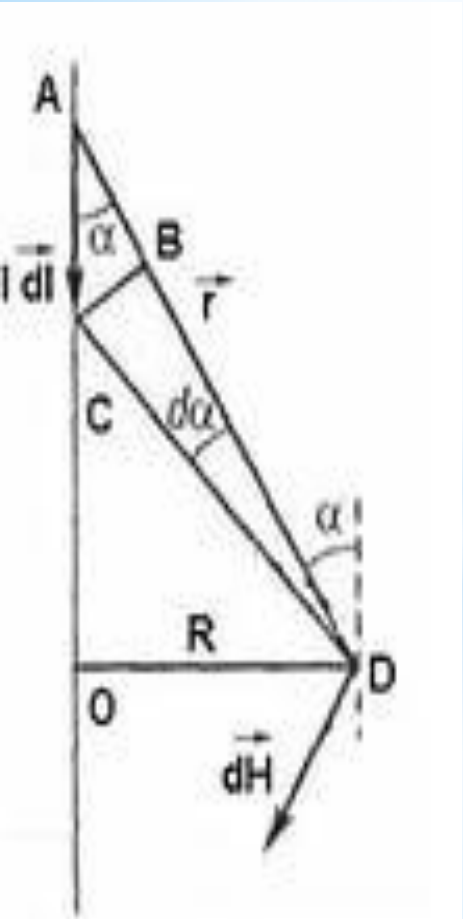


Вектор магнітної індукції $\vec{dB} \perp \vec{dl}$, $\vec{dB} \perp \vec{r}$ і напрямлений вздовж дотичної до лінії магнітної індукції. Напрям його визначають за ***правилом правого гвинта: напрям обертання головки гвинта задає напрям*** $\vec{dB}$, якщо поступальний рух гвинта відповідає напряму струму в елементі.

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

Магнітне поле прямолінійного провідника зі струмом

Такий струм створюється нескінченно довгим тонким провідником.



Оскільки для такого провідника

$$r = \frac{R}{\sin\alpha}\ ,dl = \frac{rd\alpha}{\sin\alpha}$$

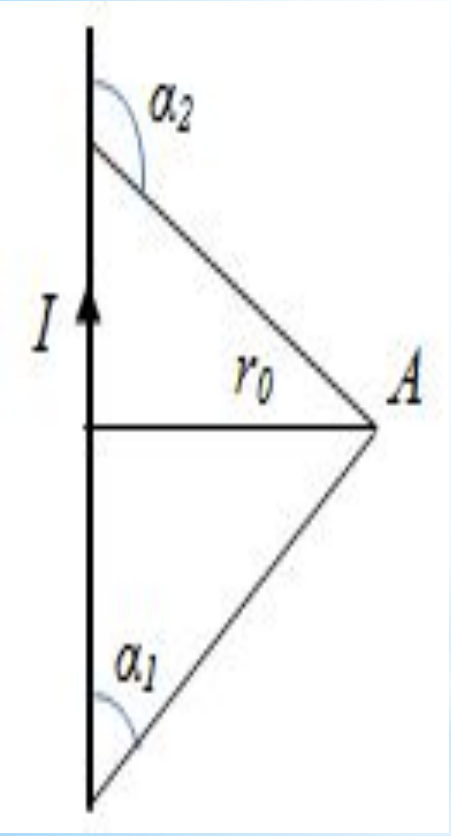
то підставивши ці залежності в закон Б-С-Л, отримаємо:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{R}\sin\alpha d\alpha$$

Врахувавши, що кут для всіх елементів прямого проводу змінюється від 0 до π, інтегруємо даний вираз

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{R}sin\alpha d\alpha$$

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{R}\int_0^{\pi} sin\alpha d\alpha = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{2I}{R}$$



Магнітне поле короткого провідника зі струмом

Якщо прямий провідник із струмом має скінченні розміри (короткий провідник), то потрібно ввести інші межі інтегрування - α_1 та α_2:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{R}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} sin\alpha d\alpha$$

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{R}(cos\alpha_1 - cos\alpha_2)$$

Циркуляція вектора магнітної індукції

*Циркуляцією вектора $\vec{B}$ по замкненому контуру називається інтеграл

$$\oint_L (\vec{B}, d\vec{l}) = \oint_L B_l dl$$

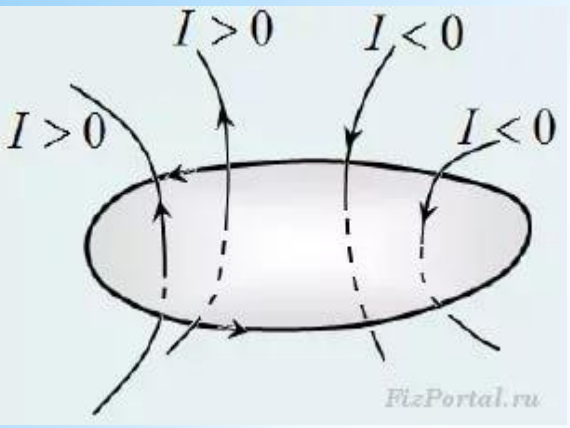
де $\vec{dl}$ - вектор елемента довжини контура, напрямлений вздовж обходу контура, $B_l = B\cos\alpha$ - проекція $\vec{B}$ на дотичну до контура, α - кут між $\vec{B}$ і $\vec{dl}$.

Закон повного струму (теорема про циркуляцію вектора магнітної індукції)

циркуляція вектора магнітної індукції по довільному замкненому контуру дорівнює добутку магнітної сталої на алгебраїчну суму струмів, які охоплюються цим контуром

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{\kappa=1}^{n} I_\kappa$$

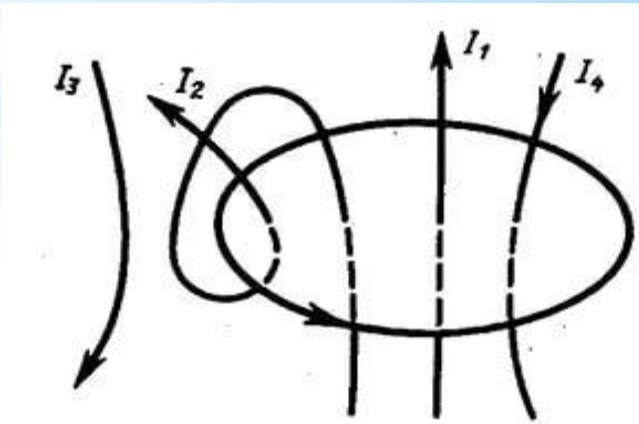
де *N* кількість провідників із струмами, які охоплює довільний замкнений контур .

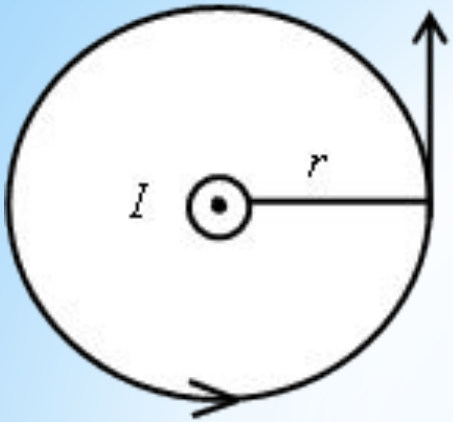


Закон повного струму (теорема про циркуляцію вектора магнітної індукції)

Кожен струм враховується стільки разів, скільки він охоплюється контуром. Додатним приймається струм, напрям якого зв’язаний з вибраним напрямом обходу контуру правилом правого гвинта, струм протилежного напряму - від’ємний. Наприклад, для малюнку у нижньому куті слайда, ця сума набуває вигляду:

$$\sum_{k=1}^{N} I_k = I_1 + 2I_2 - 0 \cdot I_3 - I_4$$





Магнітна індукція прямого струму на відстані *r* від провідника

Вибираємо контур у вигляді кола радіусом ***r*** . В кожній точці цього контуру вектор $\vec{B}$ однаковий за модулем і напрямлений по дотичній до кола . Тоді циркуляція вектору $\vec{B}$

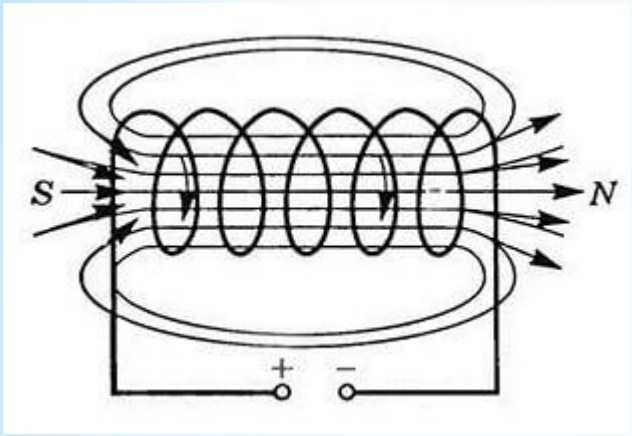
$$\oint_L (\vec{B}, d\vec{l}) = \oint_L B\, dl = B \oint_L dl = B \cdot 2\pi r$$

За законом повного струму $B \cdot 2\pi r = \mu_0 I$, тоді

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

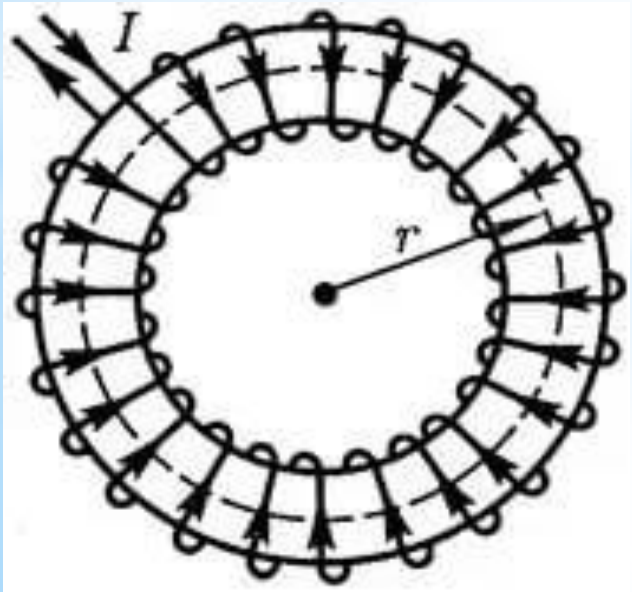
Такий самий вираз отримується і за законом Б-С-Л!

Магнітне поле нескінченно довгого соленоїда і тороїда



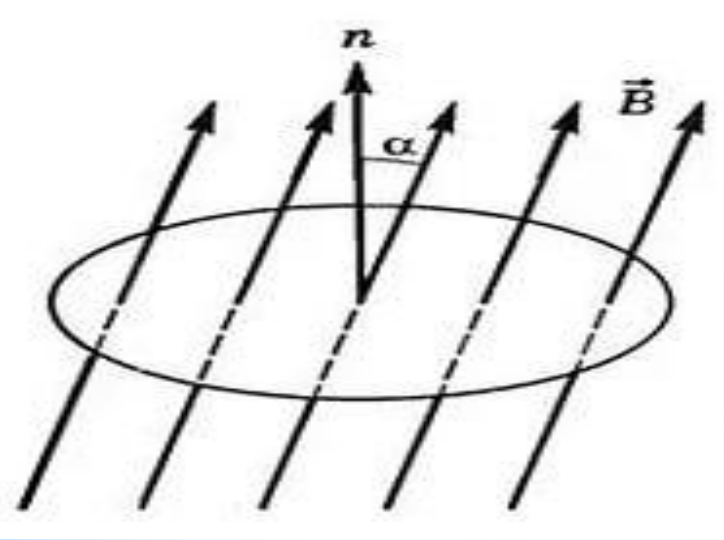
За допомогою закону повного струму також можна отримати формули для магнітного поля соленоїда:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l}$$



Та тороїда:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r}$$



Потік вектора магнітної індукції (магнітний потік)

Означеня потоку вектора магнітної індукції дається аналогічно до означення вектора напруженості магнітного поля:

Потік вектора магнітної індукції (магнітний потік) крізь площадку dS – це фізична величина, рівна скалярному добутку векторів магнітної індукції $\vec{B}$ та елементарної площадки $\boldsymbol{d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}}$

$$\boldsymbol{d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{S} = BdScos\alpha = B_n dS}$$

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{S} = BdS\cos\alpha$$

Магнітний потік

Знак потоку залежить від $\cos\alpha$. Потік вектора пов'язують з контуром, по якому протікає струм. Додатнийний напрям нормалі пов'язано зі струмом ***правилом правого гвинта***. Магнітний потік, створюваний контуром через поверхню, обмежену ним самим, ***завжди додатний***.

Магнітний потік через довільну поверхню визначається інтегралом

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S BdS\cos\alpha = \int B_n dS$$

А у випадку однорідного поля

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

Магнітний потік соленоїда

Всередині соленоїда магнітне поле однорідне, а магнітна індукція соленоїда

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l}$$

Магнітний потік через один виток соленоїда визначається формулою

$$\Phi_1 = BS = \mu_0 \frac{NI}{l} S$$

Магнітний потік, утворений усіма витками соленоїда називають **потокозчепленням** Ψ і знаходять:

$$\Psi = \Phi_1 \cdot N = NBS = \mu_0 \frac{N^2 I}{l} S$$

Теорема Гаусса для магнітного поля:

потік вектора магнітної індукції через будь-яку замкнену поверхню дорівнює нулю.

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = \oint_S B_n dS = 0 .$$

ця теорема відображає тои факт, що магнітних зарядів, подібних до електричних, не існує! Внаслідок цього лінії магнітної індукції не мають ні початку , ні кінця. Вони є замкненими, а МП – вихрове.

Характер електростатичного і магнітного полів – різний!

Вихровий характер магнітного поля

* Якщо порівняти вирази для циркуляції векторів $\vec{E}$ та $\vec{B}$, то видно, що між ними є принципова різниця. Циркуляція вектора $\vec{E}$ дорівнює нулю, а циркуляція вектора $\vec{B}$ відмінна від нуля. Рівність нулю циркуляції вектора $\vec{E}$ означає, що **електростатичне поле - потенціальне**, а **магнітне поле є вихровим.** Теорема про циркуляцію вектора $\vec{B}$ у вченні про магнітне поле має таке ж значення, як теорема Остроградського – Гаусса в електростатиці, оскільки дозволяє визначати магнітну індукцію без застосування закону Б-С-Л.