

Магнетизм

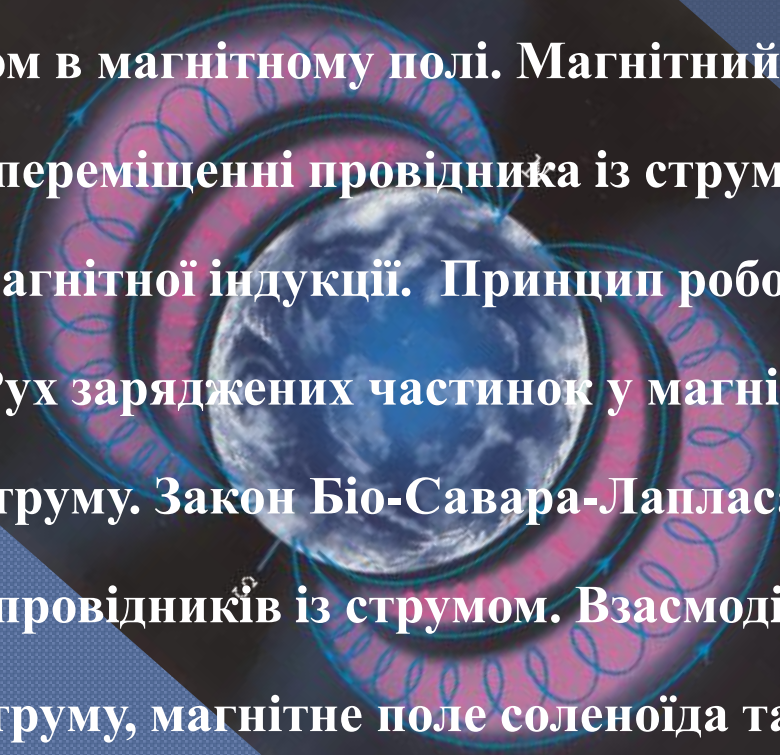
3.11. Магнітне поле, індукція магнітного поля. Закон Ампера.

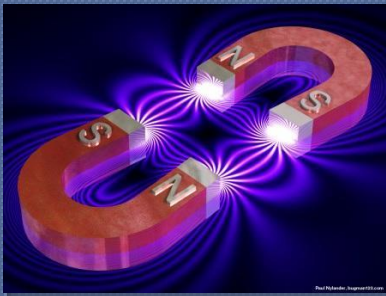
3.12. Контур із струмом в магнітному полі. Магнітний момент контура із струмом. Робота при переміщенні провідника із струмом в магнітному полі. Потік вектора магнітної індукції. Принцип роботи електродвигунів.

3.13. Сила Лоренца. Рух заряджених частинок у магнітному полі.

3.14. Магнітне поле струму. Закон Біо-Савара-Лапласа. Магнітне поле прямого та колового провідників із струмом. Взаємодія струмів.

3.15. Закон повного струму, магнітне поле соленоїда та тороїда. Вихровий характер магнітного поля. Електромагніти.





3.11. Магнітне поле

Магнітне поле – це складова електромагнітного поля, що є особливою формою матерії, через яку відбувається магнітна взаємодія.

Магнітне поле створюють:

- рухомі заряджені частинки
- провідники зі струмом
- магніти або тіла, що мають магнітні властивості
- змінне у часі електричне поле.

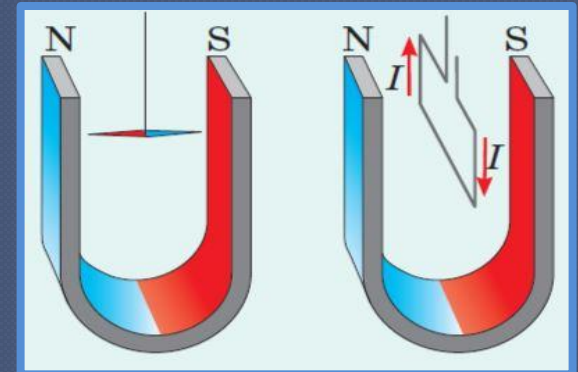
Магнітні властивості речовини були відомі людству давно, ще понад 2000 років до нашої ери. Стародавні китайці використовували магніти як **компас**. Глибоке фізичне дослідження магнітів та їх властивостей відбулося лише в XIX столітті. Дослідним шляхом виявлено, що магніти мають два **неподільні полюси N і S**, однойменні полюси відштовхуються, а різнойменні притягуються.

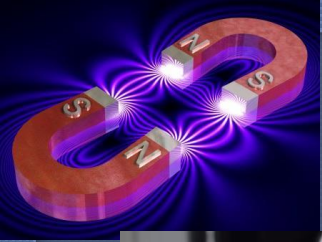
Магнітне поле діє з деякою силою:

- на заряджені тіла та
- на заряджені частинки, які рухаються
- на провідники зі струмом
- на намагнічені тіла

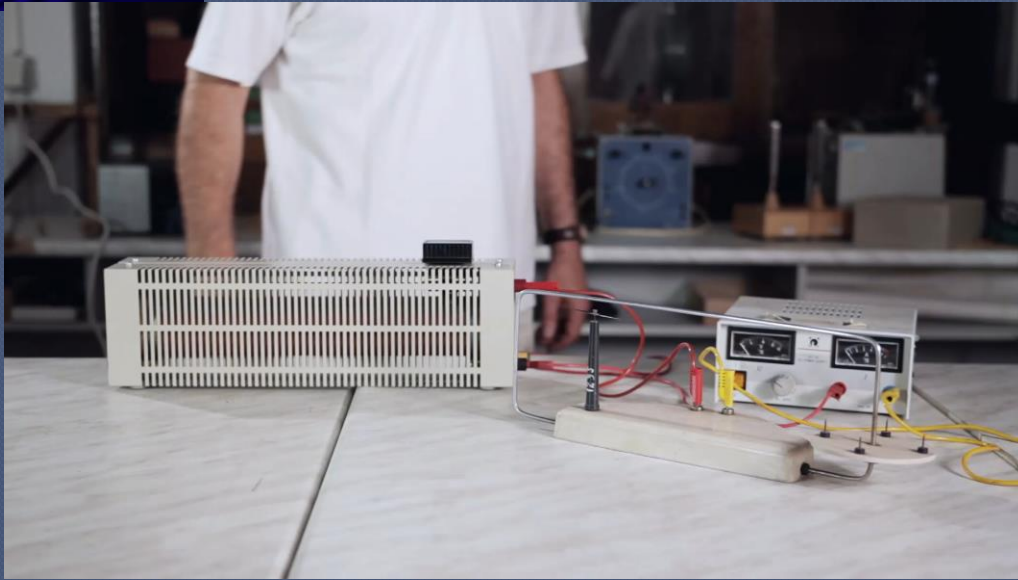
Магнітне поле чинить орієнтувальну дію:

- на магнітну стрілку
- на рамку зі струмом
- на намагнічені тіла





3.11. Магнітне поле, дослід Ерстеда



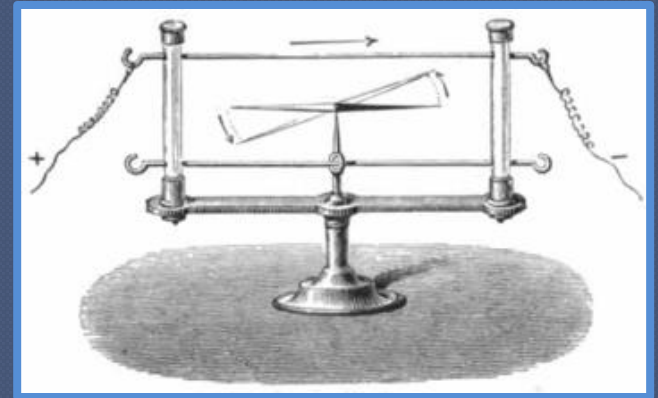
Ерстед Ханс Крістіан

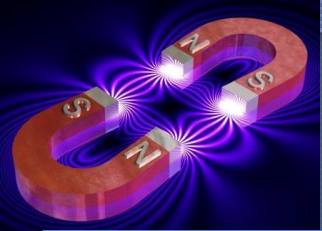
У 1820 році датський фізик **Х. Ерстед** довів, що магнітне поле виникає також навколо провідника, по якому протікає електричний струм.

Магнітна стрілка, розміщена поряд з провідником, під час пропускання по ньому електричного струму повертається і намагається установитися перпендикулярно до провідника.

Унаслідок зміни напрямку струму у провіднику на протилежний змінюється напрям дії сили на стрілку.

У міру віддалення від провідника орієнтуюча дія зменшується.





3.11. Магнітне поле, сила Ампера

А. Ампер (1920 р.) встановив, що два паралельні провідники, по яких течуть струми одного напрямку, притягуються один до одного, різного напрямку – відштовхуються.

Ампер був прихильником теорії *далекодії* і вважав, що взаємодія провідників зі струмом здійснюється *миттєво*, а навколишній *простір не бере участі в цій взаємодії*.

Англійський фізик **Майкл Фарадей** створив теорію *близькодії*, відповідно до якої заряджені частинки, що рухаються в деякому напрямку в кожному із двох провідників зі струмом, створюють у навколишньому просторі магнітне поле.

Магнітне поле одного провідника діє на другий провідник, і навпаки.

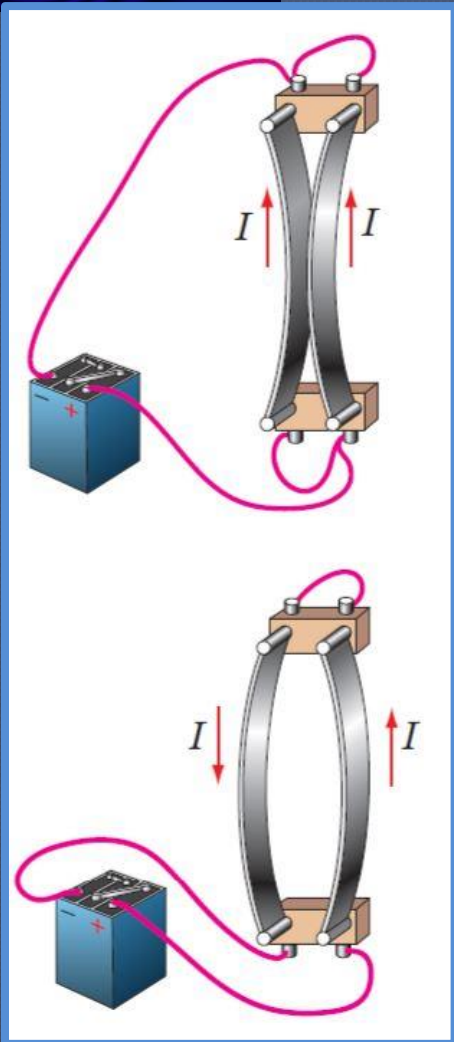
Тобто *взаємодія* провідників зі струмом здійснюється з *певною швидкістю через магнітне поле*.

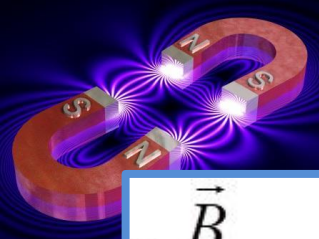


Ампер Андре-Марі

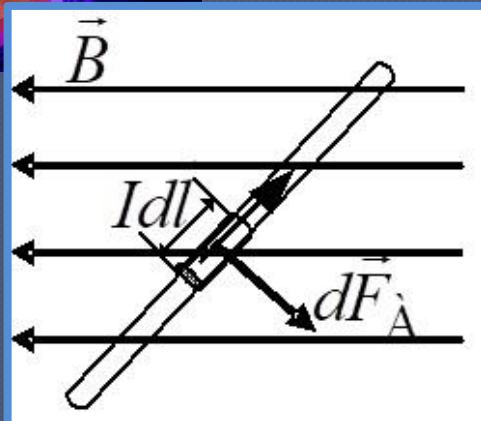


Фарадей Майкл





3.11. Магнітне поле, закон Ампера



Елементом струму називають векторну величину $Id\vec{l}$, що чисельно дорівнює добуткові сили струму I в провіднику на вектор елемента провідника $d\vec{l}$ направлений уздовж напрямку струму.

Елемент струму не лише утворює у просторі навколо себе магнітне поле, а й зазнає силового впливу з боку зовнішніх магнітних полів.

Закон Ампера:

$$d\vec{F}_A = [Id\vec{l} \times \vec{B}]$$

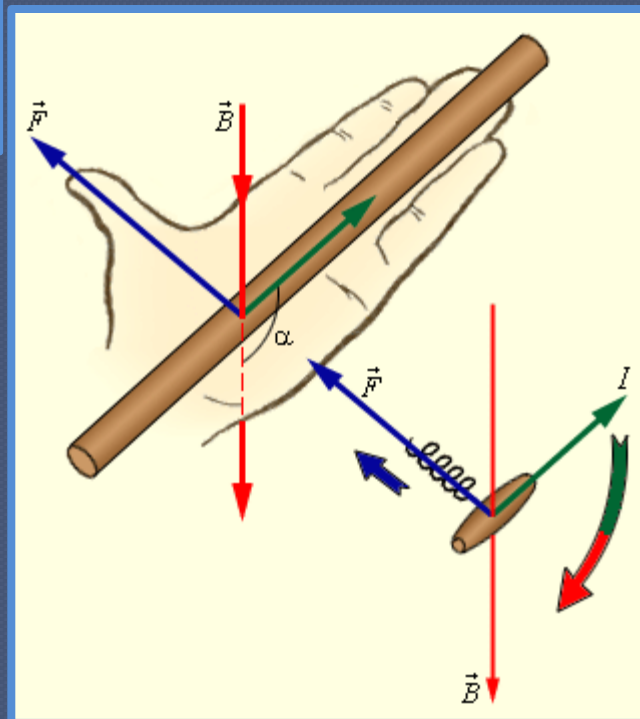
Сила $d\vec{F}_A$ з якою зовнішнє магнітне поле діє на розміщений у ньому елемент провідника зі струмом $Id\vec{l}$, дорівнює векторному добутку елемента струму на вектор індукції магнітного поля \vec{B} .

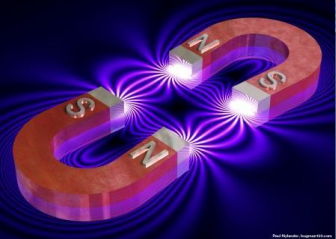
Напрямок сили визначають за правилом векторного добутку. Але для зручності часто використовують **правило лівої руки**:

Якщо ліву руку розмістити так, щоб лінії індукції магнітного поля входили в долоню, а чотири випрямлених пальці збігалися з технічним напрямом струму в провіднику, то відхилений під прямим кутом великий палець покаже **напрямок сили Ампера**.

Сила, з якою магнітне поле впливатиме на розміщений у ньому провідник, буде визначатись інтегруванням виразу значення сили Ампера по всій довжині провідника:

$$\vec{F}_A = \int_0^l d\vec{F}_A$$



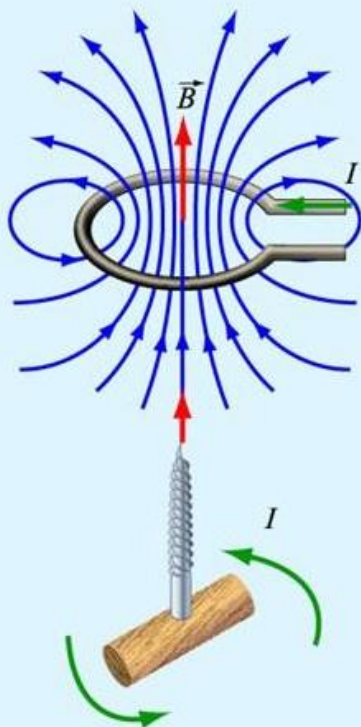
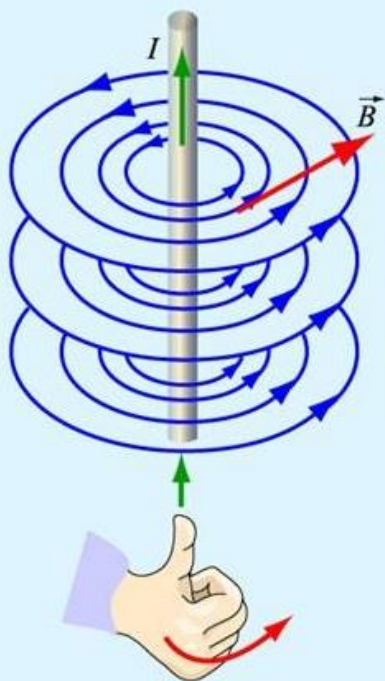


3.11. Магнітне поле, індукція магнітного поля

Відповідно до формули Ампера можна дати таке визначення індукції магнітного поля:

Індукція магнітного поля \vec{B} – це векторна фізична величина, що є *силовою характеристикою магнітного поля*, котра чисельно дорівнює силі, з якою магнітне поле діє на провідник одиничної довжини, по якому тече струм силою в 1 А, коли він розміщений перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля.

$$|\vec{B}| = \frac{F}{l \cdot \sin \alpha} \approx F$$

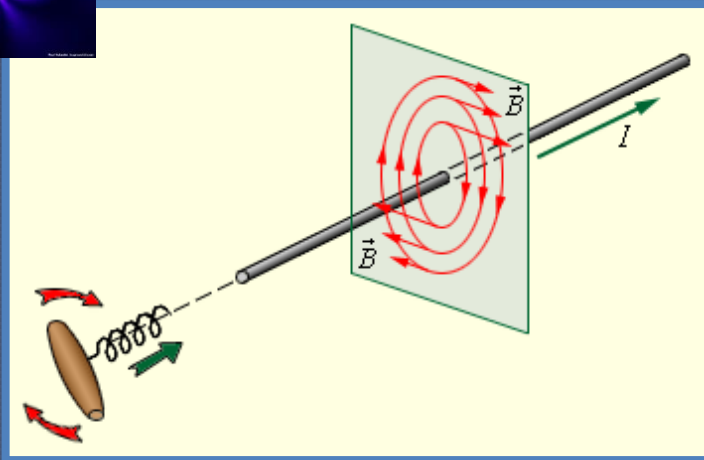


Лініями магнітної індукції (силовими лініями магнітного поля) називають криві, *дотичні* до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора магнітної індукції у цих точках.

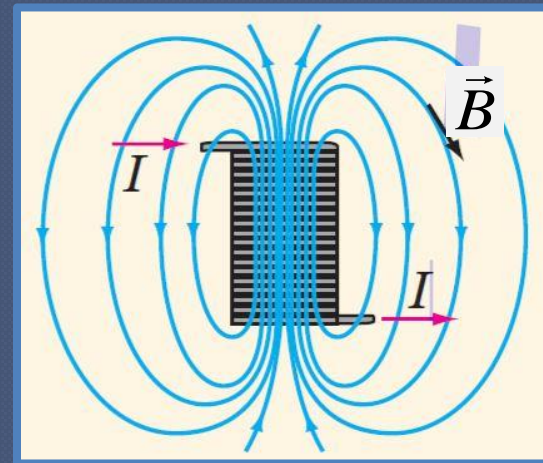
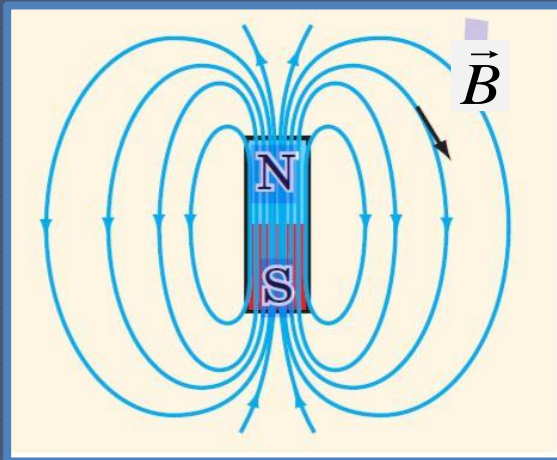
Числове значення вектора визначає *щільність* ліній магнітної індукції на одиницю площі.

Правило “правого” гвинта (свердлика): якщо поступальний рух гвинта з правою нарізкою збігається з напрямом струму, то напрям обертального руху ручки гвинта покаже напрям ліній магнітної індукції.

3.11. Силлові лінії магнітного поля.



Силлові лінії *провідника зі струмом* мають вигляд концентричних кіл, відстань між якими збільшується при віддалення від провідника.



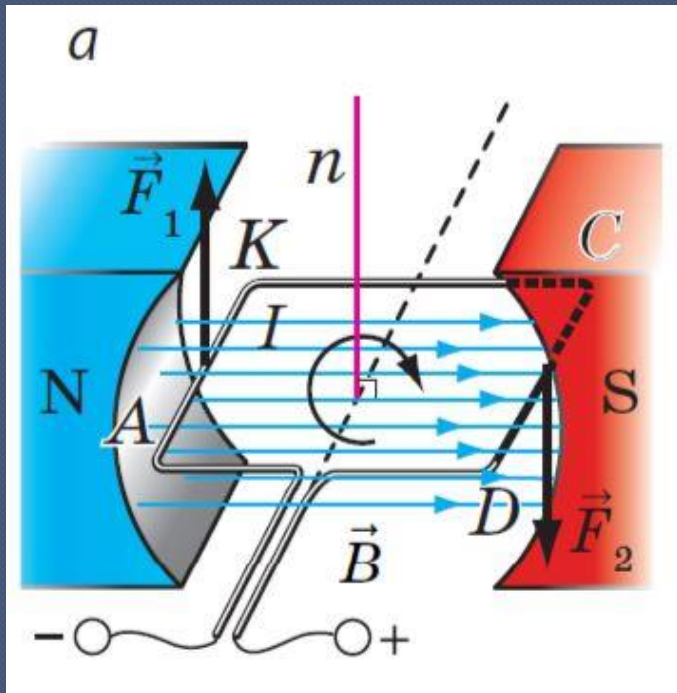
Силлові лінії *постійного магніту та соленоїда* беруть початок на північному полюсі і закінчуються на південному полюсі.

Соленоїд — циліндрична котушка, довжина якої значно більша за її діаметр. Конфігурації магнітних полів соленоїда і штабового магніту є однаковими.



3.12. Контур зі струмом в магнітному полі

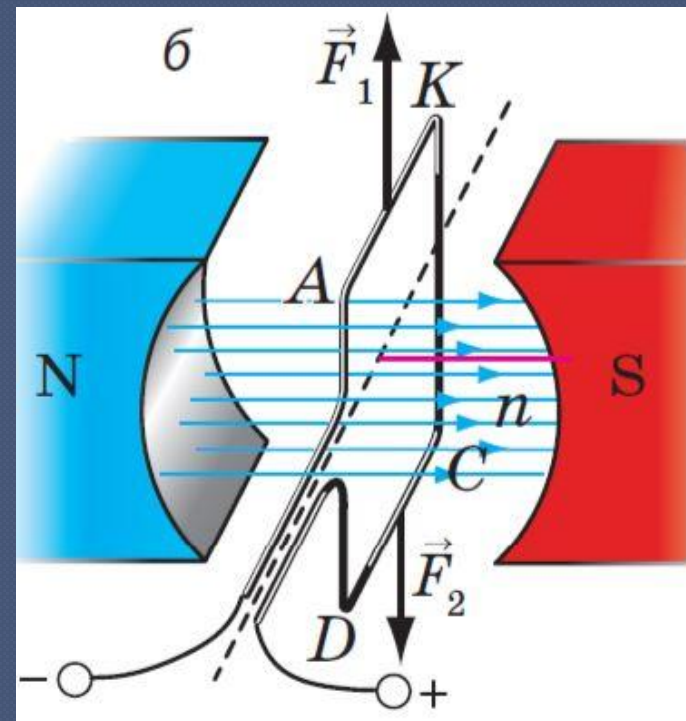
Контуром зі струмом називають замкнений провідник, по якому тече електричний струм.



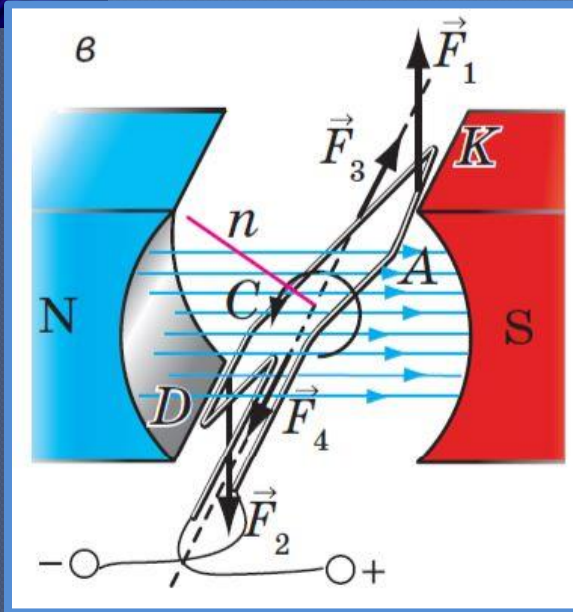
Візьмемо легку прямокутну рамку зі сторонами a і b , яка складається з одного витка дроту, помістимо її в однорідне магнітне поле так, щоб вона могла легко обертатися навколо горизонтальної осі, і пропустимо в рамці струм (рис. a)

Сили Ампера \vec{F}_1 та \vec{F}_2 створюють обертальний момент та повертають рамку проти ходу годинникової стрілки.

Погойдавшись, рамка установиться перпендикулярно до ліній магнітної індукції (рис. b)



3.12. Контур зі струмом в магнітному полі



Сили Ампера \vec{F}_3 та \vec{F}_4 не повертають, а лише розтягують рамку - моменти цих сил дорівнюють нулю.

Механічний обертальний момент пари сил \vec{F}_1 та \vec{F}_2 :

$$M = M_1 + M_2 = F_1 d_1 + F_2 d_2$$

$$F_1 = F_2 = I a B \sin(\alpha, B)$$

$$d_1 = d_2 = \frac{b}{2} \sin \alpha$$

де α - кут між вектором магнітної індукції і нормаллю n до рамки

Отже:

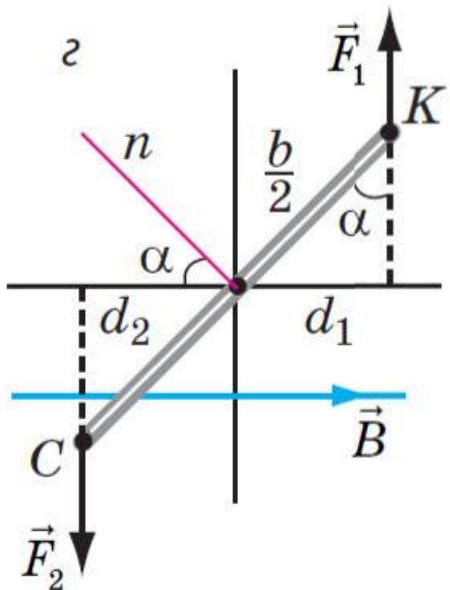
$$M = 2IB \frac{ab}{2} \sin \alpha$$

Момент сил Ампера, які діють на плоский замкнений контур, розташований в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку модуля магнітної індукції поля, сили струму в контурі, площі контуру і синуса кута α між вектором магнітної індукції та нормаллю до площини контуру:

$$M = IBS \sin \alpha$$

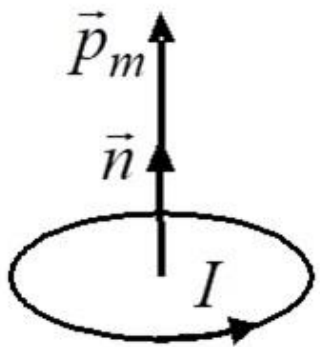
1) Якщо рамка розташована паралельно лініям магнітної індукції ($\alpha = 90^\circ$), то обертальний момент найбільший

2) якщо рамка розташована перпендикулярно до ліній магнітної індукції ($\alpha=0$), то обертальний момент дорівнює нулю - це **положення стійкої рівноваги рамки**





3.12. Магнітний момент контура зі струмом



Магнітним моментом контуру зі струмом називають векторну фізичну величину, чисельно рівну добутку сили струму в контурі на площу рамки і на одиничний вектор нормалі, проведений до площини рамки:

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

Напрямок вектора \vec{n} визначається за правилом правого гвинта відносно напрямку струму у контурі

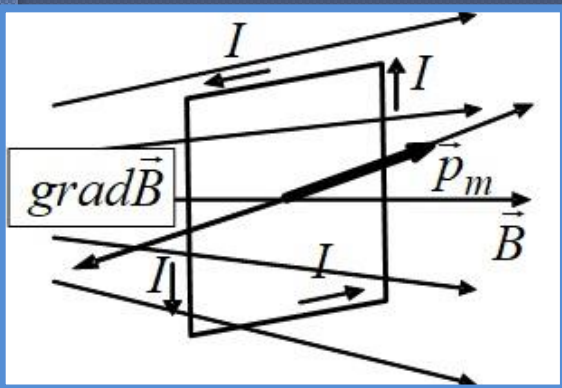
Тоді в загальному вигляді **обертальний момент сил**, що діють на контур зі струмом:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]$$

Індукція магнітного поля – це векторна фізична величина, що є силовою характеристикою магнітного поля, чисельно рівна максимальному обертальному моменту, що діє на рамку одиничної площі, по якій тече струм одиничної силою:

$$|\vec{B}| = \frac{M_{\max}}{IS}$$

Одиницею індукції магнітного поля є 1 Тл (тесла): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м})$.



У **неоднорідному магнітному полі**, окрім обертальної дії та деформації, зазнає ще й додаткових дій, що зумовлюють **переміщення** контуру в бік збільшення або зменшення магнітної індукції залежно від напрямку струму.

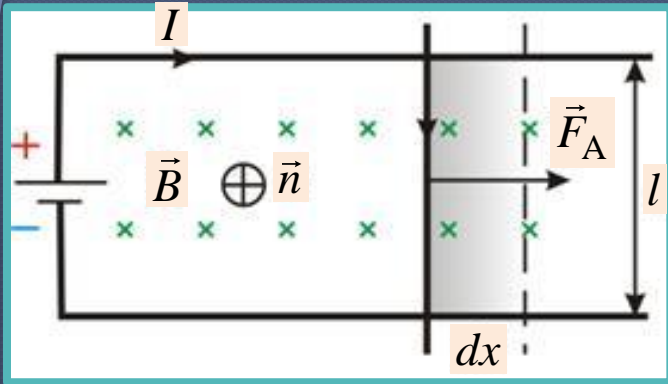
Результуюча сила, з якою магнітне поле втягує або виштовхує контур зі струмом:

$$\vec{F} = \text{grad} (\vec{p}_m \cdot \vec{B}) = -\text{grad} W_n$$

Контури зі струмом використовують у приладах для вимірювання індукції магнітного поля за відомим значенням обертального моменту сил



3.12. Робота при переміщенні провідника і контуру зі струмом у магнітному полі. Потік вектора магнітної індукції



Розмістимо незакріплений провідний контур довжиною зі струмом I , так, що одна із сторін контуру може ковзати по двох сусідніх в однорідному магнітному полі індукцією \vec{B} .

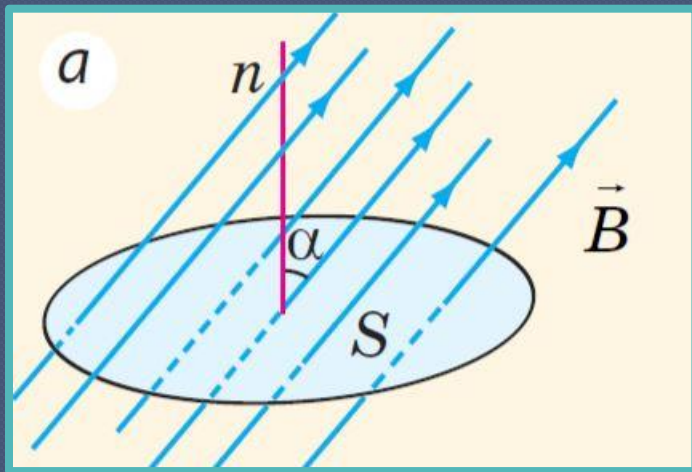
На рухому частину провідника довжиною l буде діяти сила Ампера:

$$\vec{F}_A = [I\vec{l} \times \vec{B}]$$

$$F_A = IlB \sin(\vec{l}; \vec{B})$$

Магнітне поле, переміщуючи провідник під дією цієї сили на відстань dx виконає елементарну роботу:

$$dA = F dx \cos \underbrace{\left(\vec{F}, d\vec{x} \right)}_{=1}$$



$$dA = IlB dx = IB \cdot l dx = IB \cdot dS = Id\Phi$$

Магнітним потоком, або **поток** вектора індукції магнітного поля, називають скалярну фізичну величину, що дорівнює скалярному добутку вектора індукції магнітного поля на площу контуру, яку пронизують лінії індукції:

$$\Phi = (\vec{B} \cdot \vec{S}) = BS \cos \alpha$$

Одиницею вимірювання магнітного потоку є 1 Вб (вебер): $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.



3.12. Робота при переміщенні провідника і контуру зі струмом у магнітному полі

У разі довільного *поступального переміщення* провідника зі сталим струмом у магнітному полі *повна робота* чисельно дорівнює добуткові сили струму на зміну магнітного потоку крізь площу поверхні, яку описує провідник, переміщуючись у магнітному полі:

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

У разі *обертання* контура зі струмом під дією пари сил на кут магнітне поле виконує елементарну роботу:

$$dA = (\vec{M} \cdot d\vec{\phi}) = -M \cdot d\phi$$

Знак “-“ вказує на зменшення кута за повернення контуру у положення стійкої рівноваги.

Повна робота щодо повороту контуру:

$$A = - \int_{\phi_1}^{\phi_2} M \cdot d\phi$$

Оскільки обертальний момент:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]$$

То:

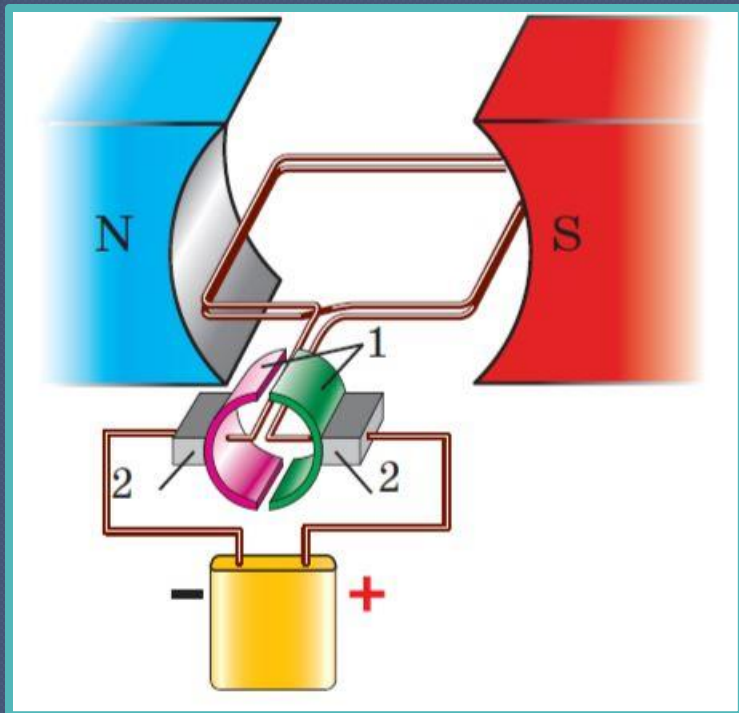
$$A = - \int_{\phi_1}^{\phi_2} p_m B \sin \phi d\phi = -p_m B (-\cos \phi) \Big|_{\phi_1}^{\phi_2} == -ISB (\cos \phi_1 - \cos \phi_2) = I (BS \cos \phi_2 - BS \cos \phi_1) = I\Delta\Phi$$

Висновок: робота під час переміщення провідника або контуру зі струмом у магнітному полі завжди може бути обчислена як

$$A = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} Id\Phi$$



3.12. Принцип роботи електродвигунів $A > 0$



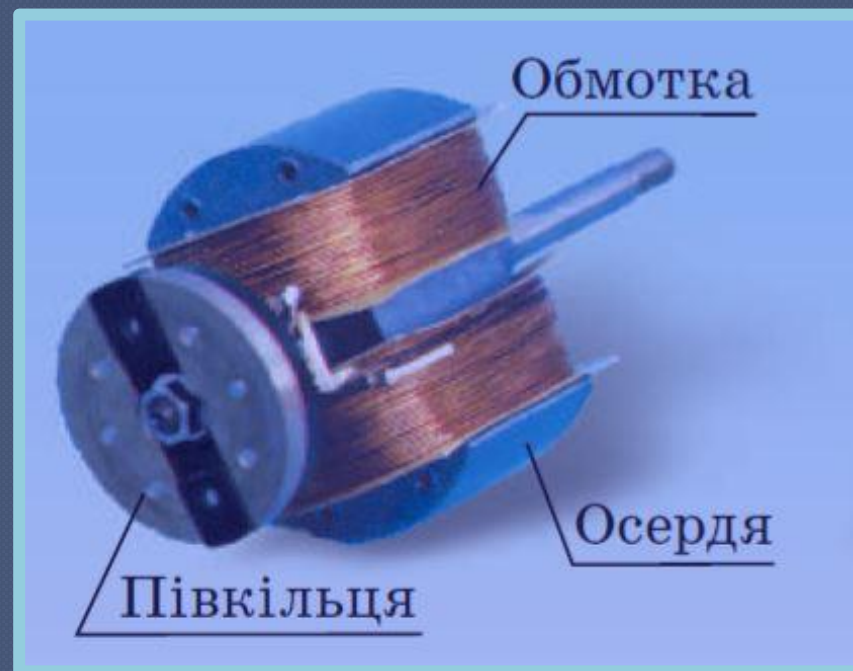
Обертання рамки зі струмом у магнітному полі використовують в *електричних двигунах*: пристроях, в яких *електрична енергія* перетворюється на *механічну*.

Електродвигун складається з обертової частини (*ротора*) та нерухомої (*статора*).

Причиною обертання ротора електродвигуна є обертальний момент, що виникає внаслідок взаємодії магнітного поля статора з обмоткою ротора, по якій тече струм.

Щоб рамка не зупинялась і оберталась в одному напрямку, застосовують *колектор*: пристрій, який автоматично змінює напрямок струму в рамці.

Колектор це - два провідних півкільця (1), до кожного з яких притиснута металева щітка (2); щітки з'єднані з полюсами джерела струму.





3.12. Принцип роботи електродвигунів

Електродвигуни постійного струму застосовують в:

- електротягових і підймальних пристроях,
- в електроприводі з широким діапазоном регулювання швидкості - електрозварювальні установки, електропривод баштових кранів тощо.

Електродвигуни змінного струму поділяють на синхронні та асинхронні.



Синхронні електродвигуни застосовують у нерегульованому електроприводі промислових установок:

- насосів,
- компресорів,
- повітродувок,
- млинів різного призначення,
- прокатних станів,
- дизель-генераторних установок тощо

Асинхронних електродвигуни розрізняють за функціональністю:

- загальнопромислові,
- кранові,
- вибухобезпечні,
- ліфтові,
- екскаваторні.

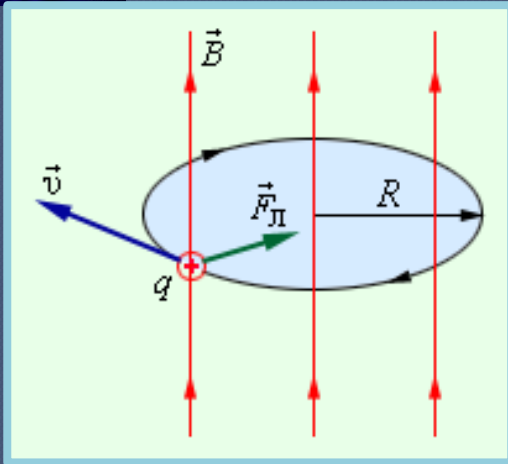
Асинхронних електродвигуни є частиною електроприводу побутових приладів, електроінструменту, металорізальних верстатів, ковальсько-пресових машин, насосів, вентиляторів, компресорів, транспортних та підйально-транспортних засобів (конвеєрів, ескалаторів, будівельних розвантажувальних і навантажувальних машин, кранів, підйомників і люльок, шахтних та ліфтових підймальних установок тощо).

На асинхронні двигуни припадає близько 90-95% від загальної кількості електродвигунів через їхню простоту, високу надійність в експлуатації, малі габаритні розміри і низьку вартість.

Електродвигуни мають значну перевагу порівняно з іншими видами двигунів (паровими, внутрішнього згорання).

Вони *екологічно чисті* – під час роботи не виділяють шкідливих газів, диму або пари; *економічні* – не потребують запасу палива і води, легко встановлюються у будь-якому доступному місці (на стіні, під підлогою електротранспорту, у корпусі електроінструментів тощо).

3.13. Сила Лоренца. Рух заряджених частинок у магнітному полі



Сила Ампера:

$$F_A = I \cdot B \sin \alpha$$

$$F_A = \frac{q}{t} \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha = \frac{N \cdot e \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha}{t} = N \cdot e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Сила Лоренца – це сила, з якою магнітне поле індукцією \vec{B} діє на окрему частинку зарядом q , що рухається зі швидкістю \vec{v} в цьому полі.

$$\vec{F}_L = q [\vec{v} \times \vec{B}]$$

Напрямок сили Лоренца визначається **правилом лівої руки**: якщо ліву руку розмістити так, щоб лінії індукції магнітного поля входили в долоню, а чотири випрямлених пальці збігалися з напрямом руху **позитивно зарядженої частинки**, то відхилений під прямим кутом великий палець покаже напрям сили Лоренца (для негативно зарядженої частинки використовують праву руку).

Сила Лоренца **завжди направлена перпендикулярно до напрямку швидкості руху зарядженої частинки**, отже **магнітне поле роботи з її переміщення не виконує**, а лише **змінює напрям швидкості** частинки.

Індукція магнітного поля – це векторна фізична величина, що є силовою характеристикою магнітного поля, чисельно дорівнює силі, з якою магнітне поле діє на одиничний позитивний заряд, що рухається з одиничною швидкістю перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля:

$$|\vec{B}| = \frac{F_L}{qv \cdot \sin \alpha}$$

Якщо на рухому заряджену частинку, окрім магнітного поля з індукцією \vec{B} діє й електричне поле з напруженістю \vec{E} то результуюча сила, прикладена до частинки, дорівнює **векторній сумі сил** – сили, що діє з боку електричного поля, і сили Лоренца:

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}]$$

3.12. Сила Лоренца. Рух заряджених частинок у магнітному полі

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}]$$

Поведінка зарядженої частинки в однорідному постійному магнітному полі залежить від орієнтації швидкості її руху відносно ліній вектора індукції:

1. Якщо вектор швидкості руху частинки збігається з напрямом вектора індукції магнітного поля $\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{B}$, то частинка буде надалі рухатися **прямолінійно й рівномірно**, оскільки ніщо не впливатиме на її рух $\vec{F}_L = 0$.

2. Якщо вектор швидкості руху частинки перпендикулярний до напрямку вектора індукції магнітного поля $\vec{v} \perp \vec{B}$, то сила Лоренца спрямована перпендикулярно до траєкторії руху частинки і виконуватиме роль **доцентрової** сили:

$$qBv = ma_n$$

$$qBv = \frac{mv^2}{R}$$

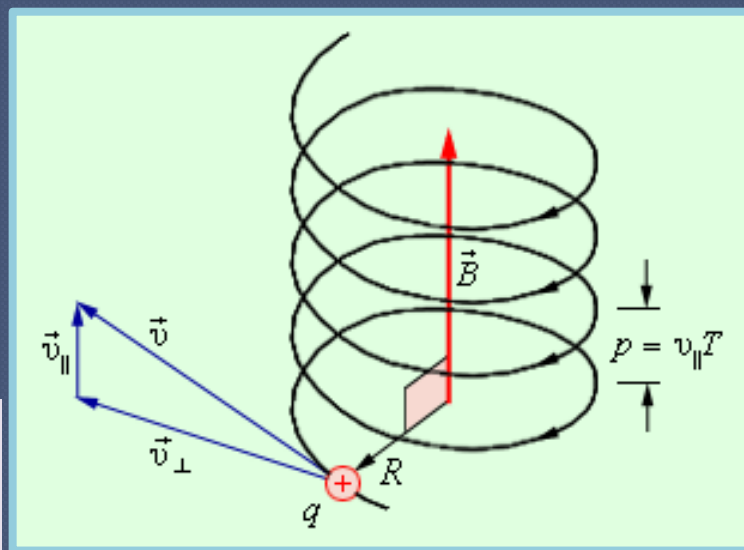
- частинка буде рухатися **по колу** з радіусом

$$R = \frac{mv}{qB}$$

- період обертання, який не залежить від швидкості руху частинки:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

3. Якщо заряджена частинка влітає у магнітне поле під кутом α до силових ліній, то вектор її швидкості можна розкласти на дві складові: паралельну до вектора і перпендикулярну до нього.



Частинка одночасно буде здійснювати поступальний рух вздовж ліній індукції магнітного поля зі сталою швидкістю v_{\parallel} і рух по колу зі швидкістю v_{\perp} , описуючи **гвинтову траєкторію**:

$$v_{\parallel} = v \cdot \cos \alpha$$

$$v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha$$

Радіус витків гвинтової лінії:

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \cdot \sin \alpha}{qB}$$

Крок гвинтової лінії руху зарядженої частинки:

$$p = v_{\parallel} T = v \cdot \cos \alpha \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi mv \cdot \cos \alpha}{qB}$$

3.13. Застосування поведінки заряджених частинок у магнітному полі

Електронна оптика - галузь фізики і техніки, в якій досліджується формування, фокусування і відхилення пучків заряджених частинок, отримання за їхньою допомогою зображень під впливом електричних і магнітних полів у вакуумі. До електронно-оптичних елементів і приладів належать:



1. Магнітні і електронні лінзи, призначені для створення магнітних та електричних полів з певною симетрією і для керування крізь них потоками заряджених частинок.

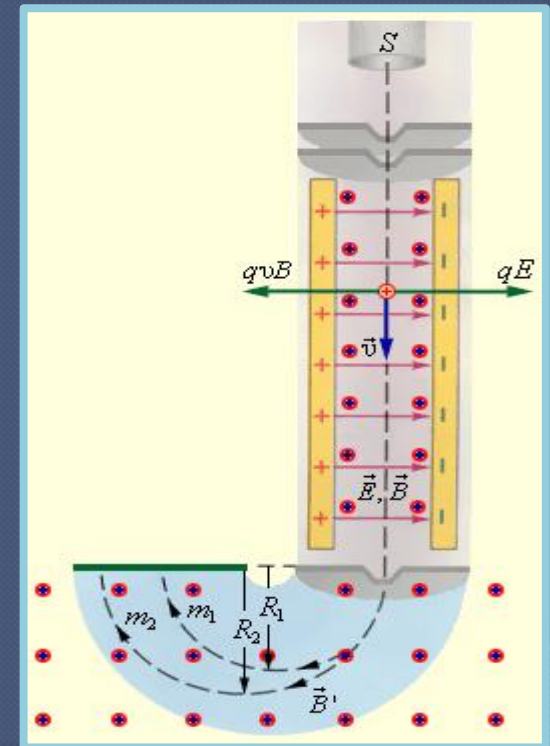
Магнітні та електронні лінзи застосовують для одержання зображень за допомогою електронних та іонних пучків, формування, фокусування і відхилення яких відбувається за допомогою електронних і магнітних полів. Застосовуються в електронно-променевих трубках, електронних мікроскопах, електронних прискорювачах, аналоговому телебаченні та радіолокації;

2. Електронні мікроскопи, призначені для спостереження та фотографування збільшених до 10^6 разів зображень об'єктів, в яких замість світлових променів використовують електронні пучки, прискорені в умовах глибокого вакууму до енергії 30 – 100 кеВ.

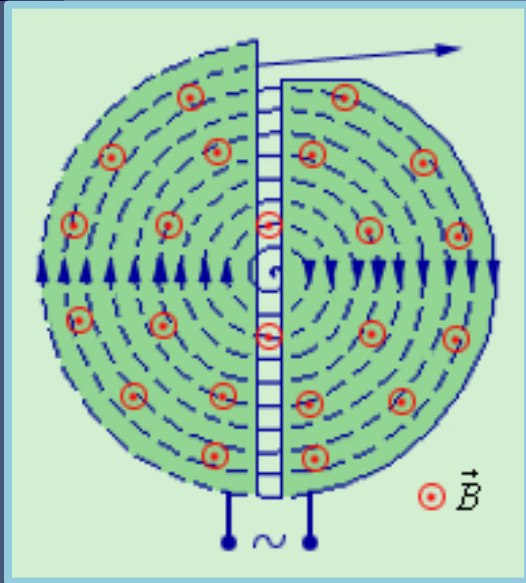
Дають можливість отримувати зображення окремих молекул і важких атомів, досліджувати мікрорельєф поверхонь, розподіл хімічного складу речовини на поверхні об'єкта, здійснювати структурний аналіз.

3. Мас-спектрометри – прилади, призначені для розділення іонізованих молекул й атомів за їхніми масами.

Використовують в ядерній енергетиці, геології, геохімії для елементарного і структурного молекулярного аналізу тощо;



3.13. Застосування поведінки заряджених частинок у магнітному полі



4. Прискорювачі заряджених частинок – установки, призначені для одержання заряджених частинок (електронів, протонів, атомних ядер, іонів тощо) великих енергій внаслідок їхнього прискорення електричними і магнітними полями.

- за типом заряджених частинок, які підлягають прискоренню, розрізняють протонні, електронні та іонні прискорювачі.
- за формою траєкторій, уздовж яких розганяють частинки, розрізняють лінійні і циклічні прискорювачі (синхрофазотрон, синхротрон, фазотрон, циклотрон, мікротрон, бетатрон).

Використовуються у наукових дослідженнях з атомної та ядерної фізики елементарних частинок, у хімії, біофізиці, геофізиці, а також у деяких прикладних галузях (дефектоскопії, променевої терапії тощо).



Магнітне фокусування пучків заряджених частинок побудоване на траєкторії руху зарядженої частинки у **неоднорідному магнітному полі**.

Якщо, наприклад, заряджена частинка рухається вздовж напрямку зростання індукції магнітного поля, то з попередніх формул видно, що радіус R та крок p гвинтової лінії будуть пропорційно зменшуватись, тобто частинка рухатиметься **по спіралі, що скручується**.

3.14. Магнітне поле струму. Закон Біо Савара Лапласа



Біо Жан-Батист



Савар Фелікс

1820 р. французькі вчені **Жан-Батист Біо** і **Фелікс Савар експериментально** визначили, що індукція магнітного поля складним чином залежить від розмірів і конфігурації провідника та завжди пропорційна силі струму що протікає у ньому та зменшується у міру віддалення точки спостереження від провідника.

Французький астроном, математик і фізик **П'єр-Сімон Лаплас** *теоретично узагальнив* ці експериментальні факти і вивів математичні формули, розрахунки за якими завжди збігалися з емпіричними вимірюваннями індукції магнітного поля.



Лаплас П'єр-Сімон

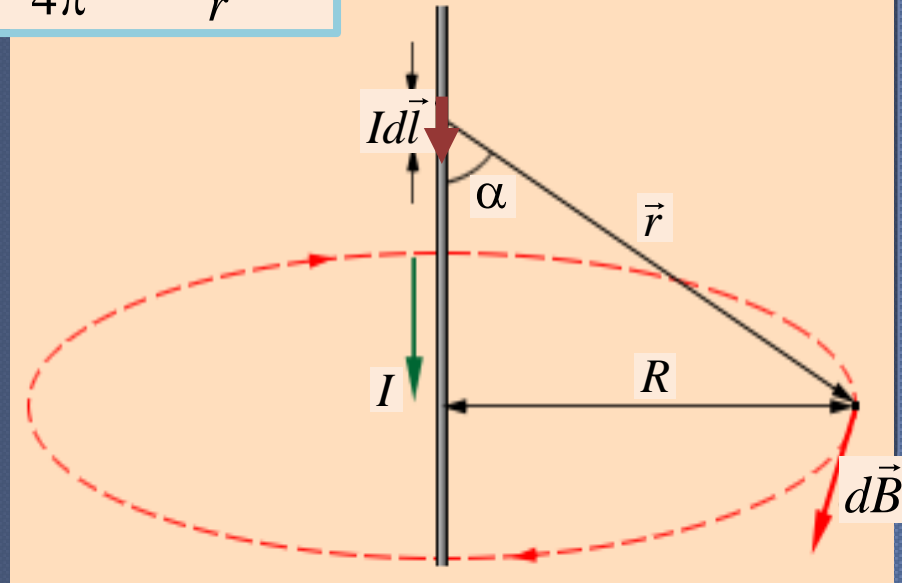
Закон Біо Савара Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{[Id\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}$$

Величина індукції магнітного поля $d\vec{B}$ яку створює у деякій точці простору елемент провідника із постійним струмом $Id\vec{l}$ дорівнює векторному добутку цього елемента на радіус-вектор \vec{r} , проведений від елемента до точки простору, у якій визначається індукція магнітного поля, помноженого на $\frac{\mu\mu_0}{4\pi}$.

У скалярному вигляді:

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



3.14. Магнітне поле струму. Закон Біо Савара Лапласа

Застосувавши *принцип суперпозиції магнітних полів* та *закон Біо Савара Лапласа* можна розрахувати індукцію магнітного поля *провідника зі струмом довільної конфігурації*.

Принцип суперпозиції магнітних полів: Вектор індукції магнітного поля створений провідником у вибраній точці простору, дорівнює векторній сумі індукцій що створюються окремими елементами цього струму в даній точці:

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B}$$

Напруженість магнітного поля - характеристика, що не залежить від магнітних властивостей середовища, в якому знаходиться провідник:

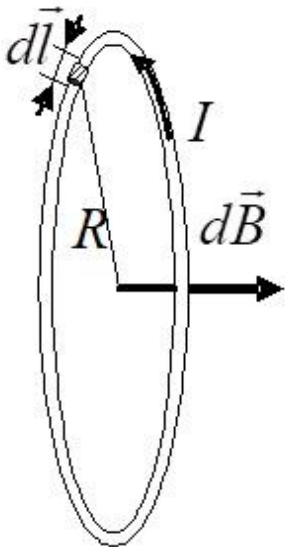
$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$$

Закон Біо Савара Лапласа

Одиницею вимірювання напруженості магнітного поля є 1 А/м.

$$\vec{H} = \int_L \frac{[I d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3}$$

Приклад 1. Розрахунок індукції магнітного поля у центрі колового провідника радіуса R зі струмом силою I .



$$B = \int_L \frac{\mu\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

- відстань від елемента провідника до точки визначення індукції магнітного поля, дорівнює радіусу кола $r = R$;
- кут між елементом провідника dl і радіусом кола R - $\alpha = \pi/2$;
- L - довжина колового витка, $L = 2\pi R$

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

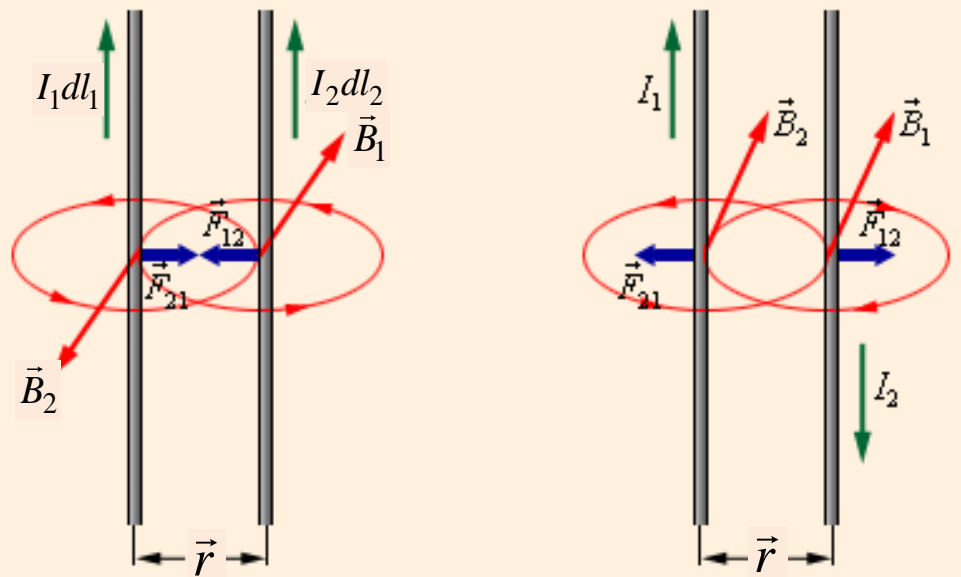
\Rightarrow

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R^2} \cdot 2\pi R$$

\Rightarrow

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

3.14. Магнітне поле струму. Взаємодія струмів



Індукція магнітного поля нескінченно довгого прямолінійного провідника із струмом на відстані r :

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

Тоді, на елемент струму $I_2 dl_2$ за законом Ампера, діятиме сила з боку магнітного поля, що створюється елементом струму $I_1 dl_1$:

$$d\vec{F}_{12} = [I_2 d\vec{l}_2 \times d\vec{B}_1]$$

$$F_{12} = I_2 dl_2 \cdot B_1 \cdot \sin 90$$

Підставимо:

$$dF_{12} = I_2 dl_2 \cdot B_1 \cdot \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

\Rightarrow

Оскільки

$$dF_{12} = dF_{12}$$

\Rightarrow

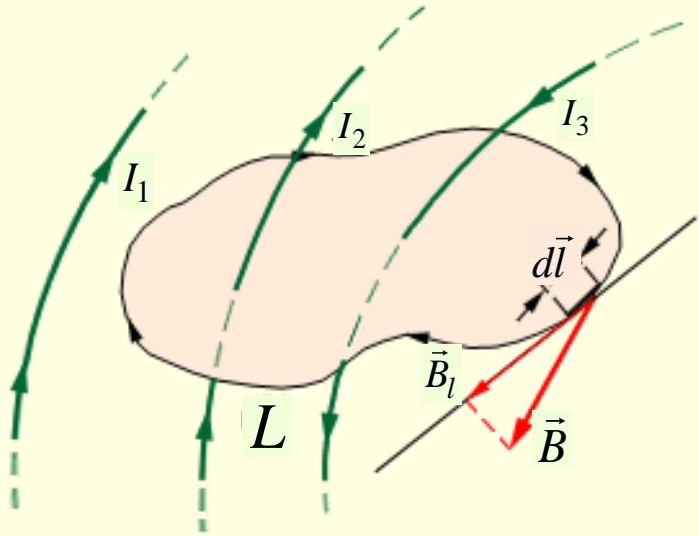
Сила взаємодії двох нескінченно довгих прямолінійних паралельних провідників, що припадає на одиницю їхньої довжини:

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{r}$$

Вивчення взаємодії двох прямих постійних паралельних струмів дало змогу визначити **одиницю струму 1 А**, яка є однією з основних одиниць системи СІ:

1 Ампер – це **сила постійного електричного струму**, який тече по двох нескінченно довгих провідниках малого перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного та спричиняє взаємодію між ними силою $2 \cdot 10^{-7}$ Н/м.

3.15. Циркуляція вектора індукції магнітного поля



Циркуляцією вектора індукції магнітного поля називається інтеграл по замкненому контуру довжиною L скалярного добутку вектора магнітної індукції B на елемент його довжини контуру dl :

$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \oint_L B \cdot dl \cdot \cos \alpha$$

Знайдемо циркуляцію вектора індукції магнітного поля прямого провідника зі струмом вздовж замкненої лінії – кола радіуса R .

Індукція магнітного поля нескінченно довгого прямолінійного провідника із струмом на відстані R :

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

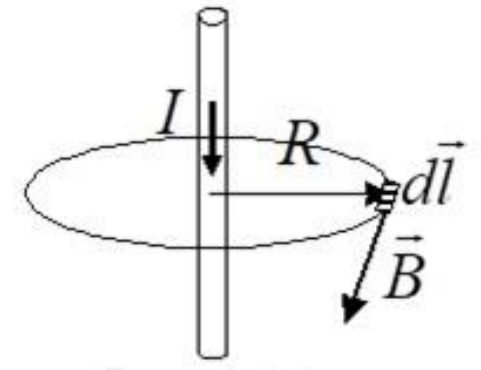
Підставимо: $\oint_L B dl \cos \alpha = \oint_L \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R} dl$

Оскільки $\cos \alpha = \cos(\vec{B}; d\vec{l}) = \cos 0^\circ = 1 \Rightarrow$

$$\oint_L B dl = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R} \int_0^{2\pi R} dl \Rightarrow$$

$$\oint_L B dl = \frac{\mu\mu_0 I 2\pi R}{2\pi R} \Rightarrow$$

$$\oint_L B dl = \mu\mu_0 I$$



3.15. Закон повного струму. Вихровий характер магнітного поля

Вираз справедливий для провідників будь-якої конфігурації незалежно від природи струму та форми замкненого контуру, аби тільки цей контур охоплював струм.

$$\oint_L B dl = \mu\mu_0 I$$

Із останнього виразу випливає, що

$$\oint_L B dl \neq 0$$

Висновки:

1. Силоне поле, індукція якого задовольняє зазначену умову, називається **непотенціальним**, або **вихровим**.
2. Лінії індукції магнітного поля не мають ні початку, ні кінця – вони завжди **замкнені**.
3. Отже, **в природі немає магнітних зарядів**.
4. У цьому полягає істотна відмінність магнітного поля від електростатичного.
5. Циркуляцію вектора напруженості магнітного поля вздовж замкненого контуру називають **магніторушійною силою**:

$$\varepsilon_m = \oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l})$$

Якщо контур L охоплює n струмів, то можна сформулювати **закон повного струму**, або **теорему про циркуляцію вектора індукції магнітного поля**:

Циркуляція вектора індукції магнітного поля постійних струмів по довільному замкненому контуру дорівнює алгебраїчній сумі сил струмів, які охоплюються цим контуром, помноженій на магнітну сталу і магнітну проникність середовища:

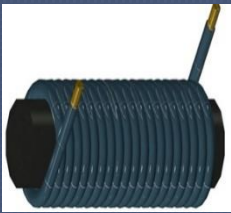
$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \mu\mu_0 \sum_{i=1}^N I_i$$

3.15. Закон повного струму, магнітне поле соленоїда.

Закон Біо Савара Лапласа застосовують у тому випадку, коли поле створене **одним провідником** довільної форми і легко провести інтегрування вздовж провідника довжиною l .

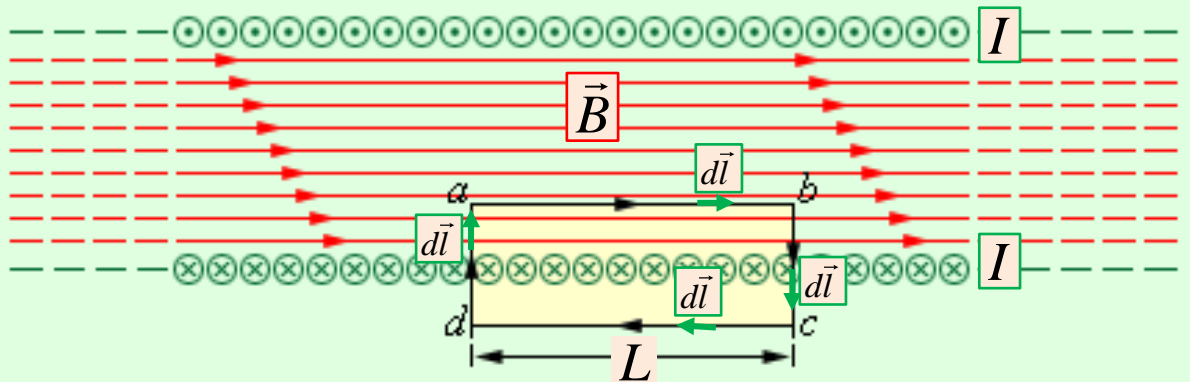
Для розрахунку індукції магнітного поля системи **декількох провідників** зі струмом застосовують **закон повного струму**, довільно обираючи контур симетричної форми з метою спрощення інтегрування.

$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \mu\mu_0 \sum_{i=1}^N I_i$$



Приклад 1. Розрахунок індукції магнітного поля на осі **довгого соленоїда** довжиною L з кількістю витків N зі струмом силою I .

Напрямок струму в соленоїді позначено точками – «до нас», хрестики – «від нас».



Оберемо замкнений контур інтегрування **abcd** і запишемо вираз для циркуляції вектора індукції магнітного поля вздовж цього контуру.

$$\oint_{abcd} \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 \sum_{k=1}^N I_k$$

Циркуляцію вектора \vec{B} по замкнутому контуру можна подати у вигляді чотирьох доданків:

$$\oint_{abcd} \vec{B} d\vec{l} = \int_{ab} B dl \cos \underbrace{\left(\vec{B}, \hat{d\vec{l}} \right)}_{=1} + \int_{bc} B dl \cos \underbrace{\left(\vec{B}, \hat{d\vec{l}} \right)}_{\approx 90^\circ} + \int_{cd} B dl \cos \underbrace{\left(\vec{B}, \hat{d\vec{l}} \right)}_{\approx 0} + \int_{da} B dl \cos \underbrace{\left(\vec{B}, \hat{d\vec{l}} \right)}_{\approx 90^\circ}$$

3.15. Закон повного струму, магнітне поле соленоїда та тороїда.

Отже, циркуляція вектора індукції магнітного поля довгого соленоїда:

$$\oint_{abcd} \vec{B} d\vec{l} = \int_{ab} B dl = B \int_L dl = BL$$

Оскільки обраний контур охоплює N витків, вздовж кожного з яких тече струм силою I , то **закон повного струму для довгого соленоїда**:

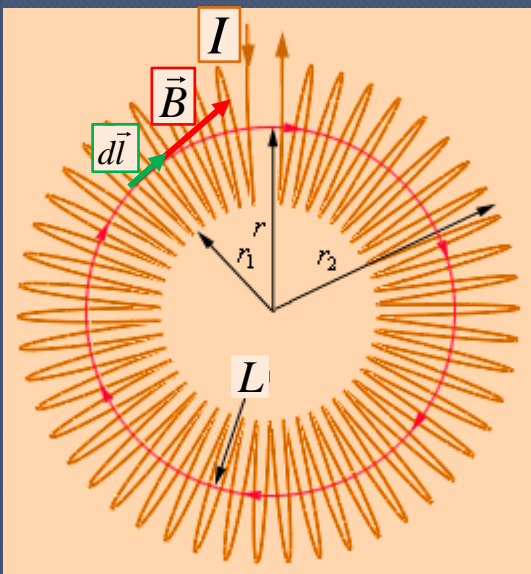
$$BL = \mu\mu_0 \sum_{i=1}^N I_i = \mu\mu_0 NI \Rightarrow$$

$$B = \mu\mu_0 \frac{NI}{L}$$

Позначимо n – кількість витків соленоїда на одиницю довжини (N/L).

$$\Rightarrow B = \mu\mu_0 nI$$

Приклад 2. Розрахунок індукції магнітного поля на осі **тороїда** довжиною середньої лінії L з кількістю витків N зі струмом силою I .



Оберемо замкнений контур інтегрування - середню лінію і запишемо вираз для циркуляції вектора індукції магнітного поля вздовж цього контуру.

$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \int_{2\pi r} B dl \cos 0 = B \cdot 2\pi r$$

Згідно закону повного струму для тороїда:

$$B \cdot 2\pi r = \mu\mu_0 NI$$

Отже, вектор індукції магнітного поля в центрі соленоїда:

$$B = \frac{\mu\mu_0 NI}{2\pi r}$$

3.15. Магнітне поле струму. Електромагніти

Явище виникнення магнітного поля навколо провідників зі струмом використовують для виготовлення **електромагнітів** – пристроїв, здатних створювати власні магнітні поля під час проходження електричного струму у витках обмотки.

Зазвичай електромагніт складається з **обмотки** і **феромагнітного осердя**, який набуває властивостей **магніту** під час проходження по обмотці **струму**.

В електромагнітах, призначених, насамперед, для створення **механічного зусилля**, є також **якір** (рухома частина **магнітопроводу**), що передає **зусилля**.

Широкого застосування електромагніти набули в електромагнітних механізмах, що здійснюють **поступально-поворотні рухи** чи гальмувальні процеси – вантажопідйомні електромагніти, металорізальні верстати, магнітні замки, релейні та пускові пристрої, механізми автоматичного вимикання, гальмові пристрої тощо.

Електромагніти використовуються там, де потрібне магнітне поле, яке можна швидко і легко змінити, наприклад:

- у побутових приладах (телевізор, магнітофон, електробритва),
- у пристроях техніки зв'язку (телефон, телеграф, радіо),
- в електричних машинах (електрогенератори та електродвигуни),
- у пристроях промислової автоматики (пускачі, перемикачі, реле та інше),
- в електромагнітних сепараторах для очищення механічних сумішей від магнітних предметів.



Лекція закінчна

Дякую за увагу

