

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

Циклова комісія природничих дисциплін

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни «Фізика»
обов'язкових компонент
освітньої програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

За темою - Магнітне поле. Закон Ампера

Харків 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 26.09.2022 № 9

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу ХНУВС
Протокол від 19.09.2022 № 2

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 23.09.2022 № 9

Розглянуто на засіданні циклової комісії природничих дисциплін протокол
від 12.09.2022 № 3

Розробник: викладач циклової комісії природничих дисциплін, спеціаліст
першої категорії, Москалик В.М.

Рецензенти:

1. Завідувач відділення фахової підготовки навчального відділу КЛК ХНУВС,
к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Владов С.І.
2. Доцент кафедри автомобілів і тракторів Кременчуцького національного
університету імені Михайла Остроградського, к.т.н., доцент Черниш А.А.

Тема Магнітне поле. Закон Ампера

План лекції:

1. Вектор індукції магнітного поля
2. Напруженість магнітного поля
3. Закон Біо-Свара-Лапласа
4. Дія магнітного поля на прямолінійний провідник із струмом.
5. Взаємодія струмів.
6. Дія магнітного поля на рухомий заряд. Сила Лоренца.

Література:

Основна література:

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

1.2 Трофімова Т.І. Курс фізики ; 11-е изд., стер. : навчальний посібник для вишів / Т.І. Трофімова. –К.: Видавничий центр «Академія», 2006. – 560 с.

1.3.Технічна термодинаміка (Термодинаміка, теплопередача, теорія авіаційних двигунів) навчальний посібник: Л.В. Михненко. Міністерство цивільної авіації. Московський інститут інженерії цивільної авіації. Москва, 1988 рік.

1. Вектор індукції магнітного поля

Магнітне поле

Початок сучасному розумінню природи магнетизму поклав датський фізик Г. Ерстед. Він уперше в 1819 р. встановив, а наступні численні досліді підтвердили той факт, що рухомі електричні заряди взаємодіють не так, як ті, що перебувають у спокої.

Дослідження, проведені російським фізиком О. О. Ейхенвальдом у 1901 р., показали, що коли заряджене тіло перебуває в спокої відносно спостерігача, то навколо цього тіла існує електричне поле. Якщо воно рухається відносно спостерігача, то виникає магнітне поле, яке відхиляє легкорухливу магнітну стрілку. Аналогічно на магнітну стрілку діє і провідник із струмом. Якщо по прямому провіднику, розміщеному по магнітному меридіану в напрямі північ - південь, пропустити струм, то розміщена під ним магнітна стрілка відхилиться (рис. 1). Якщо помістити стрілку над провідником, то стрілка відхилиться у протилежний бік.

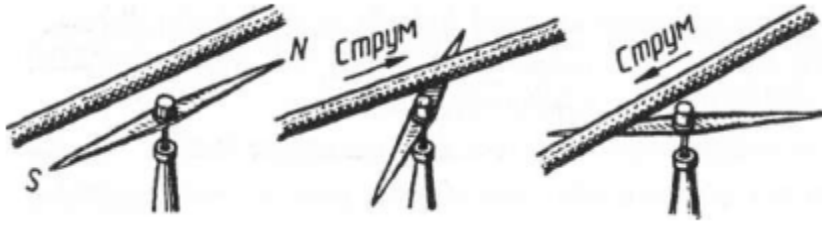


Рис. 1

Великий внесок у розуміння природи магнетизму французького вченого А. Ампера. Він установив, що всякий електричний струм здатний взаємодіяти з іншим струмом з силою, яку не можна пояснити кулонівською взаємодією.

Згідно з теорією близькодії, нерухомі електричні заряди взаємодіють через електричне поле. Провідники із струмом електрично нейтральні. Але, пропустивши по двох паралельних провідниках струм, ми побачимо, що провідники, в яких струми I_1 і I_2 проходять в одному напрямі, притягуються (рис. 2, а), а провідники, в яких струми проходять у протилежних напрямках, відштовхуються (рис. 2, б).

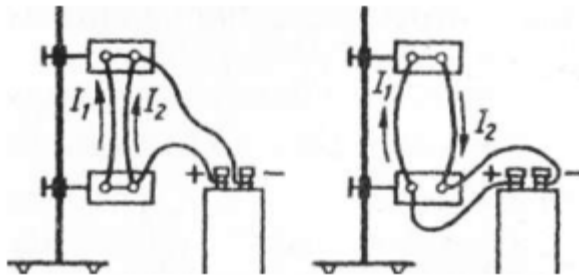


Рис. 2

Взаємодію між провідниками із струмом, тобто взаємодію між рухомими електричними зарядами, називають магнітною. Сили, з якими провідники із струмом діють один на одного, називають магнітними силами. Причиною виникнення сил магнітної взаємодії є магнітне поле, яке виникає навколо провідника із струмом.

Магнітне поле - це особлива форма матерії, через яку взаємодіють рухомі заряджені частинки або тіла, що мають магнітний момент. Експериментальним доведенням реальності магнітного і електричного полів є факт існування електромагнітних хвиль. Магнітне поле, як і електричне, є окремим проявом єдиного електромагнітного поля.

Характерною особливістю електричного поля є його здатність діяти на нерухомі заряди.

Основна властивість магнітного поля в тому, що воно діє на рухомі заряди (електричний струм).

Нерухомі заряди не створюють магнітного поля. Тільки рухомі заряди (електричний струм) і постійні магніти створюють магнітне поле.

У процесі вивчення взаємодії постійних магнітів було встановлено: постійні магніти мають два полюси: північний і південний (на рис. 1 - відповідно N і S);

однойменні полюси відштовхуються один від одного, а різнойменні притягуються.

Це наводило на думку про існування в природі «магнітних зарядів». Якби магнітні заряди існували в природі, то їх можна було б поділити як і електричні, тобто дістати постійний магніт тільки з одним полюсом. Проте якщо поділити магніт на дві половини, то кожна частина знову матиме два полюси. Процес поділу можна продовжити скільки завгодно, і кожний маленький шматочок магніту буде магнітом з двома полюсами. Пізніше було показано, що навіть електрони, протони, нейтрони поведуть себе як крихітні магніти.

Якщо окремі тіла можна зарядити позитивно або негативно, оскільки існує елементарний електричний заряд, то ніколи не можна відокремити північний полюс магніту від південного.

Отже, немає підстав вважати, що в природі існують окремі магнітні заряди.

Цю думку висловив Ампер у гіпотезі про елементарні електричні струми. Згідно з гіпотезою Ампера, всередині атомів і молекул речовини циркулюють елементарні, електричні струми. Якщо ці струми розміщені хаотично один відносно одного, то їх дія взаємно компенсується і жодних магнітних властивостей тіло не має. У намагніченому стані (наприклад, у постійних магнітах) елементарні струми відповідно орієнтовані. Отже, магнітні властивості будь-якого тіла пояснюються замкненими електричними струмами всередині нього, тобто магнітна взаємодія - це взаємодія струмів.

Замкнений контур із струмом у магнітному полі

Для вивчення електричного поля використовують пробний заряді тобто такий, який власним полем не спотворює цього електричного поля. Для дослідження властивостей магнітного поля використовують маленьку плоску рамку із струмом, підвідні проводи до якої скручують: тоді в цих проводах проходить той самий струм, але в протилежних напрямках, тому сили, які діють з боку магнітного поля на кожний провідник, однакові, але протилежно напрямлені. Результируюча сила, яка діє з боку магнітного поля на скручений провідник, дорівнює нулю. Розміри рамки і сила струму, який проходить по ній, мають бути такими, щоб магнітне поле самої рамки не спотворювало досліджуваного магнітного поля. Таку рамку із струмом називають пробним контуром.

Виконаємо дослід. Підвісимо вертикально маленький пробний контур. На деякій відстані від нього розмістимо провідник. Якщо струму в провіднику немає, то рамка перебуває в байдужому стані рівноваги. Якщо по провіднику пропустити електричний струм, то рамка із струмом повернеться і розміститься так, щоб провід був у площині рамки. Якщо змінити напрям струму в провіднику, то рамка повернеться на кут π .

Отже, магнітне поле чинить орієнтуючу дію на пробний контур. Цим користуються для встановлення напрямку поля.

Пробний контур, вміщений у магнітне поле, зазнає з боку магнітного поля дії обертального моменту сили M . На досліді було встановлено, що для певної точки магнітного поля максимальне значення моменту сили M_{max} , який діє на контур із струмом, пропорційне добутку сили струму в контурі на площу контуру S , тобто $M_{max} = IS$. Величину p_c , що характеризує магнітні властивості контуру із струмом, які визначають його поведінку в зовнішньому магнітному полі, називають магнітним моментом контуру. Отже $M_{max} \approx p_c$.

Магнітному моменту контуру p_c приписують певний напрям у просторі. Отже, це величина векторна.

Вектор p_c збігається з напрямом додатної нормалі n до площини контуру. Додатний напрям нормалі збігається з напрямом переміщення гвинта з правою нарізкою, який обертається у напрямі струму. Напрямок магнітного моменту можна визначити і за допомогою магнітної стрілки. Цей напрям показує північний полюс стрілки.

Магнітна індукція

Експериментально було встановлено, що відношення максимального обертального моменту, який діє на контур із струмом у магнітному полі, до магнітного моменту цього контуру не залежить від властивостей пробного контуру і тому може бути характеристикою досліджуваного магнітного поля. Його називають магнітною індукцією:

$$B = \frac{M_{max}}{p_c}.$$

Ця формула визначає тільки модуль магнітної індукції. Магнітне поле можна повною мірою описати, якщо в кожній його точці знайти модуль і напрям магнітної індукції B . Вектор магнітної індукції за напрямом збігається з напрямом зовнішнього магнітного поля.

Магнітна індукція - це силова характеристика магнітного поля в даній точці простору.

У загальному випадку залежність обертального моменту M від орієнтації контуру визначається формулою

$$M = B p_c \sin \alpha,$$

де α - кут між векторами p_c і B (рис. 3). Максимального значення M_{max} обертальний момент досягає при $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

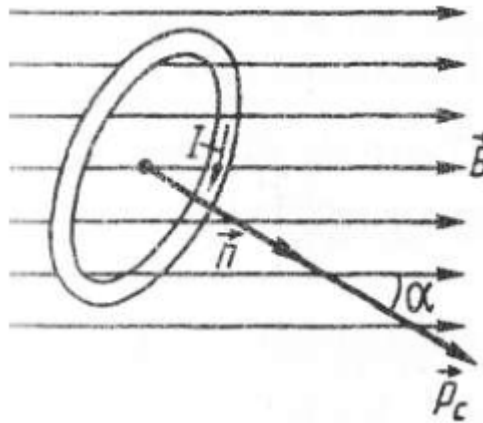


Рис. 3

Рівновага контуру в магнітному полі можлива тоді, коли вектори p_c і B напрямлені по одній прямій.

За одиницю магнітної індукції в СІ, яку називають тесла (Тл), беруть таку індукцію, при якій на контур з площею 1 м^2 і силою струму 1 А діє обертальний момент, що дорівнює $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Згідно з $M = B p_c \sin \alpha$, маємо $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м})$.

2. Напруженість магнітного поля

Подібно до того як електричні поля графічно зображують за допомогою електричних силових ліній, магнітні поля зображують за допомогою ліній магнітної індукції (або магнітних силових ліній).

Лінії магнітної індукції - це лінії, дотичні до яких у даній точці збігаються за напрямом з вектором B у цій точці. Лінії магнітної індукції можна зробити «видимими» за допомогою залізних ошурок. Якщо на скляну пластинку, крізь яку пропущено прямий провідник із струмом, насипати залізних ошурок і злегка постукати по пластинці, то залізні ошурки розмістяться вздовж силових ліній (рис. 4, а).

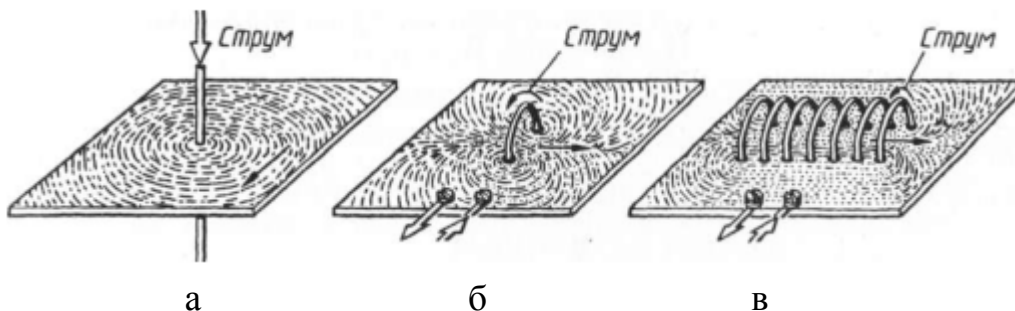


Рис. 4

З дослідів випливає, що лінії магнітної індукції прямого провідника із струмом є концентричними колами, які лежать у площині, перпендикулярній до струму. Центри цих кіл розташовані на осі провідника. За допомогою залізних ошурок можна дістати зображення ліній магнітної індукції провідників із струмом будь-якої форми (рис. 4, а-в).

Лінії магнітної індукції завади замкнені та охоплюють провідники із струмами.

Це відрізняє їх від ліній напруженості електростатичного поля. Такі поля називають вихровими на відміну від потенціальних, прикладом яких є електростатичне поле.

Напрямок ліній магнітної індукції пов'язаний з напрямом струму в провіднику. Напрямок силових ліній магнітного поля, яке створюється провідником із струмом, визначають за правилом гвинта.

Якщо гвинт з правою різьєю вкручувати в напрямі струму, то напрям обертання ручки гвинта збіжиться з напрямом ліній магнітної індукції.

Магнітне поле називають однорідним, якщо вектори магнітної індукції в усіх його точках однакові ($B = \text{const}$). Прикладом однорідного магнітного поля може бути поле всередині соленоїда - котушки, довжина якої значно більша за її діаметр (рис. 4, в). Лінії магнітної індукції однорідного поля паралельні, і їх густина скрізь однакова.

Густиною ліній магнітної індукції можна характеризувати значення магнітної індукції B . Умовились через одиничну площадку, розміщену перпендикулярно до ліній магнітної індукції, проводити таку кількість ліній, яка дорівнює або пропорційна модулю магнітної індукції в цій області магнітного поля

3. Закон Біо-Свара-Лапласа

Магнітна проникність середовища

Якщо за допомогою провідника із струмом у різних речовинах створювати магнітне поле і досліджувати його за допомогою пробного контуру, то можна пересвідчитись, що магнітна індукція залежить у даній точці від роду речовини, тобто залежить від властивостей середовища. Нехай B і B_0 - магнітні індукції відповідно в даному однорідному ізотропному середовищі й у вакуумі. Їх відношення

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

яке показує, у скільки разів магнітна індукція в середовищі більша (або менша), ніж у вакуумі, називають відносною магнітною проникністю середовища.

Відносна магнітна проникність характеризує магнітні властивості середовища, вона залежить від роду речовини і температури: $\mu \geq 1$ - величина безрозмірна; для вакууму $\mu = 1$.

Напруженість магнітного поля

Магнітне поле у вакуумі характеризують не індукцією B_0 , а напруженістю магнітного поля H . Ці дві фізичні величини пов'язані між собою співвідношенням

$$H = \frac{B_0}{\mu_0}, \text{ або } B_0 = \mu_0 H,$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

З останніх двох формул випливає, що індукція магнітного поля в середовищі

$$B = \mu\mu_0 H.$$

Отже, якщо відомі напруженість поля в даній точці і магнітна проникність середовища, то за допомогою співвідношення (останньої формули) можна визначити індукцію поля в цій точці.

Закон Біо-Савара-Лапласа

Узагальнивши експериментальні дані французьких фізиків Біо і Савара, французький математик Лаплас запропонував формулу, за якою можна обчислювати напруженість поля, створювану струмом, що проходить по ділянці провідника завдовжки Δl , у точці, розміщеній від цієї ділянки на відстані r (рис. 5):

$$\Delta H = \frac{I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2},$$

де α - кут між напрямом струму в ділянці Δl і радіусом-вектором r , який сполучає цю ділянку з розглядуваною точкою поля. Цей вираз називають законом Біо-Савара-Лапласа.

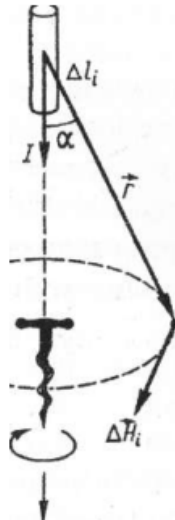


Рис. 5

За останньою формулою визначають напруженість поля, яку створює ділянка провідника із струмом I . Щоб визначити напруженість поля, яку створює весь провідник, треба застосувати принцип суперпозиції полів. За принципом суперпозиції полів, напруженість H у будь-якій точці магнітного поля провідника із струмом I дорівнює векторній сумі напруженостей ΔH_i елементарних полів, створюваних усіма ділянками провідника:

$$H = \sum_{i=1}^n \Delta H_i = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots + \Delta H_n,$$

де n - загальна кількість ділянок, на які поділено провідник.

4Дія магнітного поля на прямолінійний провідник із струмом

Одним із проявів магнітного поля є його дія на рухомі електричні заряди і провідники із струмом. У 1820 р. А. Ампер установив закон, який визначає силу, що діє на елемент струму в магнітному полі. Оскільки створити відокремлений елемент струму не можна, то Ампер вивчав поведінку рухомих дрітчастих замкнених контурів різної форми. Він установив, що

на провідник із струмом, вміщений в однорідне магнітне поле індукції B , діє сила, пропорційна довжині відрізка провідника Δl , силі струму I , який проходить по провіднику, та індукції магнітного поля B :

$$F = B I \Delta l \sin \alpha,$$

де α – кут між напрямом струму в провіднику і напрямом вектора B .

Ця сила має максимальне значення, якщо $\alpha = \pi / 2$. Якщо провідник розміщений уздовж ліній магнітної індукції, то ця сила дорівнює нулю.

Вираз $F = B I \Delta l \sin \alpha$ називають законом Ампера.

Для визначення напрямку сили, яка діє на провідник із струмом, вміщений у магнітне поле, застосовують правило лівої руки:

якщо ліву руку розмістити так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а випрямлені чотири пальці збігалися з напрямом струму в провіднику, то відігнутий великий палець покаже напрям сили, яка діє на провідник із струмом, вміщений у магнітне поле (рис. 1).

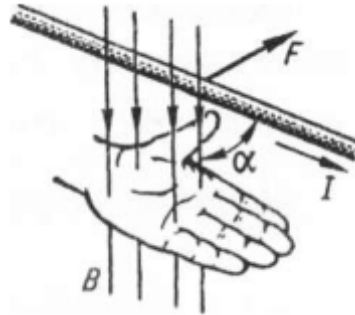


Рис. 1

Ця сила завжди перпендикулярна до площини, в якій лежать провідник і вектор B . Знаючи напрям і модуль сили, що діє на будь-яку ділянку провідника Δl_i можна обчислити силу, що діє на весь провідник. Для цього треба знайти суму сил, які діють на всі ділянки провідника.

5 Взаємодія струмів

Розглянемо взаємодію паралельних провідників із струмом. Припустимо, що в однорідному ізотропному середовищі з магнітною проникністю μ на відстані d один від одного розміщені два провідники 1 і 2 (рис.). Нехай в одному напрямі по одному з них проходить струм I_1 , а по другому – I_2 .

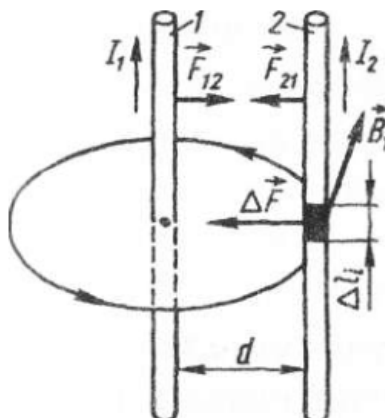


Рис. 2

Вважатимемо, що провідник із струмом I_1 створює магнітне поле, а провідник із струмом I_2 лежить у магнітному полі провідника I_1 .

Виділимо на провіднику 2 довільний елемент Δl_i , на нього діє сила Ампера

$$\Delta F_i = B_1 I_2 \Delta l_i \sin \alpha,$$

де $B_1 = \frac{\mu \mu_0 I_1}{2\pi d}$ – індукція магнітного поля, яке створює перший провідник.

Вектор B_1 напрямлений перпендикулярно до провідника із струмом I_2 , тому $\sin \alpha = 1$. Враховуючи це, дістанемо

$$\Delta F_i = \frac{\mu \mu_0 I_1}{2\pi d} I_2 \Delta l_i.$$

Застосувавши правило лівої руки, визначимо напрям цієї сили. Щоб визначити силу F_{21} (тобто силу, яка діє з боку першого провідника на другий), треба взяти суму всіх елементарних F_i . Врахувавши те, що $\sum \Delta l_i = l$, дістанемо

$$F_{21} = \sum_{i=1}^n \Delta F_i = \frac{\mu \mu_0 I_1}{2\pi d} I_2 \Delta l_i = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}.$$

Отже,

сила, з якою перший провідник діє на другий, пропорційна добутку струмів, що проходять по провідниках, і обернено пропорційна відстані між ними.

Крім того, вона залежить від магнітних властивостей середовища, в якому розміщені провідники і їх довжини.

Нехай тепер, навпаки, перший провідник буде в магнітному полі, яке створює другий провідник. За допомогою аналогічних обчислень дістанемо, що другий провідник діє на перший із силою

$$F_{12} = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}.$$

З порівняння останніх формул видно, що ці сили однакові за модулем, але протилежні за напрямом.

Якщо струми проходять по провідниках в однакових напрямках, то провідники притягуються, а якщо в протилежних - відштовхуються, бо на кожний з них з боку магнітного поля другого провідника діє сила, модуль якої

$$F = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}.$$

Магнітну взаємодію провідників із струмом використано для означення ампера - одиниці сили електричного струму, основної одиниці СІ:

1 А дорівнює силі незмінюваного струму, який під час проходження по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і дуже малої площі кругового поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричинював би на кожній ділянці провідника завдовжки 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Використавши означення ампера і останню формулу, можна знайти

$$\mu_0 = \frac{2\pi dF}{\mu I_1 I_2 l} = \frac{2\pi \cdot 1 \text{ м} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}}{1 \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

6 Дія магнітного поля на рухомий заряд. Сила Лоренца

Рухомі електричні заряди створюють навколо себе магнітні поля, які поширюються у вакуумі із швидкістю світла. У середовищах з $\varepsilon > 1, \mu \geq 1$ швидкість поширення менша.

Якщо заряд рухається в зовнішньому магнітному полі, то відбувається силова взаємодія магнітних полів, яку визначають за законом Ампера. Процес взаємодії магнітних полів дослідив Лоренц, який вивів формулу для визначення сили, що діє з боку магнітного поля на рухому заряджену частинку.

Силу, яка діє з боку магнітного поля B на заряд Q , що рухається з швидкістю V , називають силою Лоренца. Її можна визначити, виходячи з закону Ампера. Нехай по провіднику завдовжки Δl за час Δt проходить n однакових зарядів Q (рис. 3). Це означає, що через провідник проходить струм $I = nQ/\Delta t$. За законом Ампера, на nQ зарядів діє сила

$$F = BI\Delta l \sin \alpha = B \frac{nQ}{\Delta t} \Delta l \sin \alpha.$$

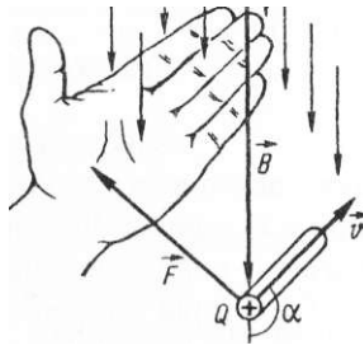


Рис. 3

Сила, з якою поле діє на кожний окремий заряд (сила Лоренца),

$$F_{\text{л}} = \frac{F}{n} = BQ \frac{\Delta l}{\Delta t} \sin \alpha.$$

Враховувши, що $\frac{\Delta l}{\Delta t} = V$ - середня швидкість руху заряду, дістанемо

$$F_{\text{л}} = QVB \sin \alpha,$$

де α - кут між вектором швидкості заряду u і вектором магнітної індукції B .

Сила Лоренца напрямлена перпендикулярно до векторів V і B .

Для рухомого позитивного заряду її напрям визначають за правилом лівої руки (рис. 3). Із зміною знака заряду напрям сили змінюється на протилежний.

Аналізуючи вираз, можна зробити висновки:

- а) якщо швидкість заряду $V = 0$, то $F_L = 0$, тобто магнітне поле не діє на нерухому заряджену частинку;
- б) якщо $\alpha = 0$, то $\sin \alpha = 0$ і $F_L = 0$, тобто якщо частинка рухається так, що вектор її швидкості V паралельний вектору магнітної індукції B , то на неї з боку магнітного поля сили не діють.

Оскільки сила Лоренца завжди напрямлена перпендикулярно до вектора швидкості частинки, яка летить, то вона не змінює модуля швидкості, а змінює тільки напрям руху частинки. Якщо заряджена частинка рухається в однорідному магнітному полі, вектор індукції якого перпендикулярний до напрямку швидкості зарядженої частинки, то сила Лоренца викривляє траєкторію руху, виконуючи роль доцентрової сили. Дія цієї сили не змінює кінетичної енергії зарядженої частинки, тобто

сила Лоренца не виконує роботи