4.1.3. Магнітне поле рухомого заряду. Дія магнітного поля на рухомий заряд.

Магнітне поле рухомого заряду

За допомогою закону Біо-Савара-Лапласа враховуючи, що

$I = \frac{dq}{dt}$, а $\frac{dl}{dr} = \upsilon$, одержимо вираз для магнітної індукцій поля заряду, що рухається зі швидкістю $\vec{\upsilon}$:

$$\vec{B}_q = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q[\vec{\upsilon},\vec{r}]}{r^3}. \tag{4.9}$$

Вектор $\vec{B}$ в кожній точці простору напрямлений перпендикулярно площині, в якій лежать вектори $\vec{\upsilon}$ і $\vec{r}$ (рис.4.6)

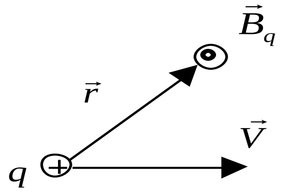

Рисунок 4.6

Дія магнітного поля на рухомий заряд

Якщо в законі Ампера (4.6) замінити силу струму на її визначення $I = \frac{dq}{dt}$, а також урахувати, що $\frac{d\vec{l}}{dt} = \vec{\upsilon}$, можна отримати вираз для сили, що діє з боку магнітного поля на заряд q, що рухається зі швидкістю $\vec{\upsilon}$

$$\vec{F}_Л = q\left[\vec{\upsilon},\vec{B}\right]. \tag{4.10}$$

Цю силу називають **силою Лоренца**.

В скалярному вигляді

$$F_Л = q\upsilon B\sin\alpha,$$

де α - кут між напрямком магнітного поля та швидкості заряду.

Напрямок сили Лоренца (правило лівої руки).

Напрямок сили Лоренца можна знайти *за* ***правилом лівої руки***: *якщо ліву руку розташувати так, щоб силові лінії входили в долоню, чотири витягнуті пальці показували напрямок швидкості позитивного заряду, тоді відігнутий під прямим кутом великий палець вкаже напрямок сили Лоренцо* (рис. 4.7).

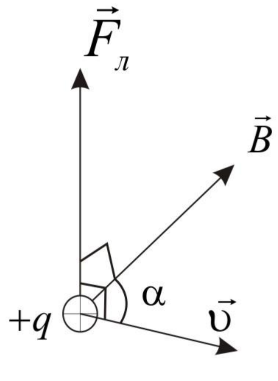

Рисунок 4.7

Властивості сили Лоренца.

Сила Лоренца має наступні властивості:

1. $\vec{F}_Л$ перпендикулярна $\vec{\upsilon}$ (тобто є центроспрямованою силою), тому не здійснює роботи і не змінює енергію та швидкість зарядженої частинки.

2. $\vec{F}_Л$ відхиляє заряд від початкового напрямку і вимушує рухатися по колу або спіралі.

Крім того, можна зробити такі висновки відносно сили Лоренца:

- *Величина і напрямок сили Лоренца* $\vec{F}_Л$ *залежить від швидкості зарядженої частинки і від величини і напрямку магнітного поля* $\vec{B}$.
- *Якщо заряджена частина рухається паралельно напрямку магнітного поля, сила Лоренца дорівнює нулю.*
- *Якщо кут між вектором швидкості заряду* $\vec{\upsilon}$ *і вектором* $\vec{B}$ *відмінний від нуля, то сила Лоренца перпендикулярна площині, в якій лежать вектори* $\vec{\upsilon}$ *і* $\vec{B}$.
- *Сила Лоренца діє на позитивний і негативний заряди в протилежних напрямках.*

Сила Лоренца широко використовується у техніці для фокусування пучків заряджених частинок: у прискорювачах різного типу, у електронно-проміневих трубках та т.і.

4.1.4. Закон повного струму та його застосування.

Згадаємо, що в електростатиці робота при переміщенні пробного заряду в електростатичному полі не залежить від форми шляху і по довільному замкнутому контуру дорівнює нулю. Таке поле є потенціальним. При цьому циркуляція вектора напруженості електричного поля дорівнює нулю

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = 0.$$

Закон повного струму для вектора $\vec{B}$

На відміну від електростатичного поля силові лінії магнітного поля замкнені, тому циркуляція вектора $\vec{B}$ по замкненому контуру не дорівнює 0. *Теорема про циркуляцію вектора* $\vec{B}$, *або* ***закон повного струму*** формулюється так: *циркуляція вектора* $\vec{B}$ *по довільному замкненому контуру дорівнює добутку магнітної сталої* μ_0 *на алгебраїчну суму струмів, охоплених цим контуром*:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^{n} I_i \,, \qquad (4.11)$$

де n - число провідників з струмами, охоплених контуром L довільної форми. Додатним вважається струм, напрямок якого складає з напрямком обходу контуру правий гвинт. Наприклад, на рис. 4.8 струми I_1 та I_3 - додатні, а струм I_2 - від’ємний.

Назва закону пояснюється тим, що у правій частині (4.11) враховуються усі струми, охоплені контуром, тобто «повний струм».

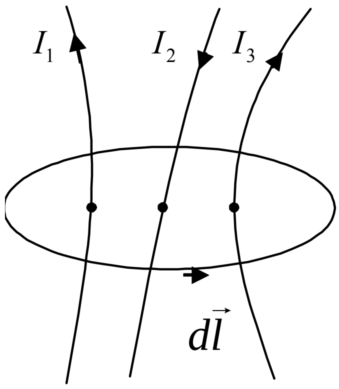

Рисунок 4.9

Наслідком (4.11) є те, *що* ***робота при перенесенні пробного одиничного елемента струму у магнітному полі в загальному випадку відмінна від нуля. Це є характерним для вихрового поля.***

Магнітне поле довгого соленоїда

За допомогою закона повного струму визначимо *магнітне поле довгого соленоїда.* Розглянемо соленоїд довжиною l, з кількістю витків N і струмом у витках I.

Довжина соленоїда набагато більша його діаметра, тобто можна вважати соленоїд нескінченно довгим. Тоді всередині соленоїда магнітне поле є однорідним, зовні – дуже слабким (рис.4.9), яким можна знехтувати.

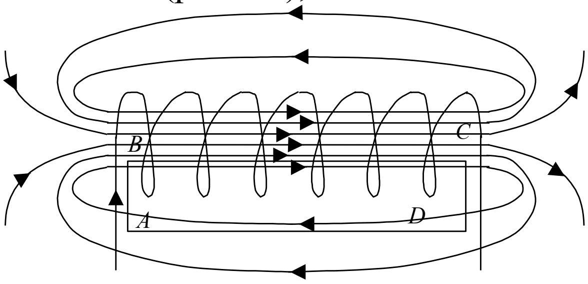

Рисунок 4.9

Для знаходження вектора магнітної індукції – беремо контур $ABCDA$ (рис.4.10). За теоремою про циркуляцію вектора $\vec{B}$ інтеграл по замкненому контуру можна розглядати як суму чотирьох інтегралів

$$\oint_{ABCDA} B_e dl = \int_{AB} B_e dl + \int_{BC} B_e dl + \int_{CD} B_e dl + \int_{DA} B_e dl\,.$$

На ділянках AB і CD $B_e = 0$ ($\vec{B} \perp d\vec{l}$), на ділянці DA (зовні соленоїда) $B = 0$, а на ділянці BC циркуляція вектора $\vec{B}$ дорівнює Bl, тобто

$$\int_{BC} B_e dl = Bl = \mu_0 NI\,.$$

Звідки

$$\oint_{ABCDA} B_e dl = \mu_0 NI$$

Величина магнітної індукції поля всередині соленоїда (у вакуумі) дорівнює

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 nI\,, \qquad (4.12)$$

де $n = \frac{N}{l}$ - лінійна густина витків соленоїда.

4.1.5. Теорема Гауса для магнітного поля. Робота у магнітному полі.

Магнітний потік

Магнітним потоком $d\Phi$ називають *кількість силових ліній* $\vec{B}$*, що пронизують деяку поверхню площею* dS

$$d\Phi = \vec{B}d\vec{S} = B_n dS = BdS\cos\alpha, \tag{4.13}$$

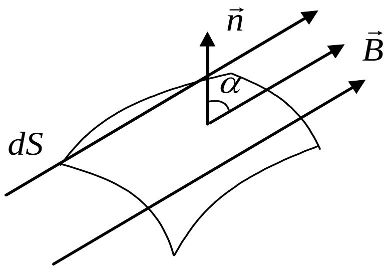

Рисунок 4.10

де $d\vec{S} = \vec{n} \cdot dS$, $\vec{n}$ - одиничний вектор зовнішньої нормалі до площини dS, B_n - проекція вектора $\vec{B}$ на напрямок нормалі, α - кут між векторами $\vec{n}$ і $\vec{B}$ (рис. 4.10). Площа dS вибирається настільки малою, щоб її можна було вважати плоскою, а магнітне поле однорідним.

Повний магнітний потік крізь довільну поверхню

$$\Phi = \int_S \vec{B}d\vec{S} = \int_S B_n dS.$$

Властивості магнітного потоку:

1. Є алгебраїчною величиною, тобто може бути $\Phi > 0$ і $\Phi < 0$ (у залежності від кута α).
2. *Одиницею магнітного потоку є Вебер* (Вб).

$[\Phi] = 1Тл \cdot м^2 = 1Вебер = 1Вб$

Теорема Гаусса для магнітного поля

Зважаючи на те, що магнітні силові лінії завжди замкнені, можна сформулювати ***теорему Гаусса для магнітного поля: магнітний потік крізь будь-яку замкнену поверхню дорівнює нулю***:

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0. \tag{4.14}$$

Оскільки кожна лінія вектора $\vec{B}$ замкнена, то, якщо вона ввійде в замкнену поверхню, то повинна і вийти з неї.

Магнітний потік крізь поверхню обмежену контуром, що складається з N витків має назву **потокозчеплення** цього контура і дорівнює

$$\Psi = N\Phi.$$

Робота по переміщенню провідника зі струмом у магнітному полі

Відомо, що магнітне поле діє на провідник зі струмом з силою Ампера (4.7): $F_A = IBl\sin\alpha$

Отже при переміщенні провідника (рис. 4.11) повинна виконуватись робота:

$$dA = F_A dx = IBl \cdot dx \cdot \sin\alpha\,, \qquad (4.15)$$

де $\angle\alpha$ – кут між $\vec{B}$ (направлено до нас) та I дорівнює 90°.

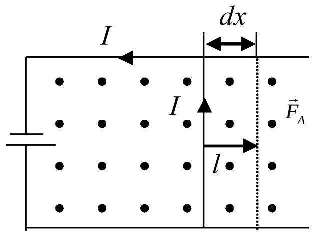

Рисунок 4.11

Враховуючи, що (у 4.15) $ldx=dS$, а $BdS=d\Phi$, отримаємо вираз для роботи: $dA=Id\Phi$, або в інтегральному вигляді

$$A=I\Phi \qquad (4.16)$$

де - Ф - *магнітний потік, що перетинає провідник при своєму русі у магнітному полі.*

Робота по переміщенню контуру зі струмом

Як було показано у підрозділі 4.1.1, дія магнітного поля на контур зі струмом міститься у повороті останнього до певного стану. При цьому магнітний потік крізь поверхню контуру

$$\Phi = BS\cos\alpha$$

змінюється, оскільки змінюється $\angle\alpha$ між $\vec{B}$ та $\vec{n}$ (рис.4.10).

Виявляється, що робота, яка при цьому виконується магнітним полем буде дорівнювати

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I\Delta\Phi \qquad (4.17)$$

де $\Delta\Phi$ - зміна магнітного потоку крізь поверхню контуру.

Формулі (4.17) можна надати інший вигляд:

$$A = IBS(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)\,,$$

Де α_1, α_2 – кут, що задає начальне і кінцеве положення контуру.

Контрольні запитання і завдання до підрозділу 4.1. Магнітне поле у вакуумі:

1. Що таке магнітне поле? Його властивості.
2. Сила Ампера, що діє на прямий провідник зі струмом.
3. Що таке вектор магнітної індукції? Його властивості.
4. Що таке 1 Ампер?
5. Закон Біо-Савара-Лапласа (формула й малюнок).
6. Що таке сила Лоренца? Її властивості.
7. Закон повного струму (теорема про циркуляцію $\vec{B}$)
8. Принцип суперпозиції полів.
9. Магнітне поле прямого струму: формула й малюнок.
10. Що таке магнітні силової лінії? Правила їхньої побудови.

11. Теорема Гауса для магнітного поля.
12. Робота з переміщення провідника зі струмом у магнітному полі.
13. Що є елементарним джерелом магнітного поля? Його основний параметр?
14. Взаємодія 2-х паралельних струмів.
15. Магнітне поле кругового струму: формула та малюнок.
16. Магнітне поле соленоїда: формула та малюнок.