

4.1. Магнітне поле у вакуумі.

4.1.1. Магнітне поле. Закон Біо-Савара-Лапласа

Магнітне поле

Магнітне поле – це силове поле, завдяки якому здійснюється взаємодія між провідниками зі струмом, або магнітами.

Властивості магнітного поля:

1. Утворюється струмами або магнітами та виявляється по дії на струми, або магніти.
2. Є соленоїдальним, а не потенційним (як електростатичне поле).

Елементарне джерело магнітного поля

Якщо елементарним джерелом електричного поля є точковий заряд, то елементарним джерелом магнітного поля є *контур зі струмом* (рис. 4.1). Його основним параметром є магнітний момент \vec{P}_m

$$\vec{P}_m = I\vec{S} = IS\vec{n},$$

де напрямок нормалі визначається за правилом **правого гвинта**: *поступальний рух гвинта вказує напрямок \vec{n} , якщо обертальний рух гвинта за стрілкою годинника співпадає з напрямком струму.*

Дія магнітного поля на контур зі струмом

Якщо внести контур зі струмом у однорідне магнітне поле, то на контур буде діяти момент сил \vec{M} , що буде повертати контур таким чином, щоб напрямок \vec{P}_m співпадав з напрямком поля.

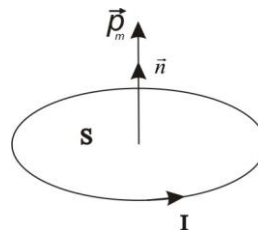


Рисунок 4.1.

При повороті площини контуру з струмом відносно напрямку магнітного поля (МП) величина \vec{M} буде змінюватись від максимального значення M_{\max} (якщо $\vec{P}_m \perp \text{МП}$), до нуля (коли $\vec{P}_m \uparrow\uparrow \text{МП}$). В останньому випадку, при $\vec{M} = 0$, $\vec{P}_m \uparrow\uparrow \text{МП}$ спостерігається стійка рівновага контуру у магнітному полі. Якщо \vec{P}_m і МП мають протилежні напрями ($\vec{M} = 0$, $\vec{P}_m \uparrow\downarrow \text{МП}$), рівновага нестійка.

Вектор магнітної індукції

Силову характеристикою магнітного поля є вектор *магнітної індукції* \vec{B} , модуль якого визначається співвідношенням:

$$|\vec{B}| = \frac{M_{\max}}{P_m}, \quad (4.1)$$

де M_{\max} - максимальне значення моменту сил, що діють на контур.

Властивості вектора магнітної індукції:

1. Підпорядковується принципу суперпозиції магнітних полів, а саме: \vec{B} магнітного поля, створеного кількома токами (магнітами) дорівнює векторній сумі індукцій полів, створених окремими токами (магнітами)

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

2. $[B]=1\text{Тл}$ (Тесла).

Магнітні силові лінії

Аналогічно електричному полю, магнітне поле можна зобразити за допомогою ліній магнітної індукції – ліній, дотичні до яких в кожній точці співпадають з напрямком вектора \vec{B} . Їх напрямок визначається за допомогою правила свердлика: якщо вістря свердлика напрямлене вздовж струму, то його ручка обертається в напрямку ліній магнітної індукції. Лінії магнітної індукції завжди замкнені та охоплюють провідник із струмом, тобто магнітне поле не має джерел, а є вихровим. У цьому суттєва відмінність силових ліній магнітного поля від силових ліній електричного поля, які починаються і закінчуються на електричних зарядах, що є джерелами електричного поля.

На рис. 4.2 зображені силові лінії вектора магнітної індукції для прямого струму (а), постійного магніту (б), та колового струму (в).

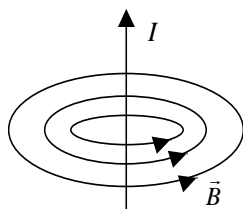


Рисунок 4.2а

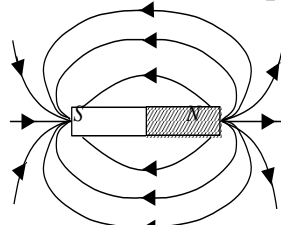


Рисунок 4.2б

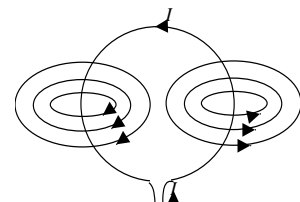


Рисунок 4.2в

Закон Біо-Савара-Лапласа

Закон Біо-Савара-Лапласа для провідника, елемент струму $I d\vec{l}$ якого створює в точці спостереження A індукцію магнітного поля $d\vec{B}$ (рис. 4.3), має вигляд:

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

(4.2)

де \vec{r} - радіус-вектор, проведений від елемента провідника $d\vec{l}$ в точку спостереження A ; I - сила струму в провіднику; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ - магнітна стала.

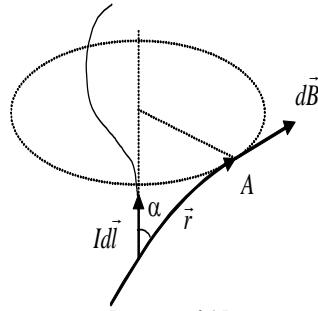


Рисунок 4.3

Напрямок $d\vec{B}$ перпендикулярний векторам $d\vec{l}$ та \vec{r} і співпадає з дотичною до силової лінії магнітної індукції. Силовою лінією вектора \vec{B} є коло, центр якого розташований по осі $d\vec{l}$. Напрямок вектора $d\vec{B}$ можна знайти за правилом правого гвинта (або свердлика): напрямок обертання головки гвинта вказує напрямок $d\vec{B}$, якщо поступальний рух гвинта відповідає напрямку елемента струму $d\vec{l}$.

Модуль вектора $d\vec{B}$ визначається, як:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}, \quad (4.3)$$

де α - кут між векторами $d\vec{l}$ та \vec{r} .

Користуючись формулою (4.3) можна розрахувати магнітне поле любого провідника зі струмом. Для цього необхідно провідник розподілити на ділянки dl і про інтегрувати по l :

$$B = \int_l dB. \quad (4.4)$$

При цьому у загальному вигляді інтегрування необхідно здійснювати по окремих проекціях вектора B

$$B_x = \int dB_x; \quad B_y = \int dB_y; \quad B_z = \int dB_z,$$

оскільки операція інтегрування скалярна.

Модуль вектора B можна знайти за формулою:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

Таким чином, розрахована індукція магнітного поля, створеного прямим провідником нескінченної ділянки дорівнює

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}, \quad (4.5)$$

де b – відстань від провідника до точки, де визначається B

4.1.2. Закон Ампера. Взаємодія двох паралельних струмів.

Закон Ампера.

Розглянемо силу, з якою магнітне поле діє на провідник з струмом. Ампер експериментально довів закон: *сила дії магнітного поля на елемент струму дорівнює векторному добутку елемента струму на вектор магнітної індукції*

$$d\vec{F}_A = I [d\vec{l}, \vec{B}]. \quad (4.6)$$

Під елементом струму слід розуміти елемент довжини провідника $d\vec{l}$, по якому тече струм I .

У скалярній формі

$$dF_A = IBdl \sin \alpha,$$

де α - кут між векторами $d\vec{l}$ і \vec{B} (рис. 4.4).

Закон Ампера в інтегральній формі має вигляд:

$$F_A = IBl \sin \alpha \quad (4.7)$$

де l – довжина прямолінійного провідника.

Визначення напрямку сили Ампера.

Напрямок сили Ампера можна визначити за **правилом лівої руки**: якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії індукції магнітного поля входили в долоню, а чотири випрямлені пальці показували напрямок струму в провіднику, то поставлений під прямим кутом великий палець покаже напрямок дії сили Ампера.

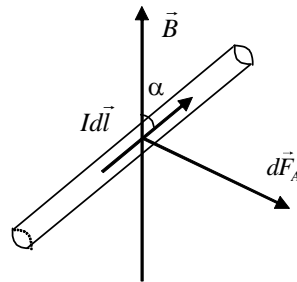


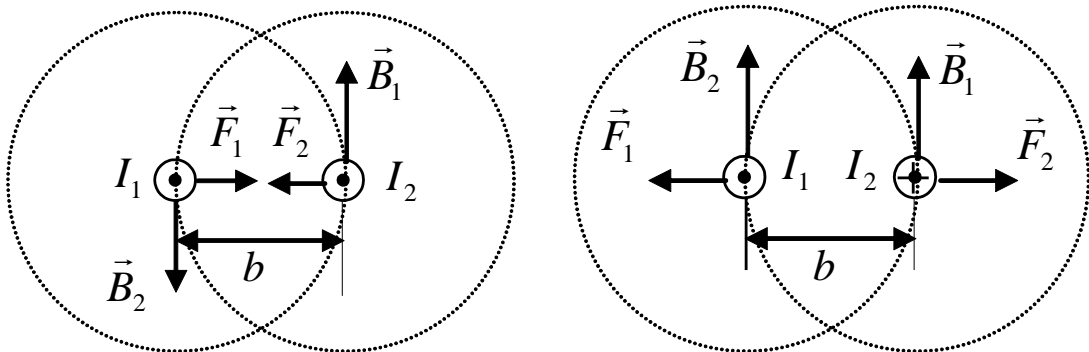
Рисунок 4.4

Сила взаємодії паралельних струмів.

Треба знайти амперову силу, з якою взаємодіють у вакуумі два паралельні нескінченно довгі провідники з струмами I_1 та I_2 , якщо відстань між провідниками b . Кожен з провідників створює магнітне поле, індукція якого у місці розташування іншого згідно (4.5) дорівнює:

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

Це магнітне поле діє на провідник з силою Ампера (4.7) $F = IBl \sin \alpha$, де відповідно до рис. 4.5 $\sin \alpha = 1$.



Якщо підставити сюди значення B , отримаємо

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi b}, \quad (4.8)$$

що є **формулою для сили взаємодії двох паралельних струмів.**

При цьому, якщо струми I_1 та I_2 в обох провідниках збігаються за напрямом, то провідники притягуються один до одного (рис. 4.5,а), якщо напрямки струмів протилежні, то провідники відштовхуються (рис. 4.5, б).

**Визначення
одиниці сили
струму –
Ампера**

Ця формула застосовується для означення одиниці сили струму – ампера, як основної одиниці в СІ.

Один ампер – сила незмінного струму, який, проходячи по двох паралельних провідниках нескінченної довжини і малого поперечного перерізу, розташованих на відстані 1 м один від одного у вакуумі, створює силу взаємодії між ними,

яка дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожний метр довжини.

Дійсно, якщо підставити у формулу (4.8) $I_1 = I_2 = 1\text{А}$, а $b = 1\text{м}$, то можна отримати умову для визначення 1А:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}.$$