13 МАГНІТНЕ ПОЛЕ У ВАКУУМІ ТА РЕЧОВИНІ

ЗВЕДЕННЯ ОСНОВНИХ ФОРМУЛ

13.1 Закон Біо-Савара-Лапласа

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

де $d\vec{B}$ – магнітна індукція поля, яку створює елемент провідника зі струмом; μ – магнітна проникність; μ_0 – магнітна стала $\left(\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \text{Ãí}/\text{ì}\right)$; $d\vec{l}$ – вектор, який за модулем дорівнює довжині dl елемента провідника і збігається за напрямком зі струмом (елемент провідника); I – сила струму; $\vec{r}$ – радіус-вектор, проведений від початку елемента провідника до точки, в якій визначається магнітна індукція.

Модуль вектора $d\vec{B}$

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

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

13.2 Зв'язок магнітної індукції $\vec{B}$ **з напруженістю** $\vec{H}$ магнітного поля

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

або у вакуумі

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}\,.$$

13.3 Магнітна індукція в центрі колового провідника зі струмом

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

де R – радіус кривини провідника.

13.4 Магнітна індукція поля, що створюється **нескінченно довгим прямим провідником зі струмом:**

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

де r – відстань від осі провідника.

13.5 Магнітна індукція поля, що створюється відрізком провідника:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r_0} \left(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2\right).$$

Позначення зрозумілі із рис. 1. Вектор індукції $\vec{B}$ перпендикулярний до площини креслення, спрямований до нас, тому зображений у вигляді точки.

При симетричному розміщенні кінців провідника відносно точки, в якій визначається магнітна індукція (рис. 1*б*), $-\cos\varphi_2 = \cos\varphi_1 = \cos\varphi$, і тому

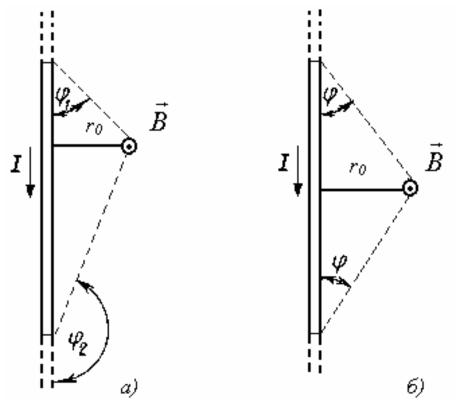

Рисунок 1

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I}{r_0} \cos\varphi .$$

13.6 Магнітна індукція поля, яке створює **соленоїд** у середній його частині (або тороїд на своїй осі):

$$B = \mu_0 \mu n I ,$$

де n – кількість витків, що припадає на одиницю довжини соленоїда; I – сила струму в одному витку.

13.7 Принцип суперпозиції магнітних полів: магнітна індукція $\vec{B}$ результуючого поля дорівнює векторній сумі магнітних індукцій $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \ldots, \vec{B}_n$ полів, що існують у даній точці:

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

У випадку накладання двох полів

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 ,$$

абсолютне значення вектора магнітної індукції

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1 B_2 \cos\alpha} ,$$

де α – кут між векторами $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$.

13.8 Закон повного струму для струму провідності

$$\oint H_l dl = I ,$$

де H_l – проекція вектора $\vec{H}$ на напрямок дотичної до контуру, що містить елемент dl; I – сила струму, що охоплюється контуром.

Якщо контур охоплює *n* струмів, то

$$\oint H_l dl = \sum_{i=1}^{n} I_i ,$$

де $\sum_{i=1}^{n} I_i$ - алгебраїчна сума струмів, які охоплює контур.

13.9 Магнітний потік *Φ* через плоский контур площею *S*:

- у випадку однорідного поля $\left(\vec{B} = const\right)$

$$\Phi = BS\cos\alpha \text{ , або } \Phi = B_n S ,$$

де α – кут між вектором нормалі $\vec{n}$ до площини контуру і вектором магнітної індукції $\vec{B}$; B_n – проекція вектора $\vec{B}$ на нормаль $\vec{n}$ ($B_n = B\cos\alpha$);

- у випадку неоднорідного поля

$$\Phi = \int_S B_n dS ,$$

де інтегрування ведеться по площі *S*.

13.10 Потокозчеплення, тобто повний магнітний потік, зчеплений зі всіма витками соленоїда або тороїда:

$$\psi = N\Phi ,$$

де Φ – магнітний потік через один виток; N – кількість витків соленоїда або тороїда.

13.11 Магнітне поле тороїда, осердя якого зроблене із двох частин, виготовлених із речовин з різними магнітними проникностями:

а) магнітна індукція на осьовій лінії тороїда

$$B = \frac{IN}{l_1/(\mu_1\mu_0) + l_2/(\mu_2\mu_0)},$$

де I – сила струму в обмотці тороїда; N – кількість її витків; l_1 і l_2 – довжини першої і другої частин осердя тороїда; μ_1 і μ_2 – магнітні проникності речовин першої і другої частин осердя тороїда; μ_0 – магнітна стала;

б) напруженість магнітного поля на осьовій лінії тороїда в першій і другій частинах осердя

$$H_1 = \frac{B}{\mu_1\mu_0},\ H_2 = \frac{B}{\mu_2\mu_0};$$

в) магнітний потік в осерді тороїда

$$\Phi = \frac{IN}{l_1/(\mu_1\mu_0 S) + l_2/(\mu_2\mu_0 S)}.$$

13.12 Магнітна проникність μ магнетика пов’язана з магнітною індукцією $\vec{B}$ поля в ньому і напруженістю $\vec{H}$ зовнішнього поля співвідношенням

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

Зв'язок індукції B **магнітного поля у феромагнетику та напруженістю поля** H **,** яке його намагнічує, наведений на графіку (рис.2).

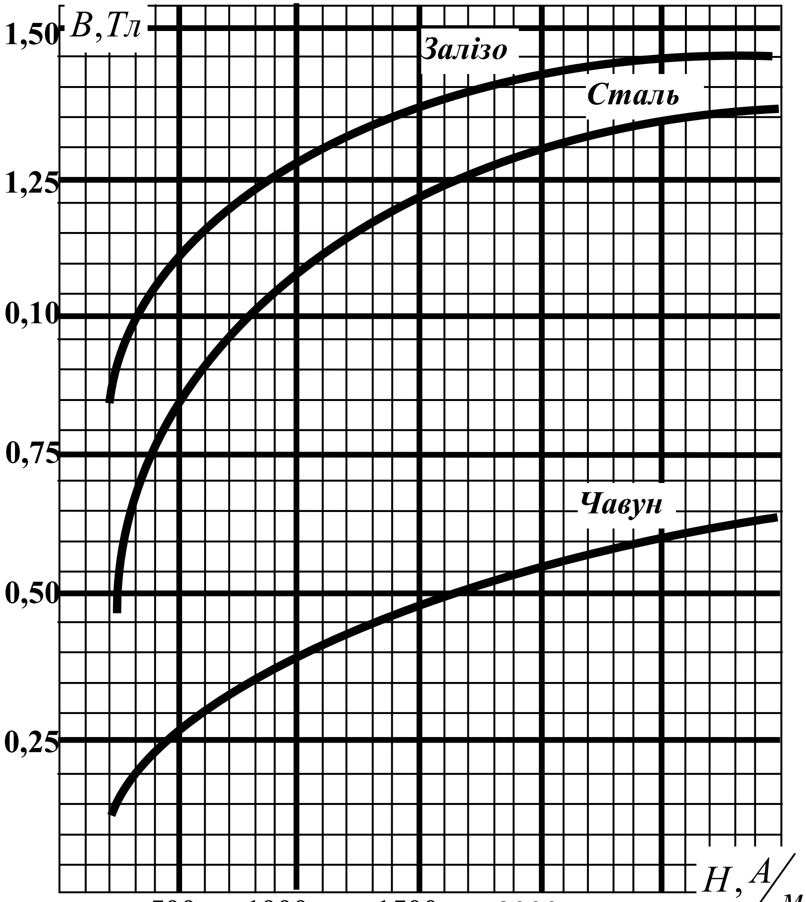

Рисунок 2

ПРИКЛАДИ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 13.1 По відрізку прямого дроту довжиною $l = 80\,см$ проходить струм силою $I = 50\,A$. Визначити магнітну індукцію B поля, що створюється цим струмом, у точці A, яка рівновіддалена від кінців відрізка дроту і розміщена на відстані $r_0 = 30\,см$ від його середини (рис. 3).

Розв’язання

$B - ?$

$l = 8\,ñì = 0,08\,ì$,

$I = 50\,A$,

$r_0 = 30\,ñì = 0,3\,ì$.

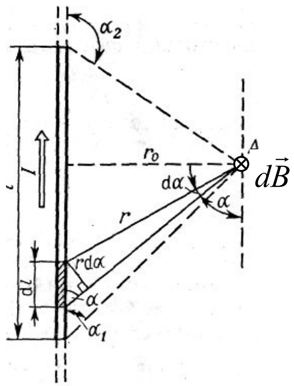

Рисунок 3

Для розв’язання задачі скористаємося законом Біо-Савара-Лапласа і принципом суперпозиції магнітних полів. Закон Біо-Савара-Лапласа дозволяє визначити магнітну індукцію dB, що створюється елементом струму Idl. Зазначимо, що вектор $d\vec{B}$ у точці А напрямлений за площину креслення. Принцип суперпозиції дозволяє для визначення B скористатися геометричним складанням (інтегруванням):

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}, \qquad (1)$$

де символ l означає, що інтегрування проводиться по всій довжині дроту.

Запишемо закон Біо-Савара-Лапласа у векторній формі

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

де dB - магнітна індукція, що створюється елементом дроту довжиною dl із струмом I у точці, визначеній радіусом-вектором $\vec{r}$; μ_0 - магнітна стала; μ – магнітна проникність середовища, в якому міститься дріт (у нашому випадку μ = 1, оскільки середовище - повітря). Спостерігаємо, що вектори dB від різних елементів струму співнапрямлені (рис. 3), тому вираз (1) можна переписати в скалярній формі:

$$B = \int_l dB, \qquad (2)$$

де

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

У скалярній формі закону Біо-Савара-Лапласа кут α - це кут між елементом струму $Id\vec{l}$ і радіусом - вектором $\vec{r}$. Таким чином:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{\sin\alpha}{r^2} \mathrm{d}l. \qquad (3)$$

Перетворимо підінтегральний вираз так, щоб у ньому була тільки одна змінна - кут α. Для цього виразимо довжину елемента дроту dl через кут $d\alpha$: $dl = \dfrac{r d\alpha}{\sin\alpha}$ (рис.3). Врахуємо також, що

$$r = \frac{r_0}{\sin\alpha}.$$

Тоді вираз (3) можна переписати у вигляді

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin\alpha \, \mathrm{d}\alpha,$$

де α_1 і α_2 - межі інтегрування. Виконаємо інтегрування:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0}\left(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\right). \qquad (4)$$

Простежуємо, що при симетричному розташуванні точки А відносно відрізка дроту $\cos\alpha_1 = -\cos\alpha_2$. З урахуванням цього формула (4) набуде вигляду

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0}\cos\alpha_1. \qquad (5)$$

Рисунок 3 показує, що

$$\cos\alpha_1 = \frac{l/2}{\sqrt{(l/2)^2 + r_0^2}} = \frac{l}{\sqrt{4r_0^2 + l^2}}.$$

Підставивши цей вираз у співвідношення (4), знайдемо:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0}\frac{l}{\sqrt{4r_0^2 + l^2}}.$$

Після підстановки у вираз числових значень фізичних величин отримаємо

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50}{2\pi \cdot 0{,}3} \cdot \frac{0{,}8}{\sqrt{4 \cdot (0{,}3)^2 + (0{,}8)^2}} = 26{,}7\ 10^{-6}\ (Тл).$$

Напрямок вектора магнітної індукції поля, що створене прямим струмом, можна визначити за правилом свердлика (правилом правого гвинта).

Перевіримо розмірність отриманої величини:

$$\frac{[\mu_0][I][l]}{[r^3]} = \frac{1Гн \cdot 1А \cdot 1м}{1м^3} = \frac{1Гн \cdot 1А^2}{1А \cdot 1м^2} = \frac{1Дж}{1А \cdot 1м^2} =$$

$$= \frac{1Н \cdot 1м}{1А \cdot 1м^2} = 1\,Тл.$$

Тут ми скористалися визначенням магнітної індукції

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

Тоді

$$1\text{Тл}=\frac{1H\cdot 1м}{1A\cdot 1м^2}.$$

Відповідь $B = 26,7\cdot 10^{-6}\,Тл$**.**

Приклад 13.2 По тонкому провідному кільцю радіусом $R = 10\,см$ проходить струм $I = 80\,A$. Знайти магнітну індукцію B у точці А, рівновіддаленій від усіх точок кільця на відстань $r = 20\,см$.

$B - ?$

$R = 10$ ñì $= 0,1$ ì ,

$I = 80\,A,$

$r = 20$ ñì $= 0,2$ ì .

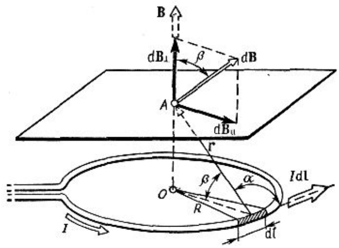

Рисунок 4

Розв'язання

Для розв'язання задачі скористаємося законом Біо-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I[d\vec{l}\cdot\vec{r}]}{r^3}, \tag{1}$$

де $d\vec{B}$ - магнітна індукція поля, створеного елементом струму $Id\vec{l}$ в точці, що визначена радіусом-вектором $\vec{r}$.

Виділимо на кільці елемент *dl* і від нього в точку А проведемо радіус-вектор $\vec{r}$ (рис.3). Вектор $d\vec{B}$ направимо відповідно до правила свердлика перпендикулярно до вектора $\vec{r}$.

Згідно з принципом суперпозиції магнітних полів магнітна індукція $\vec{B}$ в точці А визначається інтегруванням:

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B},$$

де інтегрування проводиться по всіх елементах *dl* кільця.

Розкладемо вектор $d\vec{B}$ на дві складові: $d\vec{B}_\perp$, перпендикулярну до площини кільця, і $d\vec{B}_\parallel$, паралельну площині кільця, тобто

$$d\vec{B} = d\vec{B}_\perp + d\vec{B}_\parallel,$$

тоді

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}_\perp + \int_l d\vec{B}_\parallel .$$

З міркувань симетрії простежується, що $\int_l d\vec{B}_\parallel = 0$, оскільки індукція створена симетричними елементами, компенсується. Одночасно вектори $d\vec{B}_\perp$ від різних елементів dl співнапрямлені, в результаті векторне додавання (інтегрування) можна замінити скалярним:

$$B = \int_l dB_\perp ,$$

де $dB_\perp = dB\cos\beta$, а $dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl}{r^2}$ (оскільки елемент $d\vec{l}$ перпендикулярний до $\vec{r}$, $\sin\alpha = 1$). Таким чином:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{r^2}\cos\beta\int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I\cos\beta\cdot 2\pi R}{4\pi r^2}. \qquad (2)$$

У цьому співвідношенні врахуємо, що $\cos\beta = \frac{R}{r}$, та проведемо скорочення:

$$B = \frac{\mu_0}{2}\frac{IR^2}{r^3}. \qquad (3)$$

Виразимо всі фізичні величини у (3) в одиницях СІ і проведемо обчислення:

$$B = \frac{4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 80\cdot (0{,}1)^2}{2\cdot (0{,}2)^3} = 6{,}28\cdot 10^{-5}\ (Тл).$$

Вектор $\vec{B}$ напрямлений по осі кільця (пунктирна стрілка на рис.3) відповідно до правила свердлика.

Перевіримо розмірність отриманої величини:

$$\frac{[\mu_0][I][R^2]}{[r^3]}=\frac{1Гн\cdot 1А\cdot 1м^2}{м\cdot 1м^3}=\frac{1Гн\cdot 1А^2}{1А\cdot 1м^2}=\frac{1Дж}{1А\cdot 1м^2}=$$

$$=\frac{1Н\cdot 1м}{1А\cdot 1м^2}=1\ Тл.$$

Відповідь: B =6,28·10^{-5} Тл.

Приклад 13.3 Два нескінченно довгих дроти схрещені під прямим кутом (рис.5). По дротах проходять струми $I_1 = 80\,А$ та $I_2 = 60\,А$. Відстань між дротами дорівнює $d = 10\,см$. Визначити магнітну індукцію $\vec{B}$ в точці А, однаково віддаленій від обох дротів.

Розв'язання

$B-?$
$I_1 = 80\,А,$ $I_2 = 60\,А,$ $d = 10\,ñì = 0,1\,ì$.

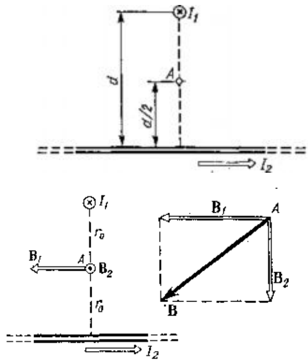

Рисунок 5

Відповідно до принципу суперпозиції магнітних полів магнітна індукція $\vec{B}$ поля, створеного струмами I_1 і I_2 в точці А, визначається векторною сумою полів, створених кожним струмом окремо $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.

Врахуємо, що вектори $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ взаємно перпендикулярні (їх напрями знаходяться за правилом свердлика і зображені в двох проекціях на рис.5). Тоді модуль вектора $\vec{B}$ можна визначити за теоремою Піфагора:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}\,, \tag{1}$$

де $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ визначаються за формулами розрахунку магнітної індукції для нескінченно довгого прямолінійного дроту із струмом:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_0} \text{ і } B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_0}\,. \tag{2}$$

У нашому випадку $r_0 = \frac{d}{2}$. Тоді, підставивши співвідношення (2) у (3), одержимо

$$B = \frac{\mu_0}{\pi d}\sqrt{I_1^2 + I_2^2}\,. \tag{3}$$

Проведемо обчислення:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot 10^{-1}}\sqrt{80^2 + 60^2} = 4 \cdot 10^{-4} \ (Тл).$$

Перевіримо розмірність отриманої величини:

$$\frac{[\mu_0][I]}{[r]} = \frac{1Гн \cdot 1А}{м \cdot 1м} = \frac{1Гн \cdot 1А^2}{1А \cdot 1м^2} = \frac{1Дж}{1А \cdot 1м^2} = \frac{1Н \cdot 1м}{1А \cdot 1м^2} = 1\ Тл\,.$$

Відповідь: $B = 4 \cdot 10^{-4}$ Тл.

Приклад 13.4 Стрижень довжиною $l = 10\,см$ заряджений рівномірно розподіленим зарядом з лінійною густиною $\tau = 0,2\,ì\ êÊë/ì$. Стрижень обертається з частотою $\nu = 20\,c^{-1}$ відносно осі, що перпендикулярна до нього, і проходить через його кінець (рис. 6). Визначити магнітний момент p_m, обумовлений обертанням стрижня.

Розв’язання

$p_m - ?$

$\tau = 0,2\,ì\ êÊë/ì$,
$l = 10\,\tilde{n}ì\ = 0,1\,ì$,
$\nu = 20\,c^{-1}$.

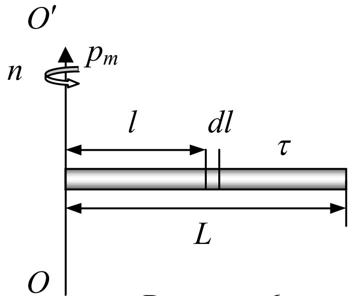

Рисунок 6

Виділимо на стрижні елемент довжиною dl (рис.6), його заряд дорівнює $dq = \tau dl$. При обертанні стрижня відносно осі OO' цей заряд обумовлює струм:

$$dI = \frac{dq}{T} = dq \cdot \nu\,, \tag{1}$$

де T - період обертання стрижня; ν - частота обертання.

Магнітний момент, що створюється струмом dI , за визначенням дорівнює

$$dp_m = SdI\,, \tag{2}$$

де площу контуру S можна знайти із співвідношення

$$S = \pi l^2 . \tag{3}$$

Підставимо співвідношення (1) і (3) в (2), тоді знайдемо

$$dp_m = \pi l^2 \cdot \nu dq = \pi l^2 \nu \tau dl \, .$$

Проінтегруємо даний вираз за довжиною стрижня L

$$p_m = \int_0^L \pi l^2 \nu \tau dl = \pi \nu \tau \int_0^L l^2 dl = \pi \nu \tau \frac{l^3}{3} \quad = \frac{1}{3} \pi \nu \tau L^3 . \tag{4}$$

Підставивши числові значення фізичних величин у співвідношення (4), отримаємо відповідь

$$p_m = 1/3 \cdot 3{,}14 \cdot 20 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot \left(0{,}1\right)^3 \quad = 4{,}2 \cdot 10^{-9} \left(\grave{A} \cdot \grave{\imath}^{\,2} \right).$$

Перевіримо розмірність отриманої величини:

$$[\nu][\tau][L^3] = 1\frac{1}{c} \cdot 1\frac{Кл}{м} \cdot 1 м^3 = A \cdot м^2 .$$

Відповідь: $p_m = 4{,}2 \cdot 10^{-9} \, A \cdot м^2$.

Приклад 13.5 Диск радіусом $R = 8\, см$ несе рівномірно розподілений по поверхні заряд $\sigma = 100\, нКл / м^2$ (рис.7). Визначити магнітний момент p_m, обумовлений обертанням диска відносно осі, що проходить через його центр і перпендикулярна до площини диска. Кутова швидкість обертання диска $\omega = 60 \; рад / c$.

Розв'язання

$p_m - ?$

$\sigma = 100\,í\,Êë/ì^{\,2}$,
$R = 8\,\tilde{n}ì\; = 0{,}08\,ì$,
$\omega = 60\; ðàä/c$.

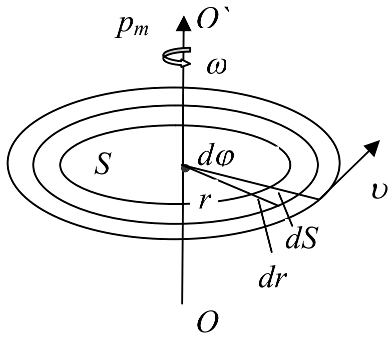

Рисунок 7

Для знаходження магнітного моменту диска зобразимо його у вигляді сукупності тонких кілець шириною $d\vec{r}$ (рис. 7).

Виділимо на диску елемент площі $dS = rd\varphi \cdot dr$ із зарядом dq

$$dq = \sigma dS = \sigma r d\varphi dr\,. \tag{1}$$

При обертанні диска відбувається переміщення електричних зарядів. Сила струму, що відповідає даному руху, визначається співвідношенням

$$dI = \frac{dq}{dt}\,. \tag{2}$$

З урахуванням рівняння (1) отримаємо

$$dI = \frac{\sigma r d\varphi dr}{dt}\,. \tag{3}$$

Магнітний момент даного струму визначається співвідношенням

$$dp_m = SdI\,, \qquad (4)$$

де площа контуру дорівнює $S = \pi r^2$.

Після підстановки виразів (2) і (3) в (4) та урахування того, що за визначенням $\dfrac{d\varphi}{dt} = \omega$, отримаємо

$$dp_m = \pi r^2 \frac{\sigma r dr d\varphi}{dt} = \pi r^2 \sigma r dr \omega\,. \qquad (5)$$

Повний магнітний момент диска буде дорівнювати сумі (інтегралу) векторів $d\vec{p}_m$. Оскільки ці вектори мають однаковий напрям, векторну суму можна замінити скалярною. Після інтегрування (5) одержимо

$$p_m = \int_0^R \pi r^2 \sigma r dr \omega = \pi\sigma\omega \int_0^R r^3 dr = \frac{\pi\sigma r^4}{4}\omega \quad = \frac{\pi\sigma R^4 \omega}{4}\,. \qquad (6)$$

Підставивши числові значення фізичних величин, знайдемо відповідь

$$p_m = \frac{3{,}14\cdot 10^{-6}\cdot\left(8\cdot 10^{-2}\right)^4\cdot 60}{4} = 1{,}93\cdot 10^{-9}\left(\grave{A}\cdot \grave{\imath}^{\,2}\right).$$

Перевіримо розмірність отриманої величини:

$$[\sigma][R^4][\omega] = 1\frac{Кл}{м^2}\cdot 1м^4\cdot 1\frac{рад}{с} = А\cdot м^2\,.$$

Відповідь: $p_m = 1{,}93\cdot 10^{-9}\ А\cdot м^2$.

Приклад 13.6 Чавунне кільце має повітряний зазор, довжина якого $l_0 = 5\,мм$. Довжина середньої лінії кільця $l = 1\,м$. Скільки витків N містить обмотка на кільці, якщо при силі струму $I = 4\,A$ індукція магнітного поля дорівнює $B = 0,5\,Тл$?

Розв’язання

$N - ?$

$l_0 = 5\,\text{ìì} \quad 5\cdot 10^{-3}\,\text{ì}$,
$l = 1\,\text{ì}$,
$B = 0,5\,\text{Òë}$,
$I = 4\,A$.

Нехтуючи розсіюванням магнітного потоку, можна вважати, що індукція поля у повітряному зазорі дорівнює індукції поля у чавуні. Скористаємося законом повного струму

$$\oint H_l dl = I\ .$$

У нашому випадку закон повного струму набере вигляду

$$IN = Hl + H_0 l_0\,,$$

де H - напруженість поля у кільці; H_0 - напруженість поля у повітряному зазорі; l і l_0 - довжини середньої лінії кільця і зазору.

За графіком (рис.2) знаходимо, що при $B = 0,5\,Тл$ напруженість магнітного поля у чавуні дорівнює $H = 1,2\,\text{êÀ}/\text{ì}$. Оскільки для повітря $\mu = 1$, то напруженість поля у повітряному зазорі

$$\text{Í}_0 = \frac{\hat{\text{À}}}{\mu_0} = 0,4\,\text{ÌÀ}/\text{ì}\ .$$

Тоді кількість витків

$$N = \frac{Hl + H_0 l_0}{I} = 800 .$$

Відповідь: $N = 800$.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

13.1 Нескінченно довгий дріт із струмом $I = 100\,A$ зігнутий так, як це показано на рис. 8. Визначити магнітну індукцію B у точці О. Радіус дуги $R = 10\,см$.

Відповідь: $B = 357$ мкТл.

13.2 По нескінченно довгому дроту, зігнутому так, як це показано на рис. 9, проходить струм $I = 200\,A$. Визначити магнітну індукцію B у точці О. Радіус дуги $R = 10\,см$.

Відповідь: $B = 0{,}5$ мТл.

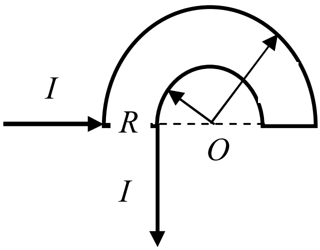

Рисунок 8

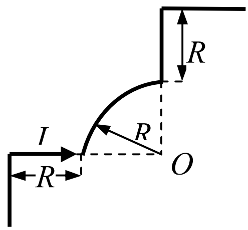

Рисунок 9

13.3 По контуру у вигляді квадрата проходить струм силою $I = 50\,A$. Довжина сторони квадрата дорівнює a=20 см. Визначити магнітну індукцію B у точці перетину діагоналей.

Відповідь: $B = 282$ мкТл.

13.4 Нескінченно довгий дріт із струмом $I = 50\,A$ зігнутий так, як це показано на рис. 10. Визначити магнітну індукцію B у точці А, що лежить на бісектрисі прямого кута на відстані

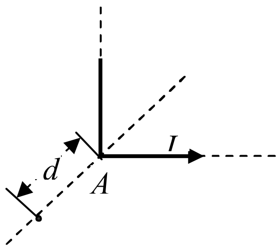

Рисунок 10

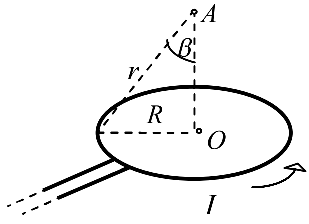

Рисунок 11

$d = 10\,см$ від його вершини.

Відповідь: $B = 41$ мкТл.

13.5 По тонкому кільцю радіусом $R = 20\,см$ проходить струм $I = 100\,A$. Визначити магнітну індукцію *B* на осі кільця в точці *A* (рис. 11). Кут $\beta = \dfrac{\pi}{3}$.

Відповідь: $B = 0{,}2$ мТл.

13.6 Визначити магнітну індукцію *B* на осі тонкого дротяного кільця радіусом $R = 10\,см$, у точці, розміщеній на відстані $d = 20\,см$ від центра кільця, якщо при проходженні струму по кільцю в центрі кільця індукція B_0 = 50 мкТл.

Відповідь: $B = 4{,}47$ мкТл.

13.7 Круговий виток радіусом $R = 15\,см$ зорієнтований так, що перпендикуляр, проведений до дроту з центра витка, є нормаллю до площини витка. Сила струму в дроті $I_1 = 1\,A$, сила струму у витку $I_2 = 5\,A$. Відстань від центра витка до дроту $d = 20\,см$. Визначити магнітну індукцію в центрі витка.

Відповідь: $B = 6{,}68$ мкТл.

13.8 По нескінченно довгому дроту, зігнутому так, як це показано на рис. 12, проходить струм $I = 200\,A$. Визначити магнітну індукцію B у точці O. Радіус дуги $R = 10\,см$.

Відповідь: $B = 0{,}88$ мТл.

13.9 По двох нескінченно довгих дротах, схрещених під прямим кутом, проходять струми I_1 і $I_2 = 2I_1$ $\left(I_1 = 100\,A\right)$. Визначити магнітну індукцію B у точці A, яка рівновіддалена від дротів на відстань $d = 10\,см$ (рис. 13).

Відповідь: $B = 280$ мкТл.

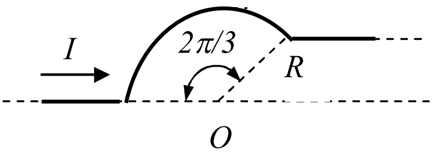

Рисунок 12

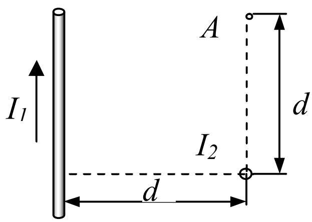

Рисунок 13

13.10 По тонкому кільцю проходить струм $I = 80\,A$. Визначити магнітну індукцію B у точці A, рівновіддаленій від точок кільця на відстань $r = 10\,см$. Кут $\alpha = \pi/6$.

Відповідь: $B = 126$ мкТл.

13.11 По двох нескінченно довгих прямих паралельних дротах проходять однакові струми $I = 60\,A$. Визначити магнітну індукцію B у точці A (рис. 14), що рівновіддалена від дротів на відстань $d = 10\,см$. Кут $\beta = \dfrac{\pi}{3}$.

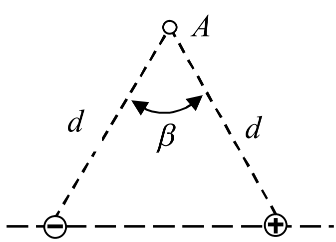

Рисунок 14

Відповідь: $B = 120$ мкТл.

13.12 По нескінченно довгому прямому дроту, зігнутому під кутом $\alpha = 120^0$, проходить струм силою $I = 50\,A$. Знайти магнітну індукцію *B* в точках, що лежать на бісектрисі кута і віддалені від його вершини на відстань $a = 5\,см$.

Відповідь: $B_1 = 120$ мкТл; $B_2 = 350$ мкТл.

13.13 По двох нескінченно довгих прямих паралельних дротах, що містяться на відстані $a = 10\,см$ один від одного у вакуумі, проходять струми $I_1 = 20\,A$ і $I_2 = 30\,A$ однакового напряму. Визначити магнітну індукцію поля, що створюється струмами в точках, які лежать на прямій, що з'єднує обидва дроти, якщо: а) точка А лежить на відстані $r_1 = 2\,см$ лівіше лівого дроту; б) точка В лежить на відстані $r_2 = 3\,см$ правіше правого дроту; в) точка С лежить на відстані $r_3 = 4\,см$ правіше лівого дроту.

Відповідь: B_A = 0,25 мТл; B_B = 0,23 мТл; B_C = 0.

13.14 По двох нескінченно довгих прямих паралельних провідниках, відстань між якими $d = 15\,см$, проходять струми $I_1 = 70\,A$ і $I_2 = 50\,A$ у протилежних напрямах. Визначити магнітну індукцію *B* у точці, віддаленій на $r_1 = 20\,см$ від першого провідника і на $r_2 = 30\,см$ від другого.

Відповідь: $B = 142{,}8$ мкТл.

13.15 Визначити магнітну індукцію в центрі кругового витка з дроту радіусом $R = 10\,см$, по якому проходить струм $I = 1\,A$.

Відповідь: $B = 6{,}28$ мкТл.

13.16 По поверхні диска радіусом $R = 15\,см$ рівномірно розподілений заряд $q = 0{,}2\,мкКл$. Диск обертається з кутовою швидкістю $\omega = 30\ ðàä/c$ відносно осі, яка перпендикулярна до площини диска і проходить через його центр. Визначити магнітний момент p_m, обумовлений обертанням диска.

Відповідь: $p_m = 34$ нА·м^2.

13.17 Визначити циркуляцію вектора індукції магнітного поля вздовж контура, який охоплює струми $I_1 = 10\,A$ і $I_2 = 15\,A$, що йдуть в одному напрямку, та струм $I_3 = 20\,A$, що йде у протилежному напрямку.

Відповідь: $\oint B_l dl = 6{,}28\,мкТл \cdot м$.

13.18 За перерізом провідника рівномірно розподілений струм, густина якого складає $j = 2\,Ì\;À/ì^{2}$. Знайти циркуляцію вектора напруженості вздовж кола радіусом $R = 5\,мм$, яке проведено всередині провідника та зорієнтовано так, що його площина складає кут $\alpha = 30^0$ з вектором густини струму.

Відповідь: $\oint H_l dl = 78{,}6\,A$.

13.19 Знайти магнітний потік Φ, що створюється соленоїдом з площею перерізу $S = 10\,см^2$, якщо він містить $n = 10$ витків на кожний сантиметр його довжини. Сила струму у соленоїді $I = 20\,A$.

Відповідь: $\Phi = 25{,}2\,мкВб$.

13.20 Плоский контур, площа якого дорівнює $S = 25\,см^2$, перебуває в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0{,}04\,Тл$. Визначити магнітний потік Φ, який пронизує контур за умови, що його площина складає кут $\alpha = 30^0$ з лініями індукції магнітного поля.

Відповідь: $\Phi = 50\,мкВб$.

13.21 Соленоїд, довжина якого $l = 1\,м$ і площа поперечного перерізу $S = 16\,см^2$, містить $N = 2000$ витків. Визначити потокозчеплення Ψ за умови, що струм в обмотці соленоїда складає $I = 10\,A$.

Відповідь: $\Psi \quad 80,5\, мкВб \times виток$.

13.22 В одній площині з довгим прямим провідником, по якому йде струм $I = 50\,A$, міститься прямокутна рамка так, що її більші сторони довжиною $l = 65\,см$ паралельні провіднику, а відстань від провідника до найближчої з цих сторін дорівнює її ширині. Знайти магнітний потік, що пронизує рамку.

Відповідь: $\Phi = 4,5\, мкВб$.

13.23 Визначити індукцію B і напруженість H магнітного поля на осі тороїда без осердя, обмотка якого містить $N = 200$ витків. Струм у обмотці $I = 5\,A$. Зовнішній діаметр тороїда дорівнює $d_1 = 30\,см$, внутрішній - $d_2 = 20\,см$.

Відповідь: $H = 1,37\, êÀ/ì$; $B = 1,6\, мТл$.

13.24 На залізне кільце намотано в один шар $N = 500$ витків дроту. Середній діаметр кільця дорівнює $d = 25\,см$. Визначити магнітну індукцію B в залізі та магнітну проникність μ заліза, за умови, що сила струму в обмотці складає: а) $I = 0,5\,A$; б) $I = 2,5\,A$.

Примітка. *Для визначення магнітної проникності скористатися графіком (рис.2)*

Відповідь: а) $B = 1\,Тл$, $\mu = 2,5 \cdot 10^3$; б) $B = 1,4\,Тл$, $\mu = 700$.

13.25 Замкнутий соленоїд (тороїд) із стальним осереддям містить $n = 10$ витків на кожний сантиметр довжини. По соленоїду йде струм, сила якого складає $I = 2\,A$. Визначити магнітний потік у осерді, якщо площа його перерізу $S = 4\,см^2$.

Примітка. *Для визначення магнітної проникності скористатися графіком (рис.2)*

Відповідь: $\Phi = 0,52\, мВб$.