

14 СИЛА ЛОРЕНЦА ТА СИЛА АМПЕРА. КОНТУР ІЗ СТРУМОМ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

ЗВЕДЕННЯ ОСНОВНИХ ФОРМУЛ

14.1 Сила Ампера

$$d\vec{F} = [d\vec{l}, \vec{B}] I ,$$

де I – сила струму; $d\vec{l}$ – вектор, який дорівнює за модулем довжині dl елемента провідника і збігається за напрямком зі струмом; \vec{B} – магнітна індукція поля.

Модуль сили Ампера

$$dF = B I dl \sin \alpha ,$$

де α – кут між векторами $d\vec{l}$ і \vec{B} .

14.2 Сила взаємодії двох прямих нескінченно довгих паралельних провідників зі струмами I_1 і I_2 , які розміщені на відстані d один від одного, що діє на відрізок провідника довжиною l , визначається за формулою

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

14.3 Магнітний момент контуру зі струмом

$$\vec{p}_m = I \vec{S} ,$$

де \vec{S} – вектор, який дорівнює за модулем площі S , яку охоплює контур, і збігається за напрямком з нормаллю до його площини.

14.4 Механічний момент, який діє на контур зі струмом, розміщений в однорідному магнітному полі:

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

Модуль механічного моменту

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

де α – кут між векторами \vec{p}_m і \vec{B} .

14.5 Потенціальна енергія контура зі струмом в магнітному полі

$$W_n = \vec{p}_m \vec{B} = p_m B \cos \alpha.$$

14.6 Сила, яка діє на контур зі струмом в магнітному полі (змінному вздовж осі x):

$$F = p_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha,$$

де $\frac{\partial B}{\partial x}$ - зміна магнітної індукції вздовж осі x , розрахована на одиницю довжини; α - кут між векторами \vec{p}_m і \vec{B} .

14.7 Сила Лоренца \vec{F} , що діє на заряд q , який рухається зі швидкістю \vec{v} в магнітному полі з індукцією \vec{B} (сила), виражається формулою

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}].$$

Модуль сили Лоренца

$$F = qvB \sin \alpha ,$$

де α – кут, який утворений вектором швидкості \vec{v} руху частинки та вектором \vec{B} індукції магнітного поля.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 14.1 По трьом паралельним провідникам, які містяться на однаковій відстані $a = 10 \text{ см}$ один від одного йдуть однакові струми $I = 100 \text{ А}$. У двох провідниках напрямки струмів збігаються. Визначити силу F , що діє на відрізок довжини $l = 1 \text{ м}$ кожного провідника.

Розв'язання

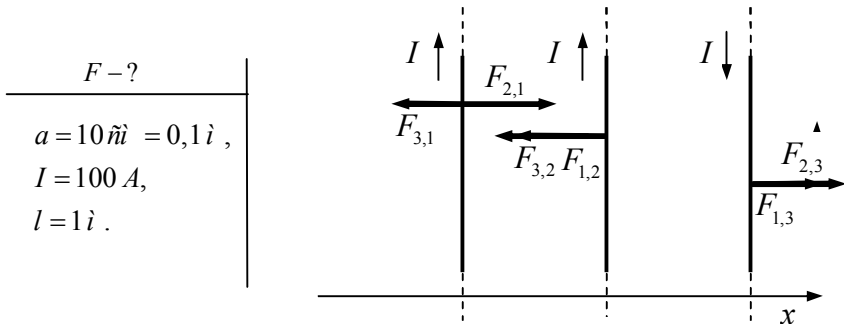


Рисунок 1

Сила взаємодії двох прямих нескінченно довгих паралельних провідників зі струмами I_1 і I_2 , які розміщені на відстані d один від одного, що діє на відрізок провідника довжиною l , визначається за формулою

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

де μ_0 - магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; μ - магнітна проникність середовища, у нашому випадку $\mu = 1$; d - відстань між провідниками.

На кожен із провідників у нашій задачі діють по дві сили так, як зображено на рис.1. Запишемо вирази для модуля кожної із цих сил враховуючи, що згідно з умовою задачі $I_1 = I_2 = I_3 = I$:

$$F_{2,1} = F_{1,2} = F_{3,2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{a} l, \quad F_{3,1} = F_{1,3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{2a} l.$$

Тоді сила, яка діє на перший провідник

$$F_1 = F_{2,1} - F_{3,1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{a} l - \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{2a} l = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{2a} l; \quad (1)$$

- на другий

$$F_2 = -F_{1,2} - F_{3,2} = -2 \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{a} l; \quad (2)$$

- на третій

$$F_3 = F_{1,3} - F_{2,3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{2a} l + \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{2a} l = 3 \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{2a} l. \quad (3)$$

Тут ми врахували, що струми, які йдуть в одному напрямку притягуються, а в протилежних – відштовхуються.

Виразимо числові значення величин в одиницях СІ і під-

ставимо у співвідношення (1), (2), (3):

$$F_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{100^2}{2 \cdot 0,1} l = 0,01(H),$$

$$F_2 = -2 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{100^2}{0,1} l = -0,04(H),$$

$$F_3 = 3 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{100^2}{2 \cdot 0,1} l = 0,03(H).$$

Перевіримо розмірність отриманої величини:

$$\begin{aligned} [\mu_0] \frac{[I^2]}{[a]} [l] &= \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot \frac{\text{А}^2}{\text{м}} \cdot \text{м} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} \cdot \frac{\text{А}^2}{\text{м}} = \\ &= \text{Тл} \cdot \text{м}^2 \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \text{А} \cdot \text{м} = \text{Н}. \end{aligned}$$

Відповідь: $F_1 = 0,01H$; $F_2 = -0,04H$; $F_3 = 0,03H$.

Приклад 14.2 Плоский квадратний контур (рис.2) із стороною $a = 10\text{см}$, по якому тече струм $I = 100\text{А}$, вільно встановився в однорідному магнітному полі ($B = 1\text{Тл}$). Визначити роботу A , яка виконується зовнішніми силами при повороті контуру відносно осі, що проходить через середину його протилежних сторін, на кут $\varphi_1 = 90^\circ$. При повороті контуру сила струму, що підтримується в ньому, не змінюється.

Розв'язання

$A - ?$
$a = 10 \text{ м} = 0,1 \text{ м}$
$B = 1 \text{ Тл}$
$I = 100 \text{ А}$
$\varphi_1 = 90^\circ$

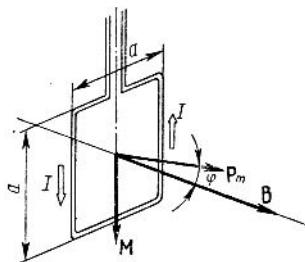


Рисунок 2

Як відомо, на контур із струмом у магнітному полі діє момент сили (рис.2)

$$M = p_m B \sin \varphi, \quad (1)$$

де $p_m = IS = Ia^2$ - магнітний момент контуру; B - магнітна індукція; φ - кут між векторами \vec{p}_m (який направлений по нормалі до контуру) і \vec{B} .

За умовою задачі в початковому положенні контур вільно встановився в магнітному полі. При цьому момент сили дорівнює нулю ($M=0$), а, отже, $\varphi = 0$, тобто вектори \vec{p}_m і \vec{B} співнаправлені. Якщо зовнішні сили виведуть контур з положення рівноваги, то момент сил, що виникне (див. рис.2), прагнучим повернути контур у початкове положення. Проти цього моменту і здійснюється робота зовнішніми силами. Оскільки момент сил є змінним (залежить від кута повороту φ), то для розрахунку роботи застосуємо формулу роботи в диференціальній формі

$$dA = Md\varphi.$$

Тоді

$$dA = IBa^2 \sin \varphi d\varphi . \quad (2)$$

Взявши інтеграл від виразу (2), знайдемо роботу при повороті рамки на кінцевий кут:

$$A = IBa^2 \int_0^{\varphi} \sin \varphi d\varphi . \quad (3)$$

Робота при повороті на кут $\varphi_1 = 90^0$ дорівнює

$$A_1 = IBa^2 \int_0^{\pi/2} \sin \varphi d\varphi = IBa^2 (-\cos \varphi) \Big|_0^{\pi/2} = IBa^2 . \quad (4)$$

Виразимо числові значення величин в одиницях СІ і підставимо в (4):

$$A_1 = 100 \cdot 1 \cdot (0,1)^2 = 1 \text{ (Дж)}.$$

Перевіримо розмірність отриманої величини:

$$[I][B][a] = 1A \cdot 1\overset{\cdot}{C}\overset{\cdot}{e} \cdot 1\overset{\cdot}{i} \overset{2}{=} 1A \cdot \frac{1\overset{\cdot}{I}}{1\overset{\cdot}{A} \cdot 1\overset{\cdot}{i}} \cdot 1\overset{\cdot}{i} \overset{2}{=} 1\overset{\cdot}{I} \cdot 1\overset{\cdot}{i} = 1\overset{\cdot}{A}\overset{\cdot}{e} .$$

Відповідь: $A_1 = 1 \text{ Дж}$.

Приклад 14.3 Протон, що пройшов прискорювальну різницю потенціалів $U = 600 \text{ В}$, влетів в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 0,3 \text{ Тл}$ і почав рухатися по колу (рис. 3). Визначити радіус R кола.

Розв'язання

$R - ?$
$U = 600 \text{ В},$
$B = 0,3 \text{ Тл}.$

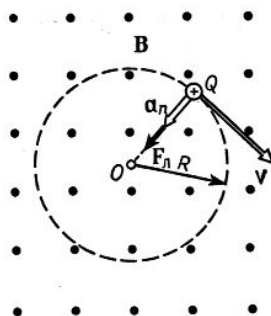


Рисунок 3

Рух зарядженої частинки в однорідному магнітному полі буде відбуватися по колу (рис. 3) тільки у тому випадку, коли частинка влетить в магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції, тобто $\vec{v} \perp \vec{B}$.

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна до вектора \vec{v} , то вона надасть частинці (протону) нормального прискорення a_n . Згідно з другим законом Ньютона

$$\vec{F}_L = m\vec{a}_n, \quad (1)$$

де m - маса протона.

На рис. 3 траєкторія протона суміщена з площиною креслення і вказаний (довільно) напрям вектора \vec{v} . Силу Лоренца спрямуємо перпендикулярно до вектора \vec{v} до центра кола (век-

тори \vec{a}_n і \vec{F}_L співнапрямлені). Використовуючи правило лівої руки, визначимо напрям магнітних силових ліній (напрямок вектора \vec{B}).

Перепишемо вираз (1) у скалярній формі (в проекції на напрямок радіуса):

$$F_n = ma_n. \quad (2)$$

Модуль сили Лоренца дорівнює $F = qvB \sin \alpha$. У нашому випадку $\vec{v} \perp \vec{B}$ і $\sin \alpha = 1$, тоді $F = qvB$. Оскільки нормальне прискорення $a_n = \frac{v^2}{R}$, то співвідношення (2) набуде вигляду

$$qvB = \frac{mv^2}{R}.$$

Звідси знайдемо радіус кола:

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (3)$$

Зазначимо, що $mv = p$, де p - імпульс протона, тому вираз (3) можна записати у вигляді

$$R = \frac{p}{qB}. \quad (4)$$

Імпульс протона знайдемо, скориставшись зв'язком між роботою сил електричного поля і зміною кінетичної енергії протона, тобто $A = \Delta W_K$, або

$$q(\varphi_1 - \varphi_2) = W_{K2} - W_{K1},$$

де $\varphi_1 - \varphi_2$ - прискорювальна різниця потенціалів (або прискорювальна напруга U); W_{K2}, W_{K1} - початкова і кінцева кінетичні енергії протона.

Нехтуючи початковою кінетичною енергією протона $W_{K1} \approx 0$ і виразивши кінетичну енергію W_{K2} через імпульс p , отримаємо

$$qU = \frac{p^2}{2m}.$$

Знайдемо з цього співвідношення імпульс протона $p = \sqrt{2mqU}$ і підставимо його у формулу (4):

$$R = \frac{\sqrt{2mqU}}{qB}.$$

Або

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}. \quad (5)$$

Підставивши у цей вираз числові значення фізичних величин, проведемо обчислення R :

$$R = \frac{1}{0,3} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 600}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 11,8 \text{ (мм)}.$$

Переконаємося в тому, що права частина рівності дає одиницю довжини:

$$\begin{aligned} \frac{1}{[B]} \sqrt{\frac{[m][U]}{[q]}} &= \frac{1}{1 \text{ Тл}} \sqrt{\frac{1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ В}}{1 \text{ Кл}}} = \frac{1}{1 \text{ Тл}} \sqrt{\frac{1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ Кл}}} = \\ &= \frac{1 \text{ А} \cdot \text{м}^2}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}} \sqrt{\frac{1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ с}^2}{1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м}^2}} = 1 \text{ м}. \end{aligned}$$

Відповідь: $R = 11,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Приклад 14.4 Електрон рухається в однорідному магнітному полі ($B = 10 \text{ мТл}$) по гвинтовій траєкторії, радіус якої дорівнює $R = 1 \text{ см}$ і крок $h = 6 \text{ см}$ (рис.3). Визначити період T обертання електрона і його швидкість v .

Розв'язання

$$T - ? \quad v - ?$$

$$B = 10 \text{ Тл} \quad \dot{\vec{e}} = 10^{-2} \dot{\vec{e}},$$

$$R = 1 \text{ нм} = 10^{-2} \text{ м},$$

$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \quad 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

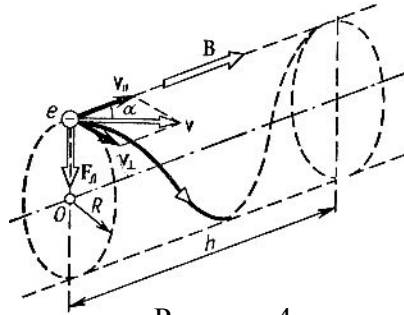


Рисунок 4

Електрон рухатиметься по гвинтовій траєкторії, якщо він влітає в однорідне магнітне поле під деяким кутом ($\alpha \neq \pi/2$) до ліній магнітної індукції. Розкладемо, як це показано на рис.4, швидкість \vec{v} електрона на дві складові: паралельну вектору \vec{B} (v_{\parallel}) і перпендикулярну до нього (v_{\perp}). Швидкість v_{\parallel} в магнітному полі не змінюється і забезпечує переміщення електрона вздовж силової лінії. Швидкість v_{\perp} внаслідок дії сили Лоренца буде змінюватися тільки за напрямом ($F_L \perp v_{\perp}$) (за відсутності паралельної складової ($v_{\parallel} = 0$) рух електрона відбувався б по колу в площині, перпендикулярній до магнітних силових ліній). Таким чином, електрон бере участь одночасно в двох рухах: рівномірному переміщенні із швидкістю v_{\parallel} і рівномірному русі по колу із швидкістю v_{\perp} .

Період обертання електрона пов'язаний з перпендикулярною складовою швидкості співвідношенням

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}}. \quad (1)$$

Знайдемо v_{\perp} . Для цього скористаємося тим, що сила Лоренца надає електрону нормального прискорення $a_n = \frac{v_{\perp}^2}{R}$. Згідно з другим законом Ньютона можна написати

$$F_L = ma_n$$

або

$$|e|v_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{R}, \quad (2)$$

де $v_{\perp} = v \sin \alpha$.

З цього співвідношення знайдемо v_{\perp} та підставимо у (1). Після простих перетворень отримаємо

$$T = 2\pi \frac{m}{|e|B}. \quad (3)$$

Модуль швидкості v , як це показано на рис.4, можна виразити через v_{\perp} , v_{\parallel} :

$$v = \sqrt{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2}.$$

Із співвідношення (2) виразимо перпендикулярну складову швидкості:

$$v_{\perp} = \frac{|e|BR}{m}.$$

Паралельну складову швидкості v_{\parallel} знайдемо у результаті таких міркувань: за час, який дорівнює періоду обертання T , електрон пройде вздовж силової лінії відстань, що дорівнює кроку гвинтової траєкторії, тобто $h = T v_{\parallel}$, звідки

$$v_{\parallel} = \frac{h}{T}.$$

Підставивши замість T праву частину співвідношення (3), отримуємо

$$v_{\parallel} = \frac{|e|BR}{2\pi m}.$$

Таким чином, модуль швидкості електрона дорівнює

$$v = \sqrt{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2} = \frac{|e|B}{m} \sqrt{R^2 + \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2}. \quad (4)$$

Проведемо обчислення періоду обертання та швидкості електрона:

$$T = \frac{2\pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-9} = 3,57 \text{ (нс)}.$$

$$v = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \left[0,01^2 + \left(\frac{0,06}{2\pi} \right)^2 \right] 2,46 \cdot 10^7 \text{ (і / с)}.$$

Переконаємося в тому, що права частина рівності (3) дає одиницю часу, s , а співвідношення (4) - одиницю швидкості, m/s .

$$\frac{[m]}{[e][B]} = \frac{1 \text{ кг}}{1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ Тл}} = \frac{1 \text{ кг} \cdot A \cdot m^2}{1 A \cdot c \cdot H \cdot m} = \frac{1 \text{ кг} \cdot c^2 \cdot m^2}{1 c \cdot \text{кг} \cdot m} = 1 c.$$

Оскільки R і h мають однакову одиницю вимірювання – метр, m , у квадратних дужках ми поставимо тільки одну з величин (наприклад, R):

$$\begin{aligned} \frac{[e][B]}{[m]} [R^2]^{1/2} &= \frac{1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ Тл}}{1 \text{ кг}} (m^2)^{1/2} = \frac{1 A \cdot c \cdot H \cdot m \cdot m}{\text{кг} \cdot A \cdot m^2} = \\ &= \frac{1 H \cdot c}{1 \text{ кг}} \frac{1 \text{ кг} \cdot m \cdot c}{1 \text{ кг} \cdot c^2} = 1 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Відповідь: $T = 3,57 \cdot 10^{-9} c$, $v = 2,46 \cdot 10^7 \text{ м/с}$.

Приклад 14.5 Альфа-частинка пройшла прискорювальну різницю потенціалів $U = 104 \text{ В}$ і влетіла в схрещені під прямим кутом електричне ($E=10 \text{ кВ/м}$) і магнітне ($B=0,1 \text{ Тл}$) поля. Знайти відношення заряду альфа-частинки до її маси, якщо, рухаючись перпендикулярно до обох полів, частинка не відхиляється від прямолінійної траєкторії (рис.5).

Розв'язання

$$\frac{q}{m} - ?$$

$$U = 104 \text{ В},$$

$$E = 10 \text{ кВ/м} = 10^4 \text{ В/м},$$

$$B = 0,1 \text{ Тл}.$$

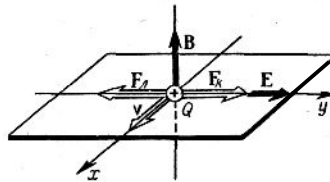


Рисунок 5

Для того щоб знайти відношення заряду q альфа-частинки до її маси m , скористаємося зв'язком між роботою сил електричного поля і зміною кінетичної енергії частинки:

$$qU = \frac{mv^2}{2}.$$

Звідки

$$\frac{q}{m} = \frac{v^2}{2U}. \tag{1}$$

Швидкість v альфа-частинки знайдемо після таких міркувань. У схрещених електричному і магнітному полях на заряджену частинку, що рухається, діють дві сили:

а) сила Лоренца $F_L = qvB$, спрямована перпендикулярно до швидкості \vec{v} і вектора магнітної індукції \vec{B} ;

б) кулонівська сила $F_K = qE$, співнапрявлена з вектором напруженості \vec{E} електростатичного поля ($q > 0$).

На рис.5 спрямуємо вектор магнітної індукції \vec{B} вздовж осі Oz , швидкість v - в позитивному напрямі осі Ox , тоді F_L і F_K будуть спрямовані так, як показано на рисунку.

Альфа-частинка рухається прямолінійно за умови, коли геометрична сума сил $F_L = F_K$ дорівнює нулю. В проекції на вісь Oy отримаємо таку рівність (при цьому враховано, що $\vec{v} \perp \vec{B}$ і $\sin \alpha = 1$):

$$qE - qvB = 0.$$

Звідки

$$v = \frac{E}{B}. \quad (2)$$

Підставивши цей вираз у формулу (1), отримаємо

$$\frac{q}{m} = \frac{E^2}{2UB^2}. \quad (3)$$

Проведемо обчислення:

$$\frac{q}{m} = \frac{(10^4)^2}{2 \cdot 104 \cdot 0,1^2} = 4,81 \cdot 10^7 = 48,1 (\dot{I} \hat{E}\ddot{e}/\hat{e}\ddot{a}).$$

Переконаємося в тому, що права частина рівності дає одиницю питомого заряду, Кл/кг :

$$\begin{aligned} \frac{[E^2]}{[U][B^2]} &= \frac{(1 \text{ В/м})^2}{1 \text{ В} \cdot (1 \text{ Тл})^2} = \frac{(1 \text{ В} \cdot \text{А})^2}{1 \text{ В} \cdot (1 \text{ Н})^2} = \frac{1 \text{ Дж} \cdot \text{Кл}}{(1 \text{ Н} \cdot \text{с})^2} \\ &= \frac{1 \text{ Кл} \cdot \text{м}}{1 \text{ Н} \cdot \text{с}^2} = 1 \text{ Кл/кг}. \end{aligned}$$

Відповідь: $\frac{q}{m} = 48,1 \dot{I} \hat{E}\ddot{e}/\hat{e}\ddot{a}.$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

14.1 У однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1 \text{ Тл}$ розміщена квадратна рамка площею $S = 25 \text{ см}^2$. Нормаль до площини рамки утворює з напрямом магнітного поля кут $\alpha = 60^\circ$. Визначити обертальний момент, що діє на рамку, якщо по ній проходить струм $I = 1 \text{ А}$.

Відповідь: $M = 217 \text{ мкН} \cdot \text{м}.$

14.2 Тонке провідне кільце із струмом $I = 40 \text{ А}$ розміщене в однорідному магнітному полі ($B = 80 \text{ мТл}$). Площина кільця пер-

пендикулярна до ліній магнітної індукції. Радіус кільця дорівнює $R = 20 \text{ см}$. Знайти силу F , що розтягує кільце.

Відповідь: $F = 0,64 \text{ мН}$.

14.3 У однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,5 \text{ Тл}$ розміщена прямокутна рамка довжиною $a = 8 \text{ см}$ і шириною $b = 5 \text{ см}$, що містить $N = 100$ витків тонкого дроту. Струм у рамці $I = 1 \text{ А}$, а площина рамки паралельна лініям магнітної індукції. Визначити: а) магнітний момент рамки; б) обертальний момент, що діє на рамку.

Відповідь: а) $p_m = 0,4 \text{ А} \cdot \text{м}^2$; б) $M = 0,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

14.4 У однорідному магнітному полі з індукцією $B = 1 \text{ Тл}$ розміщена квадратна рамка із стороною $a = 10 \text{ см}$, по якій проходить струм $I = 4 \text{ А}$. Площа рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції. Визначити роботу, яку необхідно витратити для повороту рамки відносно осі, що проходить через середини її протилежних сторін: а) на 90° , б) на 180° ; в) на 360° .

Відповідь: а) $A_1 = 0,04 \text{ Дж}$; б) $A_2 = 0,08 \text{ Дж}$; в) $A_3 = 0$.

14.5 Електрон, прискорений різницею потенціалів $U = 0,5 \text{ кВ}$, рухається паралельно прямолінійному довгому провіднику на відстані $r = 1 \text{ см}$ від нього. Визначити силу, що діє на електрон, якщо по провіднику проходить струм $I = 10 \text{ А}$.

Відповідь: $F = 4,24 \cdot 10^{-16} \text{ Н}$.

14.6 Тонке кільце масою $m = 10 \text{ г}$ і радіусом $R = 8 \text{ см}$ заряджене рівномірно з лінійною густиною $\tau = 10 \text{ нКл/м}$. Кільце рівномірно обертається з частотою $\nu = 15 \text{ с}^{-1}$ відносно осі, перпендикулярної до площини кільця, і проходить через його центр. Ви-

значити: а) магнітний момент кругового струму, що створюється кільцем; б) відношення магнітного моменту до моменту імпульсу кільця.

Відповідь: а) $p_m = 1,52 \text{ нА} \cdot \text{м}^2$; б) $\frac{p_m}{L} = 251 \text{ нКл/кг}$.

14.7 Два нескінченні прямолінійні паралельні провідники з однаковими струмами, що проходять в одному напрямі, розміщені один від одного на відстані R . Щоб їх розсунути до відстані $2R$, на кожен сантиметр довжини провідника витрачається робота $A = 138 \text{ нДж}$. Визначити силу струму в провідниках.

Відповідь: $I = 10 \text{ А}$.

14.8 Прямий провідник довжиною $l = 20 \text{ см}$ із струмом $I = 5 \text{ А}$ перебуває в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1 \text{ Тл}$. Він розміщений перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначити роботу сил поля, під дією яких провідник перемістився на $a = 2 \text{ см}$.

Відповідь: $A = 2 \text{ мДж}$.

14.9 Квадратний провідний контур із стороною $a = 20 \text{ см}$ і струмом $I = 10 \text{ А}$ вільно підвішений в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією $B = 0,2 \text{ Тл}$. Визначити роботу, яку необхідно виконати, щоб повернути контур на кут $\alpha = 180^\circ$ навколо осі, перпендикулярної до напрямку магнітного поля.

Відповідь: $A = 0,16 \text{ Дж}$.

14.10 У однорідному магнітному полі з магнітною індукцією $B = 1 \text{ Тл}$ розміщена плоска котушка з кількістю витків $N = 100$ і радіусом $r = 10 \text{ см}$, площа якої з напрямом поля утворює кут $\alpha = 60^\circ$. По котушці проходить струм $I = 10 \text{ А}$. Визначити: а) обертальний момент, що діє на котушку;

б) роботу, яка потрібна для видалення цієї котушки з магнітного поля.

Відповідь: а) $M = 15,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$; б) $A = 27,2 \text{ Дж}$.

14.11 Протон пройшов прискорювальну різницю потенціалів $U = 800 \text{ В}$ і, влетівши в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 47 \text{ мТл}$, став рухатися по гвинтовій лінії з кроком $h = 6 \text{ см}$. Визначити радіус R гвинтової лінії.

Відповідь: $R = 86 \text{ мм}$.

14.12 Заряджена частинка пройшла прискорювальну різницю потенціалів $U = 104 \text{ В}$ і влетіла в схрещені під прямим кутом електричне ($\hat{A} = 10 \hat{e}\hat{A}/\hat{i}$) і магнітне ($B = 0,1 \text{ Тл}$) поля. Знайти відношення $\frac{Q}{m}$ заряду частинки до її маси, якщо, рухаючись перпендикулярно до обох полів, вона має прямолінійну траєкторію.

Відповідь: $\frac{Q}{m} = 48 \hat{i} \hat{E}\hat{e}/\hat{e}\hat{a}$.

14.13 Електрон в атомі водню рухається навколо ядра по коловій орбіті деякого радіуса. Знайти відношення магнітного моменту p_m еквівалентного колового струму до моменту імпульсу L орбітального руху електрона. Заряд електрона і його масу вважати відомими. Визначити напрями векторів \vec{p}_m і \vec{L} .

Відповідь: $\frac{p_m}{L} = 4,8 \cdot 10^7 \text{ Кл/кг}$.

14.14 Альфа-частинка пройшла прискорювальну різницю потенціалів $U = 300 \text{ В}$ і, потрапивши в однорідне магнітне поле, стала рухатися по гвинтовій траєкторії радіусом $R = 1 \text{ см}$ і кроком $h = 4 \text{ см}$. Визначити магнітну індукцію B поля.

Відповідь: $B = 0,3 \text{ Тл}$.

14.15 Протон влітає із швидкістю $v = 100 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ у ділянку простору, де є електричне ($\vec{A} = 0,21 \hat{e} \hat{A} / \hat{i}$) і магнітне ($B = 3,3 \text{ мТл}$) поля. Напруженість E електричного поля і магнітна індукція B збігаються за напрямом. Визначити прискорення a протона для початкового моменту руху в полі, якщо напрям вектора його швидкості v : а) збігається із загальним напрямом векторів \vec{E} і \vec{B} ; б) перпендикулярний до цього напрямку.

Відповідь: а) $a_1 = 20,1 \text{ Гм/с}^2$; б) $a_2 = 37,5 \text{ Гм/с}^2$.

14.16 Два іони різних мас з однаковими зарядами влетіли в однорідне магнітне поле і почали рухатися по колах радіусами $R_1 = 3 \text{ см}$ і $R_2 = 1,73 \text{ см}$. Визначити відношення мас іонів, якщо вони пройшли однакову прискорювальну різницю потенціалів.

Відповідь: $\frac{m_1}{m_2} = 3$.

14.17 Альфа-частинка влетіла в схрещені під прямим кутом магнітне ($B = 5 \text{ мТл}$) і електричне ($\vec{A} = 30 \hat{e} \hat{A} / \hat{i}$) поля. Визначити прискорення a альфа-частинки, якщо її швидкість \vec{v} ($v = 2 \cdot 10^6 \hat{i} / \hat{n}$) перпендикулярна до векторів \vec{E} і \vec{B} , причому сили, що діють з боку цих полів, напрямлені протилежно.

Відповідь: $a_2 = 9,64 \cdot 10^{11} \hat{i} / \hat{n}^2$.

14.18 Протон рухається по колу радіусом $R = 0,5 \text{ см}$ з лінійною швидкістю $v = 10^6 \hat{i} / \hat{n}$. Визначити магнітний момент p_m , що створюється еквівалентним коловим струмом.

Відповідь: $p_m = 4 \cdot 10^{-16} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

14.19 Іон, потрапивши в магнітне поле ($B = 0,01 \text{ Тл}$), став рухатися по колу. Визначити кінетичну енергію W_K (в eB) іона, якщо магнітний момент еквівалентного колового струму дорівнює $p_m = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

Відповідь: $W_K = 1 \text{ eV}$.

14.20 Альфа-частинка, яка пройшла прискорювальну різницю потенціалів U , стала рухатися в однорідному магнітному полі ($B = 50 \text{ мТл}$) по гвинтовій лінії з кроком $h = 5 \text{ см}$ і радіусом $R = 1 \text{ см}$. Визначити, яку різницю потенціалів вона пройшла.

Відповідь: $U = 9,76 \text{ В}$.

14.21 У схрещенні під прямим кутом однорідні магнітне ($\vec{I} = 1 \hat{i} \text{ А/м}$) і електричне ($\vec{A} = 50 \hat{j} \text{ В/м}$) поля влетів іон. При якій швидкості v (за модулем і напрямом) він буде рухатися в схрещених полях прямолінійно?

Відповідь: $v = 40 \hat{i} / \hat{j}$.

14.22 Електрон влетів в однорідне магнітне поле ($B = 0,2 \text{ Тл}$) перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначити силу еквівалентного колового струму $I_{\text{екв}}$, що створений рухом електрона в магнітному полі.

Відповідь: $I_{\text{екв}} = 0,9 \text{ нА}$.

14.23 Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1 \text{ Тл}$ перпендикулярно до ліній індукції. Визначити силу F , що діє на електрон з боку поля, якщо радіус кривини траєкторії дорівнює $R = 0,5 \text{ см}$.

Відповідь: $F = 1,4 \text{ нН}$.

14.24 Однозарядний іон літію масою $m = 7 \text{ а.о.м.}$ пройшов прискорювальну різницю потенціалів $U = 300 \text{ В}$ і влетів у схрещені під прямим кутом однорідні магнітне і електричне поля. Визначити магнітну індукцію B поля, якщо траєкторія іона в схрещених полях є прямолінійною. Напруженість електричного поля дорівнює $\hat{A} = 2 \hat{e}\hat{A}/\hat{i}$.

Відповідь: $B = 0,22 \text{ Тл}$.

14.25 Електрон, пройшовши прискорювальну різницю потенціалів $U = 1,2 \text{ кВ}$, потрапив у схрещені під прямим кутом однорідні магнітне і електричне поля. Визначити напруженість E електричного поля, якщо магнітна індукція поля дорівнює $B = 6 \text{ мТл}$, а траєкторія – пряма лінія.

Відповідь: $\hat{A} = 120 \hat{e}\hat{A}/\hat{i}$.