

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Методичні вказівки
до практичних занять з курсу
ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ

розділ **"ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ"**

*(для студентів I курсу всіх форм навчання за напрямками
підготовки 6.050701, "Електротехніка та електротехнології",
6.050702 "Електромеханіка")*

Харків – ХНУМГ – 2014

Методичні вказівки до практичних занять з курсу загальної фізики, розділ "Електрика і магнетизм" (для студентів 1 курсу всіх форм навчання за напрямками підготовки 6.050701, "Електротехніка та електротехнології", 6.050702 "Електромеханіка") / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад: К. Ю. Аксьонова, Ю. Д. Оксюк; – Х.: 2014. – 46 с.

Укладачі : К. Ю. Аксьонова, Ю. Д. Оксюк.

Рецензент: доц., к. ф.-м. н. А. С. Сисоєв

Рекомендовано кафедрою фізики, протокол № 2 від 18 жовтня 2011 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Практичне заняття № 1.	
Електричне поле у вакуумі.....	5
Практичне заняття № 2.	
Провідники і діелектрики в електричному полі	12
Практичне заняття № 3.	
Постійний електричний струм.....	18
Практичне заняття № 4.	
Основні магнітні явища. Магнітне поле постійного струму.....	23
Практичне заняття № 5.	
Робота переміщення провідника зі струмом у магнітному полі. Сила Ампера. Сила Лоренца	28
Практичне заняття № 6.	
Магнітне поле в речовині. Магнітна індукція у феромагнетиках. Явище електромагнітної індукції.	
Самоіндукція, індуктивність.....	37
Список джерел.....	45

Вступ

Метою цього випуску методичних вказівок є надання допомоги студентам у підготовці до практичних занять з конкретних розділів програми курсу фізики.

Структура методичних вказівок побудована таким чином, що стимулює самостійну підготовку студента до того розділу курсу фізики, який буде розглянуто на відповідному практичному занятті. Кожному розділу (темі), в якому наводяться приклади розв'язання задач, передують питання якісного характеру, відповіді на які студент може дати лише після ретельної домашньої підготовки з використанням конспекту лекцій та підручника. Питання складені таким чином, щоб студенти не просто вивчили теоретичний матеріал, а творчо підійшли до його засвоєння і зрозуміли суть фізичних законів і явищ.

Після контрольних запитань кожного практичного заняття пропонуються кілька задач зі збірника задач [3] (всі підручники перелічені в списку літератури) для самостійного їх розв'язання на занятті й вдома.

Загальні методичні рекомендації з розв'язання задач тут не даються тому, що вони викладені в відповідних джерелах, список яких наведений у кінці цих методичних вказівок.

Практичне заняття № 1. Електричне поле у вакуумі

Контрольні запитання

1. Які властивості має електричне поле?
2. Чи буде правильним твердження, що силові лінії електричного поля – це траєкторії, за якими рухався б у полі позитивний заряд, якщо б його внесли у поле і дали діяти самостійно?
3. Чим визначається чисельне значення напруженості в даній точці електричного поля?
4. Чим визначається чисельне значення потенціалу в даній точці електричного поля?
5. Який напрямок має вектор напруженості електричного поля в точці A , що знаходиться між двома екіпотенціальними поверхнями з потенціалами $\varphi_1 = 2$ В і $\varphi_2 = 1$ В? (рис. 1)
6. Який напрямок має вектор $grad\varphi$ в точці A (див. умови питання 5)?
7. В якій точці електричного поля, екіпотенціальні поверхні якого зображені на рис. 2, напруженість поля найбільша?

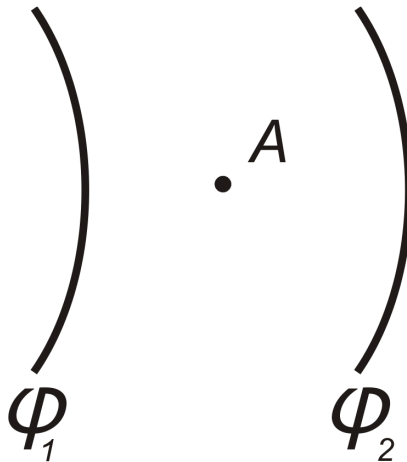


Рис. 1

8. Яке взаємне розташування мають екіпотенціальні поверхні і лінії напруженості електричного поля (рис. 2)?

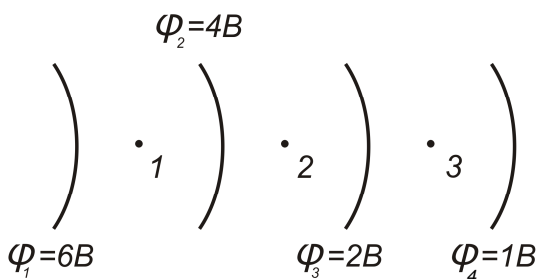


Рис. 2

9. У якому з випадків, наведених на рис.3, напруженість електричного поля рівномірно зарядженої пластини найбільша? Прямі, що зображено на рис.3, є еквіпотенціальними поверхнями з потенціалами $\varphi_1 = 1 \text{ В}$ і $\varphi_2 = 2 \text{ В}$.

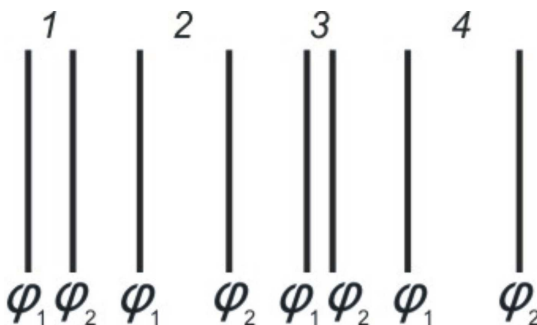


Рис. 3

10. Чи можуть силові лінії електричного поля (в тієї його частині, де відсутні електричні заряди і де напруженість поля не дорівнює нулю) перетинатися між собою; торкатися одна одної?
11. Чи можуть перетинатися або торкатися одна одної еквіпотенціальні поверхні (якщо вони відповідають різним потенціалам)?

Задачі: 9.10; 9.24; 9.38; 9.67; 9.71.

Задачі для самостійного розв'язання на занятті: 9.14; 9.44; 9.70; 9.79.

Вказівки до розв'язання задач

Для розв'язання задач за даною темою необхідно знати закон Кулона, який встановлює зв'язок між силою взаємодії двох точкових електричних зарядів і відстанню між ними; необхідно з'ясувати поняття електричного поля і його основних характеристик – напруженості й потенціалу, треба знати формули для розрахунку напруженості і потенціалу даної точки поля, що створюється точковим зарядом. Якщо поле створюється не одним зарядом, а системою зарядів, то тоді застосовують принцип суперпозиції (накладання) електричних полів, суть якого міститься в тому, що напруженість поля системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей, які створював би кожний з зарядів системи окремо: $\vec{E} = \sum \vec{E}_i$, а потенціал поля, яке створюється системою зарядів, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, що утворюються кожним з зарядів окремо: $\varphi = \sum \varphi_i$. Знання теореми Гауса дозволяє в цілій низці випадків знаходити напруженість поля простіше ніж із застосуванням принципу суперпозиції, тому треба вміти застосовувати цю теорему для розрахунків поля нескінченної однорідно зарядженої площини, поля двох різнойменно заряджених площин, поля нескінченного зарядженого циліндра і т. ін.

Треба знати зв'язок між напруженістю електричного поля і потенціалом ($\vec{E} = -\text{grad}\varphi$).

Для розв'язання цілої низки задач будуть потрібні формули для роботи сил електричного поля по переміщенню електричного заряду в полі. Окрім того, необхідно знати правила графічного зображення електричного поля (силові лінії та екіпотенціальні поверхні).

Приклади розв'язання задач

Задача 1

Три однакових позитивних заряди по 10 нКл кожний розташовані в вершинах рівнобічного трикутника (рис. 4). Який заряд треба вмістити в центрі трикутника, щоб така система знаходилась у рівновазі?

Дано:

$$q_1 = q_2 = q_3 = 1 \text{ нКл}$$

$$\underline{R_1 = R_2 = R_3 = 0}$$

$$q_4 - ?$$

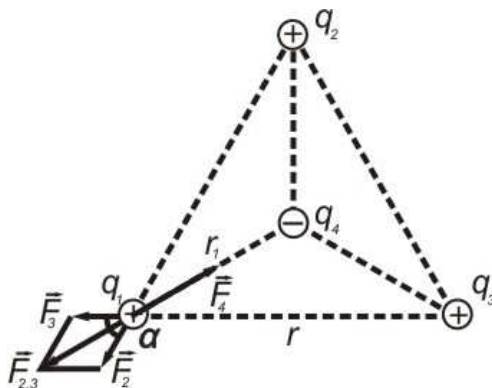


Рис. 4

Розв'язання

По-перше, ясно, що шуканий заряд повинен бути негативним для того, щоб компенсувати сили відштовхування між позитивними зарядами. По-друге, ясно, що умова рівноваги цього заряду не дає нам його величину, тому що будь-який негативний заряд, що вміщено в центр трикутника, буде знаходитись в рівновазі (при однакових зарядах q_1 , q_2 і q_3 напруженість електричного поля в центрі трикутника дорівнює нулю). Всі три заряди, розташовані у вершинах трикутника, знаходяться в однакових умовах, тому досить записати умови рівноваги для будь-якого з них. Заряд q_1 буде знаходитись у рівновазі, якщо векторна сума сил, що діють на нього, буде дорівнювати нулю (див. рис. 4):

$$\vec{R}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 = \vec{F}_{2,3} + \vec{F}_4 = 0, \quad (1)$$

де \vec{F}_2 , \vec{F}_3 , \vec{F}_4 - сили, з якими відповідно діють на заряд q_1 заряди q_2 , q_3 , q_4 , а $\vec{F}_{2,3}$ - рівнодіюча сил \vec{F}_2 і \vec{F}_3

Оскільки сили $\vec{F}_{2,3}$ і \vec{F}_4 спрямовані вздовж однієї прямої в протилежних напрямках, то векторне рівняння (1) можна замінити скалярним

$$F_{2,3} - F_4 = 0, \text{ звідки } F_{2,3} = F_4.$$

В останній рівності замінюємо $F_{2,3}$ через F_2 і F_3 і з урахуванням того, що $F_2 = F_3$, отримуємо:

$$F_4 = 2F_2 \sin \alpha,$$

де $\alpha = 60^\circ$ – внутрішній кут рівнобічного трикутника.

Застосовуємо закон Кулона. Враховуємо, що $q_1 = q_2 = q_3$ і одержуємо:

$$\frac{q_1 q_4}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} = \frac{2q_1^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin \alpha.$$

Звідси

$$q_4 = \frac{2q_1 r_1^2}{r^2} \sin \alpha.$$

З геометричних побудов у рівнобічному трикутнику знаходимо:

$$r_1 = \frac{r}{2 \sin \alpha}.$$

З урахуванням цього маємо:

$$q_4 = \frac{q_1}{2 \sin \alpha}.$$

Після підстановки чисельних значень отримуємо:

$$q_4 = 10^{-9}/\sqrt{3} = 5,8 \cdot 10^{-10} \text{ (Кл)}.$$

Відповідь: $q_4 = 5,8 \cdot 10^{-10}$ Кл.

Задача 2

Дві однакових кульки з радіусами 1 см і масами 9,81 г підвішені на шовкових нитках довжиною 19 см в одній точці (рис. 5). Кулькам надані однакові за величиною та знаком заряди. Чому дорівнює заряд кожної кульки, якщо вони розійшлися так, що нитки утворюють кут 90° ?

Дано:

$$r = 1 \text{ см} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$m = 9,81 \text{ г} = 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$l = 19 \text{ см} = 0,19 \text{ м}$$

$$2 \cdot \alpha = 90^\circ$$

$$\underline{q_1 = q_2 = q}$$

$$q - ?$$

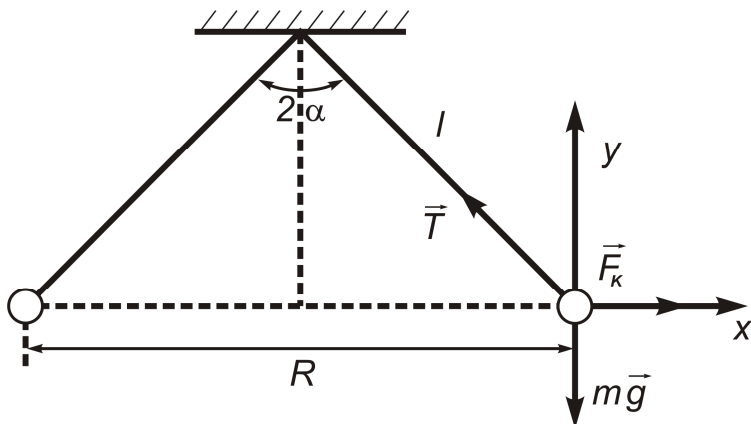


Рис. 5

Розв'язання

На кожну кульку діють сили:

- 1) сила тяжіння $m\vec{g}$,
- 2) сила натягу нитки \vec{T} ,
- 3) сили електростатичного відштовхування \vec{F}_k .

Умова рівноваги кульок

$$m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F} = 0. \quad (1)$$

Спроєктуємо це рівняння на осі x і y :

$$-T \sin \alpha + F_k = 0. \quad (2)$$

$$T \cos \alpha - mg = 0. \quad (3)$$

Поділимо друге рівняння на третє і одержимо співвідношення:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_k}{mg}. \quad (4)$$

Силу електричного відштовхування визначаємо за законом Кулона:

$$F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{R^2},$$

де R – відстань між центрами кульок.

Із трикутника (рис.5) знаходимо:

$$\frac{R}{2} = (l + r) \sin \alpha.$$

Підставимо у формулу (4) вираз для F_k і R та одержимо:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 R^2 \cdot mg}.$$

Звідси маємо:

$$q^2 = 4\pi\epsilon_0 R^2 mg \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$q = \pm 2R \sqrt{\pi\epsilon_0 mg \operatorname{tg} \alpha} = (l + r) \sin \alpha \sqrt{\pi\epsilon_0 mg \cdot \operatorname{tg} \alpha}.$$

Підставимо чисельні значення величин і отримаємо:

$$q = (0,19 + 0,01) \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 1} = \pm 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ (Кл)}$$

Перевірка одиниць вимірювання:

$$[q] = [\text{м} \cdot (\text{Ф} \cdot \text{кг} \cdot \text{м} / \text{м}^2 \cdot \text{с}^2)^{1/2}] = [\text{м} (\text{Ф} \cdot \text{кг} \cdot \text{м} / \text{м}^2 \cdot \text{с}^2)^{1/2}] = [(\text{Ф} \cdot \text{Дж})^{1/2} \cdot \text{м} / \text{м}] =$$

$$[(\text{Кл} \cdot \text{Кл} \cdot \text{В} / \text{В})^{1/2}] = [(\text{Кл}^2)^{1/2}] = [\text{Кл}]$$

Відповідь: $q = \pm 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$.

Задача 3

Яка швидкість зближення повинна бути у протонів в той момент, коли вони знаходяться на відстані 5 см, щоб вони могли зблизитися на відстань 10^{-11} см?

Дано:

$$r_1 = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 10^{-11} \text{ см} = 10^{-13} \text{ м}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\underline{m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}$$

$V - ?$

Розв'язання

При розв'язанні задачі можна вважати один з протонів нерухомим, а другий таким, що рухається в напрямку до першого. Внаслідок того, що між протонами існують сили відштовхування, рух другого протона буде сповільненим. Його швидкість зменшиться від шуканої швидкості до швидкості в момент зупинки протона. При цьому буде зменшуватись і кінетична енергія протона від початкового

значення $\frac{mV^2}{2}$ до 0 в момент зупинки протона. За рахунок кінетичної енергії протона буде здійснюватися робота проти сил поля. На підставі

закону збереження енергії можна записати:

$$\frac{mV^2}{2} + \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r_1} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r_2},$$

де q – заряд протона, $\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r_1}$ і $\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r_2}$ – потенціальні енергії взаємодії протонів.

$$\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = \frac{mV^2}{2}$$

Звідси маємо:

$$V = \sqrt{\frac{q^2 (r_1 - r_2)}{2\pi\epsilon_0 m r_1 r_2}} =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-2} - 10^{-13}}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-13}}} \approx 1,7 \cdot 10^6 \text{ (м/с)}$$

Перевірка одиниць вимірювання:

$$[V] = [\text{Кл} \cdot (\text{м} \cdot \text{м/Ф} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2)^{1/2}] = [(\text{Кл}^2 \cdot \text{В/Кл} \cdot \text{кг})^{1/2}] = [(\text{Дж/кг})^{1/2}] =$$

$$[(\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2 \cdot \text{кг})^{1/2}] = [\text{м/с}]$$

Відповідь: $V = 1,7 \text{ м/с}$.

Практичне заняття № 2.

Провідники і діелектрики в електричному полі

Контрольні запитання

1. Що можна сказати про різницю потенціалів між точкою на поверхні провідної кулі і будь-якою точкою, що знаходиться всередині її?
2. Як поводить себе електричний диполь в однорідному електричному полі?
3. У чому полягає електростатичний захист?
4. Яке співвідношення між напруженістю \vec{E} електричного поля в діелектрику і напруженістю зовнішнього електричного поля \vec{E}_0 ?
5. Чим відрізняються сегнетоелектрики від інших діелектриків?

6. Від чого залежить електрична ємність усамітненого провідника?
7. Який вплив на електроємність провідника має наближення до нього іншого провідника?
8. Чи можна прочитати формулу $C = q / \varphi$ так: ємність провідника пропорційна величині заряду і обернено пропорційна його потенціалу?
9. Два провідники мають однакову форму і розміри, причому один з них порожнистий, а другий суцільний. Чи будуть однакові їх потенціали, якщо кожному з них надати однакові заряди?
10. Конденсатор підключили до джерела струму і збільшили відстань між його пластинами. Чи зміниться при цьому його ємність, різниця потенціалів між обкладками та енергія?

Задачі: 9.87; 9.102; 9.110; 9.123.

Задачі для самостійного розв'язання на занятті: 9.88; 9.116; 9.121.

Вказівки до розв'язання задач

Для розв'язання задач на дану тему необхідно мати чітке уявлення про фізичний зміст електроємності провідника, знати формули електроємності провідника в загальному випадку та ємності сферичного провідника. Належить знати, що уявляють собою конденсатори, від чого залежить ємність конденсатора, види конденсаторів і формули для розрахунку ємностей плоского, сферичного та циліндричного конденсаторів. При розв'язанні задач на з'єднання конденсаторів в батарею необхідно знати формули обчислення загальної ємності при послідовному й паралельному з'єднанні, а також мати на увазі, що при послідовному з'єднанні весь заряд батареї дорівнює заряду кожного конденсатора, а напруга батареї дорівнює сумі падіння потенціалів на всіх конденсаторах. Корисно пам'ятати, що при послідовному з'єднанні загальна ємність батареї менше мінімальної електроємності конденсаторів, що входять в батарею. При паралельному з'єднанні конденсаторів вони всі заряджені до однакової різниці потенціалів, а загальний заряд батареї дорівнює сумі зарядів всіх конденсаторів. Необхідно звернути увагу на те, що заряджені провідники і конденсатори мають енергію, яку можна виразити формулами, які зв'язують дві з трьох величин: ємність, заряд, різницю потенціалів. Треба знати формулу густини енергії для однорідного та неоднорідного полів.

Приклади розв'язання задач

Задача 1

Який заряд необхідно надати батареї з трьох конденсаторів з ємностями 1 мкФ, 1 мкФ і 2 мкФ відповідно, які з'єднані за схемою, яку зображено на рис.6, щоб зарядити її до напруги 120 В? Яка напруга буде при цьому на кожному з конденсаторів?

Дано:

$$C_1 = 1 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 1 \text{ мкФ}$$

$$C_3 = 2 \text{ мкФ}$$

$$U = 120 \text{ В}$$

$$q, U_1, U_2, U_3 - ?$$

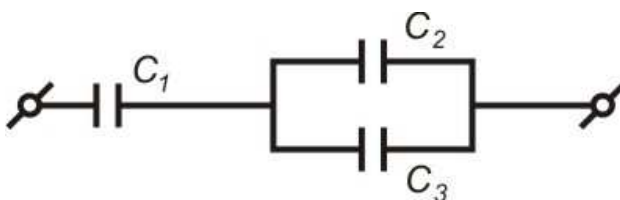


Рис. 6

Розв'язання

Заряд батареї конденсаторів $q = CU$, де C – загальна ємність батареї конденсаторів, яку знайдемо з співвідношення $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C'}$, де

$C' = C_2 + C_3$ – загальна ємність двох паралельно з'єднаних конденсаторів C_2 і C_3 , тобто ми одержали еквівалентну схему (рис. 7) з послідовно з'єднаних конденсаторів C_1 і C' .

Знаходимо

$$C = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3},$$

потім

$$q = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3} \cdot U.$$



Рис. 7

Обчислимо:

$$q = \frac{1 \cdot (1+2) \cdot 10^{-12}}{(1+1+2) \cdot 10^{-6}} \cdot 120 = \frac{3 \cdot 120}{4} 10^{-6} = 90 \text{ (мкКл)}$$

$$[q] = [\text{мкФ} \cdot \text{мкФ} \cdot \text{В} / \text{мкФ}] = [\text{мкКл}]$$

З урахуванням того, що при послідовному з'єднанні заряд батареї дорівнює заряду кожного конденсатора, можемо визначити напругу на конденсаторах C_1 і C' :

$$U_1 = \frac{q_1}{C_1}, \quad U_2 = \frac{q'}{C'} = U_3 \quad (q_1 = q' = q).$$

Напруга на паралельно з'єднаних конденсаторах однакова. Знаходимо шукані напруги:

$$U_1 = \frac{90}{1} = 90 \text{ (В)},$$

$$U_2 = U_3 = \frac{90}{3} = 30 \text{ (В)},$$

$$[U] = [\text{мкКл} / \text{мкФ}] = [\text{В}].$$

Перевірити правильність знаходження напруги на конденсаторах можна з урахуванням тих обставин, що для послідовного з'єднання напруга на батареї дорівнює сумі напруг на всіх конденсаторах. Дійсно, $U = U_1 + U_{2,3}$ і $120 \text{ В} = 90 \text{ В} + 30 \text{ В}$.

Відповідь: $q = 90 \text{ мкКл}$, $U_1 = 90 \text{ В}$, $U_2 = U_3 = 30 \text{ В}$.

Задача 2

Кульці радіусом 4 см надано заряд $6,3 \cdot 10^{-7}$ Кл. Який заряд перейде на кульку радіусом 2 мм, якщо її з'єднати з більшою кулькою?

Дано:

$$r_1 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$q = 6,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$q_2 = ?$$

Розв'язання

Оскільки кульки з'єднані провідником, їх потенціали будуть однакові. Запишемо заряди кульок після з'єднання: заряд великої кульки $q_1 = C_1\varphi$, заряд меншої кульки $q_2 = C_2\varphi$. Враховуючи, що до з'єднання маленька кулька не була заряджена, то $q = q_1 + q_2$. Підставимо значення q_1 і q_2 в останню рівність і отримаємо: $q = C_1\varphi + C_2\varphi = (C_1 + C_2)\varphi$, звідки $\varphi = \frac{q}{C_1 + C_2}$. Якщо потенціал маленької кульки відомий, визначимо її заряд за формулою

$$q_2 = C_2\varphi = C_2 \frac{q}{C_1 + C_2}.$$

З урахуванням того, що ємність кулі дорівнює $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r$, знайдемо:

$$C_1 = 4\pi\epsilon_0\epsilon r_1 \quad \text{і} \quad C_2 = 4\pi\epsilon_0\epsilon r_2.$$

Тоді

$$q_2 = q \frac{r_2}{r_1 + r_2}$$

$$q_2 = 2 \cdot 10^{-3} \frac{6,3 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-3}} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ (Кл)}$$

$$[q] = [\text{м} \cdot \text{Кл/м}] = [\text{Кл}]$$

Відповідь: $q_2 = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл.

Задача 3

Конденсатор ємністю 3 мкФ був заряджений до різниці потенціалів 40 В. Після відключення джерела струму конденсатор було з'єднано з конденсатором ємністю 5 мкФ. Яка енергія витрачається на утворення іскри в момент приєднання другого конденсатора?

Дано:

$$C_1 = 3 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 5 \text{ мкФ}$$

$$U_1 = 40 \text{ В}$$

$$U_2 = 0$$

$$\Delta W - ?$$

Розв'язання

Енергія ΔW , що витрачається на утворення іскри, дорівнює різниці енергії, яка була в першого конденсатора до з'єднання з другим, і енергії, яку має батарея, зіставлена з першого і другого конденсаторів:

$$\Delta W = W_1 - W_2. \quad (1)$$

Енергія зарядженого конденсатора визначається за формулою

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (2)$$

де C – ємність конденсатора або батареї конденсаторів, U – різниця потенціалів на обкладках конденсаторів.

Якщо виразити у формулі (1) енергії за формулою (2) і взяти до уваги, що загальна ємність паралельно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі окремих ємностей, то можна отримати

$$\Delta W = \frac{C_1 U_1^2}{2} - \frac{(C_1 + C_2)}{2} U^2, \quad (3)$$

де U – різниця потенціалів на затискачах батареї конденсаторів.

Враховуючи ті обставини, що другий конденсатор спочатку не був заряджений, можна твердити, що заряд батареї дорівнює заряду, що був на першому конденсаторі до з'єднання з другим:

$$q = C_1 U_1.$$

Напруга на батареї дорівнює:

$$U = \frac{q}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U_1}{C_1 + C_2}.$$

Тоді формула (3) матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta W &= \frac{C_1 U_1^2}{2} - \frac{(C_1 + C_2) C_1^2 U_1^2}{2(C_1 + C_2)^2} = \frac{C_1 U_1^2}{2} \left(1 - \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) = \\ &= \frac{C_1 U_1^2}{2} \cdot \frac{C_1 + C_2 - C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_1^2. \end{aligned}$$

В отриманий вираз підставимо чисельні значення і одержимо:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot \frac{(3 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6})}{3 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6}} 40^2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ (Дж)},$$

$$[\Delta W] = \left[\frac{\Phi \cdot \Phi}{\Phi} B^2 \right] = [\text{Дж}].$$

Відповідь: $\Delta W = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$.

Практичне заняття № 3.

Постійний електричний струм

Контрольні запитання

1. Умови, необхідні для існування електричного струму.
2. Поясніть фізичний зміст ЕРС, напруги і різниці потенціалів.
3. Напруга на полюсах джерела струму, замкненого на зовнішнє коло, завжди менше його ЕРС. Чому?
4. Чому дорівнюватиме напруга на затискачах джерела струму при короткому замиканні?
5. Які сили називаються сторонніми?
6. Які гіпотези покладено в основу класичної електронної теорії металів?
7. Який з дротів: мідний чи залізний (однакової площі перерізу) нагрівається струмом сильніше при їх послідовному з'єднанні?
8. Чи зміниться кількість виділеної теплоти, якщо опір спіралі зменшити у два рази, а силу струму збільшити у два рази?
9. Як залежить потужність струму від опору провідників при їх паралельному і послідовному з'єднанні?
10. При ремонті електродвигуна спіраль скоротили. Як змінилась потужність двигуна?
11. Внаслідок випаровування і розпилення матеріалу з поверхні нитки розжарювання лампи нитка з часом стає тоншою. Як це впливає на потужність лампи?
12. Що таке іонізація газу, чим вона може бути викликана?
13. У чому полягає явище несамоїсної провідності газу? Самоїсної провідності?
14. Чи однакові різниці потенціалів повинні пройти у пришвидшуючому електричному полі електрони і іони, щоб набути енергію достатню для ударної іонізації молекул одного й того ж газу?
15. Що називається плазмою? Які властивості плазми?
16. Чому при роботі електронної лампи необхідно нагрівати катод?
17. По провіднику змінного перерізу тече струм (рис.8). Чи однакова напруженість електричного поля на ділянках провідника з різними площами перерізу? Чи однакова середня швидкість спрямованого руху електронів провідності на всіх ділянках такого провідника? Чи однакова сила струму в цих умовах?

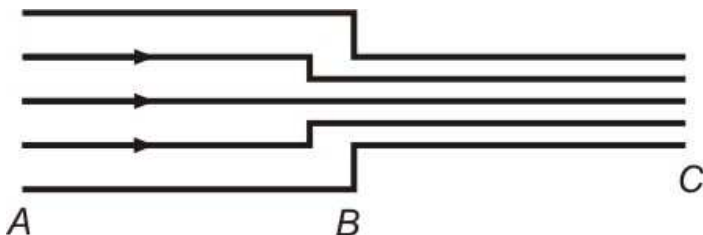


Рис. 8

18. Від чого залежить сила струму насичення в газі: від прикладеної напруги або від дії іонізатора?

19. Іскровий розряд може мати форму тонкого шнура. Які сили утримують від розширення плазми, що заповнює канал шнура?

Задачі: 10.1; 10.7; 10.37; 10.52; 10.90.

Задачі для самостійного розв'язання на занятті: 10.6; 10.14; 10.83.

Вказівки до розв'язання задач

Для розв'язання задач на дану тему необхідне знання основних понять і законів постійного струму: визначення миттєвого значення сили змінного струму як кількості електрики, що проходить через поперечний переріз провідника в одиницю часу $I = dq/dt$ і сили постійного струму $I = \Delta q/\Delta t$, закони Ома для однорідної та неоднорідної ділянки кола и для замкненого кола, формули для обчислення опору провідника в залежності від його матеріалу, розмірів, температури, закони послідовного і паралельного з'єднання провідників; формули роботи і потужності струму. Слід пам'ятати, що при однаковій силі струму в провідниках використовують формулу

$A = I^2 R t$ і відповідно $P = I^2 \cdot R$, а якщо однакова напруга, то зручніше скористатися формулами $A = (U^2/R)t$ і $P = U^2/R$.

Для розрахунку розгалужених електричних кіл застосовують закони Кірхгофа. При зіставленні рівнянь на основі цих законів треба додержуватися таких правил:

1. Довільно вибрати і вказати на схемі стрілками:

- напрямки струмів на всіх ділянках кола; ділянки, що не розділені розгалуженням (вузлом), обтікаються однаковими струмами;
- напрямок обходу контурів;

2. При складанні рівнянь за першим законом Кірхгофа треба вважати струми, що підходять до вузла, позитивними (додатними), а

струми, що виходять з вузла, - негативними (від'ємними). Кількість рівнянь зіставлених за першим законом Кірхгофа повинно бути на одиницю менше, ніж кількість вузлів в колі.

3. При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа треба мати на увазі:

а) добуток $I \cdot R$ на даній ділянці кола береться зі знаком “ + “, якщо напрямок струму на ньому співпадає з обраним напрямком обходу контуру, і зі знаком “ - “ – у протилежному випадку;

б) ЕРС входить в рівняння зі знаком “+“, якщо вона підвищує потенціал в напрямку обходу контуру, тобто якщо при обході ми змушені йти від “-“ до “+“ всередині джерела струму; в протилежному випадку ЕРС входить в рівняння зі знаком “ - “. Перший контур можна обрати довільно, а всі наступні слід обирати так, щоб кожний новий контур містив у собі хоча б один елемент кола, який би не входив у попередні контури.

Якщо при розв'язанні рівнянь, зіставлених за законами Кірхгофа, отримують від'ємні значення сили струму або опору, то це означає, що струм крізь даний резистор тече в дійсності в протилежному напрямі.

Приклади розв'язання задач

Задача1

Паралельно з лампою потужністю 100 Вт ввімкнули електроплитку потужністю 400 Вт. Напруга в мережі 127 В. Під якою напругою буде горіти лампа до і після вмикання електроплитки, якщо опір підводящих провідників 3 Ом? Вказані потужності струму в лампі і плитці відповідають напрузі 127 В.

Дано:

$$P_1 = 100 \text{ Вт}$$

$$P_2 = 400 \text{ Вт}$$

$$U = 127 \text{ В}$$

$$\underline{R_0 = 3 \text{ Ом}}$$

$$U_1' - ?$$

$$U_1'' - ?$$

Розв'язання

Позначимо: U_1' - напруга на лампі до вмикання електроплитки, U_1'' - напруга після вмикання електроплитки на лампі та плитці.

Для розв'язання задачі треба обчислити струми в колі до і після вмикання плитки. Для цього необхідно знати загальний опір кола в першому і другому випадках. Якщо знати струми і опори

споживачів, знайдемо шукані величини. Використовуючи формулу потужності, знайдемо опір лампочки $R_1 = \frac{U^2}{P_1}$ і електроплитки

$R_2 = \frac{U^2}{P_2}$. Запишемо загальний опір кола для випадку, коли плитку не

підключено: $R' = R_0 + R_1$, плитку підключено паралельно лампочці:

$$R'' = R_0 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Виразимо струми в обох випадках:

$$I' = \frac{U}{R'}, \quad I'' = \frac{U}{R''}.$$

Підведена напруга U розподілиться пропорційно опорам споживачів і опорам з'єднувальних провідників, тому що споживачі і з'єднувальні провідники в обох випадках з'єднані послідовно. До підключення плитки лампа горить під напругою $U_1' = U - I'R_0$ після підключення: $U_1'' = U - I''R_0$.

Знайдемо числові значення опорів кола:

$$R_1 = \frac{127^2}{100} = 161 \text{ (Ом)},$$

$$R' = 3 + 161 = 164 \text{ (Ом)},$$

$$R_2 = \frac{127^2}{400} = 40 \text{ (Ом)},$$

$$R'' = 3 + \frac{161 \cdot 40}{161 + 40} = 35 \text{ (Ом)}.$$

Знайдемо струми:

$$I' = \frac{127}{164} = 0,77 \text{ (А)} \text{ і } I'' = \frac{127}{35} = 3,63 \text{ (А)}.$$

Знайдемо шукані напруги:

$$U_1' = 127 - 3 \cdot 0,77 = 124,69 \text{ (В)},$$

$$U_1'' = 127 - 3 \cdot 3,63 = 106,11 \text{ (В)}.$$

Відповідь:

У результаті паралельного підключення до лампи плитки, напруга на лампі знизилась з 124,69 до 106,11 В.

Задача 2

Електричне коло складається з двох гальванічних елементів, трьох резисторів і гальванометра (рис. 9). В цьому колі $r_1 = 100 \text{ Ом}$, $r_2 = 50 \text{ Ом}$, $r_3 = 20 \text{ Ом}$, ЕРС елемента $E_1 = 2 \text{ В}$. Гальванометр реєструє струм $I_3 = 50 \text{ мА}$, що тече в напрямку, який вказано стрілкою. Визначити ЕРС другого елемента. Опором гальванометра та внутрішнім опором елементів знехтувати.

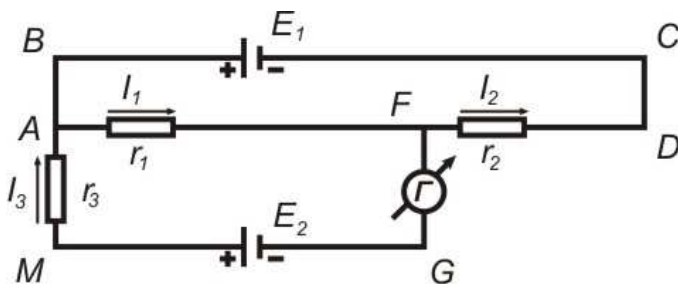


Рис. 9

Дано:

$$r_1 = 100 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 50 \text{ Ом}$$

$$r_3 = 20 \text{ Ом}$$

$$E_1 = 2 \text{ В}$$

$$E_2 = ?$$

Розв'язання

Виберемо напрямок струмів за схемою, обходячи контури за годинниковою стрілкою. За першим законом Кірхгофа для вузла F маємо:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (1)$$

За другим законом Кірхгофа для контура ABCDFA:

$$I_1 r_1 + I_2 r_2 = E_1. \quad (2)$$

Для контура AFGMA:

$$I_1 r_1 + I_3 r_3 = E_2. \quad (3)$$

Після підстановки відомих числових значень в формули (1), (2) і (3) одержимо:

$$I_1 - I_2 - 0.05 = 0$$

$$100I_1 + 50I_2 = 2$$

$$100I_1 + 0.05 \cdot 20 = E_2$$

Цю систему трьох лінійних рівнянь з трьома невідомими розв'язують стандартними прийомами і в результаті одержують числове значення E_2 , яке дорівнює 4 В.

Відповідь: $E_2 = 4$ В.

Практичне заняття № 4.

Основні магнітні явища. Магнітне поле постійного струму

Контрольні запитання

1. Що є силовою характеристикою магнітного поля? Назвіть аналог цієї величини для електричного поля.
2. Яка принципова різниця між лініями напруженості електричного поля і лініями магнітної індукції?
3. Що називається однорідним магнітним полем, як воно зображується графічно?
4. Яку інформацію про магнітне поле містить у собі формула обчислення магнітної індукції нескінченного прямого провідника із струмом?
5. Який напрямок матиме вектор індукції магнітного поля прямолінійного провідника зі струмом в точці A (рис.10)?

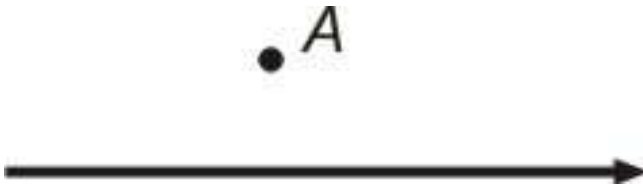


Рис. 10

6. Двома взаємно перпендикулярними коловими провідниками течуть струми однакової величини. Як буде спрямований вектор індукції магнітного поля в їх загальному центрі (рис.11)?

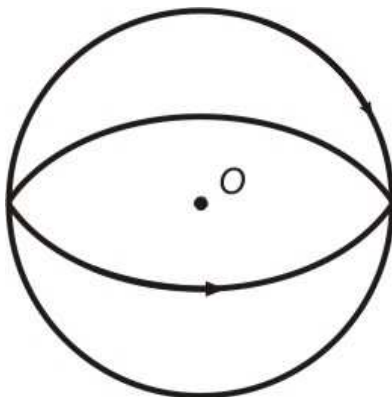


Рис. 11

7. Чим визначається чисельне значення магнітного моменту контура зі струмом?
8. Як зміниться значення індукції магнітного поля в центрі колового провідника, якщо радіус його збільшиться у два рази, а сила струму в провідникові зменшиться у три рази?
9. Який з виразів визначає циркуляцію вектора індукції магнітного поля вздовж замкненого контура?:

$$\begin{array}{ll}
 1) \oint_L B dl \cdot \cos(\hat{B}, dl), & 2) \oint_L \vec{B} d\vec{l}, \\
 3) \int_s B_n ds, & 4) \int_s B ds_n.
 \end{array}$$

10. Від яких величин залежить магнітна індукція в точці, що лежить на вісі нескінченного соленоїда?

Задачі: 11.8; 11.19; 11.28; 11.30; 11.38.

Задачі для самостійного розв'язання на занятті: 11.3; 11.29; 11.36.

Вказівки до розв'язання задач

Для розв'язання задач з даної теми треба уявити собі поняття основної характеристики магнітного поля – вектора індукції магнітного поля, добре розібратися в графічних уявленнях полів, що утворюються різними за конфігурацією провідниками зі струмом: вміти визначати напрямок ліній магнітної індукції залежно від напрямку струму, що утворює дане поле.

Зв'язок електричного поля і його магнітного поля знаходить відображення в законі Біо – Савара – Лапласа. Необхідно знати і вміти

застосовувати цей закон для розрахунку магнітних полів в окремих найпростіших випадках (поле нескінченного прямолінійного провідника зі струмом, колового струму).

При розв'язання задач на знаходження індукції магнітного поля використовують або закон Біо – Савара – Лапласа, або формули, які раніше були виведені з цього закону. При розв'язанні даних задач необхідно робити схематичне креслення. Якщо поле створюється декількома провідниками зі струмом, то використовують принцип суперпозиції магнітних полів, тобто вектор магнітної індукції є векторною сумою магнітних індукцій всіх полів, що створюються всіма струмами в даній точці простору:

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i .$$

Приклади розв'язання задач

Задача 1

Два прямолінійних провідника великої довжини розміщено паралельно на відстані 0,5 м один від одного в вакуумі (рис. 12). Струм, що тече в першому провіднику, дорівнює 20 А, а в другому – 24 А. Визначити індукцію магнітного поля в точці А, розташованій на відстані 0,4 м від першого провідника і 0,3 м від другого. Струми в провідниках спрямовані в протилежних напрямках.

Дано:

$$I_1 = 20 \text{ А}$$

$$I_2 = 24 \text{ А}$$

$$r = 0.5 \text{ м}$$

$$r_1 = 0.4 \text{ м}$$

$$r_2 = 0.3 \text{ м}$$

$$B - ?$$

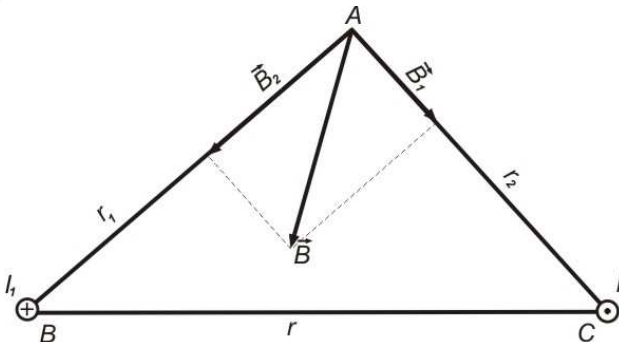


Рис. 12

Розв'язання

Рис.12 нарисовано так, що провідники розташовані перпендикулярно до площини рисунку. Маленькими колами позначають струми, а “+” або “-” всередині них вказують напрямок струму, що необхідно знати для визначення напрямку вектора магнітної індукції в точці А. За принципом суперпозиції магнітних полів $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$, де \vec{B}_1 і \vec{B}_2 – вектори магнітної індукції струмів в точці А, що створюються кожним струмом поодиночі.

Модуль індукції поля нескінченного прямолінійного струму визначається за формулою

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

(Формула отримана за законом Біо-Савара-Лапласа), тобто

$$B_1 = \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi r_1},$$

$$B_2 = \mu\mu_0 \frac{I_2}{2\pi r_2}.$$

Абсолютне значення магнітної індукції в даному випадку можна визначити за теоремою Піфагора (трикутник ABC – прямокутний, тому що його сторони відносяться як 3:4:5):

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}.$$

Підставимо чисельні значення:

$$\begin{aligned} B &= \left[\left(\mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi r_1} \right)^2 + \left(\mu\mu_0 \frac{I_2}{2\pi r_2} \right)^2 \right]^{1/2} = \\ &= \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \sqrt{\frac{I_1^2}{r_1^2} + \frac{I_2^2}{r_2^2}} = \frac{1 \cdot 4\pi 10^{-7}}{2\pi} \sqrt{\frac{20^2}{0,4^2} + \frac{24^2}{0,3^2}} \approx 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ (Тл)} \end{aligned}$$

$$[B] = [(\text{Гн/м})(\text{А}^2/\text{м}^2)^{1/2}] = [\text{Гн А/м}^2] = [\text{Вб/м}^2] = [\text{Тл}]$$

Відповідь: $B = 1,9 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Задача 2

По контуру у вигляді кільця радіусом 0,1 м тече струм 5 А. Визначити індукцію магнітного поля в точці, що лежить на перпендикулярі, який встановлено до площини кільця із його центру, якщо відстань від точки до площини кільця дорівнює 0,1 м (рис. 13).

Дано:

$$r = 0,1 \text{ м}$$

$$d = 0,1 \text{ м}$$

$$I = 5 \text{ А}$$

$$B - ?$$

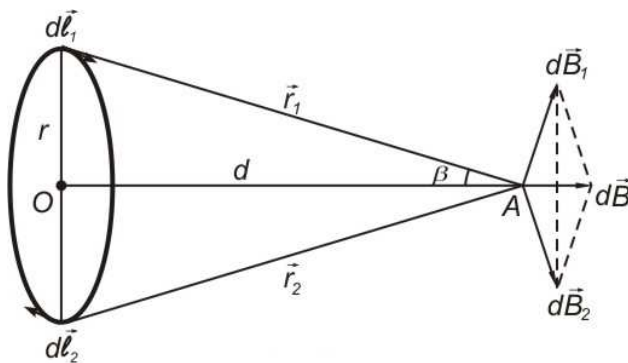


Рис. 13

Розв'язання

Знайдемо індукцію магнітного поля в точці А, що знаходиться на відстані d від площини контура. Для розв'язання задачі застосуємо закон Біо-Савара-Лапласа: елемент контура dl створює в точці А магнітну індукцію:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \cdot \sin(\vec{dl}, \vec{r})}{r^2}.$$

У цьому прикладі радіус-вектор \vec{r} перпендикулярний до елемента струму \vec{dl} . Кут між ними – це кут між твірною конуса і елементом кола його основи, тому

$$\sin(\vec{dl}, \vec{r}) = 1 \text{ і } dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl}{r^2}.$$

Розглянемо вектори магнітної індукції $d\vec{B}_1$ і $d\vec{B}_2$, що створюються в точці А двома рівними елементами контура $d\vec{l}_1$ і $d\vec{l}_2$, які знаходяться на протилежних кінцях діаметра. Кожний з векторів $d\vec{B}$ перпендикулярний до площини, що проходить крізь відповідні $d\vec{l}$ і \vec{r} . З рис.13 видно, що векторна сума векторів $d\vec{B}_1$ і $d\vec{B}_2$ буде

спрямована вздовж осі колового струму і чисельно дорівнює сумі проєкцій на вісь ОА цих векторів. Позначимо проєкцію вектора $d\vec{B}_1$ на вісь ОА як $dB_1 = dB \sin \beta$, де $\sin \beta = \frac{r}{r_1}$ (див. рис. 13) і $r_1 = \sqrt{r^2 + d^2}$.

Якщо ми розіб'ємо весь коловий контур на відповідні елементи dl , то в результаті побачимо, що результуючий вектор магнітної індукції спрямований уздовж осі колового струму і чисельно дорівнює:

$$\begin{aligned} B &= \int_l dB \cdot \sin \beta = \int_l \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Ir}{(r^2 + d^2)^{3/2}} dl = \\ &= \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Ir}{(r^2 + d^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi r} dl = \frac{\mu\mu_0}{2} \cdot \frac{Ir^2}{(r^2 + d^2)^{3/2}}. \end{aligned}$$

Виконаємо обчислення і перевіримо одиниці вимірювання:

$$B = \frac{1 \cdot 4 \cdot 10^{-7}}{2} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-2}}{(10^{-2} + 10^{-2})^{3/2}} \approx 1.11 \cdot 10^{-5} \text{ (Тл)}.$$

$$[B] = [\text{Гн А м}^2/\text{м м}^3] = [\text{В с А}/\text{м}^2 \text{ А}] = [\text{Вб}/\text{м}^2] = [\text{Тл}]$$

Примітка: якщо $d = 0$, то ми отримаємо формулу для розрахунку магнітної індукції в центрі колового струму:

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

Відповідь: $B = 1,11 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Практичне заняття № 5.

Робота переміщення провідника зі струмом у магнітному полі. Сила Ампера. Сила Лоренца

Контрольні запитання

1. Як механічну енергію безпосередньо можна перетворити на енергію електричного струму?
2. Як зміниться сила взаємодії між двома прямолінійними провідниками зі струмом, якщо сила струму в першому провіднику збільшиться у два рази, а в другому – в п'ять разів?

3. Від чого залежить радіус траєкторії руху електрона в магнітному полі? Порівняйте з радіусом траєкторії руху протона у тому самому полі.
 4. Як залежить від швидкості зарядженої частинки крок гвинтової лінії (траєкторії), по якій вона рухається в однорідному магнітному полі?
 5. Як змінюється швидкість зарядженої частинки, якщо вона входить в однорідне магнітне поле?
 6. Яким повинен бути напрямок швидкості зарядженої частинки, щоб вона рухалась прямолінійно в області простору, де діють схрещені (взаємно перпендикулярні) однорідні електричне і магнітне поля (або: При яких умовах заряджена частинка в просторі, де існують разом електричне і магнітне поля, буде рухатись прямолінійно?)
 7. Навести приклад, коли сили Ампера будуть дорівнювати нулю при взаємодії двох провідників зі струмами (або: Якими будуть сили взаємодії між двома провідниками зі струмом, якщо один з них є тонким кільцем, а другий – нескінченним прямолінійним тонким дротом, розташованим вздовж осі симетрії кільця).
 8. Як діє однорідне магнітне поле на коловий струм, площина якого перпендикулярна до напрямку магнітного поля?
 9. Як зміниться дія поля на струм в запитанні 8, якщо змінити напрямок струму в колі?
 10. Чому дорівнює робота сили, що діє на електрон в магнітному полі?
 11. Які з частинок катодних променів відхиляються на більший кут одним і тим же магнітним полем: більш швидкі або більш повільні?
 12. Як взаємодіють повітряні проводи, що живлять двигун тролейбуса?
 13. Чому два паралельних провідники, по яким проходять струми в одному напрямку, притягаються, а два паралельних катодних пучки відхиляються один від одного?
 14. Чому замкнений гнучкий провідник, по якому тече струм, намагається прийняти форму кільця, навіть якщо він не знаходиться у магнітному полі?
- Задачі: 11.64; 11.69; 11.72; 11.75; 11.86.
- Задачі для самостійного розв'язання на занятті: 11.56; 11.74;

11.87.

Вказівки до розв'язання задач

При визначенні сили, з якою задане магнітне поле діє на провідник зі струмом, спочатку за формулою закону Ампера знаходять силу $d\vec{F}$, що діє на довільний елемент $d\vec{l}$ довжини провідника, а потім інтегрують одержаний вираз по всій довжині провідника, враховуючи напрямки додатних векторів $d\vec{F}_i$.

Якщо в задачі розглядається замкнений контур, що знаходиться в однорідному магнітному полі, то на контур зі струмом діє обертальний момент, що визначається за формулою

$$P_m = IS$$

(S - площа контуру, I - сила струму в контурі). Під впливом цього моменту контур повертається так, що кут α між векторами P_m і \vec{B} зменшується, а при $\alpha = 0$ досягається стан стійкої рівноваги контура в магнітному полі.

Приклади розв'язання задач

Задача 1

В однорідному горизонтальному магнітному полі в рівновазі знаходиться мідний провідник зі струмом 20 А , розташований перпендикулярно до поля. Яка повинна бути при цьому напруженість поля, якщо переріз провідника дорівнює 2 мм^2 ?

Дано:

$$I = 20\text{ А}$$

$$S = 2\text{ мм}^2 = 2 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2$$

$$\rho = 8,6 \cdot 10^3\text{ кг}$$

$$\vec{B} \perp \vec{I}$$

$$\vec{H} - ?$$

Розв'язання

Модуль сили Ампера dF , що діє на елемент провідника dl зі струмом I , визначається за формулою

$$dF = B I dl \sin(B, I),$$

де B - індукція магнітного поля.

У випадку, коли поле однорідне і провідник прямолінійний, модуль сили Ампера дорівнює:

$$F = B I l \sin(BI).$$

У нашому випадку $\sin(\vec{B}, \vec{I}) = 1$, тоді $F = BIl$. Ця сила повинна врівноважувати силу тяжіння провідника $P = mg$, тоді

$$BIl = mg.$$

При цьому необхідно згадати зв'язок між магнітною індукцією і напруженістю магнітного поля:

$$B = \mu\mu_0 H,$$

де μ - магнітна проникність середовища, μ_0 - магнітна стала, H - напруженість магнітного поля.

Маса провідника дорівнює: $m = \rho Sl$,

де ρ - густина провідника, S - площа перетину провідника.

У результаті одержуємо:

$$\mu\mu_0 HIl = \rho l Sg.$$

Звідси:

$$H = \frac{\rho Sg}{\mu\mu_0 I}.$$

Підставляємо у формулу чисельні дані задачі:

$$H = \frac{8,6 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 9,81}{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 20} = 6,71 \text{ (А/м)}.$$

Перевіряємо одиниці вимірювання:

$$[H] = [\text{кг} \cdot \text{м} \cdot 3 \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2} / \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А} \cdot 2 \cdot \text{А}] = [\text{А/м}].$$

Відповідь: $H = 6,71 \text{ А/м}$.

Задача 2

Плоский квадратний контур зі стороною 10 см, по якому тече струм силою 100 А, вільно встановився в однорідному магнітному полі (рис.14). Магнітна індукція дорівнює 1 Тл. Визначити роботу, що здійснюється зовнішніми силами при повороті контура відносно осі, що проходить крізь середину його протилежних сторін на кут: 1) $\varphi_1 = 90^\circ$. 2) $\varphi_2 = 3^\circ$. При повороті контура сила струму в ньому підтримується постійною.

Дано:

$$I = 100 \text{ А}$$

$$a = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$B = 1 \text{ Тл}$$

$$1) \varphi_1 = 90^\circ$$

$$2) \varphi_2 = 3^\circ$$

$$A_1, A_2 - ?$$

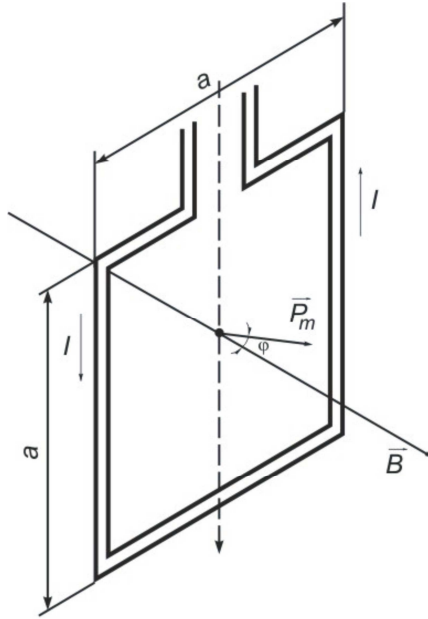


Рис. 14

Розв'язання

На контур зі струмом у магнітному полі діє момент сил:

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

де \vec{P}_m - магнітний момент контура; \vec{B} - магнітна індукція; φ - кут між векторами \vec{P}_m і \vec{B} .

За умовами задачі в початковому положенні контур вільно встановлюється в магнітному полі. При цьому момент сил дорівнює нулю ($\vec{M} = 0$), а це означає, що $\varphi = 0$, тобто вектори \vec{P}_m і \vec{B} збігаються за напрямком.

Якщо зовнішні сили виведуть контур з положення рівноваги, то момент сил, що визначається за формулою (1), буде намагатися повернути контур в первинне положення. Проти дії цього моменту і буде здійснюватися робота зовнішніми силами.

Через те, що момент сил залежить від кута повороту, для підрахунку роботи спочатку треба використати її вираз у диференціальній формі:

$$dA = M d\varphi.$$

Підставимо в останню формулу вираз M з формули (1) і врахуємо, що

$$P_m IS = Ia^2,$$

де I - сила струму в контурі, а $S = a^2$ - площа контура.

У результаті одержимо

$$dA = IBa^2 \sin \varphi d\varphi.$$

Вираз для роботи при повороті на скінченний кут φ має такий вигляд:

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

1) Робота при повороті на кут $\varphi_1 = 90^\circ$

$$A_1 = IBa^2 \int_0^{\pi/2} \sin \varphi d\varphi = IBa^2 (-\cos \varphi) \Big|_0^{\pi/2} = IBa^2 \quad (3)$$

2) Робота при повороті на кут $\varphi_2 = 3^\circ$ (в цьому випадку врахуємо, що кут φ_2 малий, і використаємо приблизну рівність $\sin \varphi \approx \varphi$):

$$A_2 = IBa^2 \int_0^{\varphi_2} \varphi d\varphi = \frac{1}{2} IBa^2 \varphi_2^2. \quad (4)$$

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

Для підстановки чисельних значень величин у (4) необхідно перевести кут φ_2 у радіанну міру. Робота буде дорівнювати:

$$A_2 = \frac{1}{2} 100 \cdot 1 \cdot (0,1)^2 \cdot (0,0523)^2 = 1,37 \cdot 10^{-3} = 1,37 \text{ (мДж)}.$$

Перевіряємо одиниці вимірювання:

$$[A] = [A \cdot \text{Тл} \cdot \text{м}^2] = [A \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2 / \text{А} \cdot \text{м}^2] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}]$$

Задачу можна було б розв'язати іншим способом. Робота зовнішніх сил по переміщенню контура зі струмом у магнітному полі дорівнює добутку сили струму в контурі на зміну магнітного потоку крізь контур:

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

де Φ_1 – магнітний потік, що пронизує контур до переміщення, Φ_2 – те саме після переміщення.

У випадку $\varphi_1 = 90^\circ$; $\Phi = BS_1 \Phi_2 = 0$. Таким чином,

$A = IBS = IBa^2$, що співпадає з одержаним вище результатом.

Відповідь: $A_1 = 1 \text{ Дж}$, $A_2 = 1,37 \text{ мДж}$.

Задача 3

Два прямолінійних довгих паралельних провідники знаходяться на відстані 0,1 м один від одного (рис.15). По провідниках в одному напрямку протікають струми силою 20 і 30 А. Яку роботу треба здійснити на кожній ділянці провідників довжиною 1 м, щоб розвести провідники до відстані 0,2 м?

Дано:

$$r_1 = 0,1 \text{ м}$$

$$I_1 = 20 \text{ А}$$

$$I_2 = 30 \text{ А}$$

$$r_2 = 0,2 \text{ м}$$

$$l = 1 \text{ м}$$

$$A/l - ?$$

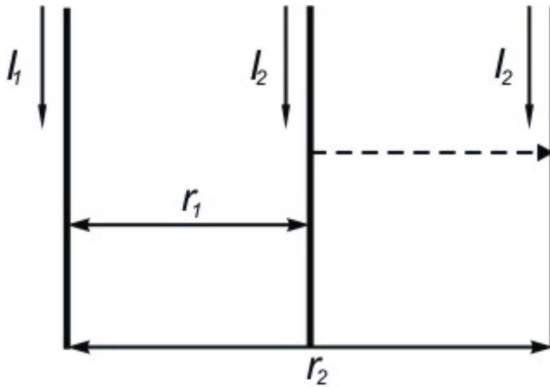


Рис. 15

Розв'язання

За законом Ампера сила взаємодії провідників зі струмами дорівнює:

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

де μ_0 – магнітна стала, μ – магнітна проникність середовища.

Якщо розглядати нескінченно мале переміщення \vec{dr} , то зміненням сили можна знехтувати, що дозволяє записати формулу для елементарної роботи $dA = Fdr$. Звідси роботу знайдемо інтегруванням в межах від r_1 до r_2 :

$$A = \int_{r_1}^{r_2} dA = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r} dr = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi} (\ln r_2 - \ln r_1)$$

При переміщенні паралельних провідників довжиною 1 м здійснюється робота:

$$\frac{A}{l} = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Виконуємо обчислення:

$$\frac{A}{l} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10 \cdot 30}{2 \cdot 3,14} \ln \left(\frac{0,2}{0,1} \right) = 8,28 \cdot 10^{-5} \text{ (Дж/м)}.$$

Відповідь: $A/l = 8,28 \cdot 10^{-5}$ Дж/м.

Задача 4

Електрон, що пройшов пришвидшуючу різницю потенціалів 400 В, попадає в однорідне магнітне поле напруженістю 10^3 А/м. Визначити радіус кривини траєкторії і частоту обертання електрона в магнітному полі. Вважати, що вектор швидкості перпендикулярний до ліній магнітного поля.

Дано:

$$U = 400 \text{ В}$$

$$H = 10^3 \text{ А/м}$$

$$\vec{v} \perp \vec{H}$$

$$R - ?$$

$$n - ?$$

Розв'язання

Радіус кривини траєкторії електрона знаходимо, виходячи з наступних міркувань: на електрон, що рухається у магнітному полі, діє сила Лоренца (дією сили тяжіння можна знехтувати), яка перпендикулярна вектору швидкості і, таким чином, надає електрону нормальне прискорення. За другим законом Ньютона можна записати:

$$F_L = ma_n,$$

де a_n – нормальне прискорення, або:

$$evB \cdot \sin \alpha = \frac{mV^2}{R}, \quad (1)$$

де e – елементарний заряд, V – швидкість електрона, B – магнітна індукція, m – маса електрона, R – радіус кривини траєкторії електрона, α – кут між напрямком вектора швидкості \vec{v} і вектора \vec{B} (в даному

випадку $\vec{v} \perp \vec{B}$ і $\alpha = 90^\circ$, а $\sin \alpha = 1$).

Із формули (1) знаходимо:

$$R = \frac{mV}{eB} \quad (2)$$

Імпульс $m \cdot v$, що входить до рівності (2), можна виразити через кінетичну енергію T електрона:

$$mV = \sqrt{2mT} \quad (3)$$

Але кінетична енергія електрона, що пройшов пришвидшуючу різницю потенціалів U , визначається з рівності

$$T = eU \quad .$$

Підставляючи цей вираз T у формулу (3), одержимо:

$$mV = \sqrt{2meU} \quad .$$

Магнітну індукцію можна виразити через напруженість магнітного поля у вакуумі співвідношенням:

$$B = \mu_0 H \quad ,$$

де μ_0 – магнітна стала.

Якщо підставити знайдені вирази B і $m \cdot V$ у формулу (2), знайдемо:

$$R = \frac{\sqrt{2meU}}{\mu_0 e H} = \frac{1}{\mu_0 H} \cdot \sqrt{\frac{2mU}{e}} \quad (4)$$

Виразимо всі величини, що входять у формулу (4), в одиницях системи СІ: $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл, $U = 400$ В, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $H = 10^3$ А/м.

Підставимо ці значення у формулу (4) і виконаємо обчислення:

$$R = \frac{1}{4,314 \cdot 10^{-7}} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 400}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 5,37 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Для визначення частоти обертання скористаємось формулою, що зв'язує частоту зі швидкістю і радіусом:

$$n = \frac{V}{2\pi R} \quad (5)$$

Скориставшись виразом (2) для радіуса кривини, з формули (5) отримуємо:

$$n = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{eB}{m} = \frac{\mu_0 e H}{2\pi m} \quad .$$

За цією формулою одержимо чисельне значення частоти:

$$n = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3}{2\pi \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}} = 3,52 \cdot 10^7 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Перевірка одиниць вимірювання:

$$[n] = [\text{Гн} \cdot \text{Кл} \cdot \text{А/м} \cdot \text{м} \cdot \text{кг}] = [\text{Ом} \cdot \text{с} \cdot \text{Кл} \cdot \text{А/м}^2 \cdot \text{кг}] = [\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{Кл} \cdot \text{А/А} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}] =$$

$$[\text{Дж} \cdot \text{с/м}^2 \cdot \text{кг}] = [\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с/с}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}] = [\text{с}^{-1}]$$

$$\text{Відповідь: } R = 5,37 \cdot 10^{-2} \text{ м, } n = 3,52 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}.$$

Практичне заняття № 6.

Магнітне поле в речовині. Магнітна індукція у феромагнетиках. Явище електромагнітної індукції. Самоіндукція, індуктивність

Контрольні запитання

1. Чи зміниться напруженість і індукція магнітного поля в соленоїді, якщо в нього вставити сердечник з алюмінію?
2. Що таке гістерезис?
3. Як спрямовано наведене магнітне поле в парамагнітній речовині по відношенню до зовнішнього магнітного поля?
4. В яких випадках правильно вказано напрямок індукційного струму у витку, відносно якого переміщується постійний магніт (рис. 16)? (Напрямок переміщення магніту, що збігається з виссю витка, вказано стрілками).

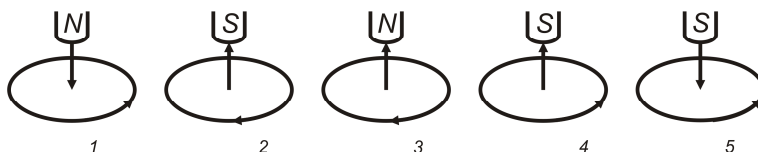


Рис. 16

5. Як спрямовано наведене магнітне поле феромагнітної речовини по відношенню до зовнішнього магнітного поля?
6. Чи зміниться напруженість і індукція магнітного поля в соленоїді, якщо в нього вставити сердечник з алюмінію?

7. Яке з перелічених значень магнітної проникності відповідає парамагнетикам (дані для проникності надані для однієї ж і тої напруженості зовнішнього магнітного поля: 0,9998; 100; 1,000023; 10)?
8. Який з чотирьох феромагнетиків, петлі гістерезиса яких зображені на рис. 17, є самим магнітом'яким?

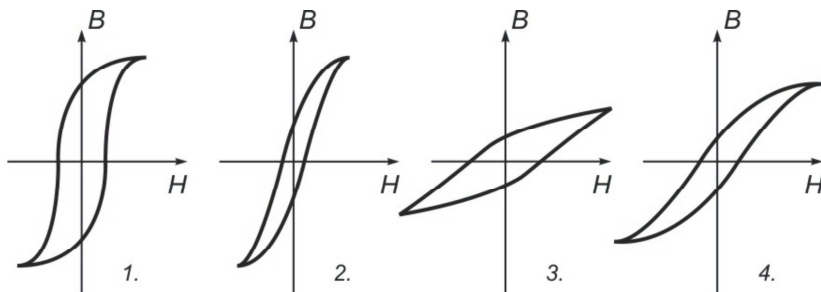


Рис. 17

9. Як за графіком, що зображений на рис. 18, визначити коерцитивну силу феромагнетика?

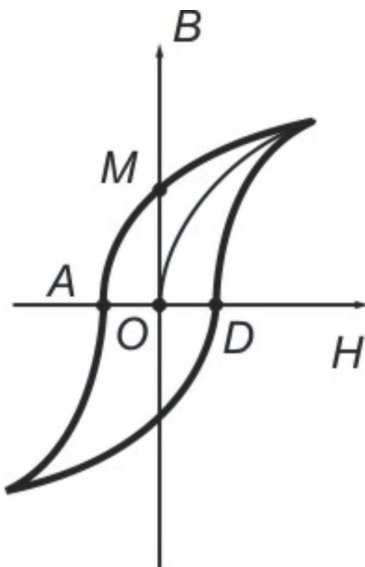


Рис. 18

10. Як за графіком, що зображений на рис. 18, визначити залишкову індукцію феромагнетика?
11. Як залежить ЕРС індукції від швидкості переміщення провідника в магнітному полі?
12. Які значення магнітної проникності відповідають феромагнетикам (дані для проникності надані для однієї і тої ж напруженості зовнішнього магнітного поля): 500; 0,99996; 1,00017; 0,9998; 10?
13. Чи може виникати індукційний струм в нерухомому замкненому провідникові, що знаходиться в змінному магнітному полі?
14. Дротяна рамка обертається в однорідному магнітному полі навколо своєї осі, що паралельна напруженості магнітного поля. Чи буде в ній виникати індукційний струм?
15. Яке явище буде спостерігатися в масивному провіднику, якщо його вмістити в змінне магнітне поле?
16. Маємо вертикально розташовану котушку, на якій лежить металевий предмет. Чому цей предмет нагрівається, коли по витках котушки протікає змінний струм і залишається холодним при протіканні сталого струму?
17. Чи може бути в просторі електричне поле із замкненими силовими лініями? Якщо може, то коли?
18. Чи зустрічаються замкнені магнітні силові лінії навколо простору, в якому немає електричних зарядів? Якщо зустрічаються, то коли?
19. Від чого залежить величина виникаючої в контурі ЕРС самоіндукції: від індуктивності контура; опору контура; швидкості змінення струму в контурі, орієнтації контура по відношенню до зовнішнього магнітного поля?
20. Від чого залежить індуктивність контура (контур знаходиться в вакуумі): від сили струму в контурі; швидкості змінени магнітного потоку крізь поверхню цього контура, розмірів і форми контура; матеріалу провідника, орієнтації контура відносно зовнішнього магнітного поля?
21. Назвіть одиниці вимірювання магнітної сталої, магнітної індукції, магнітного потоку, індуктивності.
22. Від чого залежить індуктивність соленоїда, що має феромагнітний сердечник: від кількості витків, від геометричних розмірів соленоїда, від опору провідника, з якого виготовлено соленоїд, від поперечного перетину провідника, з якого виготовлено соленоїд, від властивостей матеріалу, з якого виготовлено сердечник?

23. Які з перелічених тверджень витікають з рівнянь Максвелла: навколо заряджених частинок, що рухаються, виникає магнітне поле; між електричним і магнітним полями існує взаємний зв'язок: зміна одного приводить до виникнення другого і навпаки; навколо заряджених частинок або тіл існує електричне поле; швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль співпадає з швидкістю світла?
24. Яке з наведених рівнянь Максвелла відображає той факт, що в просторі виникає вихрове магнітне поле?

$$1) \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = -\frac{d\Phi}{dt},$$

$$2) \int_L (\vec{H} d\vec{l}) = \sum_{i=1}^n I_i + \frac{d}{dt} \int_S D_n dS,$$

$$3) \oint_S D_n dS = q,$$

$$4) \oint_S (\vec{B} \vec{n}) dS = 0.$$

26. Яке з наведених рівнянь Максвелла відображає той факт, що в просторі, де змінюється магнітне поле, виникає вихрове електричне поле?

$$1) \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = -\frac{d\Phi}{dt},$$

$$2) \int_L (\vec{H} d\vec{l}) = \sum_{i=1}^n I_i + \frac{d}{dt} \int_S D_n dS,$$

$$3) \oint_S D_n dS = q,$$

$$4) \oint_S (\vec{B} \vec{n}) dS = 0,$$

$$5) i = \sigma E.$$

Задачі: 11.39; 11.51; 11.93; 11.99; 11.108.

Задачі для самостійного розв'язання на занятті: 11.96; 11.111; 11.119.

Вказівки до розв'язання задач

В явищах електромагнітної індукції магнітний потік крізь провідний контур може змінюватися як при русі самого контура або окремих його ділянок, так і при зміні за часом магнітного поля. В обох випадках для визначення ЕРС індукції користуються законом Фарадея:

$$E_i = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Якщо в задачі треба знайти різницю потенціалів на кінцях провідника, що рухається в магнітному полі, то треба мати на увазі, що шукана різниця потенціалів чисельно дорівнює ЕРС, яка виникає в провіднику.

Якщо замкнений контур знаходиться в змінному за часом магнітному полі, то оскільки при цьому виникає вихрове електричне поле із замкненими силовими лініями, поняття потенціалу в цьому випадку взагалі не можна застосовувати.

У формулі $\Phi = LI$ величина Φ означає повний магнітний потік, або потокозціплення і вимірюється сумою магнітних потоків, що перетинають кожний виток соленоїда.

Приклади розв'язання задач

Задача 1

В однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл рівномірно з частотою 10 с^{-1} обертається рамка. Рамка складається з 1000 витків, що щільно прилягають один до одного. Площа рамки 150 см^2 . Визначити миттєве значення ЕРС індукції, що відповідає куту повороту на 30° .

Дано:

$$B = 0,1 \text{ Тл}$$

$$N = 1000$$

$$n = 10 \text{ с}^{-1}$$

$$S = 150 \text{ см}^2 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$E_i - ?$$

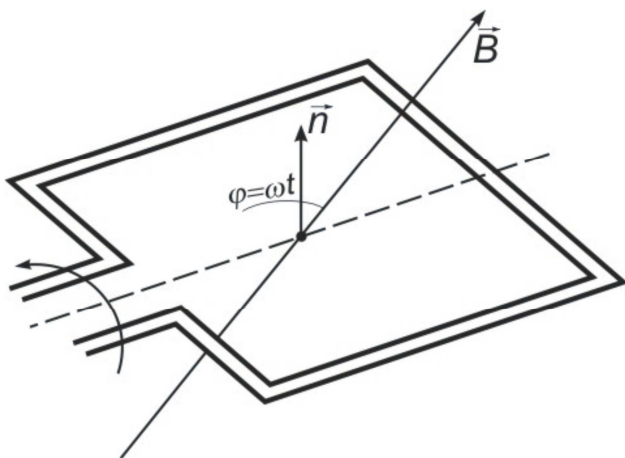


Рис. 19

Розв'язання

Миттєве значення ЕРС індукції E_i визначається основним законом електромагнітної індукції Фарадея – Максвелла:

$$E_i = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

де Ψ - потікозціплення. У свою чергу, Ψ зв'язано з магнітним потоком Φ і кількістю витків N , що щільно прилягають один до одного, співвідношенням

$$\Psi = N \cdot \Phi$$

Скориставшись цим виразом, формулу (1) отримаємо у вигляді

$$E_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

При обертанні рамки магнітний потік Φ , що пронизує рамку в момент часу t (рис. 19), змінюється за законом

$$\Phi = BS \cos \omega t, \quad (3)$$

де B – магнітна індукція; S – площа рамки; ω – кругова або циклічна частота.

Підставляємо у формулу (2) вираз (3) і диференціюємо його за часом. Так ми знаходимо миттєве значення ЕРС індукції:

$$E_i = \omega NBS \sin \omega t. \quad (4)$$

Кругова частота ω зв'язана з частотою обертання n співвідношенням:

$$\omega = 2\pi n.$$

Підставляючи значення ω у формулу (4), одержимо:

$$E_i = 2\pi n N B S \sin \omega t.$$

Підставимо чисельні значення всіх величин ($\alpha = \omega t = 30^\circ$) і отримаємо:

$$E_i = 2n \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 10^{-1} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 = 47,1 \text{ (В)}.$$

Перевірка одиниць вимірювання:

$$[E_i] = [\text{Тл} \cdot \text{м}^2 / \text{с}] = [\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2 / \text{А} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}] = [\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} / \text{А} \cdot \text{с}] = [\text{В}].$$

Відповідь: $E_i = 47,1 \text{ В}$.

Задача 2

Соленоїд з сердечником з немагнітного матеріалу містить 2000 витків проводу, причому витки щільно прилягають один до одного. При силі струму 4 А магнітний потік дорівнює 6 мкВб. Визначити індуктивність соленоїда і енергію магнітного поля соленоїда.

Дано:

$$N = 2000$$

$$I = 4 \text{ А}$$

$$\Phi = 6 \text{ мкВб}$$

$$L, W - ?$$

Розв'язання

Індуктивність L зв'язана з потокозціпленням Ψ і силою струму I співвідношенням:

$$\Psi = LI \quad (1)$$

В свою чергу потокозціплення можна виразити через потік Φ і число витків N (при умові, що витки щільно прилягають один до одного) співвідношенням:

$$\Psi = N\Phi \quad (2)$$

З виразів (1) і (2) знаходимо індуктивність соленоїда:

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (3)$$

Підставляємо числові дані у вираз (3) і проводимо обчислення:

$$L = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{4} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 3 \text{ мГн}.$$

Енергія магнітного поля соленоїда з індуктивністю L при силі

струму I , що протікає по обмотці соленоїда, може бути обчислена за формулою

$$W = \frac{1}{2} LI^2.$$

Підставимо у цю формулу вираз для L з (3) і отримаємо:

$$W = \frac{1}{2} N \Phi I.$$

Підставимо значення величин у системі СІ і виконаємо обчислення:

$$W = 0,5 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} = 24 \text{ мДж}.$$

Перевірка одиниць вимірювання:

$$[W] = [B\phi \cdot A] = [T \cdot m^2 \cdot A] = [H \cdot m \cdot m^2 \cdot A / A \cdot m^2] = [H \cdot m] = [Дж].$$

Відповідь: $W = 24 \text{ Дж}$.

Список джерел

1. Савельев И. В. Курс общей физики.[Текст] / Т.2.: учебник для высших учебных заведений / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1989. – 540 с.
2. Кучерук І.М. Загальна фізика. Електрика і магнетизм. . [Текст] / підручник / І. М Кучерук., І. Т Горбачук – К.: Вища школа, 1995. – 296 с.
3. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. [Текст] / В. С. Волькенштейн – М.: Наука, 1990 – 320 с.
4. Загальний курс фізики. Збірник задач [Текст] : підручник / І. П. Гаркуша, І. Т. Горбачук, В. П. Курінний, І.М. Кучерук. – К.: Техніка, 2004. – 350 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки
до практичних занять з курсу загальної фізики, розділ "Електрика і
магнетизм" (для студентів 1 курсу всіх форм навчання за напрямками
підготовки 6.050701, "Електротехніка та електротехнології", 6.050702
"Електромеханіка")

Укладачі: Аксьонова Катерина Юріївна
Оксюк Юрій Данилович

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання К. Ю. Аксьонова, Ю. Д. Оксюк

План 2012, поз 279 М

Підп. до друку 19.06.2012
Друк на ризографі.
Зам. №

Формат 60x84 /16
Ум. друк. арк. 2,70
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.