

Міністерство освіти і науки України
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
Кафедра Прикладної фізики та наноматеріалів

ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

**Методичні вказівки та комплексне завдання
для студентів усіх спеціальностей**

УДК 530.10

Укладачі: Ірха В.І., Марколенко П.Ю.

Електромагнетизм: методичні вказівки та комплексне завдання для студентів усіх спеціальностей. – Одеса: ДУІТЗ, 2023. – 44 с.

Методичні вказівки розглянуто
і рекомендовано до друку
на засіданні кафедри ПФН.
Протокол № 5 від 15.11.2022 р.

Структура модуля «ЕЛЕКТРИКА»

Змістовий модуль	Лекції (год.)	Заняття		Самос- тійна робота	Індиві- дуальна робота
		прак- тичні	лабо- раторні		
Модуль ЕЛЕКТРИКА (74 години)					
Тема 1. Електростатика	6	4	10	16	
Тема 2. Закони постійного струму	2	2	2	32	
Разом за змістовим модулем	8	6	12	48	

ЕЛЕКТРИКА

- 1.1. Електричні заряди та їхня взаємодія. Електричне поле точкового заряду. Електричне поле системи зарядів (2 год.).
- 1.2. Теорема Остроградського-Гаусса та її використання для обчислення характеристик електричного поля (2 год.).
- 1.3. Різниця потенціалів та її визначення. Зв'язок між потенціалом та напруженістю поля. Провідники в електричному полі (2 год.).
- 1.4. Електроємність. З'єднання конденсаторів. Діелектрики в електричному полі (2 год.).
- 1.5. Постійний електричний струм. Закони Ома та Джоуля – Ленца. З'єднання опорів (2 год.).
- 1.6. Електрорушійна сила. Правила Кірхгофа (2 год.).

Теми практичних занять модуля «ЕЛЕКТРИКА»

№ п/п	Тема	Години
1	Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції полів. Електростатична сила	2
2	Потенціал. Різниця потенціалів. Робота по переміщенню зарядів в електричному полі	2
3	Електроємність віддалених тіл та системи тіл. Енергія електричного поля	2
4	Закони постійного струму	2
5	Розгалужені кола. Правила Кірхгофа	2

**ШКАЛА ОЦІНЮВАННЯ:
національна та ECTS**

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проєкту (роботи), практики	для заліку
90 – 100	A	відмінно	зараховано
82 – 89	B	добре	
74 – 81	C		
64 – 73	D	задовільно	
60 – 63	E		
35 – 59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0 – 34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ЩОДО ВИКОНАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ЗАВДАННЯ

1. Для виконання комплексного завдання № 1 студенти повинні вивчити розділи «Електрика» курсу фізики.

2. Студент повинен розв'язати п'ять задач: 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5. Номер варіанта визначається порядковим номером студента в журналі групи. Нумери умов, які студент повинен включити до комплексного завдання, слід брати в таблицях вхідних даних.

3. Звіт з індивідуального завдання виконується в окремому зошиті. Записи проводяться на правому боці розвороту зошита. На лівому боці записують зауваги викладача та зроблені студентом виправлення.

4. На обкладинці зошита слід зазначити назву роботи, номер варіанта, прізвище та ініціали студента, шифр групи.

5. Задачі слід розташовувати у порядку, зазначеному викладачем. Умову треба переписувати повністю. Зробити **короткий запис умови**. Привести значення заданих величин до **системи одиниць СІ**. Навести пояснювальну **схему** чи **рисунок**.

6. При розв'язуванні задач треба передусім встановити основні фізичні явища й подати формули, котрі відбивають ці явища. Всі позначення у формулах слід **пояснити**.

7. З наведених формул слід скласти систему рівнянь та віднайти розв'язок задач чи її частини в **літерному вигляді**, де шукана величина має бути подана через задані величини в літерних (символьних) позначеннях.

8. Слід **перевірити одиниці виміру** здобутих величин на відповідність їх до сподіваних. Для цього підставити до формули літерного розв'язку замість символу кожної величини її одиницю виміру і здійснити необхідні перетворення. Лише після збігу одиниць виміру зі сподіваними слід підставити до формули літерного розв'язку **числові значення** величин і зробити обчислення. Обчислення провадити з трьома значущими цифрами.

9. Наприкінці роботи слід зазначити використану літературу.

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ФОРМУЛИ

Електрика

Напруженість та потенціал електростатичного поля ϵ

$$\vec{E} = \vec{F} / q_0; \quad \varphi = W_n / q_0,$$

де $\vec{F}$ – сила, котра діє на додатний точковий заряд q_0 , який поміщено в дану точку поля; W_n – потенційна енергія заряду q_0 .

Напруженість та потенціал поля точкового заряду q на відстані r від заряду

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^2}; \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r},$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала; ε – діелектрична проникність середовища.

Напруженість поля рівномірно зарядженої зарядом Q сфери радіусом R на відстані r від центра сфери:

$$\text{а) } E = 0 \text{ за } r < R; \quad \text{б) } E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon \cdot r^2} \quad \text{за } r \geq R.$$

Лінійна та поверхнева густина заряду

$$\tau = \frac{dQ}{dl}; \quad \sigma = \frac{dQ}{dS}.$$

Напруженість поля нескінченного рівномірно зарядженого циліндра радіусом R на відстані r від осі циліндра:

$$\text{а) } E = 0 \text{ за } r < R; \\ \text{б) } E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r} \quad \text{за } r \geq R.$$

Напруженість поля нескінченної рівномірно зарядженої площини:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Зв'язок поміж напруженістю та потенціалом електростатичного поля:

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dr}.$$

Для однорідного поля:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_{1,2}},$$

де $r_{1,2}$ – відстань між еквіпотенційними поверхнями з потенціалами φ_1 та φ_2 .

Робота сил поля щодо переміщення заряду q_0 з точки поля з потенціалом φ_1 до точки з потенціалом φ_2

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Електроємність конденсатора

$$C = \frac{Q}{U},$$

де Q – заряд конденсатора, U – різниця потенціалів пластин конденсатора.

Електроємність плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

де S – площа кожної пластини конденсатора; d – відстань поміж пластинами.

Електроємність циліндричного конденсатора:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon \cdot L}{\ln(R_2 / R_1)},$$

де L – довжина обкладинок конденсатора; R_1 та R_2 – радіуси коаксialьних циліндрів.

Електроємність сферичного конденсатора:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1},$$

де R_1 та R_2 – радіуси концентричних сфер.

Енергія зарядженого конденсатора:

$$W = \frac{QU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C},$$

де Q – заряд конденсатора; C – його електроємність; U – різниця потенціалів обкладинок конденсатора.

Закон Ома:

а) для однорідної ділянки кола

$$I = \frac{U}{R},$$

де I – сила струму, який протікає ділянкою кола; U – напруга на ділянці; R – опір ділянки;

б) для неоднорідної ділянки кола

$$I = \frac{\epsilon - \Delta\varphi_{2,1}}{R + r},$$

де $\Delta\varphi_{2,1} = U = \varphi_2 - \varphi_1$ – різниця потенціалів на кінцях ділянки; ϵ – ЕРС джерела, яке входить до ділянки; r – внутрішній опір джерела;

в) для замкнутого кола

$$I = \frac{\epsilon}{R + r},$$

де R – зовнішній опір кола, r – внутрішній опір джерела.

Правила Кірхгофа

$$\sum I_i = 0; \quad \sum I_i R_i + \sum I_i r_i = \sum \epsilon_i,$$

де $\sum I_i$ – алгебрична сума струмів, які сходяться у вузлі, котрі позитивні, коли струм входить до вузла;

$\sum I_i R_i$ – алгебрична сума спаду напруги на зовнішніх опорах замкнутого контура, а $\sum I_i r_i$ – алгебрична сума спаду напруги на внутрішніх опорах джерел замкнутого контура, які є позитивні, коли напрямок сили струму збігається з обраним заздалегідь напрямком обходу контура;

$\sum \epsilon_i$ – алгебрична сума ЕРС джерел, які входять до цього контура, які є позитивні, коли напрямок роботи сторонніх сил (від «–» до «+» всередині джерела) збігається з обраним заздалегідь напрямком обходу контура.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 1.1. Сфера радіусом $R = 5$ см та нескінченна площина рівномірно заряджені з поверхневою густиною заряду $\sigma_1 = 10$ нКл/м² та $\sigma_2 = -15$ нКл/м² відповідно. Центр сфери знаходиться на відстані $l = 10$ см від площини.

Знайти: напруженість електростатичного поля в точці A , яка перебуває на відстані $a = 5$ см від поверхні сфери та 10 см – від площини; силу, яка діятиме на точковий заряд $q_0 = 0,1$ нКл, якщо його помістити в точку A .

Дано: $a = 5$ см $= 5 \cdot 10^{-2}$ м

$\sigma_1 = 10$ нКл/м² $= 10 \cdot 10^{-9}$ Кл/м²

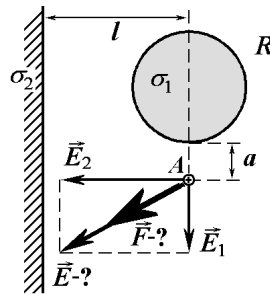
$\sigma_2 = -15$ нКл/м² $= -15 \cdot 10^{-9}$ Кл/м²

$R = 5$ см $= 5 \cdot 10^{-2}$ м

$l = 10$ см $= 10 \cdot 10^{-2}$ м

$b = 10$ см $= 10 \cdot 10^{-2}$ м

$q_0 = 0,1$ нКл $= 0,1 \cdot 10^{-9}$ Кл



$E, F - ?$

Розв'язання:

1. Відповідно до принципу суперпозиції електричних полів, кожен заряд створює поле незалежно від перебування в просторі інших зарядів. Тому повна напруженість дорівнює сумі окремих:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Напруженість поля сфери у вакуумі (чи в повітрі) на відстані r від її центра

$$E_1 = \frac{|Q_1|}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1)$$

де ϵ_0 – електрична стала; Q_1 – заряд сфери. Подамо заряд сфери через поверхневу густина заряду σ_1 та площу поверхні ($S = 4\pi R^2$), а відстань r від точки до центра сфери – через відстань a до поверхні сфери та радіус сфери R :

$$Q_1 = 4\pi\sigma_1 R^2; \quad r = a + R.$$

Підставивши ці вирази до формули (1), дістанемо

$$E_1 = \frac{4\pi R^2 |\sigma_1|}{4\pi\epsilon_0 (a + R)^2} = \frac{R^2 |\sigma_1|}{\epsilon_0 (a + R)^2}. \quad (2)$$

Напруженість поля рівномірно зарядженої площини з поверхневою густиною σ_2

$$E_2 = \frac{|\sigma_2|}{2\epsilon_0}. \quad (3)$$

Вектор $\vec{E}_1$ спрямований силовою лінією від сфери, так як сфера заряджена позитивним зарядом; вектор $\vec{E}_2$ спрямований до площини, так як вона заряджена негативно.

Модуль вектора $\vec{E}$ віднайдемо за теоремою косинусів:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha},$$

але, внаслідок того що вектори $\vec{E}_1$ та $\vec{E}_2$ взаємно перпендикулярні і $\cos 90^\circ = 0$

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}. \quad (4)$$

Підставивши (2) та (3) до (4) та виносячи спільний множник $1/\epsilon_0$ за знак кореня, дістанемо

$$E = \frac{1}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{R^2 \sigma_1^2}{(a+R)^2} + \frac{\sigma_2^2}{4}}. \quad (5)$$

2. Величину сили, котра діє на точковий заряд q_0 , який перебуває в електростатичному полі, віднайдемо за формулою

$$F = q_0 E. \quad (6)$$

Перевіряємо, чи дає формула (5) одиницю напруженості В/м, а формула (6) – одиницю сили Н.

$$[E] = \frac{1}{[\epsilon_0]} \{[\sigma^2]\}^{1/2} = \frac{1}{1\text{Ф/м}} \left\{1 \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^4}\right\}^{1/2} = \frac{1\text{Кл} \cdot \text{м}}{1\text{Ф} \cdot \text{м}^2} = \frac{1\text{Кл} \cdot \text{В}}{1\text{Кл} \cdot \text{м}} = 1\text{В/м};$$

$$[F] = [Q][E] = 1\text{Кл} \cdot 1\text{В/м} = \frac{1\text{Кл} \cdot 1\text{Дж/Кл}}{\text{м}} = \frac{1\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}} = 1\text{Н}.$$

Підставимо до формул (5) та (6) значення величин в одиницях СІ і зробимо обчислення:

$$E = \frac{1}{8,85 \cdot 10^{-12}} \sqrt{\frac{0,05^2 \cdot 10^{-16}}{(0,05 + 0,05)^2} + \frac{(1,5 \cdot 10^{-8})^2}{4}} = 1,02 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

$$F = 10^{-10} \cdot 1,02 \cdot 10^3 = 1,02 \cdot 10^{-7} \text{ Н}.$$

Напрямок сили збігається з напрямком вектора $\vec{E}$ (оскільки $q_0 > 0$), що і показано на рисунку.

Відповідь: $E = 1,02 \cdot 10^3 \text{ В/м}$, $F = 1,02 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

Приклад 1.2. Повітряний циліндричний конденсатор складається з двох коаксialьних циліндрів радіусами $R_1 = 1 \text{ см}$ та $R_2 = 3 \text{ см}$. Довжина обкладок конденсатора $L = 50 \text{ см}$. Конденсатор зарядили до різниці потенціалів $U = 100 \text{ В}$ і відключили від джерела. Визначити: 1) ємність конденсатора; 2) напруженість поля в конденсаторі на відстані $r = 2 \text{ см}$ від осі циліндра; 3) швидкість, яку матиме протон, переміщуючись під дією сил поля від однієї обкладки конденсатора до другої; 4) наскільки зміниться енергія конденсатора, якщо простір поміж циліндрами заповнити парафіном ($\epsilon = 2$).

Дано: $\varepsilon = 2$

$$R_1 = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$$

$$R_2 = 3 \text{ см} = 0,03 \text{ м}$$

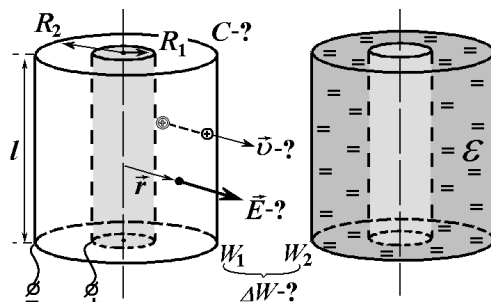
$$L = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$$

$$r = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

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

C ; E ; v ; ΔW – ?



Розв'язання

1. Електроємність повітряного $\varepsilon = 1$ циліндричного конденсатора обчислюється за формулою

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln(R_2 / R_1)}, \quad (1)$$

де ε_0 – електрична постійна; L – довжина обкладинок конденсатора; R_1 та R_2 – радіуси циліндрів.

2. Для знаходження напруженості поля на відстані r від осі циліндрів використаємо принцип суперпозиції електричних полів

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

де $\vec{E}_1$ – напруженість поля в точці, створена внутрішнім циліндром; $\vec{E}_2$ – напруженість поля зовнішнього циліндра в тій самій точці. Оскільки напруженість необхідно знайти на відстані $r < R_2$, то $E_2 = 0$ й $E = E_1$. Припускаючи, що циліндр досить довгий ($r \ll L$), необхідну напруженість дістанемо за формулою розрахунку напруженості поля нескінченно довгого циліндра :

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}, \quad (2)$$

де $\tau = Q/L$ – лінійна густина заряду циліндра. Заряд конденсатора Q , зв'язаний з напругою U між його обкладками співвідношенням

$$Q = CU. \quad (3)$$

Підставивши до формули (2) вирази для τ та Q , дістанемо

$$E = \frac{CU}{2\pi\varepsilon_0 r l}. \quad (4)$$

3. Протон, переміщуючись під дією сил поля конденсатора, змінює свою кінцеву енергію на величину, рівну роботі сил поля. Зміна кінетичної енергії

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

де T_1 й T_2 – кінетична енергія протона в початковій і кінцевій точках шляху.

Якщо у протона не було початкової швидкості, то $T_1 = 0$ і

$$\Delta T = T_2 = \frac{m\upsilon^2}{2}, \quad (5)$$

де m – маса протона; υ – його кінцева швидкість.

Робота сил поля дістається як добуток заряду протона, який дорівнює елементарному заряду e на різницю потенціалів U :

$$A = eU. \quad (6)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (5) та (6), одержимо

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = eU.$$

звідки

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (7)$$

4. При заповненні конденсатора парафіном його енергія зміниться на величину

$$\Delta W = W' - W, \quad (8)$$

де W – енергія повітряного конденсатора; W' – енергія конденсатора з парафіном.

Енергія конденсатора із зарядом Q та ємністю C визначається:

$$W = \frac{Q^2}{2C}. \quad (9)$$

Так як конденсатор відімкнено від джерела, то заряд Q на його обкладках при заповненні парафіном залишиться без змін. Ємність конденсатора після заповнення парафіном зміниться й дорівнюватиме

$$C' = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 L}{\ln(R_2 / R_1)} = \epsilon C.$$

Тоді

$$W' = \frac{Q^2}{2C'} = \frac{Q^2}{2\epsilon C}. \quad (10)$$

Підставляємо (9) та (10) у (8) й виносячи спільний множник за дужки

$$\Delta W = \frac{Q^2}{2C} \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right) = \frac{Q^2 (1 - \epsilon)}{2\epsilon C},$$

або з урахуванням формули (3) зміна енергії конденсатора визначається як

$$\Delta W = \frac{CU^2 (1 - \epsilon)}{2\epsilon}.$$

Підставимо числові значення до розрахункових формул (1), (4), (7) і (11) та виконаємо обчислення:

$$C = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5}{\ln(0,03/0,01)} = 2,53 \cdot 10^{-11} \text{ Ф};$$

$$E = \frac{2,53 \cdot 10^{-11} \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,02 \cdot 0,5} = 4,55 \cdot 10^3 \text{ В/м};$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 100}{1.67 \cdot 10^{-27}}} = 1.38 \cdot 10^5 \text{ м/с};$$

$$\Delta W = \frac{2.53 \cdot 10^{-11} \cdot 100^2 (1-2)}{2 \cdot 2} = -6.33 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}.$$

Таким чином, енергія, відключеного від джерела, конденсатора при внесенні діелектрика зменшується ($\Delta W < 0$). Це пов'язано з тим, що сили поля конденсатора поляризують діелектрик і втягують його до області більшої напруженості.

Відповідь: $E = 4.55 \cdot 10^3 \text{ В/м}$, $v = 1.38 \cdot 10^5 \text{ м/с}$, $\Delta W = -6.33 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$.

Приклад 1.3. Електричне коло складається із двох джерел ЕРС $\varepsilon_1 = 20 \text{ В}$, $\varepsilon_2 = 5 \text{ В}$ і трьох опорів: $R_1 = R_2 = 19 \text{ Ом}$ та $R_3 = 10 \text{ Ом}$. Внутрішні опори джерел $r_1 = 2 \text{ Ом}$, $r_2 = 1 \text{ Ом}$, через опір R_1 проходить струм $I_1 = 0.2 \text{ А}$ в напрямку, зазначеному на рисунку. Віднайти: опір R_1 та сили струмів, які проходять через опори R_2 та R_3 , різницю потенціалів поміж точками A та B .

Дано:

$$\varepsilon_1 = 20 \text{ В}$$

$$\varepsilon_2 = 5 \text{ В}$$

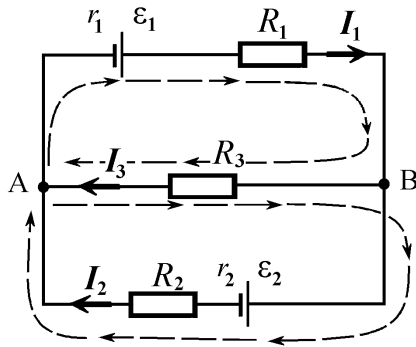
$$r_1 = 2 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 1 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 19 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 10 \text{ Ом}$$

$$I_1 = 0.2 \text{ А}$$



Віднайти: $I_2, I_3, R_1, \varphi_B - \varphi_A$?

Розв'язання:

Для розрахунку розгалужених кіл використовують правила Кірхгофа.

Для знаходження опору і двох значень сили струму, необхідно скласти три рівняння. Перед складанням рівнянь слід довільно обрати: а) напрямки струмів (якщо їх не визначено умовою); б) напрямки обходу контурів. Напрямок струму I_1 задано, напрямки струмів I_2 та I_3 оберемо так само, як на схемі, й домовимось обходити контури за годинниковою стрілкою (штрихова лінія на схемі). Дана схема має два вузли: A та B . При складанні рівнянь за першим правилом Кірхгофа слід враховувати, що струм, який підходить до вузла, входить до рівняння зі знаком “+”, а струм, що виходить від вузла, – зі знаком “–”.

За першим правилом Кірхгофа, для вузла A

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

Для вузла B скласти рівняння не має змісту – воно зводиться до рівняння (1). Необхідні ще два рівняння дістанемо, виходячи із другого правила Кірхгофа. При цьому слід дотримуватись наступних правил щодо знаків:

а) падіння напруги (добуток IR чи Ir) входить рівняння зі знаком “+”,

якщо напрям струму збігається з напрямом обходу контуру, в іншому випадку – зі знаком “–”;

б) ЕРС входить до рівняння зі знаком “+”, якщо вона збільшує потенціал в напрямку обходу контуру (перехід відбувається від мінуса до плюса всередині джерела), в іншому випадку – зі знаком “–”.

За другим правилом Кірхгофа, для контурів $BE_1R_1AR_3B$ та $BR_3AR_2E_2B$

$$I_1R_1 + I_1R_1 + I_3R_3 = \varepsilon_1, \quad (2)$$

$$-I_3R_3 + I_2R_2 + I_2R_2 = -\varepsilon_2. \quad (3)$$

Підставивши до рівнянь (1)...(3) значення заданих величин, дістанемо систему рівнянь

$$\begin{cases} 0.2 - I_3 - I_2 = 0 \\ 0.2 \cdot 2 + 0.2R_1 + 10I_3 = 20 \\ -10I_3 + 19I_2 + I_2 = -5 \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} 0.2 - I_3 - I_2 = 0 \\ 0.2R_1 + 10I_3 = 19.6 \\ 20I_2 - 10I_3 = -5 \end{cases} \quad (4)$$

Виразимо I_3 із рівняння (4) й підставимо в рівняння (6):

$$I_3 - 0.2 - I_2; \quad 20I_2 - 2 + 10I_2 = -5, \quad \text{звідки} \quad I_2 = -0.1 \text{ А.}$$

Знак “–”, у значенні струму I_3 означає, що напрямок струму I_3 було обрано протилежним до дійсного. В реальності струм I_3 протікає від вузла B до вузла A .

З рівняння (4) відшукаємо I_3 :

$$I_3 = 0.2 - (-0.1); \quad I_3 = 0.3 \text{ А.}$$

Із рівняння (5) знаходимо R_1 :

$$R_1 = \frac{19.6 \cdot 10 \cdot 0.3}{0.2} = 83 \text{ Ом.}$$

Різницю потенціалів $U = \Delta\varphi_{A,B} = \varphi_B - \varphi_A$ можна віднайти, якщо записати закон Ома для ділянки кола, наприклад BE_1R_1A :

$$I = \frac{\varepsilon - \Delta\varphi_{A,B}}{R + r}. \quad (7)$$

У законі Ома вже враховано, що позитивний напрямок сили струму збігається з напрямком роботи сторонніх сил джерела, що відповідає збільшенню потенціалу. Тоді шукана різниця потенціалів буде:

$$\Delta\varphi_{A,B} = \varepsilon_1 - I_1(R_1 + r_1).$$

Виконуємо обчислення

$$\Delta\varphi_{A,B} = 20 \text{ В} - 0.2(83 + 2) = 3 \text{ В.}$$

Відповідь: $I_2 = -0.1 \text{ А}$; $I_3 = 0.3 \text{ А}$; $R_1 = 83 \text{ Ом}$, $\Delta\varphi_{A,B} = 3 \text{ В}$.

ЗАДАЧІ

Задача 1.1. Принцип суперпозиції електричних полів

Розв'язати у відповідності зі своїм варіантом одну з наведених нижче задач. Номер задачі і всі необхідні дані подано в табл. 1.1. Якщо в номері задачі є літерний індекс, то слід відповідати лише на запитання, котре відповідає цьому індексові.

1. Електростатичне поле створюється двома нескінченними паралельними площинами, які заряджені рівномірно з поверхневими густинами σ_1 та σ_2 . Знайти силу, що діє в цьому полі на точковий заряд Q_1 , якщо заряд перебуває: а) поміж площинами; б) поза межами площин.

2. Точковий заряд Q_1 перебуває в центрі рівномірно зарядженої сфери радіусом R . Віднайти напруженість електростатичного поля у двох точках, які лежать від центра на відстанях r_1 та r_2 , якщо: а) заряд сфери дорівнює Q_2 ; б) поверхнева густина заряду сфери дорівнює σ_2 .

3. Довга нитка, рівномірно заряджена з лінійною густиною τ_1 , розташована на осі довгого циліндра, радіус якого R . Циліндр рівномірно заряджено з лінійною густиною τ_2 . Віднайти напруженість електростатичного поля у двох точках: 1) на відстані r_1 від нитки; 2) на відстані l від поверхні циліндра.

4. Дві довгі паралельні нитки рівномірно заряджено з лінійними густинами τ_1 та τ_2 . Відстань поміж нитками дорівнює l . Віднайти напруженість електростатичного поля в точці, яка перебуває на відстані r_1 від першої нитки та r_2 від другої нитки.

5. Електростатичне поле утворюється рівномірно зарядженими нескінченною площиною та сферою. Поверхнева густина заряду площини σ_1 . Радіус сфери R , поверхнева густина заряду σ_2 . Центр сфери міститься на відстані l від площини. Віднайти напруженість поля в точці, котра розміщена поміж сферою й площиною на відстані r_1 від площини.

Задача 1.2. Електроємність

Розв'язати одну з нижчеподаних задач. Номер задачі та всі необхідні дані наведено в табл. 1.2.

1. Сферичний повітряний конденсатор складається з двох концентричних сфер з радіусами R_1 та R_2 . Конденсатор заряджено до певної різниці потенціалів. В табл. 1.2 задано по варіантах R_1 , R_2 й одну з таких величин: Q – заряд на обкладках конденсатора; U – різниця потенціалів поміж обкладками; v – швидкість, яку сприймає електрон, проходячи під дією сил поля від однієї обкладки до іншої. Віднайти: 1) величину, зазначену в останній колонці таблиці; 2) напруженість поля в конденсаторі на відстані r від центра сфери; 3) енергію конденсатора.

2. Циліндричний повітряний конденсатор складається з двох коаксіальних

циліндрів радіусами R_1 та R_2 . Довжина конденсатора L . Конденсатор заряджено до певної різниці потенціалів. В табл. 1.2 задано по варіантах розміри конденсатора й одну з таких величин: Q – заряд на обкладках конденсатора; U – різниця потенціалів між обкладками; v – швидкість, яку має протон, проходячи під дією сил поля від однієї обкладки до іншої. Знайти: 1) величину, зазначену в останній колонці таблиці; 2) напруженість поля в конденсаторі на відстані r від осі циліндра; 3) енергію конденсатора.

3. Плоский повітряний конденсатор з площею пластин S та відстанню між пластинами d заряджено і вимкнено із джерела. В табл. 1.2 задано за варіантами розміри конденсатора й одну з таких величин: Q – заряд на обкладках конденсатора; U – різниця потенціалів між обкладками; E – напруженість поля в конденсаторі; v – швидкість, якої набуде електрон, переміщуючись під дією сил поля від однієї обкладки до іншої. Віднайти: 1) величину, зазначену в останній колонці таблиці; 2) наскільки зміниться енергія конденсатора, якщо відстань між його пластинами збільшити в удвічі.

4. Плоский повітряний конденсатор з площею пластин S та відстанню між пластинами d підімкнено до джерела електричної енергії. В табл. 1.2 задано по варіантах розміри конденсатора та одну з таких величин: Q – заряд на обкладках конденсатора; U – різниця потенціалів між обкладками; E – напруженість поля в конденсаторі; v – швидкість, яку матиме протон, переміщуючись під дією сил поля від однієї обкладки до іншої.

Віднайти: 1) величину, зазначену в останній колонці таблиці; 2) наскільки зміниться енергія конденсатора, якщо, не вимикаючи конденсатор із джерела, простір поміж його пластинами заповнити діелектриком з діелектричною проникністю ϵ .

Задача 1.3. Рух заряджених частинок в електричному полі

Розв'язати одну з нижчеподаних задач. Номер задачі вказано в табл. 1.3.

1. Заряджена частинка, що пройшла прискорюючу різницю потенціалів U , влітає у простір між пластинами конденсатора зі швидкістю v , спрямованою до паралельно пластин. Довжина конденсатора ℓ ; відстань між пластинами d ; h – відстань, на яку відхилилася частинка; T – енергія частинки при вильоті; t – час, впродовж якого рухалася частинка; E – напруженість електричного поля; α – кут відхилення частинки. Знайти величини, зазначені в останній графі таблиці для: а) електрона; б) протона; в) α -частинки.

2. Порошина масою m й зарядом Q урівноважена між пластинами плоского повітряного конденсатора, до якого прикладено напругу U . Відстань поміж пластинами дорівнює d . Віднайти величини, зазначені в останній графі таблиці: а) порошина позитивно заряджена; б) порошина негативно заряджена.

Задача 1.4. Закони постійного струму

Розв'язати одну з нижчеподаних задач. Номер задачі вказано в табл. 1.4.

1. Чотири джерела з ЕРС $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$, – внутрішніми опорами r_1, r_2, r_3, r_4 й чотири резистори R_1, R_2, R_3, R_4 – з'єднані так, як показано на рис. 1 чи рис. 2. (згідно з варіантом). Віднайти величини, зазначені в останній графі таблиці: силу струмів на окремих ділянках кола; струм короткого замикання $I_{\text{КЗ}}$; корисну потужність $P_{\text{ПОЛ}}$; повну потужність P_0 ; максимальну потужність $P_{\text{макс}}$; ККД (η) і потужність, що виділяється на резисторах R_1, R_2, R_3, R_4 (P_1, P_2, P_3, P_4) згідно з варіантом.

2. Чотири джерела з ЕРС $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$, внутрішніми опорами r_1, r_2, r_3, r_4 з'єднані як показано на рис. 3. R_1, R_2, R_3, R_4 – опори плечей містка Уїтстона. Віднайти величини, зазначені в останньому стовпчику таблиці за умови, що місток збалансований: сили струмів в окремих плечах містка; струм короткого замикання $I_{\text{КЗ}}$; повну потужність P_0 ; корисну потужність $P_{\text{ПОЛ}}$; максимальну потужність $P_{\text{макс}}$; ККД (η) та потужність, що виділяється в окремих плечах Уїтстона (P_1, P_2, P_3, P_4) згідно варіанта.

Задача 1.5. Розгалужені кола

Складіть схему з трьох сполучених ділянок, відображених на рис. 4. Номери ділянок, ЕРС джерел ε_i , внутрішній опір джерел r_i , опір ділянок R_i (або сила струму I_i , що протікає по одній із ділянок в напрямку від т. A до B) задано по варіантах в табл. 1.5.

Відшукати:

- 1) величини, зазначені в останній графі таблиці;
- 2) різницю потенціалів між точками A та B .

Приклад схеми, яка відповідає 25-му варіанту, показаний на рис. 4,а.

ТАБЛИЦІ ВАРІАНТІВ ЗАВДАНЬ

Таблиця 1.1

Варіант	Номери задачі	Q_1 , нКл	Q_2 , нКл	τ_1 , нКл/м	τ_2 , нКл/м	σ_1 , нКл/м ²	σ_2 , нКл/м ²	R , см	l , см	r_1 , см	R_2 , см
1	1а	+0,2	—	—	—	+2	+4	—	—	—	—
2	2а	-3	+6	—	—	—	—	6	—	3	10
3	4	—	—	-6	-9	—	—	—	6	6	6
4	5	—	—	—	—	+10	+40	4	10	2	—
5	3	—	—	-2	+3	—	—	5	5	4	—
6	16	+0,2	—	—	—	-2	-3	—	—	—	—
7	26	+0,2	—	—	—	—	+3	10	—	1	20
8	4	—	—	+3	+4	—	—	—	5	3	4
9	5	—	—	—	—	4	-9	6	12	3	—
10	1а	+0,1	—	—	—	+2	-3	—	—	—	—
11	26	+0,1	—	—	—	—	-10	5	—	3	10
12	3	—	—	+1	+2	—	—	4	5	1	—
13	16	+0,4	—	—	—	-5	+3	—	—	—	—
14	2а	+1	+5	—	—	—	—	8	—	5	10
15	4	—	—	+10	-5	—	—	—	10	10	10
16	5	—	—	—	—	-6	+8	2	5	1	—
17	4	—	—	-40	-30	—	—	—	5	4	3
18	1а	+0,3	—	—	—	4	-1	—	—	—	—
19	2а	-2	4	—	—	—	—	5	—	2	6
20	4	—	—	+8	+4	—	—	—	8	8	8
21	5	—	—	—	—	+4	-6	5	10	4	—
22	3	—	—	-3	4	—	—	6	3	3	—
23	16	+0,1	—	—	—	+3	+1	—	—	—	—
24	26	-0,4	—	—	—	—	-8	8	—	5	10
25	4	—	—	-8	+6	—	—	—	5	4	3
26	1а	-0,4	—	—	—	-2	+4	—	—	—	—
27	3	—	—	+2	-4	—	—	7	5	4	—
28	26	-0,5	—	—	—	—	+9	10	—	5	15
29	5	—	—	—	—	-3	-8	4	18	6	—
30	4	—	-	+4	+6	—	—	—	10	4	6

Таблиця 1.2

Варіант	№ задачі	R_1 , см	R_2 , см	L , см	S , см ²	d , мм	r , см	ε	Q , нКл	U , в	E , кВ/м	v , м/с	Віднайти
1	1	4	6	—	—	—	5	—	—	—	—	610 ⁶	Q
2	3	—	—	—	100	5	—	—	2	—	—	—	v
3	4	—	—	—	160	6	—	2,3	9	—	—	—	v
4	2	1	2	25	—	—	1,5	—	4	—	—	—	v
5	3	—	—	—	200	5	—	—	—	—	20	—	v
6	1	1	3	—	—	—	2	—	0,8	—	—	—	v
7	4	—	—	—	100	8	—	2,7	7	—	—	—	v
8	3	—	—	—	200	10	—	—	—	200	—	—	v
9	2	2	4	40	—	—	3	—	—	—	—	2·10 ⁵	u
10	1	4	5	—	—	—	4,5	—	—	300	—	—	v
11	3	—	—	—	120	8	—	—	—	—	—	8·10 ⁶	Q
12	4	—	—	—	200	7	—	4	—	—	50	—	v
13	1	2	3	—	—	—	2,5	—	—	—	—	10 ⁷	u
14	2	1,5	2,5	30	—	—	2	—	—	100	—	—	v
15	3	—	—	—	150	4	—	—	4	—	—	—	v
16	2	2,5	3,5	45	—	—	3	—	—	—	—	10 ⁵	Q
17	4	—	—	—	140	10	—	5	—	300	—	—	v
18	1	2,5	3,5	—	—	—	3	—	2	—	—	—	v
19	3	—	—	—	100	10	—	—	—	—	—	9·10 ⁶	u
20	2	1,5	3	35	—	—	2	—	5	—	—	—	v
21	4	—	—	—	100	4	—	4,5	J	—	—	2·10 ⁵	Q
22	1	3	4	—	—	—	3,5	—	—	200	—	—	v
23	2	2	3	30	—	—	2,5	—	—	200	—	—	
24	3	—	—	—	150	6	—	—	—	300	—	—	v
25	4	—	—	—	120	5	—	3,5	—	—	—	3·10 ⁵	u
26	3	—	—	—	260	3	—	—	—	—	—	2·10 ⁵	u
27	2	1	3	10	—	—	2	—	—	400	—	—	Q, v
28	3	—	—	—	280	2	—	—	—	—	—	3·10 ⁵	Q
29	4	—	—	—	290	4	—	6	—	—	—	2·10 ⁵	u
30	1	5	9	—	—	—	7	—	—	250	—	—	Q, v

Таблиця 1.3

Варіант	Номер завдання	$h \cdot 10^{-3}$, м	$v_0 = v_{\text{вх}} \cdot 10^6$, м/с	$L \cdot 10^{-2}$, м	$u \cdot 10^2$, В	$d \cdot 10^{-2}$, м	$E \cdot 10^4$, В/м	α°	$m \cdot 10^{-11}$, кг	$Q \cdot 10^{-14}$, Кл	Зайти
1	1а	3,66	60	5	6	1	—	—	—	—	e/m
2	1а	2	—	—	5	1	—	—	—	—	t
3	1б	0,6	—	—	—	—	8	—	—	—	V_y
4	2а	—	—	—	50	5	—	—	1	—	g
5	1в	—	—	12	4	—	—	—	—	—	t
6	1а	0,8	40	2	4	1	—	—	—	—	m
7	1б	0,67	3	6	7	2	—	—	—	—	e/m
8	1в	6	0,66	6	6	2	—	—	—	—	Q/m
9	2а	—	—	—	40	2	—	—	—	0,08	m
10	1а	5	—	2	—	—	2	—	—	—	V_0
11	1б	0,9	7	7	10	0,53	—	—	—	—	m
12	1в	1	—	8	—	—	4	—	—	—	V
13	1а	4	—	—	—	—	6	—	—	—	V_y
14	2б	—	—	—	20	3	—	—	0,1	—	Q
15	1в	0,8	2,2	8	10	3,05	—	—	—	—	m
16	1а	5	60	—	—	—	4	—	—	—	V
17	1б	0,4	—	9	—	—	3	—	—	—	V_0
18	1в	—	0,5	—	—	—	7	25	—	—	h
19	1б	0,8	—	—	11	1,5	—	—	—	—	t
20	1б	0	—,4	—	—	—	4	20	—	—	h
21	1в	5	—	—	—	—	9	—	—	—	V_y
22	1б	1	0,3	—	10	1,5	—	—	—	—	α
23	1в	3	0,5	—	—	—	8	—	—	—	V
24	1а	4	80	—	8	2	—	—	—	—	T
25	1а	5	90	—	6	1	—	—	—	—	α
26	1б	1	0,6	—	—	—	8	—	—	—	V
27	1в	1,5	0,35	—	45	2,5	—	—	—	—	T
28	1в	1,5	0,4	—	25	2	—	—	—	—	α
29	1а	—	80	—	—	—	—5	8	—	—	h
30	1б	1	0,2	—	40	2	—	—	—	—	T

Таблиця 1.4

Варіант	Рис.	ε_i, B	$r_i, Ом$	$R_i, Ом$	Зайти
1	1	$\varepsilon_1 = 5; \varepsilon_2 = 3, \varepsilon_3 = 2, \varepsilon_4 = 6$	$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 1$	$R_1 = 20, R_2 = 80, R_3 = 10, R_4 = 40$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_0, I_{K3}, P_0$
2	2	$\varepsilon_1 = 4; \varepsilon_2 = 4, \varepsilon_3 = 6$	$r_1 = 0,5, r_2 = 0,5, r_3 = 1$	$R_1 = 40, R_2 = 60, R_3 = 20$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_1, P_2, P_3$
3	2	$\varepsilon_1 = 10; \varepsilon_4 = 4$	$r_1 = 2, r_4 = 0,5$	$R_1 = 100, R_4 = 150$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_1, P_2, P_4$
4	1	$\varepsilon_1 = 6$	$r_1 = 2$	$R_2 = 300, R_4 = 120$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_2$
5	2	$\varepsilon_1 = 5; \varepsilon_2 = 5, \varepsilon_3 = 6, \varepsilon_4 = 2$	$r_1 = 0,5, r_2 = 1, r_3 = 0,5, r_4 = 1$	$R_1 = 100, R_2 = 250, R_3 = 140$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_0, I_{K3}, P_3$
6	2	$\varepsilon_1 = 4; \varepsilon_2 = 2, \varepsilon_3 = 6$	$r_1 = 1, r_2 = 1, r_3 = 1$	$R_1 = 80, R_2 = 45, R_4 = 50$	$I_1, I_2, I_4, I_5, I_6, P_{кор}$
7	1	$\varepsilon_1 = 4; \varepsilon_3 = 3, \varepsilon_4 = 1$	$r_1 = 1, r_3 = r_4 = 0,5$	$R_1 = 10, R_2 = 30$	$I_1, I_2, I_3, I_0, I_{K3}, P_{кор}$
8	3	$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 4$	$r_1 = r_3 = 1$	$R_1 = 0, R_2 = 50, R_4 = 200$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_0, I_{K3}, P_{кор}$
9	1	$\varepsilon_2 = 8, \varepsilon_3 = 6, \varepsilon_4 = 2$	$r_2 = 2, r_3 = 1,5, r_4 = 0,5$	$R_3 = 200, R_4 = 50$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_3, P_4$
10	2	$\varepsilon_3 = 10, \varepsilon_4 = 8$	$r_3 = 2, r_4 = 1$	$R_1 = 50, R_2 = 80, R_3 = 100, R_4 = 150$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_1, P_2, P_3, P_4$
11	1	$\varepsilon_1 = 2, \varepsilon_3 = 4$	$r_1 = 0,5, r_3 = 2$	$R_2 = 80, R_4 = 20$	$I_1, I_2, I_3, I_0, I_{K3}, P_{макс}$
12	3	$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 1$	$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 1$	$R_1 = 20, R_2 = 40, R_4 = 160$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_0, I_{K3}, P_{кор}$
13	3	$\varepsilon_1 = 4, \varepsilon_2 = 2$	$r_1 = 2, r_2 = 1$	$R_1 = 45, R_2 = 75, R_3 = 300$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_0, I_{K3}, P_0$
14	2	$\varepsilon_2 = 6, \varepsilon_3 = 6$	$r_2 = 1, r_3 = 1$	$R_1 = 80, R_2 = 20, R_3 = 10$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_1, P_2, P_3$
15	1	$\varepsilon_1 = 3, \varepsilon_2 = 3, \varepsilon_3 = 3$	$r_1 = r_2 = r_3 = 0,5$	$R_1 = 200, R_3 = 15, R_4 = 45$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_4$
16	1	$\varepsilon_1 = 5, \varepsilon_3 = 4, \varepsilon_4 = 2$	$r_3 = 1, r_4 = 3$	$R_2 = 100, R_3 = 20, R_4 = 30$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_0, I_{K3}, P_2$
17	2	$\varepsilon_2 = 5, \varepsilon_3 = 5$	$r_2 = 1, r_3 = 1$	$R_1 = 150, R_2 = 50, R_3 = 100$	$I_1, I_2, I_3, I_5, I_6, I_0, I_{K3}, P_0$
18	3	$\varepsilon_1 = 6$	$r_1 = 2$	$R_1 = 30, R_3 = 70, R_4 = 280$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_1$
19	2	$\varepsilon_3 = 6, \varepsilon_4 = 2$	$r_3 = 2, r_4 = 0,5$	$R_1 = 50, R_2 = 20, R_3 = 10, R_4 = 40$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_6, I_0, I_{K3}, P_2$
20	1	$\varepsilon_2 = 6, \varepsilon_4 = 2$	$r_1 = 1,5, r_4 = 2$	$R_1 = 110, R_3 = 40$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_3$
21	3	$\varepsilon_1 = 3, \varepsilon_3 = 3, \varepsilon_2 = \varepsilon_4 = 2$	$r_1 = r_3 = 1,5, r_2 = r_4 = 0,5$	$R_2 = 20, R_3 = 120, R_4 = 40$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_2$
22	2	$\varepsilon_1 = 6, \varepsilon_4 = 8$	$r_1 = 2, r_4 = 2$	$R_1 = 100, R_3 = 200, R_4 = 20$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_0, I_{K3}, P_{макс}$
23	1	$\varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = 2, \varepsilon_3 = 4$	$r_1 = 2, r_4 = 0,5, r_3 = 1,5$	$R_1 = 50, R_3 = 30$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_0, I_{K3}, P_3$
24	3	$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 3$	$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 1$	$R_1 = 40, R_2 = 80, R_4 = 240$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_2, P_3$
25	1	$\varepsilon_1 = 7, \varepsilon_3 = 1$	$r_1 = 2, r_3 = 1$	$R_2 = 220, R_3 = 40$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_3$
26	2	$\varepsilon_1 = 7, \varepsilon_2 = 3, \varepsilon_3 = 6, \varepsilon_4 = 4$	$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 1$	$R_1 = 10, R_2 = 40, R_3 = 8, R_4 = 60$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_0, I_{K3}, P_0$
27	2	$\varepsilon_1 = 7, \varepsilon_2 = 3, \varepsilon_3 = 6, \varepsilon_4 = 4$	$r_1 = 2, r_4 = 1$	$R_1 = 150, R_3 = 200, R_4 = 20$	$P_0, P_{кор}, P_{макс}, \eta, P_2, P_3$
28	1	$\varepsilon_1 = 6, \varepsilon_2 = 4, \varepsilon_3 = 5, \varepsilon_4 = 3$	$r_1 = 0,5, r_2 = 1,5, r_3 = r_4 = 2$	$R_1 = 40, R_4 = 10$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_0, I_{K3}, P_0$
29	1	$\varepsilon_1 = 3, \varepsilon_2 = 2, \varepsilon_3 = 4, \varepsilon_4 = 1$	$r_1 = r_2 = 1, r_3 = r_4 = 0,5$	$R_1 = 10, R_3 = 30, R_4 = 20$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_0, I_{K3}, P_{кор}$
30	1	$\varepsilon_1 = 8, \varepsilon_2 = 2$	$r_1 = 2,5, r_2 = 0,5$	$R_1 = 200, R_4 = 40$	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_0, I_{K3}, P_4$

Таблиця 1.5

Варіант	Номери ділянок	ε_i , В	r_i , Ом	R_i , Ом	I_i , А	Знайти
1	1, 2, 3	$\varepsilon_1 = 11, \varepsilon_2 = 4, \varepsilon_3 = 6$	$r_1 = r_2 = r_3 = 0$	$R_1 = 25, R_2 = 50, R_3 = 10$	–	I_1, I_2, I_3
2	4, 5, 6	$\varepsilon_4 = 9, \varepsilon_5 = 10$	$r_4 = 1, r_5 = 2$	$R_4 = 19, R_5 = 38$	$I_6 = 0,1$	I_4, I_5, R_6
3	1, 2, 4	$\varepsilon_1 = 16, \varepsilon_2 = 5, \varepsilon_4 = 7$	$r_1 = r_2 = r_4 = 0$	$R_2 = 30, R_4 = 50$	$I_1 = 0,4$	I_2, I_4, R_1
4	5, 4, 1	$\varepsilon_1 = 9, \varepsilon_4 = 6, \varepsilon_5 = 2$	$r_1 = r_4 = r_5 = 0$	$R_4 = 50, R_5 = 10$	$I_1 = 0,2$	I_4, I_5, R_1
5	1, 2, 6	$\varepsilon_1 = 10, \varepsilon_2 = 8$	$r_1 = 2, r_2 = 1$	$R_1 = 8, R_2 = 19, R_6 = 60$	–	I_1, I_2, I_6
6	3, 2, 1	$\varepsilon_2 = 4, \varepsilon_3 = 5$	$r_1 = r_2 = r_5 = 0$	$R_1 = 30, R_2 = 40, R_3 = 20$	$I_1 = 0,1$	I_2, I_3, ε_1
7	1, 4, 6	$\varepsilon_1 = 8, \varepsilon_4 = 2$	$r_1 = 2, r_4 = 1$	$R_1 = 18, R_4 = 39, R_6 = 80$	–	I_1, I_4, I_6
8	1, 4, 2	$\varepsilon_2 = 11, \varepsilon_4 = 7$	$r_1 = r_2 = r_4 = 0$	$R_1 = 50, R_2 = 20, R_4 = 30$	$I_1 = 0,1$	I_2, I_4, ε_1
9	2, 1, 3	$\varepsilon_1 = 9, \varepsilon_2 = 8, \varepsilon_3 = 1$	$r_1 = r_2 = r_5 = 0$	$R_1 = 50, R_2 = 20, R_3 = 10$	–	I_1, I_2, I_3
10	4, 1, 5	$\varepsilon_4 = 4, \varepsilon_5 = 2$	$r_1 = r_4 = r_5 = 0$	$R_1 = 25, R_4 = 50, R_5 = 10$	$I_1 = 0,4$	I_4, I_5, ε_1
11	1, 3, 2	$\varepsilon_2 = 16, \varepsilon_3 = 3$	$r_1 = r_2 = r_5 = 0$	$R_1 = 70, R_2 = 20, R_3 = 10$	$I_1 = 0,1$	I_2, I_3, ε_1
12	6, 4, 1	$\varepsilon_1 = 3, \varepsilon_4 = 7$	$r_1 = 2, r_4 = 1$	$R_1 = 78, R_4 = 39$	$I_6 = 0,1$	I_1, I_4, R_6
13	5, 4, 1	$\varepsilon_4 = 4, \varepsilon_5 = 14$	$r_1 = r_4 = r_5 = 0$	$R_1 = 90, R_4 = 20, R_5 = 40$	$I_1 = 0,1$	I_4, I_5, ε_1
14	4, 6, 5	$\varepsilon_4 = 10, \varepsilon_5 = 5$	$r_4 = 2, r_5 = 1$	$R_4 = 33, R_5 = 19$	$I_6 = 0,3$	I_4, I_5, R_6
15	1, 6, 4	$\varepsilon_1 = 4, \varepsilon_4 = 3$	$r_1 = 2, r_4 = 1$	$R_1 = 18, R_4 = 9, R_6 = 60$	–	I_1, I_4, I_6
16	4, 1, 6	$\varepsilon_1 = 2, \varepsilon_4 = 12$	$r_1 = 3, r_4 = 2$	$R_1 = 97, R_4 = 18$	$I_6 = 0,1$	I_2, I_4, R_6
17	4, 1, 5	$\varepsilon_1 = 22, \varepsilon_4 = 8, \varepsilon_5 = 4$	$r_1 = r_4 = r_5 = 0$	$R_1 = 25, R_4 = 50, R_5 = 10$	–	I_1, I_4, I_5
18	2, 1, 6	$\varepsilon_1 = 20, \varepsilon_2 = 6$	$r_2 = 1$	$R_1 = 82, R_2 = 29, R_6 = 10$	$I_1 = 0,2$	I_2, I_6, r_1
19	2, 3, 1	$\varepsilon_1 = 19, \varepsilon_2 = 4, \varepsilon_3 = 5$	$r_1 = r_2 = r_3 = 0$	$R_2 = 20, R_3 = 10$	$I_1 = 0,2$	I_2, I_3, R_1
20	4, 1, 6	$\varepsilon_1 = 13, \varepsilon_4 = 1$	$r_4 = 1$	$R_1 = 27, R_4 = 24, R_6 = 40$	$I_1 = 0,3$	I_4, I_6, r_1
21	2, 1, 4	$\varepsilon_1 = 12, \varepsilon_2 = 9, \varepsilon_4 = 5$	$r_1 = r_2 = r_4 = 0$	$R_1 = 30, R_2 = 60, R_4 = 20$	–	I_1, I_2, I_4
22	2, 1, 6	$\varepsilon_1 = 8, \varepsilon_2 = 6$	$r_1 = 3$	$R_1 = 27, R_2 = 9, R_6 = 25$	$I_2 = 0,1$	I_1, I_6, r_2
23	5, 1, 4	$\varepsilon_1 = 19, \varepsilon_4 = 6, \varepsilon_5 = 2$	$r_1 = r_4 = r_5 = 0$	$R_4 = 50, R_5 = 10$	$I_1 = 0,2$	I_4, I_5, R_1
24	1, 6, 2	$\varepsilon_1 = 18, \varepsilon_2 = 15$	$r_1 = 2, r_2 = 1$	$R_1 = 58, R_2 = 9, R_6 = 30$	–	I_1, I_2, I_6
25	4, 1, 2	$\varepsilon_2 = 4, \varepsilon_4 = 2$	$r_1 = r_2 = r_4 = 0$	$R_1 = 50, R_2 = 20, R_4 = 80$	$I_1 = 0,2$	I_2, I_4, ε_1
26	1, 6, 5	$\varepsilon_1 = 8, \varepsilon_5 = 6$	$r_1 = 2, r_5 = 3$	$R_1 = 8, R_5 = 12, R_6 = 10$	–	I_1, I_5, I_6
27	2, 4, 5	$\varepsilon_2 = 8$	$r_2 = 2, r_4 = 1, r_5 = 5$	$R_2 = 18, R_4 = 14, R_5 = 25$	$I_4 = 0,2, I_5 = 0,3$	$I_2, \varepsilon_4, \varepsilon_5$
28	3, 6, 4	$\varepsilon_3 = 36, \varepsilon_4 = 9$	$r_3 = 2, r_4 = 1$	$R_3 = 16, R_4 = 8$	$I_6 = 0,5$	I_4, I_3, R_6
29	3, 1, 5	$\varepsilon_3 = 40, \varepsilon_5 = 30$	$r_1 = r_5 = 2, r_3 = 5$	$R_3 = 35, R_1 = 28, R_5 = 28$	$I_1 = 0,7$	I_5, I_3, ε_1
30	2, 3, 4	$\varepsilon_2 = 20, \varepsilon_4 = 40, \varepsilon_3 = 10$	$r_2 = 10, r_4 = 15, r_3 = 5$	$R_2 = 110, R_4 = 105$	$I_3 = 0,2$	I_4, I_2, R_3

РИСУНКИ ДО ЗАДАЧ

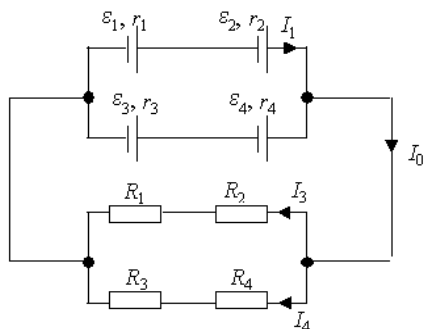


Рисунок 1

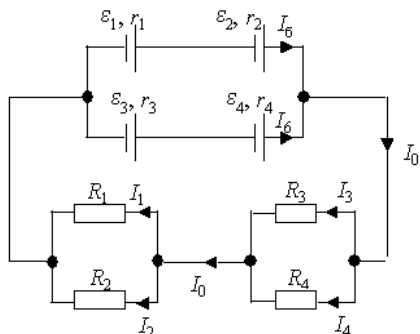


Рисунок 2

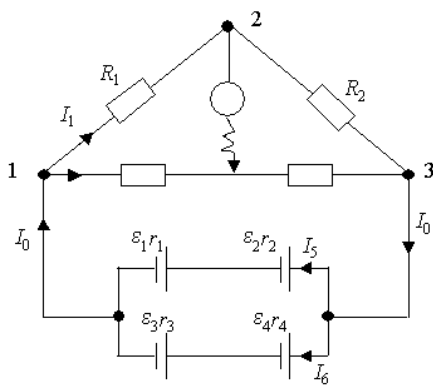


Рисунок 3

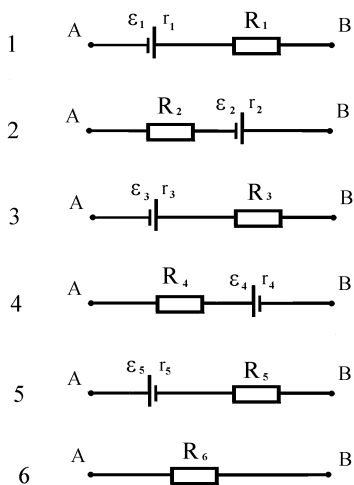


Рисунок 4

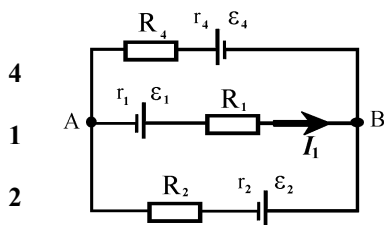


Рисунок 4,а

Структура модуля «МАГНЕТИЗМ»

Змістовий модуль	Лекції (год.)	Заняття		Самос- тійна робота	Індиві- дуальна робота
		прак- тичні	лабо- раторні		
Модуль: МАГНІТНЕ ПОЛЕ СТРУМІВ (46 години)					
Тема 1. Електростатика	6	6	6	28	
Разом за змістовим модулем	6	6	6	28	

МАГНЕТИЗМ

2.1. Магнітне поле та магнітна індукція. Напруженість магнітного поля. Лінії індукції магнітного поля. Магнітна напруженість (2 год.).

2.2. Магнітний момент струму. Контур зі струмом у магнітному полі. Магнітний потік (2 год.).

2.3. Рух заряджених частинок в електричному та магнітному полях (2 год.).

2.4. Електромагнітна індукція. Правило Ленца. Самоіндукція. Індуктивність (2 год.).

2.5. Магнетики (2 год.).

2.6. Взаємне перетворення електричних та магнітних полів. Струм зміщення. Рівняння Максвелла (2 год.).

ТЕМИ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ МОДУЛЯ «МАГНЕТИЗМ»

№ п/п	Тема	Години
1	Магнітна індукція та напруженість магнітного поля. Принцип суперпозиції магнітних полів	2
2	Закон Ампера. Сила Лоренца. Рух заряджених частин в магнітному полі.	2
3	Магнітний потік. Індуктивність.	2
4	Явище електромагнітної індукції. Явище самоіндукції.	2

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ФОРМУЛИ

Магнетизм

Зв'язок між магнітною індукцією $\vec{B}$ та напруженістю $\vec{H}$ магнітного поля

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

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; μ – магнітна проникність ізотропного середовища.

Закон Біо-Савара-Лапласа

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

де $d\vec{H}$ – напруженість магнітного поля, яка створюється елементом $d\vec{l}$ довжини провідника зі струмом I ; $\vec{r}$ – радіус-вектор, проведений від $d\vec{l}$ до точки, в якій визначається напруженість.

Напруженість магнітного поля

а) нескінченно довгого прямого провідника зі струмом I на відстані r_0 від осі

$$H = \frac{I}{2\pi r_0};$$

б) відрізка провідника зі струмом I на відстані r_0 від осі

$$H = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2),$$

де α_1 і α_2 – кути, що створює провідник з радіусами-векторами, проведеними від кінців провідника до розглядуваної точки;

в) в центрі кругового контура радіуса R зі струмом I

$$H = \frac{I}{2R};$$

г) на осі кругового контура

$$H = \frac{IR^2}{2(R^2 + a^2)^{3/2}},$$

де a – відстань від центра контура до точки, де визначається напруженість;

д) нескінченно довгого соленоїда

$$H = In_0 = \frac{IN}{L},$$

де N – кількість витків в обмотці соленоїда; L – довжина соленоїда; n_0 – кількість обвитків на одиницю довжини соленоїда.

Сила Лоренца

$$\vec{F} = Q[\vec{v} \times \vec{B}],$$

де Q – заряд частинки, яка рухається зі швидкістю v в полі з магнітною індукцією $\vec{B}$.

Потік вектора магнітної індукції $\vec{B}$ через плоску котушку в однорідному магнітному полі

$$\Phi = BSN \cos \alpha ,$$

де S – площа контура; α – кут між вектором $\vec{B}$ та нормаллю $\vec{n}$ до площини контура; N – кількість витків котушки, що пронизуються магнітним потоком Φ .

ЕРС індукції в котушці, як що магнітний потік Φ змінюється

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

Заряд, що протікає по замкнутому колу котушки опором R при зміні магнітного потоку

$$Q = -\frac{\Delta\Phi}{R} ,$$

Енергія магнітного поля, що пов'язана з контуром індуктивністю L , по якому проходить струм I

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

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 1. Нескінченно довгий прямолінійний провідник розташований перпендикулярно до площині кругового контура і знаходиться на відстані $a = 5$ см від його центра. Сила струму в провіднику $I_1 = 10$ А, сила струму в контурі $I_2 = 3$ А, напрямок струму показано на рисунку. Радіус контура $R = 3$ см. Знайти індукцію магнітного поля в центрі контуру.

Дано:

$$I_1 = 10 \text{ А};$$

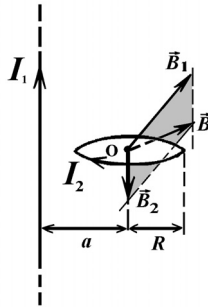
$$I_2 = 3 \text{ А};$$

$$R = 3 \text{ см} = 0,03 \text{ м};$$

$$a = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}.$$

Знайти:

$$B - ?$$



Розв'язання: Згідно з принципом суперпозиції магнітних полів індукція магнітного поля $\vec{B}$ в центрі кругового контура дорівнює векторній сумі магнітних індукцій $\vec{B}_1$ та $\vec{B}_2$ полів, утворюваних в цій точці струмами I_1 та I_2 :

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

Провідник зі струмом I_1 розташований в площині рисунка, струм провідником йде до спостерігача. Для визначення напрямку вектора $\vec{B}_1$ проводимо силову лінію (штрихова лінія на рисунку), визначаємо її напрямку по правилу свердлика і на дотичній до неї в заданій точці проводимо $\vec{B}_1$. Вектор $\vec{B}_2$ за правилом свердлика спрямовано перпендикулярно до площини рисунка від спостерігача. На рисунку показано напрямки векторів $\vec{B}_1$ та $\vec{B}_2$ в двох проекціях. Так як вектори $\vec{B}_1$ та $\vec{B}_2$ взаємно перпендикулярні, модуль вектора $\vec{B}$ віднайдемо за теоремою Піфагора:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} \quad (1)$$

Індукція магнітного поля нескінченно довгого прямолінійного провідника зі струмом у вакуумі (чи повітрі $\mu = \mu_0$) визначається за формулою

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_0}, \quad (2)$$

де μ_0 – магнітна стала; r_0 – відстань від провідника до точки, де треба знайти магнітну індукцію.

Індукція магнітного поля в центрі кругового контуру радіусом R

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2R}. \quad (3)$$

Підставляючи (2) і (3) в формулу (1) та враховуючи, що в даному випадку $r_0 = \alpha$, дістанемо:

$$B = \sqrt{\frac{\mu_0^2 I_1^2}{4\pi^2 \alpha^2} + \frac{\mu_0^2 I_2^2}{4R^2}} \quad \text{або} \quad B = \frac{\mu_0}{2} \sqrt{\frac{I_1^2}{\pi^2 \alpha^2} + \frac{I_2^2}{R^2}} \quad (4)$$

Перевіряємо, чи дає права частина формули (4) одиницю магнітної індукції (Тл)

$$[B] = [\mu_0] \cdot \left[\frac{[I^2]}{[R^2]} \right]^{1/2} = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot \left[\frac{[\text{А}^2]}{[\text{м}^2]} \right]^{1/2} = \frac{\text{Вб} \cdot \text{А}}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2} = \text{Тл}.$$

Виконаємо обчислення:

$$B = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{2} \cdot \frac{10^2}{3,14^2 \cdot 0,03^2} = 7,45 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}.$$

Відповідь: $B = 7,45 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}.$

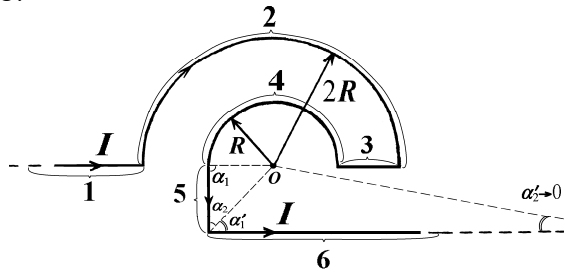
Приклад 2. Нескінченно довгим провідником, зігнутим так, як показано на рисунку, проходить струм $I = 5 \text{ А}$. Радіус дуги $R = 5 \text{ см}$. Знайти напруженість магнітного поля в точці O .

Дано:

$$I = 5 \text{ А}.$$

$$R = 5 \text{ см}$$

$$H = ?$$



Розв'язання: Напруженість магнітного поля $\vec{H}$ в точці O знайдемо використовуючи принцип суперпозиції полів. В даному випадку провід можна розбити на шість ділянок: чотири прямих (1, 3, 5 та 6) і дві дуги півкіл (2 та 4). Напруженість магнітного поля в точці O рівна векторній сумі напруженостей полів, що створюються із ділянок в цій точці

$$\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \vec{H}_3 + \vec{H}_4 + \vec{H}_5 + \vec{H}_6.$$

Напруженість магнітного поля, що створюється елементом довжини $d\vec{l}$ провідника із струмом визначається за законом Біо-Савара-Лапласа

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}.$$

де $\vec{r}$ – радіус-вектор, проведений від $d\vec{l}$ до точки, де визначається напруженість.

Так як точка О лежить на осі ділянок 1 та 3, то для любого елемента $\overline{dl}$ цих ділянок $[dlr] = 0$. Тому $H_1 = H_3 = 0$

$$\overline{H} = \overline{H_2} + \overline{H_4} + \overline{H_5} + \overline{H_6}. \quad (1)$$

Напрямки векторів напруженості віднайдемо за правилом свердлика. Вектор $\overline{H_2}$ напрямлений перпендикулярно до площині рисунка від спостерігача, вектори $\overline{H_4}, \overline{H_5}, \overline{H_6}$ – до спостерігача. Враховуючи напрямок до спостерігача додатнім, замінімо векторну рівність (1) скалярною.

$$H = H_4 + H_5 + H_6 - H_2. \quad (2)$$

Модуль вектора $\vec{H}_4$ віднайдемо, використовуючи формулу розрахунку для напруженості поля в центрі кругового струму

$$H = \frac{I}{2R}.$$

В даному випадку магнітне поле створюється лише половиною такого кругового струму, тому

$$H_4 = \frac{I}{4R}. \quad (3)$$

Аналогічно для ділянки 2

$$H_2 = \frac{I}{8R} \quad (4)$$

Модулі векторів $\overline{H_5}$ та $\overline{H_6}$ знаходимо, використовуючи формулу розрахунку для напруженості поля, що створюється відрізком провідника зі струмом,

$$H_5 = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2),$$

де r_0 – найменша відстань від провідника до точки, де шукається напруженість; α_1 та α_2 – кути, що створюються провідником та радіусами-векторами, проведеними з кінців провідника до цієї точки. Для ділянки 5 $r_0 = R$; $\alpha_1 = 90^\circ$; $\cos \alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = \pi/4$; $\cos \alpha_2 = \sqrt{2}/2$.

Тоді
$$H_5 = \frac{I\sqrt{2}}{8\pi R}. \quad (5)$$

Аналогічно для ділянки 6

$$H_5 = \frac{I}{4\pi R} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$$

$\alpha_1 = \pi/4$; $\cos \alpha_1 = \sqrt{2}/2$; $\alpha_2 \rightarrow 0$ (провід нескінченно довгий), $\cos \alpha_2 \rightarrow 1$.

$$H_6 = \frac{I}{4\pi R} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right). \quad (6)$$

Підставивши (3), (4), (5) і (6) в формулу (2), дістанемо

$$H = \frac{I}{4R} + \frac{I\sqrt{2}}{8\pi R} + \frac{I}{4\pi R} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right) - \frac{I}{8R} = \frac{I}{8R} + \frac{I\sqrt{2}}{4\pi R} + \frac{I}{4\pi R},$$

або

$$H = \frac{I}{8\pi R} (\pi + 2\sqrt{2} + 2). \quad (7)$$

Перевіряємо чи дає права частина формули (7) одиницю напруженості магнітного поля (А/м):

$$[H] = \left[\frac{[I]}{[R]} \right] = \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Виконаємо обчислення:

$$H = \frac{5}{8 \cdot 3,14 \cdot 0,05} (3,14 + 2\sqrt{2} + 2) \text{ А/м} = 31,7 \text{ А/м}.$$

Відповідь: $H = 31,7 \text{ А/м}$.

Приклад 3. Електрон, прискорений різницею потенціалів U , влітає в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 5 \text{ мТл}$ і рухається гвинтовою лінією з кроком $h = 4 \text{ см}$ та радіусом $R = 1 \text{ см}$. Знайти прискорюючу різницю потенціалів U , яку пройшов електрон.

Дано:

$$B = 5 \text{ мТл} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$$

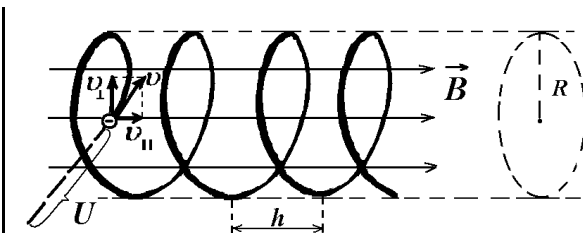
$$h = 4 \text{ см} = 0,04 \text{ м}$$

$$R = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$$

$$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$U = ?$



Розв'язання:

Електрон, проходячи прискорювальну різницю потенціалів U , придбає кінетичну енергію $mv^2/2$, рівну роботі сил прискорювального поля:

$$\frac{mv^2}{2} = A = |e| U,$$

звідки

$$U = \frac{mv^2}{2|e|}, \quad (1)$$

де m – маса електрона; v – швидкість, набута електроном у прискорювальному полі; e – заряд електрона. Таким чином, для визначення прискорювальної різниці потенціалів необхідно віднайти швидкість, з якою електрон потрапляє до магнітного поля.

Так, як електрон в магнітному полі рухається гвинтовою лінією, то його швидкість утворює певний кут ($\alpha \neq \pi/2$) з лініями магнітної індукції (див. рисунок). Розкладаємо вектор $\vec{v}$ на дві складові: паралельну до вектора магнітної індукції $\vec{B}(\vec{v}_{\parallel})$ та перпендикулярну до нього ($\vec{v}_{\perp}$). На електрон, який

рухається в магнітному полі, діє сила Лоренца

$$\vec{F}_L = e \cdot [\vec{v} \times \vec{B}].$$

Модуль цієї сили

$$F_L = |e| v B \sin \alpha = |e| v_{\perp} B. \quad (2)$$

Швидкість $\vec{v}_{\parallel}$ в магнітному полі не змінюється ($[\vec{v} \times \vec{B}] = 0$) і забезпечує переміщення електрона уздовж силової лінії. Складову швидкості сила Лоренца змінює лише за напрямком ($\vec{v}_{\perp} \perp \vec{F}_L$), створюючи нормальне прискорення

$$a_n = \frac{v_{\perp}^2}{R},$$

де R – радіус гвинтової лінії. Отже, електрон водночас бере участь у двох рухах: рівномірному переміщенні зі швидкістю $\vec{v}_{\parallel}$ і рівномірному руху по колу зі швидкістю $v_{\perp}$ (за відсутності паралельної складової електрон рухався б колом в площині, перпендикулярній до силових ліній).

За другим законом Ньютона,

$$F_L = m a_n = \frac{m v_{\perp}^2}{R}. \quad (3)$$

Прирівнюючи праві частини (2) та (3), знаходимо перпендикулярну складову швидкості

$$|e| v_{\perp} B = \frac{m v_{\perp}^2}{R}; \quad v_{\perp} = \frac{|e| R B}{m}. \quad (4)$$

Паралельну складову $\vec{v}_{\parallel}$ віднайдемо із наступних міркувань. За час, рівний періоду обертання електрона T , в напрямку ліній індукції електрон переміститься зі швидкістю $\vec{v}_{\parallel}$ на відстань, рівну кроку гвинтової лінії h .

Тоді при $T = 2\pi R / v_{\perp}$

$$v_{\parallel} = \frac{h}{T}. \quad (5)$$

Після підстановки $v_{\perp}$ із формули (4) і скорочення на R , дістанемо

$$T = \frac{2\pi m}{|e| B}.$$

Знайдемо вираз для T підставимо до формули (5):

$$v_{\parallel} = \frac{h |e| B}{2\pi m}. \quad (6)$$

Квадрат модуля швидкості, як видно з рисунка, можна подати через $v_{\perp}$ та $v_{\parallel}$:

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

або з урахуванням (4) та (6)

$$v^2 = \frac{|e|^2 R^2 B^2}{m^2} + \frac{h^2 |e|^2 B^2}{4\pi^2 m^2} = \frac{|e|^2 B^2}{m^2} \left(R^2 + \frac{h^2}{4\pi^2} \right). \quad (7)$$

Підставивши в формулу (1) вираз (7) й виконавши необхідні скорочення, знайдемо шукану різницю потенціалів

$$U = \frac{|e| B^2}{2m} \left(R^2 + \frac{h^2}{4\pi^2} \right).$$

Перевіримо, чи дає права частина розрахункової формули одиницю різниці потенціалів (В):

$$[U] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Тл}^2}{\text{кг}} \cdot \text{м}^2 = \frac{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{Н}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{А}^2 \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{с} \cdot \text{Н} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{А} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

Виконаємо обчислення:

$$U = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} (5 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}} \left(0,01^2 + \frac{0,04^2}{4 \cdot 3,142} \right) = 309 \text{ В}.$$

Відповідь: $U = 309 \text{ В}$.

Приклад 4. В середині довгого прямого соленоїда, який має $n_0 = 10$ витків/см, розміщений круговий контур площею $S = 10 \text{ см}^2$. Площина контура розташована під кутом $\alpha = 30^\circ$ до осі соленоїда (див. рисунок). Обмоткою соленоїда протікає струм $I = 5 \text{ А}$. Яка середня ЕРС наводиться в круговому контурі, якщо за час $\Delta t = 10 \text{ мс}$ напрям струму в обмотці змінити на протилежний?

Дано: $I = 5 \text{ А}$

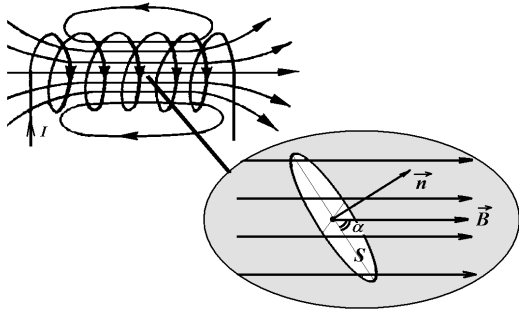
$n_0 = 10 \text{ см}^{-1} = 10^3 \text{ м}^{-1}$

$S = 10 \text{ см}^2 = 10^{-3} \text{ м}^2$

$\alpha = 30^\circ$

$\Delta t = 10 \text{ мс} = 10^{-2} \text{ с}$

$\langle \varepsilon \rangle = ?$



Розв'язання: При зміні струму в обмотці соленоїда зміниться й магнітний потік Φ , який пронизує круговий контур. Внаслідок цього в контурі виникне ЕРС індукції, яка визначається за законом електромагнітної індукції

$$\varepsilon = -d\Phi/dt.$$

По цій формулі знаходять миттєве значення ЕРС індукції, середнє значення знаходять із середньої швидкості зміни магнітного потоку з часом

$$\langle \varepsilon \rangle = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}, \quad (1)$$

де $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ – зміна магнітного потоку за інтервал часу Δt . Поле в середній частині довгого соленоїда буде однорідним. В цьому разі магнітний потік визначається за формулою: $\Phi = BS \cos \varphi$, де B – індукція магнітного поля соленоїда; S – площа контура; φ – кут між вектором $\vec{B}$ та нормаллю $\vec{n}$ до площини контура. Індукція магнітного поля в середині довгого соленоїда

$$B = \mu \mu_0 I n_0,$$

де μ_0 – магнітна постійна; μ – магнітна проникність середовища (в повітрі

$\mu = 1$) I – сила струму в обмотці соленоїда; n_0 – кількість обвитків на одиницю довжини.

Оберемо напрямок струму в обмотці соленоїда так, як це показано на рисунку (I_1), і по правилу свердлика віднайдемо відповідний йому напрямок вектора $\vec{B}_1$. Магнітний потік в цьому випадку

$$\Phi_1 = \mu_0 I n_0 S \cos \varphi_1.$$

Після зміни напрямку струму на протилежний змінить свій напрямок і вектор магнітної індукції ($\vec{B}_2$).

Магнітний потік

$$\Phi_2 = \mu_0 I n_0 S \cos \varphi_2 = -\mu_0 I n_0 S \cos \varphi_1 \quad (3)$$

(тут враховано, що $\varphi_2 = 180^\circ - \varphi_1$ і $\cos \varphi_2 = -\cos \varphi_1$). Підставляючи в формулу (1) вирази Φ_1 та Φ_2 і враховуючи, що $\varphi_1 = 90^\circ - \alpha$ (див. рисунок), одержуємо

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{2\mu_0 I n_0 S \cos \varphi_1}{\Delta t} = \frac{2\mu_0 I n_0 S \sin \alpha}{\Delta t}.$$

Перевіримо чи дає права частина розрахункової формули одиницю різниці потенціалів (В):

$$[\varepsilon] = \frac{[\mu_0] \cdot [I] \cdot [n_0] \cdot [\sin \alpha]}{[\Delta t]} = \frac{\text{Гн/м} \cdot \text{А} \cdot \text{м}^{-1} \cdot 1}{\text{с}} = \frac{\text{Вб}}{\text{с}} = \text{В}$$

виконаємо обчислення

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{2 \cdot 4 \cdot 4,14 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} \sin 30^\circ}{10^{-2}} = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ В.}$$

Відповідь: $\langle \varepsilon \rangle = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ В.}$

Приклад 5. В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,5 \text{ Тл}$ рівномірно обертається коротка котушка, яка складається із $N = 100$ обвитків площею $S = 100 \text{ см}^2$. Вісь обертання лежить в площині обвитків котушки і перпендикулярна до ліній індукції магнітного поля (див. рисунок). Знайти: максимальну ЕРС, яка наводиться в котушці при її обертанні з періодом $T = 0,1 \text{ с}$; заряд, який проходить котушкою при зміні кута між віссю котушки та вектором магнітної індукції від $\varphi_1 = 0$ до $\varphi_2 = 90^\circ$, якщо опір котушки $R = 2 \text{ Ом}$.

Дано:

$$B = 0,5 \text{ Тл}$$

$$N = 100$$

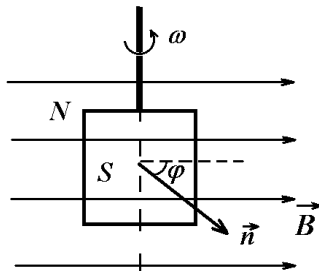
$$S = 100 \text{ см}^2$$

$$T = 0,1 \text{ с}$$

$$\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 90^\circ$$

$$R = 2 \text{ Ом}$$

Знайти: $\varepsilon_{\max}$; Q – ?



Розв'язання: При обертанні котушки змінюється магнітний потік, який пронизує котушку, і згідно із законом електромагнітної індукції в котушці виникає ЕРС індукції

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Магнітний потік в однорідному магнітному полі з індукцією B визначається за формулою:

$$\Phi = BSN \cos \varphi, \quad (2)$$

де S – площа витків; φ – кут між нормаллю $\vec{n}$ до площини витків котушки та вектором $\vec{B}$; N – кількість витків, що пронизуються потоком Φ . При рівномірному обертанні за час t котушка повернеться на кут $\varphi = \omega t$, де ω – кутова швидкість обертання, зв'язана з періодом співвідношенням $\omega = 2\pi/T$.

Підставивши в формулу (2) вирази ω та φ одержимо

$$\Phi = BSN \cos \omega t = BSN \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right). \quad (3)$$

Для знаходження миттєвого значення ЕРС індукції віднайдемо, підставивши до формули (1) вираз для магнітного потоку Φ та про диференціювавши його за часом:

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt} \left[B \cdot S \cdot N \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}\right) \right] = BSN \frac{2\pi}{T} \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right).$$

Значення ЕРС буде максимальним в той момент часу, коли $\sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) = 1$.

Тоді

$$\varepsilon_{\max} = BSN \frac{2\pi}{T}. \quad (4)$$

Для виявлення заряду Q , що проходить по котушці, застосуємо закон Ома для замкнутого кола

$$\varepsilon_i = RI_i, \quad (5)$$

де R – опір котушки; I_i – миттєве значення сили струму в котушці.

Прирівнюючи праві частини рівнянь (1) та (5), одержимо

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

Оскільки миттєве значення сили струму $I_i = dQ/dt$, то це рівняння можна переписати у вигляді

$$-\frac{d\Phi}{dt} = R \frac{dQ}{dt},$$

звідки

$$dQ = -\frac{1}{R} d\Phi. \quad (6)$$

Якщо взяти інтеграл з виразу (6), то віднайдемо заряд, який проходить котушкою за змінювання магнітного потоку від Φ_1 до Φ_2 :

$$\int_0^Q dQ = -\frac{1}{R} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\Phi \quad \text{або} \quad Q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}. \quad (7)$$

За змінювання кута поміж віссю котушки та вектором $\vec{B}$ від φ_1 до φ_2 , магнітний потік зміниться від $\Phi_1 = BSN \cos \varphi_1$ до $\Phi_2 = BSN \cos \varphi_2$. Підставивши вирази Φ_1 та Φ_2 до формули (7), знайдемо шуканий заряд:

$$Q = \frac{BSN}{R} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2). \quad (8)$$

Перевіримо, чи дає права частина формули (4) одиницю ЕРС (B), а права частина формули (8) одиницю заряду (Кл):

$$[\epsilon_{\text{макс}}] = \frac{[B][S][N]}{[T]} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В};$$

$$[Q] = \frac{[B][S][N]}{[R]} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{Ом}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{Ом}} = \frac{\text{Дж}}{\text{В}} = \text{Кл}.$$

Проведемо обчислення:

$$\epsilon_{\text{макс}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 31,4 \text{ В};$$

$$Q = \frac{100 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}}{2} (\cos 0^\circ - \cos 90^\circ) = 0,25 \text{ Кл}$$

Відповідь: $\epsilon_{\text{макс}} = 31,4 \text{ В}; Q = 0,25 \text{ Кл}.$

ЗАДАЧІ

Задача 2.1. Принцип суперпозиції магнітних полів

Розв'язати одну з нижчеподаних задач (номер задачі вказано в табл. 2.1, рисунки обираються згідно варіанту).

1. Віднайти індукцію магнітного поля, утворюваного двома нескінченно довгими провідниками зі струмом. Номер рисунка, на якому показано розташування провідників, значення сили струмів I_1 та I_2 , точка, в якій потрібно віднайти магнітну індукцію, й необхідні відстані задано в табл. 2.1.

2. Віднайти напруженість магнітного поля, утворюваного нескінченним прямолінійним провідником та круговим контуром радіуса R . Номер рисунка, на якому показано розташування провідника й контура, значення сили струму в провіднику I_1 та контурі I_2 , точка, в якій треба віднайти напруженість, та необхідні відстані задано в табл. 2.1.

3. Нескінченно довгим зігнутим дротом протікає струм I_1 . Номер рисунка, на якому відбито форму дрота, значення сили струму й необхідні відстані задано в табл. 2.1. Знайти індукцію магнітного поля в точці O .

4. Нескінченно довгий провідник, зігнутий під кутом α , і круговий контур, який має радіус R , лежать в одній площині. Номер рисунка, на якому показано розташування провідника й контура, значення сили струму в провіднику I_1 та контурі I_2 , кут α й необхідні відстані задано в табл. 2.1.

Віднайти напруженість магнітного поля в центрі кругового контура.

Задача 2.2. Рух заряджених частинок в магнітному полі

Розв'язати одну з нижчеподаних задач (номер задачі зазначено в табл. 2.2).

Примітка. 1 а. о. м. (атомна одиниця маси) = $1.66 \cdot 10^{-27}$ кг;
 e (елементарний заряд) = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл..

1. Заряджена частинка з масою m та зарядом Q влетіла в однорідне магнітне поле зі швидкістю v , що направлена під кутом α до ліній індукції, й рухається гвинтовою лінією. Крок гвинтової лінії дорівнює h , радіус – R . Індукція магнітного поля B . За заданими в табл. 2.2 значеннями величин віднайти величину, зазначену в останній графі таблиці.

2. Заряджена частинка з масою m та зарядом Q пройшла прискорювальну різницю потенціалів U і, потрапивши в однорідне магнітне поле (магнітна індукція B), рухається колом радіусом R . За заданими в табл. 2.2 значеннями величин віднайти величину, зазначену в останній графі таблиці.

3. Заряджена частинка з масою m і зарядом Q , влетівши в однорідне магнітне поле (магнітна індукція B), рухається колом, здійснюючи один оберт за час T . За заданими в табл. 2.2 значеннями величин віднайти величину, зазначену в останній графі таблиці.

Задача 2.3. Магнітний потік

Розв'язати одну з нижчеподаних задач (номер задачі вказано в табл. 2.3).

1. Всередині соленоїда, який містить n обвитків на одиницю довжини соленоїда, вміщено круговий обмоток діаметром D . Обмоткою соленоїда тече струм силою I . Магнітний потік, який пронизує обмоток – Φ . Площина обвитка розташована: а) під кутом α до осі соленоїда; б) під кутом α поміж віссю соленоїда й нормаллю, проведеною до даної площини. Віднайти величину, зазначену в останній графі таблиці 2.3.

2. Соленоїд довжиною ℓ , діаметром D , площею поперечного перерізу S містить N обвитків. n – кількість обвитків на одиницю довжини соленоїда, L – індуктивність соленоїда. За сили струму I , який протікає обмоткою, індукція магнітного поля усередині соленоїда B ; Φ – магнітний потік, який утворює соленоїд, якщо сила струму I ; W – енергія магнітного поля усередині соленоїда. Осердя виконано з немагнітного матеріалу й магнітне поле у всьому обсязі однорідне. Віднайти величину, зазначену в останній графі таблиці 2.3.

3. Обмотка соленоїда складається з N обвитків дроту, поперечний переріз якого S . Довжина соленоїда ℓ , його опір R , L – індуктивність соленоїда. За сили струму I , який протікає обмоткою, соленоїд утворює магнітний потік Φ , W – енергія магнітного поля усередині соленоїда; μ – магнітна проникність осердя. Віднайти величину, зазначену в останній графі таблиці, якщо

а) обмотка виконана з мідного дроту ($\rho_{\text{Cu}} = 1,71 \cdot 10^{-8}$ Ом·м);

б) обмотка виконана з алюмінієвого дроту ($\rho_{\text{Al}} = 2,53 \cdot 10^{-8}$ Ом·м).

4. На цілковито розмагнічене осердя з магнітною проникністю μ ,

діаметром D та об'ємом V намотано в один шар N обвитків проводу (n – кількість обвитків на одиницю довжини соленоїда). За сили струму I , який протікає обмоткою, напруженість магнітного поля усередині соленоїда H , а індукція B ; Φ – магнітний потік, який створює соленоїд за сили струму I ; W – енергія магнітного поля усередині соленоїда; L – індуктивність соленоїда. Віднайти величину, зазначену в останньому стовпчику таблиці.

Задача 2.4. Закон електромагнітної індукції

Розв'язати одну з нижчеподаних задач (номер задачі вказано в табл. 2.4).

1. Рамка площею S , яка має N обвитків дроту опором R , перебуває в однорідному магнітному полі з індукцією B . Площина рамки складає кут β з лініями магнітної індукції. За змінювання напрямку магнітного поля на протилежний рамкою проходить заряд Q . За значеннями величин, заданими в табл. 2.4 Віднайти величину, зазначену в останній графі таблиці.

2. На соленоїд із залізним осердям довжиною L і площею поперечного перерізу S надіто дротяне кільце. Обмотка соленоїда має N обвитків. При замиканні кола в обмотці соленоїда за час Δt встановлюється струм I . При цьому в дротяному кільці наводиться середня ЕРС $\varepsilon_{\text{ср}}$. Магнітна проникність заліза в цих умовах μ . За значеннями величин, заданими в табл. 2.4, віднайти величину, зазначену в останній графі таблиці.

3. В однорідному магнітному полі з індукцією B обертається коротка котушка, яка має N обвитків діаметром D . Вісь обертання лежить в площині обвитків котушки і є перпендикулярна до ліній індукції магнітного поля. Кутова швидкість обертання ω (частота обертання ν , період T). Максимальне значення ЕРС індукції, яка виникає в котушці, $\varepsilon_{\text{макс}}$. За значеннями величин, які задано в табл. 2.4 віднайти величину, зазначену в останній графі таблиці.

ТАБЛИЦІ ВАРІАНТІВ ЗАВДАНЬ

Таблиця 2.1

Варіант	Номер задачі	Номер рисунок	Точка	I_1 , А	I_2 , А	R , см	a , см	b , см	c , см
1	1	1	A	3	4	—	1	—	—
2	3	6	O	10	—	4	—	—	—
3	1	2	A	4	4	—	10	—	—
4	3	9	O	9	—	3	—	—	—
5	2	4	O	10	2	2	5	—	—
6	1	1	B	12	8	—	1	2	—
7	4	10	O	8	5	2	—	—	—
8	1	3	B	8	6	—	5	3	4
9	2	5	B	2	10	5	6	—	—
10	3	7	O	10	—	3	—	—	—
11	1	3	A	5	3	—	8	—	—
12	4	1	O	3	2	4	—	—	—
13	2	5	A	6	5	6	8	—	—
14	3	8	O	8	—	2	—	—	—
15	4	12	O	10	5	5	3	—	—
16	1	1	C	16	12	—	2	4	—
17	3	6	O	5	—	3	—	—	—
18	2	5	O	15	4	4	5	—	—
19	4	10	O	4	3	1	—	—	—
20	1	2	B	6	8	—	5	3	4
21	3	7	O	12	—	2	—	—	—
22	2	4	A	8	10	3	4	—	—
23	4	11	O	6	5	3	—	—	—
24	3	8	O	6	—	1	—	—	—
25	4	12	O	8	2	10	5	—	—
26	1	1	B	2	6	-	5	3	—
27	2	5	O	3	7	5	9	—	—
28	3	9	O	5	—	10	-	—	—
29	1	2	B	3	5	-	5	3	4
30	2	4	A	2	6	7	9	-	-

Таблиця 2.2

Варіант	Номер задачі	m , а.о.м.	Q	B , мТл	U , кВ	v , Мм/с	α	R , см	h , см	T , нс	Віднайти
1	2	1	e	–	5	–	–	5	–	–	B
2	1	4	–	100	–	0,2	–	4	7	–	Q
3	3	1	e	200	–	–	–	–	–	–	T
4	2	7	e	–	3	–	–	8	–	–	B
5	1	–	$-e$	2	–	9	–	2	10	–	m
6	3	4	–	400	–	–	–	–	–	652	Q
7	1	1	e	–	–	0,5	–	2	10	–	B
8	2	4	–	100	2	–	–	9,11	–	–	Q
9	3	7	e	300	–	–	–	–	–	–	T
10	1	–	–	3	–	30	–	5	17	–	Q/m
11	2	–	e	200	0,9	–	–	2,17	–	–	m
12	1	4	$2e$	500	–	–	–	3	9	–	v
13	2	–	–	3	0,8	–	–	3,18	–	–	Q/m
14	3	–	$-e$	2	–	–	–	–	–	17,9	m
15	1	1	e	100	–	–	–	6	10	–	v
16	2	4	$2e$	100	4	–	–	–	–	–	R
17	3	7	$2e$	–	–	–	–	–	–	760	B
18	1	1	e	400	–	2	60°	–	–	–	$R; h$
19	2	7	$2e$	200	1	–	–	–	–	–	R
20	3	–	–	150	–	–	–	–	–	869	Q/m
21	1	7	–	400	–	0,3	–	5	13,5	–	Q
22	2	–	$-e$	5	0,5	–	–	1,5	–	–	m
23	3	–	–	200	–	–	–	–	–	326	Q/m
24	1	7	$2e$	500	–	0,6	45°	–	–	–	$R; h$
25	2	4	e	300	–	–	–	5	–	–	U
26	1	3	–	370	–	0,2	–	0,5	1,57	–	α, Q
27	1	2	$2e$	300	–	–	–	1,4	6,3	–	α, T
28	2	3	$-e$	100	–	–	–	6	–	–	U
29	1	4	$-2e$	–	–	–	–	2	12,5	250	α, B
30	3	2	$2e$	–	–	–	–	–	–	300	B

Таблица 2.3

[illegible]

Таблица 2.4

Вариант	Задача	N	$S, \text{см}^2$	$D, \text{см}$	$L, \text{см}$	$R, \text{Ом}$	$B, \text{Тл}$	$\beta, ^\circ$	$Q, \text{мкКл}$	$I, \text{А}$	μ	$\epsilon_{\text{ср}}, \text{В}$	$\Delta t, \text{мс}$	$\epsilon_{\text{макс}}, \text{В}$	$\omega, \text{рад/с}$	$\nu, \text{1/с}$	$T, \text{мс}$	Знайти
1	3	—	—	12	—	—	0,4	—	—	—	—	—	—	30	60	—	—	N
2	1	100	80	—	—	20	0,2	30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Q
3	3	100	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15	90	—	—	B
4	2	500	4	—	30	—	—	—	—	2	—	0,4	2	—	—	—	—	μ
5	1	300	40	—	—	—	0,2	60	4	—	—	—	—	—	—	—	—	R
6	3	500	—	20	—	—	0,3	—	—	—	—	—	—	90	—	—	—	ω
7	1	400	50	—	—	40	0,1	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	β
8	2	600	4	—	25	—	—	—	—	0,8	400	—	3	—	—	—	—	$\epsilon_{\text{ср}}$
9	3	300	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	—	25	—	B
10	1	100	40	—	—	15	—	40	6	—	—	—	—	—	—	—	—	B
11	3	—	—	18	—	—	0,2	—	—	—	—	—	—	60	—	15	—	N
12	1	200	50	—	—	10	0,3	60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Q
13	3	100	—	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80	—	—	20	B
14	2	800	3	—	20	—	—	—	—	0,5	—	0,3	1	—	—	—	—	μ
15	1	—	20	—	—	30	0,3	30	2	—	—	—	—	—	—	—	—	N
16	3	100	—	8	—	—	0,4	—	—	—	—	—	—	50	—	—	—	T
17	1	200	20	—	—	5	0,3	—	48	—	—	—	—	—	—	—	—	β
18	3	200	—	20	—	—	0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	20	—	$\epsilon_{\text{макс}}$
19	2	700	8	—	40	—	—	—	—	0,6	600	—	2	—	—	—	—	$\epsilon_{\text{ср}}$
20	3	—	—	15	—	—	0,1	—	—	—	—	—	—	40	—	—	30	N
21	1	500	10	—	—	25	—	20	4	—	—	—	—	—	—	—	—	B
22	3	200	—	10	—	—	0,2	—	—	—	—	—	—	70	—	—	—	ν
23	2	900	6	—	35	—	—	—	—	—	800	0,6	4	—	—	—	—	I
24	3	400	—	15	—	—	0,3	—	—	—	—	—	—	—	50	—	—	$\epsilon_{\text{макс}}$
25	2	—	5	—	25	—	—	—	—	1	200	0,5	1	—	—	—	—	N
26	2	650	—	—	10	—	—	—	—	0,2	300	0,1	5	—	—	—	—	S
27	3	450	—	—	—	—	0,4	—	—	—	—	—	—	80	—	—	25	D
28	2	150	7	—	15	—	—	—	—	5	200	0,7	—	—	—	—	—	Δt
29	1	400	—	—	—	5	0,15	70	6	—	—	—	—	—	—	—	—	S
30	2	900	3	—	—	—	—	—	—	0,4	500	0,2	6	—	—	—	—	L

РИСУНКИ ДО ЗАДАЧ

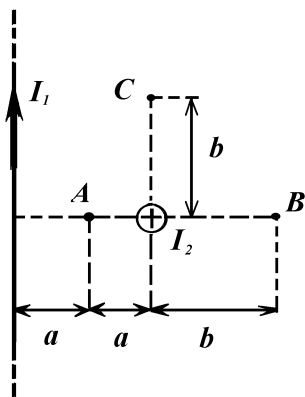


Рисунок 1

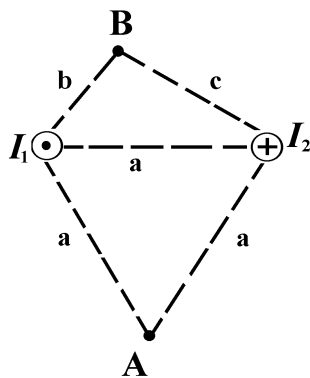


Рисунок 2

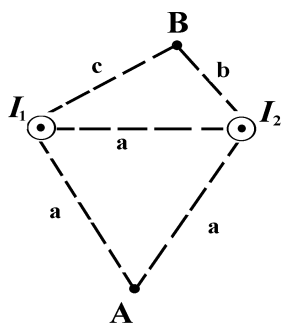


Рисунок 3

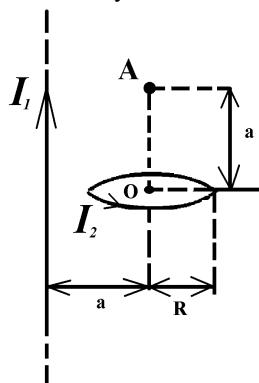


Рисунок 4

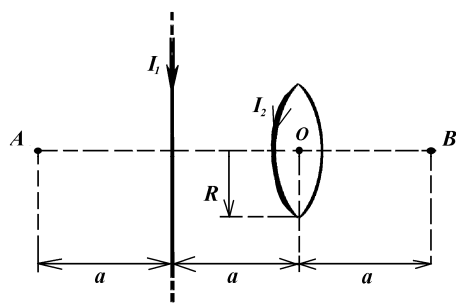


Рисунок 5

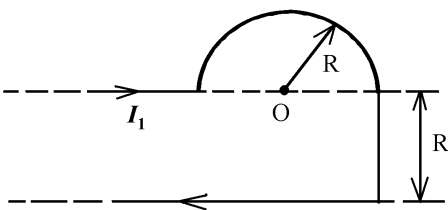


Рисунок 6

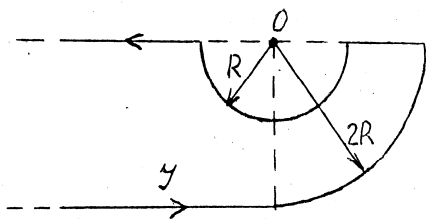


Рисунок 7

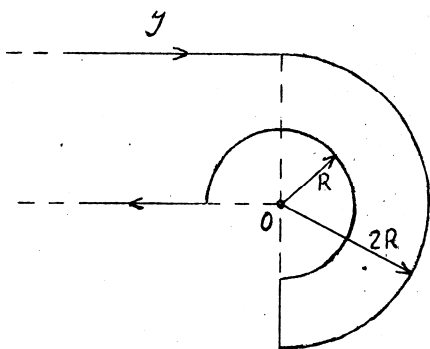


Рисунок 8

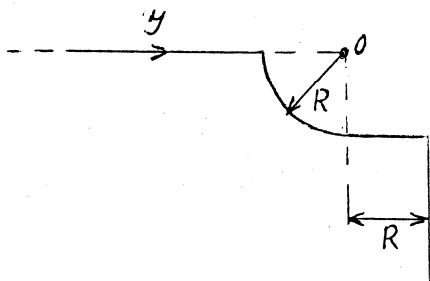


Рисунок 9

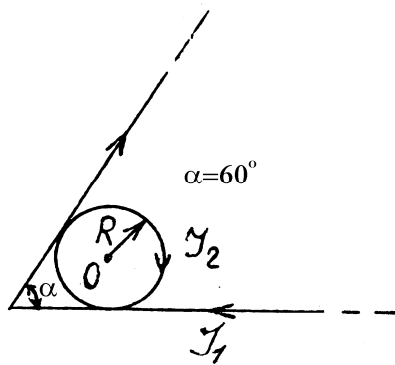


Рисунок 10

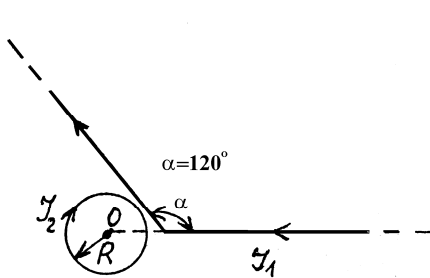


Рисунок 11

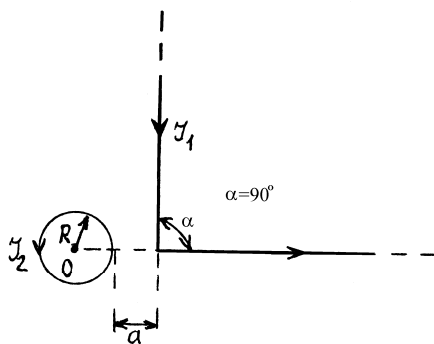


Рисунок 12

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вікулін І.М. Фізика. Модуль 1. Частина 1. Електрофізика. Учбовий посібник. Одеса: ОНАЗ, 2007. 198 с.
2. Вікулін І.М. Фізика. Електрофізика-II. Конспект лекцій для самостійної роботи студентів по курсу фізики. Одеса: ОНАЗ, 2011. 119 с.
3. Горбачов В. Е., Ірха В.І., Назаренко О.А. Фізика. Модуль 1. Частина 2. Електрика. Методичні вказівки для самостійної роботи. Одеса: ОНАЗ, 2006. 38 с.
4. Горбачов В. Е., Ірха В.І., Назаренко О.А. Фізика. Модуль 1. Частина 2. Магнетизм. Методичні вказівки для самостійної роботи. Одеса: ОНАЗ, 2006. 42 с.
5. Марколенко П.Ю., Горбачов В.Е., Ірха В.І., Коробіцин Б.В. Електромагнетизм. Методичний посібник до лабораторних робіт з фізики № 2-1, ..., 2-4, 3-1, ..., 3-4 з курсу фізики. Одеса: ОНАЗ, 2013. 174 с.

Інформаційні ресурси

1. https://uk.wikipedia.org/wiki/Напруженість_електричного_поля
2. https://uk.wikipedia.org/wiki/Електричний_струм
3. https://uk.wikipedia.org/Закон_Ома
4. https://uk.wikipedia.org/wiki/Магнітна_індукція
5. <https://www.youtube.com/watch?v=tY0wnMZA3ac>
5. https://uk.wikipedia.org/wiki/Закон_Ампера
6. https://uk.wikipedia.org/wiki/Сила_Лоренца

ЗМІСТ

Структура модуля ЕЛЕКТРИКА	3
Методичні вказівки щодо виконання комплексного завдання	5
Основні поняття і формули	5
Приклади розв'язання задач	8
Задачі	14
Таблиці варіантів завдань	17
Рисунки до задач.....	22
 Структура модуля МАГНЕТИЗМ	 23
Основні поняття і формули	24
Приклади розв'язування задач	26
Задачі	34
Таблиці варіантів завдань	37
Рисунки до задач	41
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	43

Підписано до друку 07.03.2023.

Формат 60х84/16. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.

Друк офсетний. Обсяг 2,75 друк. арк. Наклад 50 прим.

Зам. № 2087/3

Надруковано у ФОП Бондаренко М.О.

м. Одеса, вул. В. Арнаутська, 60.

т. +38 048 700 11 55

info@aprel.od.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців ДК № 4684 від 13.02.2014 р.