



Приватний вищий навчальний заклад
«Міжнародний економіко-гуманітарний університет
імені академіка Степана Дем'янчука»

Кафедра математичного моделювання

Андрій Ясінський

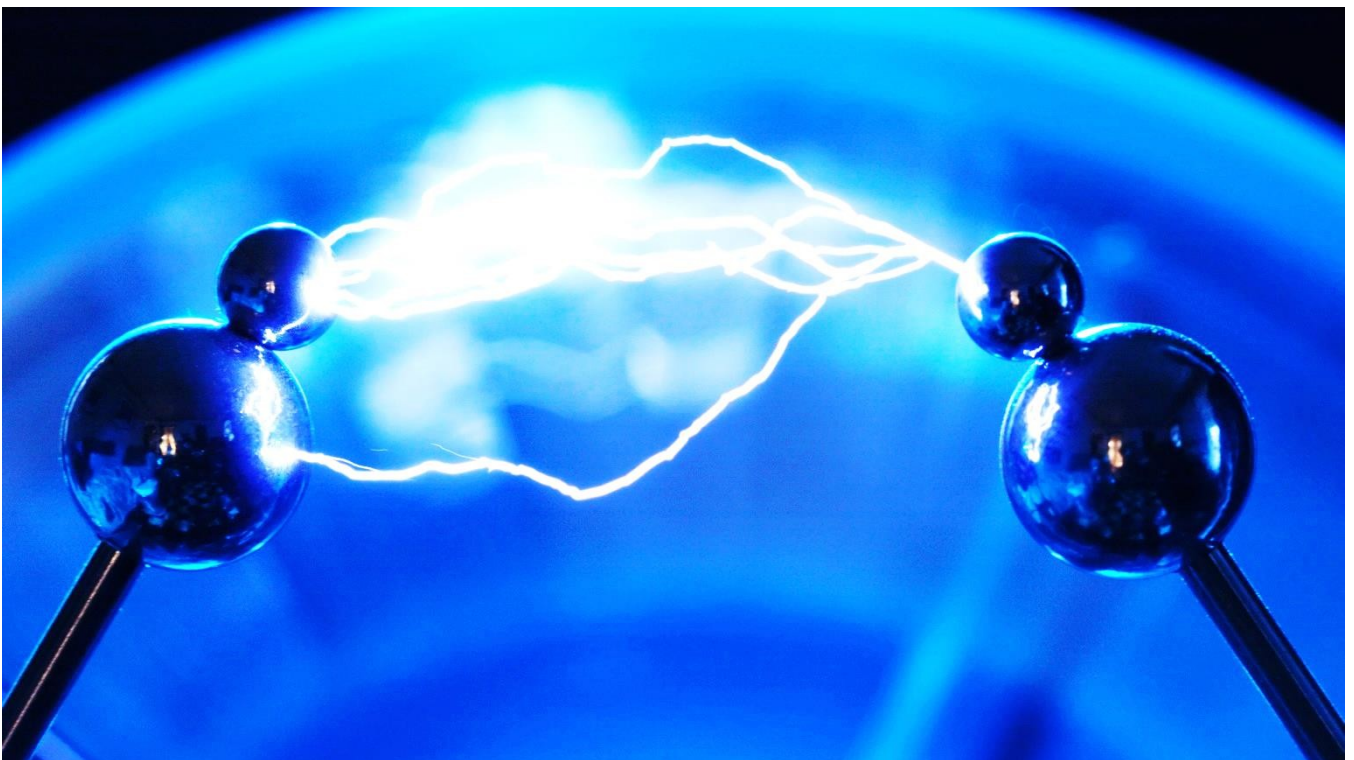
Юрій Лотюк

Людмила Соловей

ФІЗИКА

(вибрані розділи)

ПРАКТИКУМ З РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ



Андрій Ясінський, Юрій Лотюк, Людмила Соловей «Фізика(вибрані розділи).
Практикум з розв'язування задач.» – Рівне: ПВНЗ «МЕГУ імені академіка
С. Дем'янчука», –2023. – 147 с.

Рецензенти:

Рудик Андрій Вікторович, доктор технічних наук, професор кафедри
автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національного університету водного господарства та природокористування

Круліковський Борис Борисович, кандидат технічних наук, доцент кафедри
обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та
природокористування

Друкується за ухвалою Вченої Ради Міжнародного економіко-гуманітарного
університету імені академіка Степана Дем'янчука

© Міжнародний економіко-гуманітарний університет імена академіка Степана
Дем'янчука, 2023

Зміст

ПЕРЕДМОВА.....	7
I. ЕЛЕКТРОСТАТИКА.....	9
1. Заряд.....	9
2. Закон Кулона.....	9
3. Напруженість поля $\vec{E}$. Силові лінії.....	10
4. Потенціал поля. Робота електростатичного поля.....	11
4.1. Диференціальний зв'язок напруженості й потенціалу поля.....	11
4.2. Інтегральний зв'язок напруженості та потенціалу поля. Циркуляція напруженості.....	12
5. Потенціал поля точкового заряду q	12
6. Напруженість електричного поля на осі зарядженого кільця.....	13
7. Напруженість електричного поля на осі диска.....	13
8. Електричний диполь та його поле.....	13
8.1. Потенціал електричного поля диполя.....	14
8.2. Напруженість електричного поля диполя.....	14
8.3. Диполь у неоднорідному електричному полі.....	14
9. Потік вектора напруженості, теорема Остроградського-Гауса.....	15
9.1. Потік вектора напруженості.....	15
9.2. Теорема Остроградського-Гауса.....	15
10. Провідники та діелектрики.....	15
10.1. Провідники.....	15
10.2. Діелектрики.....	16
11. Напруженість поля $\vec{E}$ нескінченно великої зарядженої площини.....	17
12. Потенціал поля нескінченно великої зарядженої площини.....	17
13. Напруженість поля $\vec{E}$ зарядженого циліндра та його потенціал.....	18
14. Напруженість поля $\vec{E}$ зарядженої сфери та її потенціал.....	18
15. Електростатичне поле в діелектрику.....	19
16. Індукція електростатичного поля $\vec{D}$. Теорема Остроградського-Гауса для індукції.....	20
17. Граничні умови для електричного поля в діелектрику.....	20
18. Сегнетоелектрики.....	20
19. Електроємність провідників.....	21
19.1. Електроємність відокремленого провідника.....	21
19.2. Взаємна електроємність.....	21
20. Конденсатори.....	21
20.1. Плоский конденсатор.....	21
20.2. Циліндричний конденсатор.....	22
20.3. Сферичний конденсатор.....	22
20.4. Системи з'єднаних конденсаторів.....	22
21. Електрична енергія заряджених провідників. Енергія електростатичного поля.....	23
21.1. Електрична енергія відокремленого зарядженого провідника.....	23

21.2. Енергія системи з N нерухомих точкових зарядів.....	23
21.3. Енергія конденсатора.....	23
21.4. Сила тяжіння між пластинами зарядженого конденсатора.....	23
21.5. Енергія електростатичного поля.....	24
22. Процес релаксації у контурі з ємністю.....	24
Приклади розв'язування задач.....	25
Питання для самоконтролю.....	30
Завдання для самостійного опрацювання.....	33
II. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ.....	43
1. Струм, сила струму, густина струму.....	43
2. Класична модель розрахунку густини струму.....	43
3. Класична теорія електропровідності провідника.....	44
3.1. Закон Ома у диференціальній формі.....	44
3.2. Закон Ома в інтегральній формі.....	44
4. Закон Джоуля-Ленца.....	44
4.1. Закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі.....	44
4.2. Закон Джоуля-Ленца в інтегральній формі.....	44
5. Температурна залежність опору провідника.....	45
6. Сторонні сили, ЕРС.....	45
7. Правила Кірхгофа.....	45
7.1. Перше правило Кірхгофа.....	45
7.2. Друге правило Кірхгофа.....	46
8. Електропровідність рідин.....	46
9. Електропровідність газів.....	46
10. Плазма.....	47
11. Контактні та термоелектричні явища в металах.....	47
11. 1. Робота виходу.....	47
11. 2. Перший закон Вольта.....	48
11. 3. Другий закон Вольта.....	48
11. 4. Термоелектрорушійна сила.....	48
11. 5. Електронна емісія.....	49
Приклади розв'язування задач.....	50
Питання для самоконтролю.....	53
Завдання для самостійного опрацювання.....	54
III. МАГНЕТИЗМ.....	64
1. Магнітне силове поле.....	64
1.2. Магнітний момент плоского контуру із струмом.....	64
1.3. Індукція магнітного поля.....	64
1.4. Силкові лінії магнітного поля.....	64
1.5 Закон Біо - Савара - Лапласа.....	65
1.6. Магнітне поле заряду, що рухається.....	66
1.7. Магнітне поле деяких провідників із струмами.....	66
1.8. Циркуляція індукції магнітного поля.....	67
2. Закон Ампера, сила Лоренця.....	67
3. Сила взаємодії струмів.....	68

4. Потенціальна енергія контуру в магнітному полі.....	68
4.1. Момент сили, що діє на контур.....	68
4.2. Енергія контуру.....	68
5. Потік індукції магнітного поля.....	69
5.1. Потік вектора магнітної індукції.....	69
5.2. Теорема Остроградського-Гауса для магнітного поля.....	69
5.3. Потокозчеплення.....	69
5.4. Робота по переміщенню провідника із струмом у магнітному полі.....	70
6. Визначення питомого заряду електрона.....	70
7. Ефект Холла.....	70
8. Прискорювачі елементарних частинок.....	71
8.1. Лінійні прискорювачі.....	71
8.2. Циклотрон.....	71
8.3. Синхрофазотрон.....	72
8.4. Колайдери.....	72
9. Мас – спектрометри.....	72
10. Електронний мікроскоп.....	72
10.1. Електронні лінзи.....	72
10.2. Електронний мікроскоп.....	73
11. Гіромагнітне відношення для електрона.....	73
11.1. Прецесія електрона.....	73
12. Магнітне поле в магнетиках.....	74
12.1. Намагніченість середовища.....	74
12.2. Гіпотеза Ампера.....	74
12.3. Магнітне поле у магнетикові.....	74
12.4. Діамагнетики.....	75
12.5. Парамагнетики.....	75
12.6. Феромагнетики.....	76
13. Закон повного струму.....	76
13.1. Закон Фарадея.....	76
13.2. Правило Ленца.....	76
13.3. Закон Фарадея й закон збереження енергії.....	77
13.4. Закон Фарадея й електронна теорія.....	77
14. МГД – генератор.....	77
15. Вихрове електричне поле та його циркуляція.....	78
15.1. Явище електромагнітної.....	78
15.2. Явище електромагнітної взаємодії. Трансформатор.....	79
15.3. Процес релаксації у контурі з індуктивністю.....	80
16. Енергія магнітного поля.....	80
Приклади розв’язування задач.....	82
Питання для самоконтролю.....	87
Завдання для самостійного опрацювання.....	90
IV. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ.....	118
1. Коливальний контур.....	118
2. Незгасаючі електромагнітні коливання.....	118

3. Вільні згасаючі електромагнітні коливання.....	120
4. Вимушені коливання.....	121
5. Змінний струм.....	123
6. Рівняння Максвелла.....	124
6.1. Теорема Остроградського-Гауса.....	124
6.2. Теорема Стокса.....	125
6.3. Струм зміщення.....	125
6.4. Перше рівняння Максвелла.....	125
6.5. Друге рівняння Максвелла.....	125
6.6. Третє рівняння Максвелла.....	126
6.7. Четверте рівняння Максвелла.....	126
6.8. Матеріальні рівняння Максвелла.....	126
7. Диференціальні рівняння Максвелла у діелектрику.....	127
8. Плоска електромагнітна хвиля.....	127
9. Поляризація хвилі.....	127
10. Енергія, інтенсивність та тиск електромагнітної хвилі.....	128
11. Випромінювання електричного диполя.....	128
Приклади розв'язування задач.....	130
Питання для самоконтролю.....	135
Завдання для самостійного опрацювання.....	136
ДОВІДНИК.....	142
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	145

ПЕРЕДМОВА

У навчальному посібнику викладені основні тези фізики електричних явищ. З кожної теми наведено основні формули курсу фізики і приклади розв'язування задач. Є питання для самоконтролю, наведено приклади розв'язування типових задач розділу. Упорядникам вдалося подати матеріал у доступній і зрозумілій формі. Теоретичний виклад супроводжується практичними вправами для закріплення навчального матеріалу та довідковими матеріалами. Зміст задач, запропонованих для розв'язування, структуровано за темами, що відповідають логіці вивчення електричних явищ.

Навчальний посібник призначений для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освіти, що не спеціалізуються на поглибленому вивченні фізичних явищ.

Для здобувачів денної та заочної форм навчання.

Задачі радимо розв'язувати в такій послідовності:

1. Ознайомлення з умовою задачі та її запис

Умову задачі спочатку записується повністю, а далі – скорочено.

2. Аналіз задачі

Насамперед необхідно з'ясувати фізичний зміст задачі, а потім встановити функціональну залежність між величинами, даними в її умові, та величиною, яку потрібно знайти. Щоб краще зрозуміти умову задачі, слід зробити рисунок або схему, якщо вони необхідні. Завершальним етапом аналізу є вибір методу розв'язування.

3. Розв'язання задачі

Задачу можна розв'язати аналітичним або синтетичним методами. Аналітичний метод полягає в тому, що спочатку знаходять формулу, в яку входить шукана величина та найбільша кількість відомих з умови задачі величин. Якщо в цій формулі є невідомі величини, необхідно взяти додаткові формули, за допомогою яких можна було б визначити їх через відомі величини. Підставивши знайдені вирази нових невідомих величин у формулу шуканої величини, ми одержимо розв'язок задачі у загальному вигляді.

Синтетичний метод полягає в тому, що розв'язання задачі починають не з шуканої величини, а з величин, відомих з умови. Використовуючи відомі зв'язки між величинами, даними в умові, знаходимо формули, які дають функціональну залежність між ними. Переходячи від однієї формули до іншої, зупинимось на формулі, яка дає відповідь на запитання задачі, тобто величину, що нас цікавить.

4. Обчислення шуканої величини

У праву частину формули загального розв'язання задачі підставимо числові значення фізичних величин з найменуваннями одиниць вимірювання, взятих у Міжнародній системі одиниць (системі СІ). Якщо розв'язання в загальному вигляді складне, рекомендується спочатку підставити в його формулу найменування одиниць вимірювання фізичних величин, що увійшли до неї. Якщо найменування лівої та правої частин формули загального розв'язання неоднакові, то це свідчить про помилку у розв'язанні задачі.

5. Аналіз одержаного результату

Отримавши шукану величину, треба проаналізувати її, щоб переконатися, що вона відповідає умові задачі.

I. ЕЛЕКТРОСТАТИКА

1. Заряд

Заряд тіла є дискретною величиною, пропорційною величині елементарного заряду $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Дослідним шляхом встановлено фундаментальний закон збереження заряду: повний заряд замкненої системи зберігається

$$Q = \sum_{i=1}^{i=N} q_i = \text{const} \quad (1.1)$$

Це означає, що частинки можуть народжуватися та зникати (анігілювати) попарно як такі, що мають рівні за величиною і різнойменні заряди.

Електрон – стабільна елементарна частинка, яка має класичну масу $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, класичний радіус $r_0 \approx 10^{-13} \text{ м}$, заряд $q = -e$, питомий заряд $\gamma = \frac{e}{m} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

Протон – стабільна елементарна частинка, яка має додатній заряд $q = e$, класичний радіус $r_0 \approx 10^{-15} \text{ м}$, масу $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, причому

$$\frac{m_p}{m_e} = 1836 \quad (1.2)$$

2. Закон Кулона

Закон Кулона встановлює силу електростатичної взаємодії між двома точковими зарядами.

$$\vec{F} = k \frac{qq_0}{r^2} \vec{e} \quad (1.3)$$

Коефіцієнт пропорційності k є розмірним

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \quad (1.4)$$

Величина $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ називається електричною сталою.

Одиничний вектор $\vec{e}$ напрямку сили $\vec{F}$ направлений уздовж прямої, яка з'єднує заряди у напрямку від додатного q . Якщо точкові заряди розміщені в середовищі, яке називається діелектриком, то сила взаємодії в ньому буде в ε раз менше ніж у вакуумі, тобто

$$\vec{F} = k \frac{qq_0}{\varepsilon r^2} \vec{e} \quad (1.5)$$

3. Напруженість поля $\vec{E}$. Силкові лінії.

Силова дія поля описується напруженістю поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}, \quad (1.6)$$

Вона чисельно дорівнює силі, що діє на одиничний заряд у полі. Із цього визначення слідує, що напруженість поля точкового заряду q дорівнює

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \vec{e}, \quad (1.7)$$

де одиничний вектор $\vec{e}$, направлений від додатного заряду в нескінченність або до від'ємного заряду. Одиницею вимірювання напруженості поля є $[E] = \text{В/м}$ (вольт/метр), або Н/Кл (ньютон на кулон).

Електростатичним полем називається поле, напруженість якого $\vec{E}$ не залежить від часу.

Однорідне електростатичне поле – поле, напруженість якого $\vec{E} = \text{const}$ у будь-якій точці поля, тобто вектори $\vec{E}$ в цих точках рівні за величиною та паралельні.

Законом суперпозиції: вона дорівнює векторній сумі напруженостей, що створюються кожним із цих зарядів

$$\vec{F}_0 = \sum_{i=1}^N F_{0i} \vec{e}_{0i}, \quad (1.8)$$

а напруженість поля обчислимо за її визначенням

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}, \quad \vec{E} = \sum_{i=1}^N \frac{\vec{F}_{0i}}{q_0}, \quad \vec{E}_{0i} = k \frac{q_i}{r_{0i}^2} \vec{e}_{0i}, \quad \vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_{0i}. \quad (1.9)$$

Принцип суперпозиції означає незалежність виникнення та дії електростатичних полів.

4. Потенціал поля. Робота електростатичного поля.

Електростатичне поле й заряд q_0 взаємодіють між собою і ця взаємодія характеризується потенціальною енергією W . Відношення

$$\phi = \frac{W}{q_0} \quad (1.10)$$

є енергетичною характеристикою поля і називається потенціалом поля. Якщо поле створюється точковими зарядами Δq_i , то величина потенціальної енергії ΔW_i взаємодії кожного з них із пробним зарядом q_0 є попарною, тобто повна енергія

взаємодії є $W = \sum_i \Delta W_i$ і потенціал поля визначається як

$$\phi = \frac{W}{q_0} = \sum_i \frac{\Delta W_i}{q_0}, \quad \Delta \phi_i = \frac{\Delta W_i}{q_0}, \quad \phi = \sum_i \Delta \phi_i.$$

Останній вираз для ϕ називають законом (принципом) суперпозиції для потенціала поля.

Еквіпотенціальною поверхнею називається поверхня в кожній точці якої потенціал має одну й ту ж величину, тобто $\phi = \text{const}$.

4.1. Диференціальний зв'язок напруженості й потенціалу поля.

Сила $\vec{F}$, що діє на пробний заряд q_0 в електричному полі, за час dt переміщує його на $d\vec{L}$. При цьому вона виконує елементарну роботу

$$\delta A = \vec{F} d\vec{L} = q_0 \vec{E} d\vec{L} = q_0 E dL \cos \alpha,$$

де α – кут між $\vec{E}$ та $d\vec{L}$.

або

$$d\phi = -\vec{E} d\vec{L}. \quad (1.11)$$

Вираз (4.1.1) є диференціальним рівнянням, що зв'язує енергетичну та силову характеристики поля.

Розв'язком рівняння (4.1.1) відносно напруженості поля і враховуючи записати вектор $\vec{E} = \{E_x, E_y, E_z\}$ через значення його компонент

$$\vec{E} = -\left\{ \vec{i} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right\} \quad (1.12)$$

4.2. Інтегральний зв'язок напруженості та потенціалу поля. Циркуляція напруженості

Якщо циркуляція вектора напруженості силового поля дорівнює 0, то поле є потенціальним, у протилежному - поле називається вихровим.

$$\Gamma_E = \oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0 \quad (1.13)$$

5. Потенціал поля точкового заряду q

У випадку електричного поля точкового заряду q напруженість поля є

$$E = \frac{F}{q_0} = k \frac{q}{r^2}. \quad (1.14)$$

Остаточно потенціал електростатичного поля точкового заряду q на відстані r від нього дорівнює

$$\phi = k \frac{q}{r}. \quad (1.15)$$

Якщо поле створене декількома зарядами, то потенціальна енергія пробного заряду буде складатися з енергій взаємодії з кожним із зарядів і остаточно

$$\phi = \sum_i \phi_i, \phi_i = k \frac{q_i}{r_i}. \quad (1.16)$$

Одержаний вираз (5.3) знову приводить до **принципу суперпозиції для потенціалу**: потенціал поля в точці А, створеного декількома точковими електричними зарядами, є алгебраїчною сумою потенціалів, створених кожним із зарядів окремо.

6. Напруженість електричного поля на осі зарядженого кільця

Напруженість dE , створювана елементом кільця dL із зарядом $dq = \lambda \cdot dL$, дорівнює

$$dE = k \frac{dq}{r^2}, \quad (1.17)$$

де $r = \sqrt{x^2 + a^2}$ – відстань точки А від елемента кільця товщиною dL .

7. Напруженість електричного поля на осі диска

Покладемо, що кільце має товщину dx і площу $dS = 2\pi x \cdot dx$. Запишемо заряд кільця q через поверхневу густину σ

$$dQ = 2\pi x \cdot dx \cdot \sigma \quad dQ = q = 2\pi x \sigma \cdot dx.$$

Остаточно величина напруженості поля диска на осі дорівнює

$$E_D = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \eta^2}} \right), \quad (1.18)$$

де $\eta = R/a$.

8. Електричний диполь та його поле

Якщо система з двох різнойменних точкових зарядів величиною q , відстань між якими l , розглядається на відстані $r \gg l$, то вона називається диполем. Величина l – плече диполя. Диполь характеризується вектором дипольного моменту $\vec{p} = q\vec{l}$, направленим від від'ємного заряду до додатного.

8.1. Потенціал електричного поля диполя

Потенціал та напруженість електричного поля диполя в точці A з радіус-вектором $\vec{r}$ відносно середини плеча диполя O та кутом ϑ між $\vec{r}$ та моментом $\vec{p}$.

$$\phi = \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}, \quad (1.19)$$

8.2. Напруженість електричного поля диполя

Напруженість у точках на прямій, на якій лежить диполь ($\vartheta = 0$ або $\vartheta = \pi$) дорівнює

$$E = \frac{2kp}{r^3}, \quad (1.20)$$

а в точці, що знаходиться на осі диполя ($\vartheta = \pi/2$)

$$E = \frac{kp}{r^3}. \quad (1.21)$$

8.3. Диполь у неоднорідному електричному полі

На заряди диполя, розміщеного в електростатичному полі з напруженістю $\vec{E}$ діє пара сил величиною $F = qE$ й плечем $l \cdot \sin \alpha$, які створюють момент сили величиною

$$M = F \cdot l \sin \alpha = qE \cdot l \sin \alpha = pE \sin \alpha$$

що діє на диполь. Вектор моменту сили запишеться так

$$\vec{M} = [\vec{p} \vec{E}]. \quad (1.22)$$

При повороті диполя на кут $d\alpha$, поле виконує роботу

$$\delta A = M d\alpha = pE \sin \alpha d\alpha = -d(pE \cos \alpha).$$

$$\delta A = -d(\vec{p} \vec{E}) \quad (1.23)$$

Ця робота виконується зовнішнім полем на створення **механічної потенціальної енергії W_m диполя в електричному полі**

$$dW_m = \delta A. \quad (1.24)$$

9. Потік вектора напруженості, теорема Остроградського-Гауса

9.1. Потік вектора напруженості

Нехай в електростатичному полі є елементарна поверхня $d\vec{S} = \vec{n} dS$ з нормаллю $\vec{n}$, яку пронизує силова лінія напруженості $\vec{E}$.

Елементарний потік Φ вектора напруженості $\vec{E}$ через цю поверхню визначається так

$$d\Phi = \vec{E} d\vec{S} = E \vec{n} d\vec{S} = E dS \cos \alpha = E_n dS, \quad (1.25)$$

де α — кут між $\vec{E}$ та нормаллю $\vec{n}$ до dS , $E_n = E \cos \alpha$.

9.2. Теорема Остроградського-Гауса

Теорема Остроградського-Гауса стверджує, що потік вектора напруженості електростатичного поля у вакуумі через довільну замкнену поверхню S_v дорівнює

$$\Phi = \oint_{S_v} \vec{E} d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon \epsilon_0}. \quad (1.26)$$

Фізичний зміст теореми Остроградського-Гауса полягає в тому, що за її допомогою, при відомій напруженості електростатичного поля $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r})$, можна визначити розподіл зарядів $q(\vec{r})$ у просторі поля. Такий зв'язок існує лише у випадку центральних сил, величина яких обернено пропорційна відстані між точковими джерелами центральних сил.

10. Провідники та діелектрики

10.1. Провідники.

До провідників електричного струму відносять метали — провідники першого роду та електроліти — провідники другого роду й іонізовані гази.

Напруженість електростатичного поля у просторі між різнойменно зарядженими **металічними** нескінченно довгими **циліндрами** з лінійною густиною заряду λ і радіусами r_1 і r_2 визначається лише зарядом внутрішнього циліндра, тобто

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}, \quad (1.27)$$

де $r_1 \leq r \leq r_2$.

Або електростатичне поле у просторі між двома різнойменно зарядженими **металічними сферами**, що мають спільний центр, заряд q і радіуси r_1 і r_2 , напруженість визначається лише зарядом внутрішньої сфери, тобто

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1.28)$$

де $r_1 \leq r \leq r_2$.

Поверхня зарядженого провідника є екіпотенціальною.

Напруженість поля при поверхні зарядженого провідника. $E = \sigma / \epsilon_0$.

10.2. Діелектрики.

Діелектриком називається речовина, яка при звичайних умовах не проводить електричний струм.

Діелектрик називається **неполярним**, якщо у відсутності зовнішнього електричного поля центри "тяжіння" додатних і від'ємних зарядів у його молекулах співпадають.

Діелектрик називається **полярним**, якщо він складається з полярних молекул.

З класичної точки зору в електричному полі з напруженістю $\vec{E}$ центри "тяжіння" від'ємних та додатних зарядів неполярних молекул зміщуються один відносно одного і в них виникає (індукується) електричний дипольний момент $\vec{p}$, як

показують експериментальні дослідження, вектор дипольного моменту пропорційний напруженості електричного поля

$$\vec{p}_e = \epsilon_0 \alpha \vec{E}. \quad (1.29)$$

Коефіцієнт α називається коефіцієнтом поляризованості молекули. Кількісною мірою поляризації діелектрика служить вектор поляризації

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}_{ei}, \quad (1.30)$$

де $\vec{p}_{ei}$ – електричний дипольний момент i -ої молекули, ΔV – об'єм діелектрика.

Експериментальні дослідження показали, що вектор поляризації як неполярного так і полярного діелектрика при невеликих напруженостях зовнішнього поля можна записати у вигляді

$$\vec{P} = n\epsilon_0 \alpha \vec{E} = \chi\epsilon_0 \vec{E}, \quad (1.31)$$

де n – концентрація молекул, $\chi = n\alpha$ – нерозмірна величина, що називається діелектричною сприйнятливістю середовища, $\vec{E}$ – середня напруженість поля усередині діелектрика.

11. Напруженість поля $\vec{E}$ нескінченно великої зарядженої площини

Напруженість поля $\vec{E}$ нескінченно великої зарядженої площини направлена перпендикулярно до поверхні площини

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (1.32)$$

Електростатичне поле, створене двома нескінченно великими різнойменно зарядженими площинами з однаковою величиною поверхневої густини заряду σ ,

знаходиться між ними і його напруженість $E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (1.33)$

12. Потенціал поля нескінченно великої зарядженої площини.

Нехай вісь Ox перпендикулярна нескінченно великій зарядженій площині з поверхневою густиною заряду σ . Для знаходження різниці потенціалів між точками, що знаходяться на відстанях x_1 та x_2 від площини з $d = x_2 - x_1$, скористаємося зв'язком напруженості та потенціалу поля

$$\phi_1 - \phi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = \int_1^2 E dl \cos \alpha = \int_{x_1}^{x_2} E dx = E(x_2 - x_1) = Ed \quad (1.34)$$

Обчислюючи $\phi_1 - \phi_2$, ми зважили на те, що $\vec{E} \parallel Ox$ і $dl \cos \alpha = dx$, де α – кут між векторами напруженості $\vec{E}$ та переміщення $d\vec{l}$.

13. Напруженість поля $\vec{E}$ зарядженого циліндра та його потенціал

Напруженість поля $\vec{E}$ нескінченно довгого зарядженого циліндра із радіусом основи r та лінійною густиною заряду λ направлена по нормалі до бічної поверхні циліндра. При $R > r$ величина напруженості дорівнює

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon\epsilon_0 R} \quad (1.35)$$

Потенціал поля нескінченно великого зарядженого циліндра. Якщо розглядаються два співвісні різнойменно заряджені металеві циліндри з радіусами r_1 та r_2 , то в просторі між ними поле створюється лише зарядом внутрішнього циліндра з напруженістю

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (1.36)$$

а різниця потенціалів між поверхнями циліндрів становить

$$\phi_1 - \phi_2 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (1.37)$$

14. Напруженість поля $\vec{E}$ зарядженої сфери та її потенціал

Напруженість поля $\vec{E}$ зарядженої сфери радіуса r , що містить заряд q , для $R > r$ направлена по радіальним прямим і за величиною дорівнює

$$E = \frac{q}{4\pi r^2 \epsilon \epsilon_o}. \quad (1.38)$$

Потенціал зарядженої сфери. Потенціал зарядженої сфери радіуса R із зарядом Q на відстані від центра $r \geq R$ дорівнює

$$\phi = k \frac{Q}{r}. \quad (1.39)$$

Різниця потенціалів між точками, що знаходяться на відстанях r_1 та r_2 від центра дорівнює

$$\phi_1 - \phi_2 = Q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \frac{1}{4\pi \epsilon \epsilon_o}. \quad (1.40)$$

Поле двох різнойменно заряджених сфер із радіусами r та $R > r$ й зарядом Q створюється лише внутрішньою сферою, а тому різниця потенціалів між сферами дорівнює

$$\phi_1 - \phi_2 = Q \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \frac{1}{4\pi \epsilon \epsilon_o}. \quad (1.41)$$

Якщо $R = r + d, r \gg d$, то

$$\frac{1}{r} - \frac{1}{R} = \frac{R - r}{rR} = \frac{d}{r^2}$$

і

$$\phi_1 - \phi_2 = Q \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \frac{1}{4\pi \epsilon \epsilon_o} = \frac{1}{4\pi \epsilon \epsilon_o} \frac{Q}{r^2} d = Ed. \quad (1.42)$$

Цей результат також збігається з випадком для різниці потенціалів для двох різнойменно заряджених нескінченних площин.

15. Електростатичне поле в діелектрикові

Якщо діелектрик помістити у зовнішнє електричне поле з напруженістю $\vec{E}_0$, то в ньому буде індукуватися внутрішнє поле $\vec{E}'$, створене орієнтацією зв'язаних зарядів молекули: електрони атомів розмістяться назустріч полю, а ядра — за полем. Сумарне поле буде мати напруженість $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$. В ізотропних діелектриках

$$E = E_0 / \epsilon, \quad (1.43)$$

де $\epsilon = 1 + \chi$ — безрозмірна величина, яка називається діелектричною проникливістю.

16. Індукція електростатичного поля $\vec{D}$. Теорема Остроградського-Гауса для індукції

Теорема Остроградського-Гауса для електричного зміщення є

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q, \quad (1.44)$$

де q — алгебраїчна сума **вільних** зарядів, що містяться усередині замкненої поверхні діелектрика S .

17. Граничні умови для електричного поля в діелектрику

Граничні умови для електричного поля при переході границі двох діелектриків із діелектричними проникливостями ϵ_1 та ϵ_2 мають вигляд

$$E_{2\tau} = E_{1\tau}, D_{2\tau} = D_{1\tau} \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}, D_{2n} = D_{1n}, E_{2n} = E_{1n} \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}. \quad (1.45)$$

Індекс τ означає тангенціальну складову до граничної поверхні, а індекс n — нормальну складову відповідного вектора.

18. Сегнетоелектрики

Сегнетоелектриком називається діелектрик, що має макроскопічні об'єми (домени) у середині яких у звичайних умовах існує спонтанна (невимушена) насичена поляризація і тому сегнетоелектрики, будучи розміщеними у зовнішньому електричному полі, мають аномально велику діелектричну проникливість $\epsilon \sim 10^4$.

Зауваження.

1. Результат поляризації сегнетоелектрика залежить від передісторії його стану, функція $P=P(E)$ є неоднозначною.
2. Залежність $P=\chi E$ справджується лише на початку головної гілки намагнічування 0—1.
3. При поляризації сегнетоелектрика змінюється його форма та розміри, виникає так назване явище електрострикції.
4. Механічна деформація змінює поляризацію сегнетоелектрика.

19. Електроємність провідників

19.1. Електроємність відокремленого провідника.

Відокремлений провідник, має потенціал ϕ пропорційний розміщеному на ньому зарядові q і тому можна записати, що $q=C\phi$. Коефіцієнт пропорційності C називають електроємністю відокремленого провідника. Електроємність C залежить від геометричної форми та розмірів провідника.

Розмірність електроємності $[C]=В/м=\text{Фарад}$, або скорочено $[C]=\Phi$. Електроємність відокремленого провідника, що є сферою з радіусом R дорівнює

$$C = \frac{q}{\phi} = q : \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R. \quad (1.46)$$

Розмірність електричної сталої $[\epsilon_0]=\Phi/м$.

19.2. Взаємна електроємність.

Взаємна електроємність C двох різнойменно заряджених провідників із

величиною заряду q визначається як $C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2}$, де ϕ_1 і ϕ_2 — потенціали

провідників. Ємність C залежить від геометричної форми провідників та їх взаємного розташування.

20. Конденсатори

За визначенням електроємність конденсатора є

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{q}{U}, \quad U = \phi_1 - \phi_2, \quad (1.47)$$

де ϕ_1, ϕ_2 – потенціали провідників, U – різниця потенціалів.

20.1. Плоский конденсатор

Електроємність плоского конденсатора становить

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}. \quad (1.48)$$

20.2. Циліндричний конденсатор

Електроємність циліндричного конденсатора можна розрахувати так:

$$U = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right), \quad q = \lambda h, \quad (1.49)$$

$$C = \frac{q}{U} = \frac{2\pi h \epsilon \epsilon_0}{\ln(R_1/R_2)}. \quad (1.50)$$

Якщо $d = R_1 - R_2 \ll R_1$, то вираз для ємності циліндричного конденсатора приймає вид ємності плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (1.51)$$

де $S = 2\pi h R_1$ – бічна поверхня циліндра.

20.3. Сферичний конденсатор

Електроємність сферичного конденсатора

$$C = q/U = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}. \quad (1.52)$$

Нехай $R_2 - R_1 = d \ll R_1$, R_2 і $R_1 = R_2 = R$. Площа поверхні сфери $S = 4\pi R^2$ і тоді

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} . \quad (1.53)$$

20.4. Системи з'єднаних конденсаторів.

При паралельному з'єднанні конденсаторів у батарею, їх загальна ємність дорівнює сумі ємностей усіх конденсаторів батареї.

$$C = \frac{Q}{U} = \sum_i \frac{q_i}{U} = \sum_i C_i , \quad (1.54)$$

При послідовному з'єднанні конденсаторів у батарею величина обернена їх загальній ємності дорівнює сумі величин, обернених ємностям усіх конденсаторів батареї.

$$\frac{1}{C} = \frac{U}{q} ; \quad \frac{1}{C} = \sum_i \frac{U_i}{q} = \sum_i \frac{1}{C_i} , \quad (1.55)$$

21. Електрична енергія заряджених провідників. Енергія електростатичного поля

21.1. Електрична енергія відокремленого зарядженого провідника.

Електрична енергія відокремленого зарядженого провідника дорівнює

$$W = \frac{q^2}{2C} \quad \text{або} \quad W = \frac{q\phi}{2} = \frac{C\phi^2}{2} . \quad (1.56)$$

21.2. Енергія системи з N нерухомих точкових зарядів

Енергія системи з двох точкових зарядів q_1 і q_2 , відстань між якими становить $r_{12}=r_{21}$, є енергія взаємодії одного заряду з другим і може бути записана як енергія одного заряду в полі другого так

$$W = W_1 = W_2 \Rightarrow$$

$$W = \frac{1}{2} (q_1 \cdot \phi_{12} + q_2 \cdot \phi_{21}) . \quad (1.57)$$

21.3. Енергія конденсатора.

Електрична енергія, плоского конденсатора є сумою енергії двох різнойменно заряджених обкладинок

$$W = W_1 + W_2 = \frac{q\phi_1}{2} - \frac{q\phi_2}{2} = \frac{q}{2}(\phi_1 - \phi_2) = \frac{qU}{2}, \quad (1.58)$$

де $U = \phi_1 - \phi_2$.

21.4. Сила тяжіння між пластинами зарядженого конденсатора.

Потенціальну енергію зарядженого плоского конденсатора можна представити у вигляді функції x

$$W(x) = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{1}{2}\epsilon\epsilon_0 SE^2 x, \quad (1.59)$$

де x — відстань між пластинами. Величину сили взаємодії між пластинами знайдемо через градієнт потенціальної енергії

$$F = \frac{dW}{dx}, \quad \Rightarrow \quad F = \frac{1}{2}\epsilon\epsilon_0 SE^2. \quad (1.60)$$

21.5. Енергія електростатичного поля.

Можна вважати, що енергія зарядженого конденсатора тотожна енергії електричного поля

$$W = \frac{1}{2}\epsilon\epsilon_0 E^2 V, \quad V = Sd. \quad (1.61)$$

22. Процес релаксації у контурі з ємністю

Залежність величини заряду q від часу t при зарядці й розряді конденсатора визначається величиною ємності C .

Час τ за який величина заряду зменшиться в e раз називається часом релаксації.

$$\tau = RC. \quad (1.62)$$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Два точкових заряди величиною $q_1 = 1$ нКл і $q_2 = -2$ нКл розміщені в повітрі у двох вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $r = 10$ см. Знайти напруженість електричного поля в третій вершині трикутника.

Розв'язання

Дано:

$$q_1 = 1 \text{ нКл} = 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -2 \text{ нКл} = -2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

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

$E = ?$

Згідно з принципом суперпозиції електричних полів кожний заряд створює поле незалежно від присутності в просторі інших зарядів. Тому напруженість E електричного поля

знайдемо, як векторну суму напруженостей, створених кожним зарядом зокрема $E = E_1 + E_2$.

Модуль вектора напруженості поля, створеного кожним точковим

$$E = \frac{|q_1|}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}; \quad E = \frac{|q_2|}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}.$$

Абсолютне значення вектора E одержимо за теоремою косинусів:

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

де α – кут між векторами E_1 і E_2 , $\alpha = 120^\circ$. Напрямки векторів E_1 і E_2 визначимо, урахувавши знаки зарядів q_1 і q_2 (напрямок вектора напруженості збігається з напрямком сили, що діє на точковий позитивний одиничний заряд, поміщений в дану точку поля). За правилом складання векторів графічно знайдемо і напрям вектора E .

Підставивши числові значення в системі СІ, одержимо $E = 1,56$ кВ/м

Задача 2. Однорідне електростатичне поле створене двома паралельними пластинами завдовжки по 3 см. Електрон влітає в це поле зі швидкістю $2 \cdot 10^6$ м/с, напрямленою паралельно до пластин. На яку відстань по вертикалі зміститься електрон до моменту виходу із простору між пластинами, якщо напруга між пластинами 4,8 В, а відстань між ними 16 мм? Маса електрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, модуль його заряду $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Виконаємо рисунок (рис.1.1), на якому покажемо осі координат, початкове й кінцеве положення електрона, напрямок його початкової швидкості й прискорення руху.

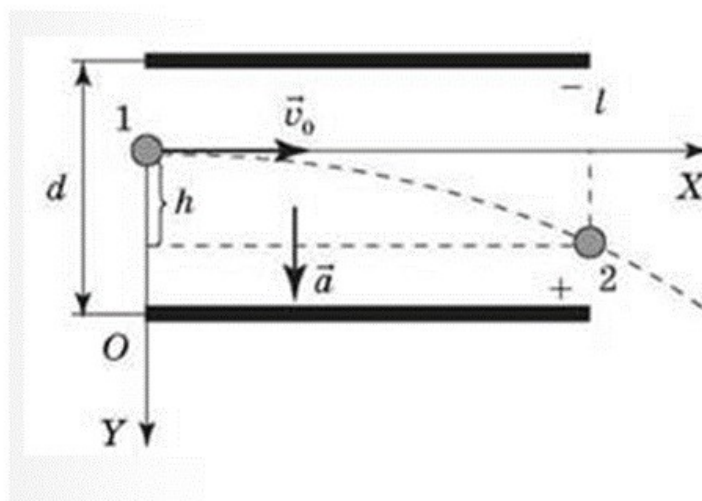


Рис. 1.1

Запишемо рівняння для координат:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

З урахуванням того, що: $x = l$, $x_0 = 0$, $v_{0x} = v_0$, $a_x = 0$, $y = h$, $y_0 = 0$, $v_{0y} = 0$, $a_y = a$, одержуємо:

$$l = v_0 t, \quad (1)$$

$$h = \frac{at^2}{2}. \quad (2)$$

З рівності (1) визначаємо час руху $t = \frac{l}{v_0}$ й підставляємо його в рівність (2):

$$h = \frac{al^2}{2v_0^2}.$$

Під час руху електрона між пластинами на нього діє електрична сила:

$$F = |e|E = |e|\frac{U}{d} \quad (3)$$

Під дією цієї сили електрон набуває прискорення a , яке за другим законом Ньютона дорівнює $a = \frac{F}{m}$, або з урахуванням формули (3): $a = \frac{|e|U}{md}$. Знаючи прискорення руху електрона, визначимо відстань, на яку зміститься електрон під час

руху між пластинами:

$$h = \frac{|e|Ul^2}{2mdv_0^2}.$$

Визначаємо значення шуканої величини:

$$[h] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2} = \frac{\text{Дж}}{\text{Н}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м};$$

$$h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,8 \cdot 9 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 16 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{12}} = 6 \cdot 10^{-3} (\text{м}).$$

Відповідь: у момент виходу із простору між пластинами електрон зміститься на відстань 6 мм.

Задача 3. Позитивні заряди $q_1 = 3 \text{ мкКл}$ і $q_2 = 20 \text{ нКл}$ знаходяться у вакуумі на відстані $r_1 = 1,5 \text{ м}$ один від одного. Визначити роботу A , яку потрібно здійснити, щоб наблизити заряди до відстані $r_2 = 1 \text{ м}$.

Розв'язання

Дано

$$\begin{aligned} q_1 &= 3 \text{ мкКл} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \\ q_2 &= 20 \text{ нКл} = 20 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ r_1 &= 1,5 \text{ м} \\ r_2 &= 1 \text{ м} \end{aligned}$$

$A = ?$

Припустимо, що перший заряд q_1 залишається нерухомим, а другий – q_2 , під дією зовнішніх сил переміщується у полі, створеному зарядом q_1 з відстані $r_1 = 1,5 \text{ м}$ до відстані $r_2 = 1 \text{ м}$.

Робота A зовнішньої сили по переміщенню заряду q з однієї точки поля з потенціалом φ_1 в іншу, потенціал якої φ_2 , дорівнює за абсолютною величиною і протилежна за знаком роботі A' сил поля по переміщенню заряду між тими ж точками: $A = -A'$.

Робота сил поля по переміщенню заряду

$$A' = q (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1)$$

Робота зовнішніх сил A може бути записана у вигляді:

$$A = -q (\varphi_1 - \varphi_2) = q (\varphi_2 - \varphi_1).$$

Потенціали точок початку і кінця шляху виражаться формулами:

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1}, \quad \varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2}$$

Підставляючи вирази φ_1 і φ_2 у формулу (1) і враховуючи, що для цього випадку заряд, що переноситься $q = q_2$, одержимо

$$A = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right). \quad (2)$$

Підставивши у формулу (2) значення величин і обчисливши, знайдемо: $A=180$ мкДж.

Задача 4. Плоский конденсатор заряджений до різниці потенціалів $U = 1$ кВ. Відстань d між пластинами дорівнює 1 см. Об'єм між пластинами заповнений склом. Визначити об'ємну густину енергії конденсатора.

Розв'язання

$$U = 1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$$

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

$$\varepsilon = 2$$

$$w = ?$$

Об'ємна густина енергії поля конденсатора:

$$w = W/V \quad (1)$$

де W – енергія поля конденсатора, V – об'єм, який займає поле – об'єм простору, який охоплюють пластини конденсатора. Енергія поля конденсатора визначається за формулою:

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

де U – різниця потенціалів, до якої заряджені пластини конденсатора; C – його ємність.

$$\text{Але } C = \varepsilon \varepsilon_0 S / d, \quad V = Sd$$

Діелектрична проникність скла $\varepsilon = 2$. Підставивши вираз C у формулу (2), а потім вирази W і V у формулу (1), одержимо

$$w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2 d^2} \quad (3)$$

Підставивши значення величин і обчисливши, одержимо: $w = 0,309$ Дж/м³.

Задача 5 Конденсатор, заряджений до напруги 100 В, з'єднують із конденсатором із такою самою ємністю, але зарядженим до напруги 200 В: один раз однойменно зарядженими обкладками, а інший – різнойменно зарядженими обкладками. Яка напруга встановиться між обкладками в обох випадках?

Розв'язування

Спочатку знайдемо заряди на обкладках конденсаторів

$$\begin{aligned} U_1 &= 100 \text{ В}, \\ U_2 &= 200 \text{ В}, \\ C_1 &= C_2 = C \\ U^I, U^{II} &=? \end{aligned}$$

до з'єднання:

$$q_1 = CU_1, \quad q_2 = CU_2.$$

Розглянемо перший випадок. При з'єднанні однойменних обкладок загальний заряд батареї дорівнює сумі зарядів на обкладках до з'єднання (паралельне):

$$q^I = q_1 + q_2 = CU_1 + CU_2 = C(U_1 + U_2).$$

Напруга на батареї після з'єднання (12.3):

$$U^I = \frac{q^I}{C^I}$$

Оскільки конденсатори з'єднуються паралельно:

$$C_P = C_1 + C_2 = 2C.$$

Підставляємо у вираз для знаходження U^I знайдену напругу та ємність:

$$U^I = \frac{q^I}{C^I} = \frac{C(U_1 + U_2)}{2C} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

Тепер переходимо до розгляду другого випадку. При з'єднанні різнойменних обкладок загальний заряд відповідно до можна визначити як

$$q^{II} = q_2 - q_1 = CU_2 - CU_1 = C(U_2 - U_1),$$

де $q_2 > q_1$, оскільки $U_2 > U_1$. Далі розв'язок аналогічний першому випадку:

$$U^{II} = \frac{q^{II}}{C^{II}} = \frac{C(U_2 - U_1)}{2C} = \frac{U_2 - U_1}{2}$$

Розрахуємо відповідні значення:

$$U^I = \frac{100 + 200}{2} = 150 \text{ (В)}$$

$$U^{II} = \frac{200 - 100}{2} = 50 \text{ (В)}$$

Питання для самоконтролю

1. Електричний заряд, дискретність. Закон збереження заряду.
2. Наведіть закон Кулона.
3. Дайте визначення діелектричної проникливості.
4. Дайте визначення напруженості електричного поля.
5. Визначіть силові лінії електричного поля.
6. Дайте визначення електростатичного поля
7. Яке електростатичне поле називається однорідним.
8. Дайте визначення принципу суперпозиції для напруженості електричного поля.
9. Дайте визначення потенціалу електричного поля.
10. Еквіпотенціальною поверхнею.
11. Дайте визначення принципу суперпозиції для потенціалу електричного поля.
12. Яка поверхня називається еквіпотенціальною?
13. Знайдіть зв'язок напруженості й потенціалу електричного поля.
14. Знайдіть циркуляцію напруженості електричного поля.
15. Яке поле є потенціальним?
16. Яке поле є вихровим?
17. Визначте взаємне розташування силових ліній та еквіпотенціальних поверхонь.
18. Знайдіть напруженість та потенціал поля точкового заряду.
19. Знайдіть напруженість електричного поля на осі зарядженого кільця.
20. Знайдіть напруженість електричного поля на осі зарядженого диска
21. Напруженість електричного поля диполя
22. Диполь у неоднорідному електричному полі
23. Механічної потенціальної енергії W_m диполя в електричному полі
24. Просторовий (тілесний) кут
25. Потік вектора напруженості $\vec{E}$
26. Теорема Остроградського-Гауса

27. Фізичний зміст теореми Остроградського-Гауса
28. Провідники.
29. Електростатичного захисту.
30. Діелектрики.
31. Діелектрик називається неполярним.
32. Діелектрик називається полярним.
33. Вектор поляризації діелектрика.
34. Поляризації діелектрика зовнішнє поле виконує роботу.
35. Напруженість поля $\vec{E}$ нескінченно великої зарядженої площини та її потенціал
36. Потенціал поля нескінченно великої зарядженої площини
37. Напруженість поля $\vec{E}$ зарядженого циліндра
38. Напруженість поля $\vec{E}$ зарядженої сфери та її потенціал.
39. Електростатичне поле в діелектрикові.
40. Індукція електростатичного поля.
41. Теорема Остроградського-Гауса для індукції.
42. Граничні умови для електричного поля в діелектрику.
43. Сегнетоелектрики.
44. Явище «петля гістерезису».
45. Електроємність відокремленого провідника.
46. Взаємна електроємність.
47. Конденсатор.
48. Плоский конденсатор.
49. Електроємність плоского конденсатора.
50. Циліндричний конденсатор .
51. Електроємність циліндричного конденсатора.
52. Сферичний конденсатор.
53. Електроємність сферичного конденсатора.
54. Системи з'єднаних конденсаторів.
55. Електрична енергія відокремленого зарядженого провідника.

56. Енергія системи з N нерухомих точкових зарядів.
57. Енергія конденсатора.
58. Сила тяжіння між пластинами зарядженого конденсатора.
59. Енергія електростатичного поля.
60. Процес релаксації у контурі з ємністю.

Завдання для самостійного опрацювання

1. Два однойменних заряди $q_1 = 0,7$ нКл і $q_2 = 1,3$ нКл знаходяться в повітрі на відстані $r=6$ см один від одного. На якій відстані між ними слід помістити третій заряд, щоб результуюча сила, що діє на кожний заряд була рівною нулю?
2. Два однакових точкових заряди величиною $q = 1,1$ нКл знаходяться на відстані $r = 17$ см. З якою силою і в якому напрямку вони діють на одиничний позитивний заряд, що знаходиться на такій же відстані від кожного з них?
3. Точкові заряди $q_1 = 5$ мКл і $q_2 = 7$ мКл знаходяться на відстані $d = 0,4$ м один від одного. Визначити напруженість електричного поля в точці, що знаходиться на відстані $r_1 = 0,5$ м від першого заряду і на відстані $r_2 = 0,3$ м від другого.
4. Однойменні заряди $q_1 = q_2 = 0,2$ мКл і $q_3 = 0,4$ мКл розміщені у вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $a = 4$ см. Визначити модуль та напрям сили, що діє на заряд q_3 .
5. Точкові заряди $Q_1=20$ мкКл, $Q_2=10$ мкКл знаходяться на відстані $d=5$ см один від одного. Визначити напруженість поля в точці, віддаленій на $r_1=3$ см від першого і $r_2=4$ см від другого заряду. Визначити також силу F , діючу в цій точці на точковий заряд $Q=1$ мкКл.
6. Три однакових точкових заряди $Q_1=Q_2=Q_3=2$ нКл знаходяться у вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $a=10$ см. Визначити модуль і напрям сили F , діючої на один із зарядів з боку двох інших.
7. Два позитивних точкових заряди Q і $9Q$ закріплені на відстані $l=100$ см один від одного. Визначити, в якій точці на прямій, що проходить через заряди, слід розмістити третій заряд так, щоб він знаходився у рівновазі. Вказати, який знак повинен мати цей заряд для того, щоб рівновага була стійка, та якщо переміщення заряду можливі тільки уздовж прямої, що проходить через закріплені заряди.
8. Дві однакові заряджені кульки підвішені в одній точці на нитках однакової довжини. При цьому нитки розійшлися на кут α . Кульки занурюються в олію. Яка густина ρ_0 олії, якщо кут розходження ниток при зануренні кульок в олію залишиться незмінним? Густина матеріалу кульок $\rho=1,5 \cdot 10^3$ кг/м³, діелектрична

проникність олії $\epsilon = 2,2$.

9. Чотири однакових заряди $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=40$ нКл закріплені у вершинах квадрата зі стороною $a=10$ см. Знайти силу F , діючу на один із цих зарядів з боку трьох інших.

10. У вершинах квадрату знаходяться однакові заряди $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=8 \cdot 10^{-3}$ нКл. Який від'ємний заряд Q треба помістити в центрі квадрату, щоб сила взаємного відштовхування позитивних зарядів була врівноважена силою притягування негативного заряду?

11. На відстані $d=20$ см знаходяться два точкових заряди $Q_1= -50$ нКл і $Q_2=100$ нКл. Визначити силу F , діючу на заряд $Q_3= -10$ нКл, віддаленого від обох зарядів на однакову відстань, рівне d .

12. Відстань d між двома точковими зарядами $Q_1=2$ нКл і $Q_2=4$ нКл рівна 60 см. Визначити точку, в яку треба помістити третій заряд Q_3 так, щоб система зарядів знаходилась у рівновазі. Визначити розмір і знак заряду. Стійка чи нестійка буде рівновага?

13. На тонкому кільці рівномірно розподілений заряд із лінійною густиною заряду $\tau=0,2$ кНл/см. Радіус кільця $R=15$ см. На серединному перпендикулярі до площини кільця знаходиться точковий заряд $Q=10$ нКл. Визначити силу F , діючу на точковий заряд з боку зарядженого кільця, якщо він віддалений від центру кільця на:
1) $a_1=20$ см; 2) $a_2=10$ м.

14. По тонкій нитці, зігнутій по дузі кола радіусом $R=10$ см, рівномірно розподілений заряд $Q=20$ нКл. Визначити напруженість E поля, що створене цим зарядом в точці, співпадаючої з центром кривизни дуги, якщо довжина нитки дорівнює чверті довжини кола.

15. Визначити напруженість E поля, створеного зарядом, рівномірно розподіленим по тонкому прямому стержню із лінійною густиною заряду $\tau=200$ нКл/м, в точці, що лежить на продовженні стержня на відстані $a=20$ см від найближчого кінця. Довжина стержня $l=40$ см.

16. На продовженні осі тонкого прямого стержня, рівномірно зарядженого з лінійною густиною заряду $\tau=15$ нКл/см, на відстані $a=40$ см від кінця стержня

знаходиться точковий заряд $Q=10$ мкКл. Другий кінець стержня йде в нескінченність. Визначити силу взаємодії стержня і заряду Q .

17. По тонкому кільцю радіусом $R=10$ см рівномірно розподілений заряд $Q_1=20$ нКл. Яка напруженість E поля в точці, що знаходиться на осі кільця на відстані $a=20$ см від центру кільця?

18. Два довгих, тонких рівномірно заряджених (з $\tau=1$ мкКл/м) стержні розташовані перпендикулярно один одному так, що точка перетину їх осей знаходиться на відстані $a=10$ см і $b=15$ см від ближчих кінців стержнів. Знайти силу F , діючу на заряд $Q=10$ нКл, поставлений в точку перетину осей стержнів.

19. Тонке півкільце радіусом $R=20$ см має рівномірно розподілений заряд $Q_1=2$ мкКл. Визначити силу F , діючу на точковий заряд $Q_2=40$ нКл, розміщений в центрі кривизни півкільця.

20. Визначити напруженість E поля, створюваного тонким довгим стержнем, рівномірно зарядженим з лінійною густиною заряду $\tau=20$ мкКл/м в точці, яка знаходиться на відстані $a=2$ см від стержня, біля його середини.

21. Паралельно нескінченній площині, зарядженій з поверхневою густиною заряду $\rho=4$ мкКл/м², розміщена нескінченно довга пряма нитка, заряджена з лінійною густиною заряду $\tau=100$ нКл/м. Визначити силу F , діючу зі сторони площини на відрізок нитки довжиною $l=1$ м.

22. Дві однакові круглі пластини площею $S=400$ см² кожна розміщені паралельно одна одній. Заряд однієї пластини $Q_1=400$ нКл, другої $Q_2=-200$ нКл. Визначити силу F взаємного притягування пластин, якщо відстань між ними: а) $r_1=3$ мм; б) $r_2=10$ м.

23. На нескінченному тонкостінному циліндрі діаметром $d=20$ см рівномірно розподілений заряд з поверхневою густиною $\rho=4$ мкКл/м². Визначити напруженість поля в точці, що знаходиться від поверхні циліндра на відстані $a=15$ см.

24. З якою силою (на одиницю площі) взаємодіють дві нескінченні паралельні площини, заряджені з однаковою поверхневою густиною заряду $\rho=5$ мкКл/м²?

25. Дві довгі прямі паралельні нитки знаходяться на відстані $d=5$ см одна від одної. На нитках рівномірно розподілені заряди з лінійними густинами зарядів $\tau_1=-5$

нКл/см і $\tau_2=10$ нКл/см. Визначити напруженість E електричного поля в точці, віддаленій від першої нитки на відстань $r_1=3$ см і від другої на відстань $r_2=4$ см.

26. До нескінченної рівномірно зарядженої вертикальної площини підвішена на нитці однойменно заряджена куляка масою $m=50$ мг і зарядом $Q=0,6$ нКл. Сила натягу нитки, на якій висить куляка, $F=0,7$ мН. Знайти поверхневу густину заряду ρ на площині.

27. З якою силою (на одиницю довжини) взаємодіють дві нескінченно довгі паралельні нитки з однаковою лінійною густиною заряду $\tau=20$ мкКл/м, які знаходяться на відстані $r=10$ см одна від одної.

28. Поверхнева площа заряду ρ покладеної вертикально нескінченної площини рівна 400 мкКл/м². До площини на нитці підвішена заряджена куляка масою $m=10$ г. Визначити заряд Q кульки, якщо нитка утворює з площиною кут $\varphi=30^\circ$.

29. Визначити потенціальну енергію W системи двох точкових зарядів $Q_1=400$ нКл і $Q_2=20$ нКл, які знаходяться на відстані $r=5$ см одна від одної.

30. Дві паралельні заряджені площини, поверхневі густини зарядів яких $\rho_1=2$ мкКл/м² і $\rho_2=-0,8$ мкКл/м², знаходяться на відстані $d=0,6$ см одна від одної. Визначити різницю потенціалів U між площинами.

31. Поле утворене рівномірно зарядженою нескінченною площиною з поверхневою густиною заряду $\rho=40$ нКл/м². Визначити різницю потенціалів U двох точок поля, що знаходяться від площини на відстані $r_1=15$ см і $r_2=20$ см.

32. Чотири однакових краплі ртуті, заряджених до потенціалу $\varphi=10$ В, зливаються в одну. Який потенціал φ_1 краплі що утворилася?

33. Тонкий стержень рівномірно заряджений з лінійною густиною заряду $\tau=800$ нКл/м зігнутий у кільце радіусом $R=10$ см. Визначити потенціал φ в точці, розміщеній на осі кільця на відстані $h=10$ см від його центру.

34. Поле утворене точковим диполем з електричним моментом $p=200$ нКл·м. Визначити різницю потенціалів U двох точок поля, розміщених симетрично щодо диполя на його осі на відстані $r=40$ см від центру диполя.

35. Електричне поле утворене нескінченно довгою зарядженою ниткою,

лінійна густина заряду якої $\tau=20$ пКл/м. Визначити різницю потенціалів U двох точок поля, що знаходяться від нитки на відстані $r_1=8$ см і $r_2=12$ см.

36. Тонка квадратна рамка рівномірно заряджена з лінійною густиною заряду $\tau=200$ пКл/м. Визначити потенціал ϕ поля в точці перетину діагоналей.

37. Пилінка масою $m=200$ мкг, що несе на собі заряд $Q=40$ нКл, влетіла в електричне поле в напрямку силових ліній. Після проходження різниці потенціалів $U=200$ В пилінка мала швидкість $v_0=10$ м/с. Визначити швидкість пилінки до того, як вона влетіла в поле.

38. Електрон, що мав кінетичну енергію $T=10$ еВ, влетів в однорідне електричне поле в напрямку силових ліній поля. Яку швидкість матиме електрон, пройшовши в цьому полі різницю потенціалів $U=8$ В?

39. Знайти відношення швидкостей іонів Cu^{++} і K^+ , що пройшли однакову різницю потенціалів.

40. Електрон з енергією $T=400$ еВ (на нескінченності) рухається уздовж силових ліній по напрямку до поверхні металевої зарядженої сфери радіусом $R=10$ см. Визначити мінімальну відстань, на яку наблизиться електрон до поверхні сфери, якщо її заряд $Q = -10$ нКл.

41. Електрон, пройшовши в плоскому конденсаторі шлях від однієї пластини до іншої, набув швидкість $v=10^5$ м/с. Відстань між пластинами $d=8$ мм. Знайти: 1) різницю потенціалів U між пластинами; 2) поверхневу гуστину заряду σ на пластинах.

42. Пилінка масою $m=5$ нг, що несе на собі $N=10$ електронів, пройшла у вакуумі прискорюючи різницю потенціалів $U=1$ мВ. Яка кінетична енергія T пилінки? Яку швидкість v набула пилінка?

43. Іон атому літію Li^+ пройшов різницю потенціалів $U_1=400$ В, а іон атому натрію Na^+ пройшов різницю потенціалів $U_2=300$ В. Знайти відношення швидкостей цих іонів.

44. При бомбардуванні нерухомого ядра калію α -частинкою сила відштовхування між ними стала $F=100$ Н. На яку найменшу відстань наблизилась α -частинка до ядра атому калію? Яку швидкість v мала α - частинка вдалині від ядра?

Впливом електронної оболонки атому калію знехтувати.

45. В моделі атома Резерфорда-Бора електрони рухаються по колових орбітах довкола позитивно зарядженого ядра. Визначити швидкість v і прискорення a електрона в атомі водню, якщо радіус борівської орбіти $r_0 = 3$ пм.

46. Визначити прискорення, з яким буде рухатись електрон, що знаходиться в електричному полі іншого електрона на відстані $r = 1$ мм.

47. Порівняти силу кулонівської взаємодії двох електронів із силою їхньої гравітаційної взаємодії.

48. Безконечно довга пряма дротина заряджена. Лінійна густина заряду $\lambda = 0,1$ мКл/м. Знайти силу, яка діє на точковий заряд $q = 0,3$ мкКл, що знаходиться на відстані $r = 0,2$ м від дротини.

49. Дві порожнисті концентричні металеві кульки заряджені. Заряд меншої $q_1 = 2$ нКл, а заряд більшої становить $q_2 = 5$ нКл. Знайти напруженість електричного поля: а) всередині меншої кульки; б) в точці, що віддалена на $r_1 = 7$ см від спільного центру і знаходиться між кульками.

50. Дуже довга тонка пряма дротина несе заряд, рівномірно розподілений по всій її довжині. Обчислити лінійну густина заряду λ на дротині, якщо на відстані $l = 0,2$ м

51. Знайти потенціал електричного поля в центрі квадрата зі стороною $a=6$ см, яке створене системою точкових зарядів величиною $q=1$ пКл, розміщених у вершинах квадрата.

52. Знайти потенціал сферичної краплі ртуті, що утворилась від злиття п'яти однакових крапель ртуті, кожна з яких мала заряд $q = 1$ нКл і радіус $r = 1$ мм.

53. Лінійна густина зарядів на безконечній прямій дротині становить $\lambda = 2$ пКл. Знайти різницю потенціалів між точками, що знаходяться на відстані $r_1 = 15$ см і $r_2 = 30$ см від нитки.

54. Пилінка масою $m = 250$ мг, що несе заряд $q = - 4,5$ нКл влетіла в електричне поле в напрямку його силових ліній. Після проходження різниці потенціалів $U = 600$ В вона мала швидкість $v = 15$ м/с. Визначити швидкість пилінки до того моменту, як вона влетіла в електричне поле.

55. В однорідне електричне поле напруженістю $E = 1$ кВ/м влітає вздовж силової лінії електрон зі швидкістю $v_0 = 1$ Мм/с. Визначити відстань l , пройдену електроном до точки, в якій його швидкість буде дорівнювати половині початкової.

56. Електрон з початковою швидкістю $v_0 = 3$ Мм/с влетів у однорідне електричне поле напруженістю $E = 150$ В/м. Вектор початкової швидкості перпендикулярний до ліній напруженості електричного поля. Знайти прискорення електрона а також швидкість v , яку він буде мати через час $t = 0,2$ мкс

57. Електрон, що летів горизонтально зі швидкістю $v = 1,6$ Мм/с, влетів у однорідне електричне поле з напруженістю $E = 90$ В/м, направлене вертикально вгору. Якими будуть напрям і абсолютне значення швидкості електрона через час $t = 1$ нс?

58. Електрон влетів у простір між пластинами плоского конденсатора знаходячись на однаковій відстані від кожної пластини паралельно до пластин, маючи швидкість $v = 10$ Мм/с. Відстань між пластинами $d = 2$ см, довжина кожної пластини $l = 10$ см. Яку найменшу різницю потенціалів U слід прикласти до пластин, щоб електрон не вилетів з конденсатора?

59. Електрон влетів у простір між пластинами плоского конденсатора зі швидкістю $v = 10$ Мм/с, спрямовану паралельно пластинам. На скільки наблизиться електрон до позитивно зарядженої пластини за час руху всередині конденсатора (поле вважати однорідним), якщо відстань між пластинами $d = 16$ мм, довжина пластин $l = 6$ см, різниця потенціалів $U = 30$ В?

60. Електрон знаходиться в однорідному електричному полі напруженістю $E = 200$ кВ/м. Який шлях пройде електрон за час $t = 1$ нс, якщо його початкова швидкість дорівнювала нулю? Яку швидкість буде мати електрон в кінці цього проміжку часу?

61. Протон, початкова швидкість якого $v = 100$ км/с, влетів у однорідне електричне поле ($E = 300$ В/см) так, що вектор швидкості збігся з напрямком ліній напруженості. Який шлях повинен пройти протон у напрямку поля, щоб його швидкість подвоїлась?

62. Два точкових заряди величиною $q_1 = 2$ мкКл і $q_2 = 3$ мкКл знаходяться на

відстані $l=0,5$ м один від одного. Яка робота буде виконана електричними силами, якщо в результаті електричного відштовхування відстань між зарядами стане рівною $L = 5$ м?

63. Два заряди $q_1 = -1$ мкКл і $q_2 = -2$ мкКл знаходяться на відстані $l_0 = 20$ см. Визначити роботу з переміщення заряду $q_0 = 20$ нКл з точки, що знаходиться на відстані $l_1 = 10$ см від першого заряду і $l_2 = 30$ см від другого у безконечність по прямій, що з'єднує ці заряди.

64. В однорідне електричне поле напруженістю $E = 1$ кВ/м влітає вздовж силової лінії протон зі швидкістю $v = 10$ км/с. Визначити відстань l , яку пройшов протон в електричному полі, поки його швидкість зменшиться удвічі.

65. Заряджена частинка, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів $U = 600$ кВ, набула швидкості $v = 5,4$ Мм/с. Визначити питомий заряд частинки (відношення заряду до маси).

66. Якою повинна бути початкова швидкість електрона, який знаходиться на відстані $L = 5$ м від іншого електрона, щоб він наблизився до нього на відстань $l = 1$ мм по прямій, що з'єднує електрони?

67. Конденсатори ємністю $C_1 = 5$ мкФ і $C_2 = 10$ мкФ заряджені до напруг $U_1 = 70$ В та $U_2 = 110$ В відповідно. Визначити сумарну енергію електричного поля конденсаторів після того, як вони були з'єднані однойменними обкладками.

68. Два незаряджених конденсатори ємністю $C_1 = 3$ мкФ та $C_2 = 5$ мкФ з'єднані паралельно. Послідовно до них під'єднано третій конденсатор ємністю $C_3 = 4$ мкФ і після цього вся батарея конденсаторів була заряджена до напруги $U = 400$ В. Визначити електричний заряд, що накопичився на пластинах першого конденсатора.

69. Конденсатор ємністю $C_1 = 20$ мкФ заряджений до напруги $U = 200$ В. До нього приєднали паралельно незаряджений конденсатор ємністю $C_2 = 300$ мкФ. Яка напруга встановиться після їхнього з'єднання?

70. Два конденсатори ємністю $C_1 = 2$ мкФ і $C_2 = 3$ мкФ з'єднали послідовно і зарядили до різниці потенціалів $U = 1$ кВ. Як зміниться енергія системи, якщо її від'єднати від джерела напруги і однойменно заряджені обкладки конденсатора з'єднати паралельно?

71. Після зарядки до різниці потенціалів $U = 1,5$ кВ плоский повітряний конденсатор з відстанню між пластинами $d = 2,0$ см і площею пластин $S = 0,20$ м² кожна від'єднують від джерела струму і збільшують відстань між пластинами удвоє. Визначити роботу, що здійснюється проти сил поля для розсування пластин і густину енергії електричного поля конденсатора до і після розсування пластин.

72. Дві металевих кулі радіусами $R_1 = 2$ см і $R_2 = 6$ см з'єднали провідником, ємністю якого можна знехтувати. Кулям надали заряд $q = 1$ нКл. Знайти поверхневу густину зарядів на кулях.

73. Між пластинами плоского конденсатора знаходиться скляна пластинка, що щільно прилягає до пластин конденсатора. Конденсатор заряджений до різниці потенціалів $U_1 = 100$ В. Якою буде різниця потенціалів U_2 , якщо витягти скляну пластину з конденсатора?

74. Визначити густину струму j в залізному провіднику довжиною $l = 10$ м, якщо провідник знаходиться під напругою $U = 6$ В.

75. Відстань між пластинками плоского конденсатора $d = 2$ мм, різниця потенціалів між ними $U = 600$ В. Заряд кожної пластини $Q = 40$ нКл. Визначити енергію W поля конденсатора та силу F взаємного притягування пластин.

76. Два однакових плоских повітряних конденсатори ємністю $C = 100$ пФ кожний з'єднані в батарею послідовно. Визначити наскільки зміниться ємність C батареї, якщо простір між пластинками одного із конденсаторів заповнити парафіном.

77. Два конденсатори ємністю $C_1 = 5$ мкФ і $C_2 = 8$ мкФ з'єднані послідовно і приєднані до батареї з е.р.с. $E = 80$ В. Визначити заряди Q_1 і Q_2 конденсатора та різниці потенціалів U_1 і U_2 між їх обкладинками.

78. Плоский конденсатор складається з двох круглих пластин радіусом $R = 10$ см кожна. Відстань між пластинами $d = 2$ мм. Конденсатор приєднаний до джерела живлення $U = 80$ В. Визначити заряд Q та напруженість E поля конденсатора в двох випадках: а) діелектриком є повітря; б) діелектриком є скло.

79. Два однакових плоских повітряних конденсатори з'єднані послідовно в батарею, яка підключена до джерела струму з е.р.с. $E = 12$ В. Визначити, наскільки

зміниться напруга на одному з конденсаторів, якщо другий – занурити в трансформаторну олію.

80. Дві металеві кульки радіусами $R_1=5$ см і $R_2=10$ см мають заряди $Q_1=40$ нКл та $Q_2=-20$ нКл. Знайти енергію W яка виділиться при розрядці, якщо кульки з'єднати провідником.

81. Плоский конденсатор з площею пластин $S=200$ см² кожна, заряджена до різниці потенціалів $U=2$ кВ. Відстань між пластинками $d=2$ см. Діелектриком є скло. Визначити енергію W поля конденсатора та густину w енергії поля.

II. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

1. Струм, сила струму, густина струму

Електричним струмом називається впорядкований рух заряджених частинок у речовині чи у вакуумі (електричні струми в металах, електролітах, іонізованих газах, плазмі, напівпровідниках, пучки електронів чи інших заряджених частинок у вакуумі).

Якщо за час dt через поперечний переріз провідника пройде заряд dq , то за визначенням величина I є сила струму.

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2.1)$$

Густина струму за визначенням є

$$j = \frac{dI}{dS_n}, \quad (2.2)$$

де dI — струм через переріз провідника $dS_n = dS \cdot \cos\alpha$, перпендикулярний напрямкові струму. Для сталого в часі протікання заряду у провіднику сила струму становить

$$I = \frac{q}{t}, \quad (2.3)$$

де q — заряд, що пройшов через переріз провідника за час t . Такий струм називають постійним.

2. Класична модель розрахунку густини струму

Густина струму j лінійно залежить від концентрації носіїв струму n , величини заряду e та середньої швидкості направленої руху $\vec{V}_d$ і дорівнює

$$\vec{j} = ne \vec{V}_d. \quad (2.4)$$

3.Класична теорія електропровідності провідника.

3.1.Закон Ома у диференціальній формі

Коефіцієнт σ називається провідністю і він дорівнює

$$\sigma = \frac{q^2 n \lambda}{2 m V_{\tau}} = n \lambda u \quad (2.5)$$

Провідність σ чисельно дорівнює густині струму при одиничній напруженості поля у провіднику, а вираз (1.5) має назву диференціального закону Ома. Визначення провідності σ , є змістом класичної теорії електропровідності провідників.

3.2.Закон Ома в інтегральній формі

З диференціального закону Ома можна безпосередньо одержати інтегральний закон. Остаточно з маємо вираз для закону Ома в інтегральній формі який він установив експериментально.

$$IR = U, \quad (2.6)$$

4. Закон Джоуля-Ленца

4.1.Закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі

Вираз (6) визначає густину теплового потоку у провіднику і носить назву диференціального закону Джоуля-Ленца.

$$w = \sigma E^2 = jE = j^2 / \sigma \quad (2.7)$$

4.2.Закон Джоуля-Ленца в інтегральній формі

З диференціального закону можна одержати інтегральний закон Джоуля-Ленца для теплового потоку.

$$dQ = I^2 R dt. \quad (2.8)$$

Величина $P = dQ/dt = I^2 R$ називається тепловим потоком у провіднику і чисельно дорівнює потужності джерела струму, що виділяється у провіднику.

5. Температурна залежність опору провідника

Експеримент показує, що для високих температур питомий опір металів залежить від температури лінійно

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T). \quad (2.9)$$

У цьому виразі ρ_0 – питомий опір при $T_0 = 273,15$ К, $\Delta T = T - T_0$, α – температурний коефіцієнт опору.

Існує скінчений інтервал температури **перехідної області** ΔT_c від звичайного стану до стану надпровідності. Для чистих надпровідників $\Delta T_c \approx 10^{-3}$ К.

6. Сторонні сили, ЕРС

При сполученні тіл із різними потенціалами провідником у ньому за рахунок кулонівських сил $\vec{F}_k$ виникає спадний у часі струм, що приводить до **вирівнювання потенціалів** і подальшого **припинення струму у провіднику**. Одержана формула виражає закон Ома для неоднорідної ділянки кола, яка містить джерело сторонніх сил

$$RI = (\phi_1 - \phi_2) + \mathcal{E}_{1-2}. \quad (2.10)$$

7. Правила Кірхгофа

7.1. Перше правило Кірхгофа

Перше правило Кірхгофа: сума струмів, що приходять у вузол, дорівнює сумі струмів, що виходять із вузла. Якщо струмам, що виходять із вузла приписати

від'ємний знак, а струмам, що входять — додатний, то **перше правило Кірхгофа** можна записати у вигляді

$$\sum_k I_k = 0, \quad (2.11)$$

7.2. Друге правило Кірхгофа

В розгалужених колах виділяються окремі замкнені контури, вершинами яких є вузли. Друге правило Кірхгофа можна записати також у вигляді

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k. \quad (2.12)$$

8. Електропровідність рідин

Носіями струму в рідинах є іони. В умовах динамічної рівноваги дисоціації та молізації **електроліт характеризується коефіцієнтом дисоціації α , який дорівнює відношенню числа дисоційованих молекул до їх загального числа в розчині.** Тепер вираз для маси може бути записано у вигляді

$$m = \frac{MQ}{ZF} 10^{-3} = kQ \cdot 10^{-3} \text{ кг}, \quad k = \frac{k_x}{F}, \quad k_x = \frac{M}{Z}. \quad (2.13)$$

Коефіцієнт k називається електрохімічним еквівалентом іона, а коефіцієнт k_x називається хімічним еквівалентом іона.

9. Електропровідність газів

Для характеристики здатності частинок газу іонізуватися, вводиться поняття

потенціалу іонізації $\phi_i = \frac{A}{e}$, де e - заряд електрона.

Таблиця. Потенціали іонізації деяких речовин.

Атоми	H	He	O	N	Ne	Cl	Na	Hg	K	Ar
ϕ_i, eV	13.6	24.6	13.6	14.5	21.6	13.0	5.14	10.4	4.34	15.8
молекули	H ₂	O ₂	H ₂ O	N ₂	NO ₂	Cl ₂	CO ₂	CO	HCl	NO
ϕ_i, eV	15.4	12.2	12.6	15.6	12.3	11.3	13.8	14.0	12.6	9.2

Кількісною характеристикою процесу іонізації є інтенсивність іонізації, яка визначається числом новоутворених пар різнойменних зарядів за одиницю часу.

Таким чином ударна іонізація можлива при виконанні умови

$$mV^2/2 \geq A_i(1+m/M). \quad (2.14)$$

Одночасно з процесом іонізації відбувається зворотній процес – процес рекомбінації іонів та електронів – перетворення іонів у нейтральні атоми чи молекули.

10. Плазма

При високих температурах речовина переходить у стан, який називається плазмою. Плазма – іонізований газ, у якому об'ємні густини додатних ρ_+ та від'ємних ρ_- зарядів однакові за величиною, його об'єм значно більший характерного об'єму D^3 , у якому спостерігається порушення рівноваги числа додатних та від'ємних зарядів. Величина D називається Дебаєвським радіусом екранування і залежить від температури плазми $D \sim \sqrt{T}$.

Фізичним змістом Дебаєвського радіуса екранування є те, що на відстанях більших за D від іона чи електрона їх електростатичне поле екранується повністю.

Така плазма має властивості ідеального газу і добре описується рівнянням

$$p = nkT. \quad (2.15)$$

Відношення числа іонізованих атомів до їх загального числа у плазмі називається ступенем іонізації плазми.

11. Контактні та термоелектричні явища в металах

11. 1. Робота виходу.

При $T > 0K$, за рахунок теплової енергії $E = kT$, вільні електрони мають можливість відриватися від поверхні кристала.

Ця робота рівна

$$A = e\Delta\phi, \Delta\phi = \phi_+ - \phi_-, \quad (2.16)$$

де $\Delta\phi$ – поверхнева різниця потенціалів.

11. 2. Перший закон Вольта.

При сполученні двох провідників, виготовлених із різнорідних металів А та В, між їх вільними кінцями виникає контактна різниця потенціалів, величина якої залежить виключно від хімічної природи та температури провідників. Вольтом був установлений ряд металів, у якому кожен попередній метал при контакті з одним із наступних електризується позитивно. Ряд цей такий: Al, Zn, Cd, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag.

11. 3. Другий закон Вольта.

Різниця потенціалів між кінцями ланцюга, з'єднаних різнорідних провідників, що мають однакову температуру, не залежить від хімічного складу проміжних провідників, і дорівнює контактній різниці потенціалів, що виникає при безпосередньому з'єднанні крайніх провідників.

Розрахунки класичної теорії показують, що $\Delta\phi''$ визначається так

$$\Delta\phi'' = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (2.17)$$

де k – стала Больцмана, e – заряд електрона. По порядку величини для кімнатних температур $\Delta\phi'' \approx 0.03$ В.

11. 4. Термоелектрорушійна сила

У 1821 році Зеебек виявив, що у замкненому колі з двох різнорідних провідників, контакти яких знаходяться при різних температурах, виникає електрорушійна сила, яку назвали термоелектрорушійною – ТЕРС. Основними процесами, що створюють ТЕРС, є такі:

а) Дифузія електронів. В околиці контакту з більшою (меншою) температурою виникають електрони з енергіями більшими (меншими) ніж енергія

Фермі. Це створює градієнт концентрації і потік гарячих електронів у напрямку холодного контакту.

б) Зміна рівнів Фермі в залежності від температури. Внутрішня контактна різниця потенціалів, що визначається рівнями Фермі й температурою, різна у гарячого й холодного контактів і їх різниця дає відповідний вклад у ТЕРС.

в) Утягування електронів потоком фононів.

Розрахунки показують, що величина термоелектрорушійної сили $\mathcal{E}_{TEPC}$ у замкненому колі визначається різницями потенціалів на контактах 1 та 2. Ця підстановка дає такі результати

$$\mathcal{E}_{TEPC} = \alpha \Delta T, \quad (2.18)$$

де

$$\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad \Delta T = T_2 - T_1. \quad (2.19)$$

Величина α називається коефіцієнтом термоелектрорушійної сили, характерної для кожної з пар металів.

11. 5. Електронна емісія

Випускання електронів твердими тілами чи рідинами називається електронною емісією, а самі тіла — емітерами.

Розрізняють:

- термоелектронну емісію (нагрівання тіл);
- вторинну електронну емісію (бомбардування поверхні електронами);
- іонно-електронну емісію (бомбардування поверхні іонами);
- фотоелектронну емісію (електромагнітне опромінення);
- автоелектронну емісію (зовнішнє електричне поле) та ін.

Приклади розв'язування задач

Задача 1 Визначити питомий опір провідника довжиною $l = 2$ м, якщо при густині струму $j = 106$ А/м² на його кінцях підтримується різниця потенціалів $U = 2$ В.

Дано:

$$l = 2 \text{ м,}$$

$$j = 106 \text{ А/м}^2$$

$$U = 2 \text{ В}$$

$$\rho - ?$$

Розв'язання

За означенням густина струму

$$j = S/I, \quad (1)$$

де I – сила струму, S – площа поперечного перерізу

провідника.

За законом Ома

$$U = I \cdot R \quad (2)$$

де U – напруга на кінцях провідника, I – струм, R – опір провідника, який знайдемо за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3)$$

де ρ – питомий опір провідника, l – довжина провідника, S – площа поперечного перерізу провідника.

Підставивши у формулу (1) вирази для I та R з формул (2) та (3), одержимо:

$$j = \frac{U}{\rho l}, \quad (4)$$

звідки знайдемо питомий опір провідника:

$$U = \rho \cdot j \cdot l \quad (5)$$

Підставивши дані, одержимо $\rho = 10^{-6}$ Ом · м.

Задача 2. Сила струму в провіднику опором $R = 20$ Ом наростає протягом часу $\Delta t = 2$ с за лінійним законом від $I_0 = 0$ до $I = 6$ А. Визначити кількість теплоти, яка виділилась в цьому провіднику за першу секунду і за другу секунду.

Розв'язання

Закон Джоуля-Ленца у вигляді $Q = I^2 R t$ справедливий для постійного струму. Якщо ж сила струму в провіднику змінюється, то вказаний закон справедливий для нескінченно малого інтервалу часу і

$R = 20 \text{ Ом}$
 $\Delta t = 2 \text{ с}$
 $I_0 = 0$
 $I = 6 \text{ А.}$
 $Q - ?$

$$dQ = I^2 R dt.$$

В даній задачі сила струму є функцією часу $I = kt$, де k – коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни сили струму:

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{6 \text{ А}}{2 \text{ с}} = 3 \frac{\text{А}}{\text{с}}.$$

Тоді

$$dQ = k^2 R t^2 dt.$$

Проінтегруємо цей вираз в межах від t_1 до t_2 .

$$Q = k^2 R \int_{t_1}^{t_2} t^2 dt = \frac{1}{3} k^2 R (t_2^3 - t_1^3).$$

Проведемо обчислення:

$$Q_1 = \frac{1}{3} \cdot 3^2 \cdot 20 (1 - 0) = 60 \text{ (Дж)},$$

$$Q_2 = \frac{1}{3} \cdot 3^2 \cdot 20 (8 - 1) = 420 \text{ (Дж)}.$$

Задача 3. На балоні електролампи написано 300 Вт, 110 В. Який додатковий опір потрібно приєднати до цієї лампи, щоб при напрузі $U_1 = 127 \text{ В}$ вона працювала у нормальному режимі?

Розв'язання

Дано:

$$U = 110 \text{ В}$$

$$P = 300 \text{ Вт}$$

$$U_1 = 127 \text{ В}$$

Рд–?

Лампа розрахована на потужність $P = 300 \text{ Вт}$ і напругу $U = 110 \text{ В.}$

Струм через лампу: $I = \frac{P}{U} \quad (1)$

Опір лампи: $R = \frac{U}{I} \quad (2)$

При напрузі $U_1 = 127$ В для нормальної роботи лампи через неї повинен проходити такий же струм I . Щоб його одержати, до джерела напруги послідовно з лампою повинен бути ввімкнений додатковий опір, на якому спадатиме надлишок напруги. Величина сумарного опору ділянки кола з урахуванням (1) буде

$$R_{\text{сум}} = \frac{U_1}{I} = \frac{U_1 U}{P}$$

Знаючи опір лампи (2), визначимо величину додаткового опору:

$$R_{\text{дод}} = R_{\text{сум}} - R = \frac{U_1 U}{P} - \frac{U}{I}$$

Величина додаткового опору $R_{\text{дод}} = 10,4 \text{ Ом}$.

Питання для самоконтролю

1. Густина енергії електростатичного поля.
2. Поляризація молекул, вектор поляризованості середовища.
3. Електростатичне поле у діелектрику.
4. Густина енергії поля в діелектрику.
5. Діелектрична проникливість. Індукція електростатичного поля.
6. Теорема Остроградського-Гауса для D .
7. Струм, сила струму, густина струму.
8. Умови існування струму. Визначити, що $j = e n v$.
9. Класична теорія електропровідності σ .
10. Закон Ома в інтегральній та диференціальній формах.
11. Сторонні сили. E R S гальванічного елемента.
12. Напруга. Закон Ома для неоднорідної ділянки.
13. Закон Джоуля-Ленца у інтегральній та диференціальній формах.
14. Правила Кірхгофа.
15. Електропровідність рідин та газів.
16. Поняття про плазму.
17. Робота виходу.
18. Контактна різниця потенціалів, правила Вольта.
19. Термоелектрорушійна сила.
20. Термоелектронна емісія.

Завдання для самостійного опрацювання

1. Котушка і амперметр з'єднані послідовно і підключені до джерела живлення. До клем котушки приєднані вольтметр з опором $r=4$ кОм. Амперметр показує силу струму $I=0,3$ А, вольтметр – напругу $U=120$ В. Визначити опір R котушки. Визначити відносну похибку ε , отриману при вимірюванні опору, якщо знехтувати силою струму, що тече через вольтметр.

2. Е.р.с. батареї $E=24$ В. Внутрішній опір $R_1=5$ Ом. Зовнішнє коло потребує потужності $P=100$ Вт. Визначити силу струму I в колі, напругу U , під якою знаходиться зовнішнє коло, та його опір R .

3. Від батареї, е.р.с. якої $E=600$ В, потрібно передати енергію на відстань $l=1$ км. Споживана потужність $P=5$ кВт. Знайти мінімальні втрати потужності в колі, якщо діаметр мідних провідників складає $d=0,5$ см.

4. Визначити число електронів, що проходять за час $t=1$ с через поперечний переріз з площею $S=1$ мм² залізного провідника довжиною $l=20$ м при напрузі на його кінцях $U=16$ В.

5. Е.р.с. батареї $E=24$ В. Найбільша сила струму, яку може дати батарея, $I_{\max}=10$ А. Визначити максимальну потужність $P_{\max}$, яка може виділятися в зовнішньому колі.

6. При зовнішньому опорі $R_1=8$ Ом сила струму в колі $I_1=0,8$ А, при опорі $R_2=15$ Ом сила струму $I_2=0,5$ А. Визначити силу струму $I_{\text{к. з.}}$ короткого замикання джерела е.р.с.

7. В коло з напругою $U=100$ В підключили котушку з опором $R_1=2$ кОм і вольтметр, з'єднані послідовно. Покази вольтметра $U_1=80$ В. Коли котушку замінили іншою, вольтметр показав $U_2=60$ В. Визначити опір R_2 другої котушки.

8. За час $t=20$ с при рівномірно зростаючій силі струму від нуля до деякого максимуму в провіднику з опором $R=5$ Ом виділилося кількість теплоти $Q=4$ кДж. Визначити швидкість наростання сили струму, якщо опір провідника $R=5$ Ом.

9. Сила струму в провіднику опором $R=10$ Ом за час $t=50$ с рівномірно зростає від $I_1=5$ А до $I_2=10$ А. Визначити кількість теплоти Q , що виділилася за цей час у провіднику.

10. У провіднику за час $t=10$ с при рівномірному зростанні сили струму від $I_1=1$ А до $I_2=2$ А виділилася кількість теплоти $Q=5$ кДж. Знайти опір R провідника.

11. За час $t=10$ с при рівномірно зростаючій силі струму від нуля до деякого максимуму в провіднику виділилася кількість теплоти $Q=40$ кДж. Визначити середню силу струму $\langle I \rangle$ в провіднику, якщо його опір $R=25$ Ом.

12. За $t=8$ с при рівномірно зростаючій силі струму в провіднику опором $R=8$ Ом виділилась кількість теплоти $Q=500$ Дж. Визначити заряд q , який проходить по провіднику, якщо сила струму в момент часу $t=0$ дорівнює нулю.

13. Визначити кількість теплоти Q , що виділилася за час $t=10$ с в провіднику опором $R=10$ Ом, якщо сила струму в ньому рівномірно зменшувалась, змінюючись від $I_1=10$ А до $I_2=0$.

14. Резистор опором $R=6$ Ом підключений до двох паралельно з'єднаних джерел струму з е.р.с. $E_1=2.2$ В і $E_2=2,4$ В і внутрішніми опорами $R_1=0,8$ Ом і $R_2=0.2$ Ом. Визначити силу струму I в цьому резисторі та напругу U на затискачах другого джерела струму.

15. Вольфрамова нитка електролампи має довжину $l = 18$ см і опір $R=190$ Ом при температурі $t=2400^\circ\text{C}$. Чому дорівнює діаметр нитки?

16. Зашунтований амперметр вимірює струми силою до $I = 10$ А. Яку найбільшу силу струму може вимірювати цей амперметр без шунта, якщо опір амперметра $R_A = 0,02$ Ом, а опір шунта $R_{\text{ш}} = 5$ мОм?

17. Котушка і амперметр з'єднані послідовно і приєднані до джерела струму. До затискачів котушки приєднаний вольтметр опором $R_B = 1$ кОм. Покази амперметра $I = 0,5$ А, вольтметра $U = 100$ В. Визначити опір R котушки. Скільки відсотків від точного значення опору котушки становитиме похибка, якщо не враховувати опору вольтметра?

18. За якого значення опору зовнішнього кола потужність, яку віддає джерело струму в зовнішнє коло, максимальна і які при цьому сила струму і потужність?

19. Три провідники опором $R_1 = 3$ Ом, $R_2 = 4$ Ом та $R_3 = 5$ Ом з'єднані паралельно. На першому провіднику за певний час виділяється $Q_1 = 20$ кДж теплоти. Визначити кількість теплоти, що виділяється на третьому провіднику.

20. Обмотка електричного кип'ятильника має дві секції. Якщо ввімкнена тільки перша секція, то вода закипає через $t_1 = 15$ хв., якщо тільки друга, то через $t_2 = 30$ хв. Через скільки хвилин закипить вода, якщо обидві секції ввімкнути послідовно?

21. При зовнішньому опорі $R_1 = 3$ Ом сила струму в колі дорівнює $I_1 = 0,8$ А, а при опорі $R_2 = 14$ Ом – сила струму дорівнює $I_2 = 0,2$ А. Визначити величину максимальної потужності, що може виділитись у зовнішньому колі даного джерела струму.

22. Підйомний кран піднімає вгору з постійною швидкістю вантаж масою $m = 0,6$ т за час $t = 40$ с на висоту $h = 16$ м. Двигун працює під напругою $U = 220$ В. Знайти струм, що споживає двигун, якщо його к.к.д. дорівнює 80%.

23. Джерело струму при короткому замиканні дає силу струму $I_k = 2,6$ А. Якщо джерело замкнути на опір $R = 2,9$ Ом, то потужність струму у зовнішньому колі дорівнює $I = 1,6$ Вт. Знайти внутрішній опір джерела струму.

24. Об'єм газу, закритого між електродами іонізаційної камери, $V = 0,8$ л. Газ іонізується рентгенівським випромінюванням. Сила струму насичення $I_{\text{нас}} = 6$ нА. Скільки пар іонів виникне за час $t = 1$ с в об'ємі $V_1 = 1$ см³ газу? Заряд кожного іона рівний елементарному заряду.

25. На відстані $d = 1$ см одна від одної розміщені дві пластини площею $S = 400$ см² кожна. Водень між пластинами іонізують рентгенівським випромінюванням. При напрузі $U = 100$ В між пластинами іде далекий від насичення струм силою $I = 2$ мкА. Визначити концентрацію n іонів одного знака між пластинами. Заряд кожного іона вважати рівним елементарному заряду.

26. Знайти опір трубки довжиною $0,5$ м і площею поперечного перерізу $S = 5$ мм², якщо вона наповнена азотом, іонізованим так, що в об'ємі $V = 1$ см³ його знаходиться при рівновазі $n = 10^8$ пар іонів. Іони одновалентні.

27. До електродів розрядної трубки, що містить водень, прикладена різниця потенціалів $U = 10$ В. Відстань d між електродами рівна 25 см. Іонізатор створює в об'ємі $V = 1$ см³ водню $n = 10^7$ пар іонів в секунду. Знайти густину струму j в трубці. Визначити також, яка частина сили струму створюється рухом позитивних іонів.

28. Азот між плоскими електродами іонізаційної камери іонізується рентгенівським випромінюванням. Сила струму, поточного через камеру, $I=1,5$ мкА. Площа кожного електрода $S=200$ см², відстань між ними $d=1,5$ см, різниця потенціалів $U=150$ В. Визначити концентрацію n іонів між пластинами, якщо струм далекий від насичення. Заряд кожного іона дорівнює елементарному заряду.

29. Газ, розміщений в іонізаційній камері між плоскими пластинами, опромінюється рентгенівським випромінюванням. Визначити густину струму насичення $j_{\text{нас}}$, якщо іонізатор утворить в об'ємі $V=1$ см³ газу $n=5 \cdot 10^6$ пар іонів в секунду. Прийняти, що кожний іон несе на собі елементарний заряд. Відстань між пластинами камери $d=2$ см.

30. Маленька куля із зарядом $q = +100$ од. СГСЕ перебуває на відстані $r=5$ см від нескінченної заземленої металевої пластини. Визначити: Розподіл наведеного заряду на пластині. Силу, з якої кулька притягається до пластини. Загальний заряд, наведений на пластині.

31. Відстань d між двома точковими зарядами $q_1= 1$ мкК й $q_2= -1$ мкК дорівнює 10 см. Визначити силу, що діє на точковий заряд $q=0,1$ мкК, вилучений на $r_1= 6$ см від першого й $r_2= 8$ см від другого зарядів.

32. Три однакових заряди $q= 10^{-9}$ Кл кожний розташовані по вершинах рівностороннього трикутника. Який негативний заряд q_1 потрібно помістити в центрі трикутника, щоб його притягування урівноважило сили взаємного відштовхування зарядів? Чи буде ця рівновага стійким.

33. Тонке півкільце радіусом $R=10$ см несе рівномірно розподілений заряд $q_1= 0,2$ мкК. У центрі кривизни півкільця перебуває точковий заряд $q_2= 10$ нК. Знайти силу взаємодії точкового заряду й зарядженого півкільця.

34. Який заряд пройде по провіднику опором $R = 1,0$ кОм при рівномірному наростанні напруги на його кінцях від $U_1=15$ В до $U_2= 25$ В протягом $t=20$ с?

35. Опір кожного ребра дротового куба дорівнює r . Чому дорівнює опір R куба, якщо він включений у ланцюг своїми вершинами, що лежать на діагоналі?

36. Визначити Е.Р.С. і внутрішній опір гальванічного елемента, якщо при його замиканні на опір $R_1= 1,8$ Ом дає струм $J_1= 0,7$ А, а при замиканні на опір $R_2= 2,3$ Ом

струм $J_2 = 0,56\text{А}$. Чому буде дорівнювати струм J_0 короткого замикання?

37. Узято n джерел з рівними Е.Р.С. E_i і внутрішнім опором r_i , які послідовно з'єднані з опором R . Визначити силу струму в ланцюзі.

38. Визначити щільність струму в залізному проведенні довжиною 10 м, якщо проведення перебуває під напругою 6 В.

39. Котушка й амперметр з'єднані послідовно й приєднані до джерела струму. До затискачів котушки приєднаний вольтметр із опором 1000 Ом. Показання амперметра 0,5А, вольтметра – 100 В. Визначити опір котушки. Скільки відсотків від точного значення опору котушки складе помилка, якщо не враховувати опір вольтметра?

40. До затискачів батареї акумуляторів приєднаний нагрівач. Е.Р.С. батареї 24 В, внутрішній опір 1 Ом. Нагрівач, включений у ланцюг, споживає потужність 80 Вт. Визначити струм у ланцюзі й к.к.д. нагрівача.

41. Джерело струму з Е.Р.С. E з внутрішнім опором r замкнута на змінний опір R . Визначити, як залежить потужність, виділена джерелом, і потужність, що віддається в зовнішній ланцюг, від величини опору навантаження.

42. Зі шматка дроту опором $R = 10$ Ом зроблене кільце. Де варто приєднати проводи, щоб опір кільця рівнявся $r = 1$ Ом?

43. Батарея акумуляторів з Е.Р.С. $E = 6$ В замкнута на два послідовно з'єднаних реостати кожен опором $r = 5000$ Ом. Що покаже вольтметр, приєднаний до клем одного реостата, якщо опір вольтметра: 1) $R_{V1} = 100000$ Ом; 2) $R_{V2} = 10000$ Ом? Внутрішній опір батареї малий.

44. Е.Р.С. батареї $E = 12$ В. Найбільша сила струму, що може дати батарея, $J_{\max} = 6\text{А}$. Визначити максимальну потужність $P_{\max}$, що може виділятися в зовнішньому ланцюзі.

45. Визначити падіння напруги в опорах R_1 й R_2 (рис. 2.1), якщо амперметр показує 3А; $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 2$ Ом й $R_3 = 4$ Ом. Знайти J_2 й J_3 - силу струму в опорах R_2 й R_3 .

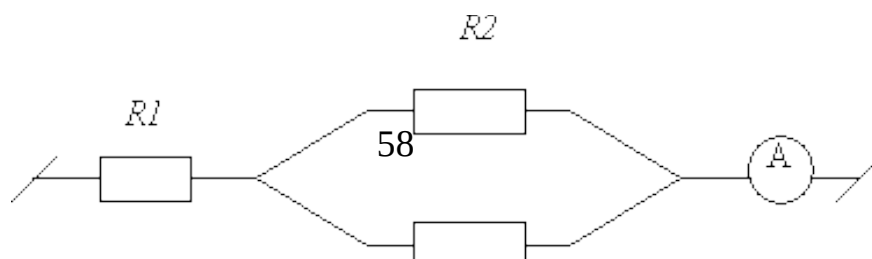


Рис. 2.1

46. Скільки електронів проходить за 1 с через нитку електричної лампочки в 40 Вт при напрузі в мережі 125 В?

47. Дві електричні лампочки включені в мережу паралельно. Опір першої лампочки 360 Ом, другої - 240 Ом. Яка з лампочок споживає більшу потужність? У скільки разів?

48. Для вимірювання напруги мережі у 120 В послідовно з'єднали два вольтметри з номінальними напругами 100 В й опорами 20000 Ом та 15000 Ом. Визначити показання кожного вольтметра й найбільша напруга, яку можна виміряти вольтметрами.

49. Дві лампочки 25 Вт та 100Вт з'єднані послідовно й включені в мережу. У якій з них виділяється більше тепла?

50. Визначити заряд на конденсаторі, якщо $R_1=R_2=R_3=R_4=20$ Ом, $r = 10$ Ом, $C=10$ мкф, $E =500$ В (рис. 2.2).

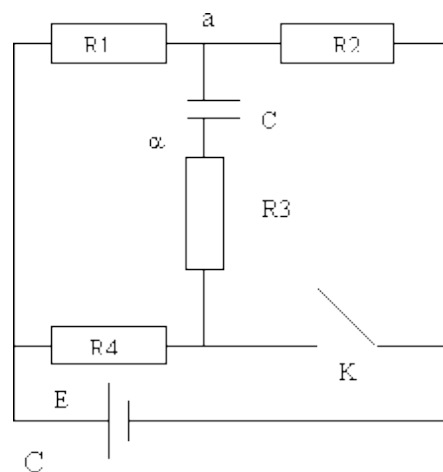


Рис. 2.2

51. Металевий суцільний циліндр обертається навколо своєї осі, роблячи 20

об/с. Визначити напруженість електричного поля, що виникає в його середині, як функцію відстані до осі й різницю потенціалів між віссю й периферією циліндра. Діаметр циліндра $D = 5$ см.

52. Батарея складається з $n = 8$ елементів, з'єднаних послідовно, е.р.с. кожного елемента $E_0 = 1,5$ В, внутрішній опір $r_0 = 0,25$ Ом. Зовнішній ланцюг представляє з'єднані паралельно два провідники опорами $R_1 = 10$ й $R_2 = 50$ Ом. Визначити напругу на затискачах батареї.

53. Яка різниця потенціалів виходить на затискачах двох елементів, включених паралельно, якщо їх е.р.с. рівні відповідно $E_1 = 1,4$ В, $E_2 = 1,2$ В і внутрішній опір $r_1 = 0,6$ Ом й $r_2 = 0,4$ Ом.

54. Е.р.с. батареї $E = 60$ В, внутрішній опір $r_1 = 4$ Ом. Зовнішній ланцюг споживає потужність $P = 125$ Вт. Визначити силу струму J в ланцюгу, напругу U , під яким перебуває зовнішній ланцюг, і її опір R . Визначити, який заряд пройде через опір R_1 (рис. 2.2) після розмикання ключа.

55. Наприкінці зарядки батареї акумуляторів струмом $J_2 = 3$ А, приєднаний до неї вольтметр показував напругу $U_2 = 4,25$ В. На початку розрядки тієї ж батареї струмом $J_1 = 4$ А вольтметр показував напругу $U_1 = 3,9$ В. Струм, що проходить по вольтметрі, дуже малий. Визначити е.р.с. і внутрішній опір батареї.

56. Є п'ять електричних лампочок на 110 В з потужністю 40, 40, 40, 60 й 60 Вт. Як варто включити їх у мережу з напругою 220 В, щоб всі вони світилися з нормальним розжаренням?

57. Два елементи з е.р.с. рівною $E_1 = 0,96$ В и $E_2 = 1,4$ В, із внутрішніми опорами $r_1 = 0,650$ Ом й $r_2 = 0,50$ Ом з'єднані однойменними полюсами. Який струм проходить по них?

58. Елемент замикається дротом у першому випадку з опором $R = 4$ Ом, у другому $R_2 = 9$ Ом. В обох випадках кількість тепла Q , що виділяється в провіднику за той же час, однакова. Який внутрішній опір елемента?

59. Два чайники, кожний з яких споживає при напрузі 220 В потужність 460 Вт, закипає при послідовному й при паралельному включенні за однаковий час. Чому дорівнює опір підводящих проводів?

60. Дві батареї з $E_1 = 10$ В та $E_2 = 8$ В, внутрішні опори яких $r_1 = 1$ Ом, $r_2 = 2$ Ом реостат $R = 6$ Ом з'єднані як показано на рис. 2.3. Визначити силу струму через батарею. Визначити показання амперметра за схемою (рис. 2.4), якщо $E_1 = 110$ В и $E_2 = 220$ В, $R_1 = R_2 = 100$ Ом, $R_3 = 500$ Ом. Внутрішнім опором генераторів й амперметра знехтувати. На рис. 2.5 $E_1 = 2$ В, $R_3 = 8$ Ом, $E_2 = 4$ В, $E_3 = 6$ В, $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 6$ Ом. Знайти силу струму через опори R_2 й R_3 .

61. Яку силу струму показує гальванометр G (рис. 2.6), якщо $E_1 = 1$ В і $E_2 = 2$ В, $R_2 = 1500$ Ом, $R = 500$ Ом, а напруга на опорі R_2 рівна 1 В. Опором генераторів знехтувати.

62. При заданому напрямку струмів (рис. 2.5) і $E_1 = 1$ В, $E_2 = 2$ В, $E_3 = 3$ В, $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 200$ Ом, $R_3 = 300$ Ом визначити струм через опір R_1 .

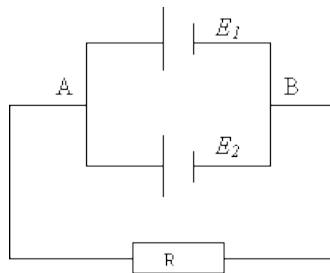


Рис. 2.3

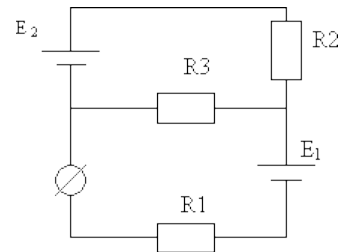


Рис. 2.4

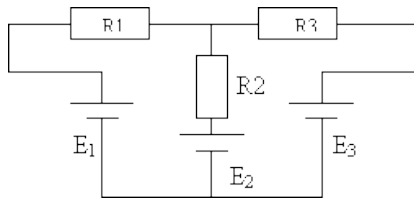


Рис. 2.5

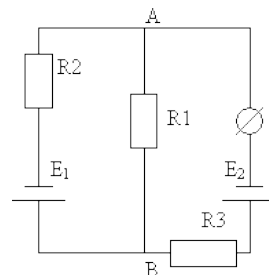


Рис. 2.6

63. Два елементи з $E_1 = 2,1$ В, $E_2 = 1,9$ В с три опори $R = R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 45$ Ом з'єднані за схемою (рис. 2.7). Опором елементів знехтувати. Визначити струм через опір R_1 .

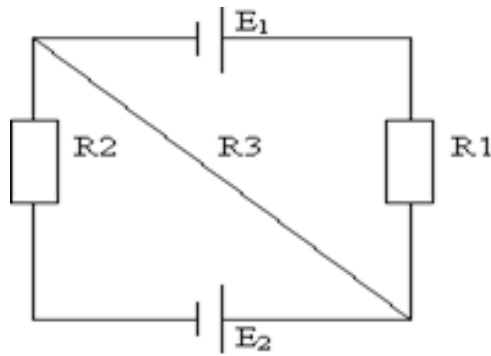


Рис. 2.7

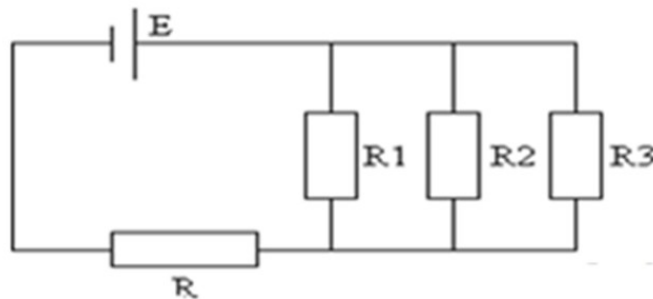


Рис. 2.8

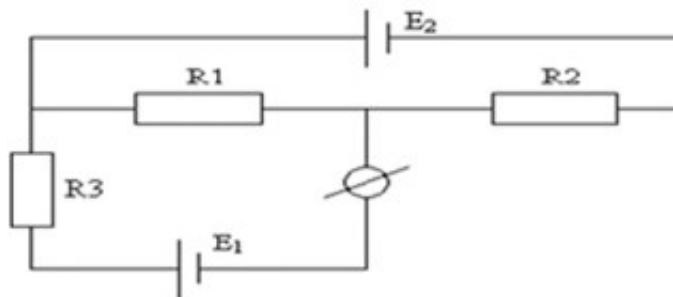


Рис. 2.9

64. Задано генератор з е.р.с. рівної 100 В и $R_1 = R_3 = 40 \text{ Ом}$, $R_2 = 80 \text{ Ом}$ й $R_4 = 34 \text{ Ом}$ у схемі на рис. 2.8. Визначити силу струму через опір R_4 . Внутрішнім опором генератора знехтувати.

65. Визначити струм через опір R_2 за схемою (рис. 2.5), якщо $E_1 = 1 \text{ В}$, $E_2 = 2 \text{ В}$, $E_3 = 3 \text{ В}$, $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 200 \text{ Ом}$, $R_3 = 300 \text{ Ом}$. Внутрішніми опорами джерел струмів знехтувати.

66. Яку силу струму показує гальванометр (рис. 2.9), якщо $E_1 = 1 \text{ В}$, $E_2 = 2 \text{ В}$,

$R_3=1500\text{ Ом}$, $R_1=500\text{ Ом}$, а спадання напруги на опорі R_2 дорівнює 1 В . Опором генератора знехтувати.

67. Визначити заряд, що пройшов по провіднику з опором $r=3\text{ Ом}$ при рівномірному наростанні напруги на його кінцях від $U_1=2\text{ В}$ до $U_2=4\text{ В}$ протягом часу $t=20\text{ сек}$.

68. Два позитивних точкових заряди q й $4q$ закріплені на відстані $l=60\text{ см}$ один від одного. Визначити, у якій точці на прямій, що проходить через заряди, варто помістити третій заряд так, щоб він перебував у рівновазі. Указати, який знак повинен мати цей заряд для того, щоб рівновага була стійкою, якщо переміщення заряду можливі тільки уздовж прямої, що проходить через закріплені заряди.

69. Два конденсатори ємністю $C_1=2\text{ мкф}$ й $C_2=3\text{ мкф}$ з'єднані послідовно й приєднані до батареї з е.р.с. $\mathcal{E}=30\text{ В}$. Визначити заряд кожного конденсатора й різниця потенціалів між його обкладинками.

III. МАГНЕТИЗМ

1. Магнітне силове поле

1.2. Магнітний момент плоского контуру із струмом.

Характеристикою контуру із струмом є магнітний момент $\vec{P}$, що визначається так

$$\vec{P} = \vec{n} SI, \quad (3.1)$$

де вектор $\vec{n}$ – одиничний **додатній вектор нормалі** до поверхні контуру S , із вершини якого напрямок струму в контурі буде проти годинникової стрілки.

1.3. Індукція магнітного поля.

Силовую характеристикою поля є вектор індукції магнітного поля $\vec{B}$, який визначається з виразу

$$\vec{M} = [\vec{P} \vec{B}]. \quad (3.2)$$

Орієнтуючи контур у просторі, можна знайти максимальне значення величини моменту сили $M_{\max} = PB \cdot \sin \pi/2 = PB$ і тим самим визначити величину вектора $\vec{B}$ так

$$B = M_{\max}/P. \quad (3.3)$$

Одиницею вимірювання індукції є тесла

$$[B] = \frac{H}{A \cdot m} = Tл.$$

1.4. Силові лінії магнітного поля.

Графічно магнітне поле зображується за допомогою силових ліній. Замкненість силових ліній відображає той факт, що в природі не існують магнітні "заряди" (монополі Дірака), як джерел магнітного поля.

1.5 Закон Біо - Савара - Лапласа.

Біо та Савар експериментально дослідили вектор індукції магнітного поля $d\vec{B}$, створеного елементом електричного струму $d\vec{l}$, а Лаплас узагальнив ці дослідження, зв'язавши відповідні величини у витончену векторну формулу

$$d\vec{B} = k \frac{I \cdot [d\vec{l} \cdot \vec{r}]}{r^3}, \quad (3.4)$$

де

$$k = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м} \cdot \text{рад}}, \quad (3.5)$$

а

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad (3.6)$$

є магнітна стала, $\vec{r}$ – радіус-вектор положення точки спостереження відносно елемента струму $d\vec{l}$, I – сила струму в провіднику. Напрямок $d\vec{l}$ задається напрямком струму. Величина вектора $d\vec{B}$ дорівнює

$$|d\vec{B}| = k \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2}. \quad (3.7)$$

Із закону Біо-Савара-Лапласа випливає принцип суперпозиції, який визначає, що магнітне поле, створене декількома струмами, має індукцію $\vec{B}$, яка визначається векторною сумою N індукцій $\vec{B}_i$, створених кожним струмом I_i окремо

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{i=N} \vec{B}_i. \quad (3.8)$$

У магнітних середовищах, у порівнянні з вакуумом, величина індукції магнітного поля $\vec{B}$ збільшується в μ разів і становить

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0. \quad (3.9)$$

Коефіцієнт μ називається магнітною проникливістю середовища.

Індукція $\vec{B}$ є силовою характеристикою магнітного поля, але для зручності розрахунків інших характеристик поля введено поряд з індукцією $\vec{B}$ ще й напруженість поля $\vec{H}$, яка для діамagnetиків та парамагнетиків визначається так

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0}. \quad (3.10)$$

1.6. Магнітне поле заряду, що рухається.

За законом Біо - Савара - Лапласа dN електронів створюють індукцію $d\vec{B}$ магнітного поля, а тому індукція $\vec{B}_0$ поля, створеного одним зарядом, може бути обчислена так

$$\vec{B}_0 = \frac{d\vec{B}}{dN}, \quad \vec{B}_0 = kq \frac{[\vec{V} \cdot \vec{r}]}{r^3}. \quad (3.11)$$

1.7. Магнітне поле деяких провідників із струмами

1.7.1. Магнітне поле прямого провідника із струмом.

У випадку нескінченно довгого прямолінійного провідника ($b \ll$ довжини провідника L) кути $\alpha_1, \alpha_2 \rightarrow 0$ і тоді

$$B_\infty = k \frac{2I}{b}. \quad (3.12)$$

1.7.2. Магнітне поле колового струму.

Нехай по провіднику у вигляді кола радіуса R тече струм I . Якщо точка A співпадає з центром кола, то $r=R$ і в центрі колового струму буде

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R}. \quad (3.13)$$

1.7.3. Магнітне поле соленоїда

Соленоїд являє собою циліндр радіуса R довжиною L . Для нескінченно довгого соленоїда ($R \ll L$) α_1 та $\alpha_2 \rightarrow 0$ і тоді

$$B_{\infty} = \mu_0 nI . \quad (3.14)$$

1.8. Циркуляція індукції магнітного поля

З одержаного виразу знайдемо величину індукції поля тороїда де n -густина витків тороїда.

$$B = \mu_0 \frac{N}{C} I = \mu_0 nI , \quad (3.15)$$

Нескінченно великий соленоїд можна уявити як тороїд, а величини їх індукції будуть співпадати.

2. Закон Ампера, сила Лоренця

Проводячи цілий ряд дослідів, Ампер установив, що на елемент $d\vec{l}$ провідника із струмом I в магнітному полі з індукцією $\vec{B}$ діє сила

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l} \times \vec{B}] . \quad (3.16)$$

Сила $\vec{F}_{\text{лм}}$ називається магнітною складовою сили Лоренця - сили, що діє на заряджену частинку в електромагнітному полі

$$\vec{F}_\text{л} = \vec{F}_{\text{ле}} + \vec{F}_{\text{лм}} , \quad (3.17)$$

де $\vec{F}_{\text{ле}} = q\vec{E}$ – електрична складова сили Лоренця, $\vec{E}$ – напруженість електричного поля.

Сила $\vec{F}_{\text{лм}}$ перпендикулярна векторам $\vec{V}$ і $\vec{B}$, тому є доцентровою силою, яка викликає рух заряду по колу з радіусом R .

$$R = \frac{mV}{qB} . \quad (3.18)$$

Період обертання для рівномірного руху заряду в однорідному магнітному полі зі сталою індукцією $\vec{B}$ можна знайти, розділивши довжину кола $C = 2\pi R$ на швидкість обертання V

$$T = \frac{2\pi m}{qB} . \quad (3.19)$$

При цьому частинка буде описувати гвинтову лінію з кроком

$$h = V_{\tau} \cdot T = V_{\tau} \frac{2\pi m}{qB} . \quad (3.20)$$

3. Сила взаємодії струмів

В околиці елемента dl струму I_2 струм I_1 створює магнітне поле з індукцією величини

$$B = k \frac{2I_1}{b} . \quad (3.21)$$

Якщо напрямок струму I_1 співпадає з віссю OX і струми лежать у площині XOY , то вектор $\vec{B}$ у будь-якій точці струму I_2 направлений по осі OZ . Сила Ампера, що діє на елемент провідника dl визначається законом Ампера

$$d\vec{F} = I_2 [d\vec{l} \vec{B}] . \quad (3.22)$$

Вектор $d\vec{F}$ направлений  до струму I_1 . Якщо струми паралельні, то провідники притягуються, а коли навпаки, то провідники відштовхуються.

$$dF = k \frac{2I_1 I_2}{b} \cdot dl . \quad (3.23)$$

4. Потенціальна енергія контуру в магнітному полі

4.1. Момент сили, що діє на контур.

На контур із струмом I , що знаходиться в магнітному полі з індукцією $\vec{B}$ діє пара сил $\vec{F} = I [\vec{b} \vec{B}]$ із плечем a . Вони створюють момент сили, який можна записати так

$$\vec{M} = [a \vec{F}] \quad (3.24)$$

з величиною

$$|\vec{M}| = IbaB = |[\vec{P} \vec{B}]| , \quad (3.25)$$

де $\vec{P} = \vec{n} IS$ – магнітний момент контуру, $S = ab$.

4.2. Енергія контуру.

При повороті контуру на кут $d\beta$ момент сили виконує роботу $\delta A = PM \sin \beta \cdot d\beta$, а повна робота

$$A = \int_{\beta_1}^{\beta_2} PM \sin \beta \cdot d\beta, \quad (3.26)$$

де β - кут між векторами $\vec{P}$ та $\vec{B}$, інтегрування проводиться від β_1 до β_2 . Після інтегрування маємо

$$A = -PB(\cos \beta_2 - \cos \beta_1) = -[(\vec{P} \vec{B})_2 - (\vec{P} \vec{B})_1]. \quad (3.27)$$

Ця робота виконується за рахунок зменшення потенціальної енергії взаємодії контуру з магнітним полем де величина

$$W = -(\vec{P} \vec{B}) \quad (3.28)$$

є механічна потенціальна енергія контуру в магнітному полі.

5. Потік індукції магнітного поля

5.1. Потік вектора магнітної індукції

Елементарний потік $d\Phi$ вектора індукції магнітного поля $\vec{B}$ через елементарну поверхню dS із нормаллю $\vec{n}$ визначається скалярним добутком

$$d\Phi = \vec{B} d\vec{S}, \quad (3.29)$$

де вектор $d\vec{S} = \vec{n} dS$.

5.2. Теорема Остроградського-Гауса для магнітного поля.

Потік вектора магнітної індукції через довільну замкнену поверхню S за теоремою Остроградського-Гауса дорівнює нулю.

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (3.30)$$

5.3. Потокозчеплення.

Повний магнітний потік через N простих контурів із магнітним потоком Φ через кожний з них називається потокозчепленням. Магнітний потік через виток соленоїда з перерізом S і лінійною густиною p витків є

$$\Phi = SB = S \mu \mu_0 n I, \quad (3.31)$$

а потокозчеплення через N витків становить

$$\Psi = N\Phi = NS \mu \mu_0 n I = \mu \mu_0 n^2 IV, \quad (3.32)$$

де V — об'єм соленоїда.

Потокозчеплення контуру, зумовлене магнітним полем струму, що тече в іншому контурі називається потокозчепленням взаємної індукції цих контурів.

5.4. Робота по переміщенню провідника із струмом у магнітному полі.

Якщо в магнітному полі з індукцією $\vec{B}$ знаходиться провідник dl із струмом I , то магнітне поле створить силу Ампера $\vec{F}_A$. Ця сила приведе провідник у рух і за час dt він переміститься на $d\vec{r}$. Елементарну роботу сили Ампера запишемо у вигляді

$$A = \int_1^2 I \cdot d\Phi = I \Delta\Phi. \quad (3.33)$$

6. Визначення питомого заряду електрона

Питомий заряд електрона

$$\gamma = \frac{e}{m} \quad (3.34)$$

можна визначити, розглядаючи його рух у схрещених (взаємно перпендикулярних) магнітному та електричному полях. Такі поля можуть створювати, наприклад, соленоїд та циліндрична електронна лампа, розміщена в ньому. Анодом лампи є циліндр радіуса r_0 , а катодом - розжарена нитка, розміщена вздовж осі циліндра. **Проходячи анодну напругу U , термоелектрони катода наблизяться до поверхні анода і набудуть швидкість V .**

Тепер питомий заряд можна записати у вигляді

$$\gamma = \frac{8U}{(\mu_0 \mu n I_{кр} r_0)^2}. \quad (3.35)$$

7. Ефект Холла

Ефект Холла полягає у тому, що при протіканні струму I через провідник, що розміщений у магнітному полі між верхньою та нижньою гранями створюється напруга $U_{\perp}$, яку називають поперечною або холлівською. Холл дослідним шляхом установив залежність величини $U_{\perp}$ від густини струму та індукції B

$$U_{\perp} = R_x j B d, \quad (3.36)$$

де величина R_x — стала Холла.

8. Прискорювачі елементарних частинок

За формою траєкторії прискорюваних частинок прискорювачі поділяються на дві групи: лінійні та циклічні. У перших - траєкторії близькі до прямих, а у других вони можуть бути близькими до кола або спіралей, що розкручуються.

8.1. Лінійні прискорювачі.

В лінійних прискорювачах напруга створюється або високовольтним генератором Ван - де - Граафа, або високовольтним імпульсним генератором.

8.2. Циклотрон.

Прискорювач заряджених частинок, що складається з двох металічних дуантів M і N — двох половинок тонкостінної металічної циліндричної коробки, розділеної вузькою щілиною D , називається циклотроном. Це досягається тим, що період змінної напруги T_0 дорівнює періоду T обертання частинки (синфазність)

$$T = T_0, \quad T = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (3.37)$$

Теоретично показано, що набута гранична енергія частинки в циклотроні не перевищує

$$V = 4 \sqrt{m_0 c^2 \cdot \frac{qU_0}{\pi}}, \quad (3.38)$$

де U_0 - амплітуда прискорюючого електричного поля, m_0 - маса спокою частинки.

8.3. Синхрофазотрон.

Якщо проводиться синхронізація величини індукції магнітного поля B і частоти прискорюючого електричного поля для врахування зміни релятивістської

маси частинки $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$, то такий циклічний прискорювач називається синхрофазотроном. При цьому період T залишається сталим, а енергії прискорених частинок досягають сотень Гев ($1\text{Гев} = 10^9 \text{ еВ}$).

8.4. Колайдери.

У колайдерах енергії прискорених частинок сягають $\sim 10^{11} \text{ еВ}$: співударення двох протонів у цих пучках, розігнаних до енергії 50 Гев, еквівалентно бомбардуванню нерухомої мішені з протонів пучком протонів, розігнаних до енергії $\sim 5300 \text{ Гев}$.

9. Мас – спектрометри

Мас-спектрометр - установка, що розділяє траєкторії руху заряджених частинок за їх питомим зарядом $\gamma = q/m$.

В мас-спектрометрах, прискорені частинки під дією магнітного поля заряди рухаються по траєкторіям, що є дугами кіл, радіуси яких

$$R = \frac{V}{\gamma B}. \quad (3.39)$$

10. Електронний мікроскоп

10.1. Електронні лінзи.

В магнітному полі на заряджену частинку діє сила Лоренця перпендикулярна до силових ліній індукції $\vec{B}$, яка, змінюючи траєкторію частинок, може збирати чи

розсіювати заряджені частинки. До таких полів відносяться, наприклад, магнітні поля в соленоїді чи спеціальним чином створені інші неоднорідні магнітні поля.

10.2. Електронний мікроскоп.

Електронний мікроскоп - пристрій, призначений для одержання зображення мікрооб'єктів, у якому на відміну від оптичного мікроскопа замість світлових променів використовують прискорені до великих енергій (30 — 100 кеВ і більш) в умовах глибокого вакууму (приблизно 0,1 мПа) електронні пучки, а замість звичайних лінз — електронні та магнітні лінзи.

За допомогою електронних мікроскопів можна домогтися значних збільшень (до 10^6 разів), що дозволяє спостерігати деталі структур розмірами до 10^{-10} м.

11. Гіромагнітне відношення для електрона

Дослідним шляхом встановлено, що електрон поряд із такими характеристиками як **заряд**, **маса** та класичний **радіус** має ще й **власний момент імпульсу**

$$L_s = \hbar \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (3.40)$$

який одержав назву **спіна електрона**. В цьому виразі

$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ — стала Дірака, h — стала Планка. Спіну електрона відповідає спіновий магнітний момент $P_s = \gamma_s L_s$, причому

$$\gamma_s = -\frac{e}{m_e} = 2\gamma. \quad (3.41)$$

11.1. Прецесія електрона

Унаслідок прецесії відбувається додатковий рух електрона навколо $\vec{B}$, який створює орбітальний струм

$$\Delta I = e \frac{\omega_L}{2\pi} \quad (3.42)$$

і орбітальний магнітний момент

$$P'_m = \Delta I \cdot S_{\vec{B}} = e^2 \frac{B}{4\pi m} \cdot S_{\vec{B}}, \quad (3.43)$$

де вектор $\vec{P}'_m \parallel -\vec{B}$, $S_{\vec{B}}$ — площа проекції орбіти прецесії електрона на площину $\vec{B}$. Таким чином в атомі під дією зовнішнього магнітного поля виникає додатковий магнітний момент, що направлений проти індукції зовнішнього магнітного поля.

12. Магнітне поле в магнетиках

12.1. Намагніченість середовища.

Будь - яка речовина, внесена в зовнішнє магнітне поле, намагнічується, створюючи своє власне магнітне поле. При дослідженні магнітного поля використовується така його характеристика як вектор напруженості

$$\vec{H} = \vec{B}_0 / \mu_0. \quad (3.44)$$

Як показують досліди, для ізотропного магнетика величина вектора намагніченості середовища пропорційна напруженості магнітного поля H , тобто

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (3.45)$$

χ — коефіцієнт пропорційності, який називають магнітною сприйнятливістю середовища.

12.2. Гіпотеза Ампера.

За гіпотезою Ампера, виникнення магнітних властивостей у магнетиках пов'язане з молекулярними струмами I'_0 , джерелом яких є рух електронів в атомах, іонах, молекулах. В підсумку поле в магнетикі є сумою зовнішнього та внутрішнього магнітних полів

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_e. \quad (3.46)$$

12.3. Магнітне поле у магнетиків

Розглянемо поле в середині магнетика у вигляді циліндра довжини L та радіуса основи $r \ll L$. Остаточно вираз для індукції у середовищі магнетика $\vec{B} = B_0 + \vec{B}_e$ запишеться так

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (3.47)$$

де μ – магнітна проникливість середовища.

Частку, що приходить на індукцію, створену молекулярними струмами, можна записати так

$$\frac{B_e}{B} = \frac{\mu_0 \chi H}{\mu \mu_0 H} = \frac{\chi}{\mu} = \frac{\mu - 1}{\mu}. \quad (3.48)$$

За ступенем й характером намагніченості розрізняють три групи речовин: діамагнетики, парамагнетики й феромагнетики.

12.4. Діамагнетики.

Діамагнетиком називається речовина, яка в зовнішньому магнітному полі намагнічується і її індукція має напрямок, протилежний напрямкові індукції зовнішнього поля. Цей коефіцієнт визначає магнітну сприйнятливість $\chi = \frac{\chi'}{1 - \chi'}$. Для діамагнетиків величина $\chi' \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$ і $\chi \sim \chi'$, тобто

$$\chi = -\mu_0 n e^2 Z \langle S_i \rangle \frac{\hbar^2}{4\pi m}. \quad (3.49)$$

12.5. Парамагнетики.

Парамагнетиками називаються речовини, які намагнічуються в зовнішньому магнітному полі за рахунок переорієнтації власних магнітних моментів атомів P_m із хаотичного в напрямку $\vec{B}$ під дією механічного моменту сили $\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}]$. Магнітна сприйнятливість парамагнетиків визначається так

$$\chi = \frac{\mu_0 n P_m^2}{3 k T} . \quad (3.50)$$

Кюрі експериментально встановив, що величина χ обернено пропорційна температурі і це співвідношення має назву закону Кюрі.

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (3.51)$$

12.6. Феромагнетики.

Феромагнетиками називаються тверді тіла, в яких існують макроскопічні області спонтанної намагніченості - домени. При температурі $T > T_k$ — температури Кюрі феромагнетик утрачає доменну структуру і має характеристики властиві парамагнетикам.

13. Закон повного струму

Закон повного струму для магнітного поля в магнетику дає визначення циркуляції напруженості магнітного поля $\vec{H}$ через макрострум

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{макро}} , \quad (3.52)$$

що проходить через поверхню S , натягнуту на замкнений контур L .

13.1. Закон Фарадея

Будь-яка зміна у часі величини магнітного потоку Φ_m через деякий контур призводить до виникнення в ньому ЕРС індукції, яка пропорційна швидкості зміни магнітного потоку

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_m}{dt} . \quad (3.53)$$

13.2. Правило Ленца

При будь-якій зміні магнітного потоку Φ_m крізь поверхню, натягнуту на замкнутий контур провідника, в останньому виникає індукційний струм такого напрямку, що потік вектора індукції його магнітного поля Φ_i протидіє зміні

зовнішнього магнітного потоку Φ_m . За законом Ома ЕРС $\mathcal{E}_i$ індукції можна записати через індукційний струм I_i та опір контуру R

$$I_i = \frac{dq}{dt}, \quad \mathcal{E}_i = I_i R_i. \quad (3.54)$$

13.3. Закон Фарадея й закон збереження енергії.

Якщо замкнений провідник довжиною dl із струмом I помістити у магнітне поле $\vec{B}$, то під дією сили Ампера провідник буде переміщуватися.

$$\mathcal{E} Idt = RI^2 dt + Id\Phi.$$

З одержаного рівняння, можна записати закон Ома у вигляді

$$I = \frac{\mathcal{E} + \left(-\frac{d\Phi}{dt}\right)}{R}. \quad (3.55)$$

Вираз у чисельнику містить складову $-\frac{d\Phi}{dt}$, яка має розмірність електрорушійної сили і називається ЕРС індукції

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.56)$$

Таким чином, розглядаючи окремий випадок зміни магнітного потоку через контур провідника, із закону збереження енергії ми одержали вираз закону Фарадея.

13.4. Закон Фарадея й електронна теорія.

Можна одержати ЕРС індукції у провіднику за визначенням

$$\mathcal{E}_i = \frac{\delta A}{-e} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.57)$$

Таким чином, і у цьому окремому випадку зміни магнітного потоку, ми також одержали вираз для закону Фарадея.

14. МГД – генератор

Генератор, що безпосередньо перетворює внутрішню енергію плазми у електричну називається магнітогідродинамічним генератором (МГД – генератор). Таким чином, в МГД - генераторі електричний струм створюється складовими зарядами плазми і він виконує роботу за рахунок їх кінетичної енергії.

15. Вихрове електричне поле та його циркуляція

Електрорушійна сила $\mathcal{E}_i$ при цьому може бути записана через напруженість $\vec{E}$ як

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E} d\vec{l}, \quad (3.58)$$

Підставивши в закон Фарадея вирази для ЕРС індукції та магнітного потоку одержимо циркуляцію напруженості індукованого поля у вигляді

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_m}{\partial t} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. \quad (3.59)$$

15.1. Явище електромагнітної

Якщо в контурі протікає струм I , то навколо нього створюється магнітне поле з індукцією $\vec{B}$, яке у свою чергу створює магнітний потік. Величина такого магнітного потоку пропорційна силі струму I у провідникові

$$\Phi_m = LI. \quad (3.60)$$

Коефіцієнт пропорційності L називається індуктивністю контуру і її величина визначається його конфігурацією (геометрією). Це явище назвали самоіндукцією. Якщо в колі протікає змінний струм I , або змінюється конфігурація кола, то в ньому виникає ЕРС самоіндукції

$$\mathcal{E}_s = -\frac{d\Phi_m}{dt} = \left(-L \frac{dI}{dt}\right) + \left(-I \frac{dL}{dt}\right). \quad (3.61)$$

Напрямок $\mathcal{E}_s$ такий, що поле струму самоіндукції протидіє зміні магнітного потоку Φ_m .

Як приклад, розглянемо магнітний потік через довгий соленоїд. Індукція магнітного поля соленоїда

$$B = \mu_0 n I, \quad (3.62)$$

де n – густина витків, I – струм у соленоїді. З урахуванням (3) магнітний потік через соленоїд буде таким

$$\Phi_m = NBS = LI, \quad (3.63)$$

де

$$L = \mu_0 N S n = \mu_0 n (l S) n = \mu_0 n^2 V -$$

індуктивність соленоїда, а $V = lS$ – об'єм соленоїда .

Якщо соленоїд знаходиться в магнітному середовищі з магнітною проникливістю μ , то індуктивність соленоїда буде

$$L = \mu_0 \mu n^2 V. \quad (3.64)$$

15.2. Явище електромагнітної взаємодукції. Трансформатор

Якщо в обмеженому просторі знаходяться два контури і в першому з них виникає змінний струм I_1 , то в другому індукується ЕРС взаємодукції

$$\mathcal{E}_{i2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (3.65)$$

І навпаки, якщо в другому контурі тече змінний струм I_2 , то в першому контурі індукується

$$\mathcal{E}_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}. \quad (3.66)$$

Коефіцієнти $L_{12} = L_{21}$ – називаються коефіцієнтами взаємодукції і їх величина залежить від конфігурації контурів та їх взаємного розташування. Величини взаємодукції визначаються для конкретних приладів окремо.

Трансформатори. На явищі взаємної індукції створено трансформатори – прилади, за допомогою яких можна підвищувати чи понижувати змінні напругу або струм. За цих припущень потужності в первинній та вторинній обмотках будуть однакові

$$U_1 I_1 = U_2 I_2.$$

Порівнюючи вирази для напруг та потужностей, одержимо

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1, \quad I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1. \quad (3.67)$$

Коефіцієнт

$$k = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.68)$$

називається коефіцієнтом трансформації. Якщо $k > 1$, то трансформатор підвищуючий, у протилежному – понижуючий.

15.3. Процес релаксації у контурі з індуктивністю

Розглянемо електричний контур з омичним опором R та індуктивністю L . Залежність величини струму від часу t при вмиканні й вимиканні електрорушійної

сили $\mathcal{E}$ визначається величиною індуктивності L . Зважаючи, що $\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt}$ одержимо неоднорідне диференціальне рівняння

$$\frac{dI}{dt} + \gamma I = \frac{\mathcal{E}}{L}, \quad \gamma = \frac{R}{L}. \quad (3.69)$$

Остаточне рішення рівняння буде мати вигляд

$$I = A e^{-\gamma t} + I_0. \quad (3.70)$$

Час τ за який величина заряду зменшиться в e раз називається часом релаксації. Обчислимо величину τ . За визначенням маємо

$$\frac{I_0}{I_0 e^{-\gamma \tau}} = e^1 \quad (3.71)$$

і звідси

$$\tau = 1/\gamma = L/R. \quad (3.72)$$

Якщо прийняти, що під $R=r$ розуміємо лише опір соленоїда, знехтувавши зовнішнім опором, то при зростанні зовнішнього опору до R ЕРС індукції можна представити у вигляді

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt} = \gamma L I_0 e^{-\gamma t} = \frac{R}{r} \mathcal{E} e^{-\gamma t} . \quad (3.73)$$

Якщо $R \gg r$, то $\mathcal{E}_i$ буде значно більшою $\mathcal{E}$, унаслідок чого може виникнути електричний пробій повітряного зазору вимикача й вихід його з ладу. Для уникнення цього явища, паралельно до вимикача підключають конденсатор.

16. Енергія магнітного поля

У випадку нескінченно великого соленоїда, при протіканні в ньому струму I , магнітне поле зосереджується в середині об'єму соленоїда V .

Ця робота створює енергію магнітного поля соленоїда

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (3.74)$$

і може бути записана у вигляді

$$W = \frac{B^2 V}{2 \mu \mu_0} . \quad (3.75)$$

У зв'язку із тим, що магнітне поле довгого соленоїда цілком знаходиться лише у середині його, то енергія соленоїда є енергією магнітного поля. Тепер з можна знайти об'ємну густину енергії магнітного поля $w = W/V$, яка дорівнює

$$w = \frac{B^2}{2 \mu \mu_0} = \frac{1}{2} BH = \frac{\mu \mu_0 H^2}{2} . \quad (3.76)$$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Магнітна індукція поля, яке створене відрізком прямого провідника зі струмом в точці, яка рівновіддалена від кінців відрізка і знаходиться на відстані $r_0=0,2$ м від його середини, $B=24,9$ мкТл. Довжина відрізка $L=0,6$ м. Визначити силу струму, що проходить у провіднику.

Розв'язання

Використаємо закон Біо-Савара-Лапласа:

$$r_0=0,2 \text{ м}$$

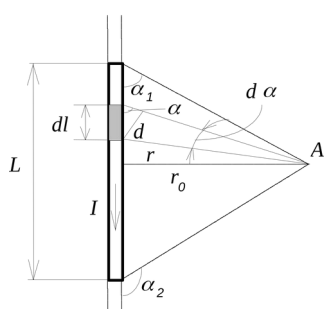
$$B=24,9 \text{ мкТл.}$$

$$L=0,6 \text{ м.}$$

I -?

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

де α – кут між напрямком струму і радіус-вектором r , проведеним від елемента струму dl в точку A . Як видно з рисунка,



$$dl = \frac{dS}{\sin \alpha} = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha}; \quad r = \frac{r_0}{\sin \alpha}.$$

Підставивши вирази dl і r в рівняння для B , знайдемо

$$\begin{aligned} B &= \frac{I \mu_0}{4 \pi r_0} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = \\ &= \frac{I \mu_0}{4 \pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \end{aligned}$$

Оскільки

$$\cos \alpha_2 = \cos(\pi - \alpha_1) = -\cos \alpha_1,$$

то
$$B = \frac{I \mu_0}{2 \pi r_0} \cos \alpha_1.$$

З рисунка видно, що

$$\cos \alpha_1 = \frac{L}{\sqrt{4r_0^2 + L^2}} \quad \text{і} \quad B = \frac{I \mu_0}{2 \pi r_0} \cdot \frac{L}{\sqrt{4r_0^2 + L^2}}.$$

Звідси

$$I = \frac{1}{\mu_0 L} 2 \pi r_0 B \sqrt{4r_0^2 + L^2}.$$

Підставимо числові значення:

$$I = \frac{2 \pi \cdot 0,2 \cdot 24,9 \cdot 10^{-6} \sqrt{4 \cdot 0,2^2 + 0,6^2}}{4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,6} =$$

$$30 \text{ (А)}.$$

Задача 2. На дротяний виток радіусом $r = 10$ см, розміщений між полюсами магніту, діє максимальний механічний момент $M_{\max} = 6,5$ мкН. Сила струму I в витку дорівнює 2 А. Визначити магнітну індукцію B поля між полюсами магніту. Дією магнітного поля Землі знехтувати.

Дано:

$r = 10$ см

$M_{\max} = 6,5 \cdot 10^{-6}$ Н

$I = 2$ А

B - ?

Розв'язування

Індукцію магнітного поля можна визначити з виразу моменту сили, що діє на виток із струмом в магнітному полі.

$$M = P_m B \sin(\alpha) \quad (1)$$

Якщо врахувати, що максимальне значення механічний момент набуває при $\alpha = \pi/2$, $P_m = I \cdot S$, то формула (1) буде виглядати так:

$$M_{\max} = IBS.$$

Звідси, враховуючи, що $S = \pi r^2$, знаходимо

$$B = \frac{M_{\max}}{\pi r^2 I}.$$

Провівши розрахунки і перевірку величин, отримаємо:

$$B = 104 \text{ мкТл} = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$$

$$[B] = \frac{H \cdot m}{m^2 A} = \frac{H}{m \cdot A} = Tл$$

Задача 3. Визначити максимальну магнітну індукцію $B_{\max}$ поля, яке створюється електроном, що рухається прямолінійно із швидкістю $v = 10$ Мм/с, в точці, що знаходиться від траєкторії на відстані $d = 1$ нм.

Дано:

$v = 10^{-7}$ см

$d = 10^{-9}$ м

$B_{\max}$ - ?

Розв'язання

Рухомий заряд створює в просторі магнітне поле, індукція якого B_q в будь-якій точці поля прямо пропорційна величині заряду

його швидкості і магнітній проникності середовища і обернено пропорційна квадрату відстані даної точки поля від заряду.

Індукція B_q залежить від кута між векторами $\vec{v}$ і $\vec{r}$. При інших рівних умовах вона максимальна в точках прямої, що проведена через заряд перпендикулярно до вектора його швидкості $\vec{v}$.

В усіх точках поля, що знаходяться на прямій, яка співпадає з вектором швидкості $\vec{v}$ руху заряду, магнітна індукція дорівнює нулю.

Числове значення магнітної індукції в точці А поля рухомого заряду дорівнює:

$$B_q = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} * \frac{qv \sin(\vec{v}, \vec{r})}{r^2} \quad (1)$$

Згідно умови задачі кут між векторами $(\vec{v}, \vec{r}) = \pi/2$, отже $\sin(\pi/2) = 1$.

Тоді

$$B_q = \frac{1 * 4\pi * 10^{-7}}{4\pi} * \frac{1,6 * 10^{-19} * 10 * 10^6}{(1 * 10^{-9})^2} = 0,16 \text{ Тл}$$

Перевіряємо розмірність величин

$$[B_q] = \frac{H * K_l * m}{A^2 * c * m^2} = \frac{H * A * c * m}{A^2 * m^2 * c} = \frac{H}{A * m} = \text{Тл}$$

Задача 4. У центрі соленоїда (довжина $l=0,7$ м, діаметр витків $d=7$ см, кількість витків $N_1=300$) розміщено плоску котушку, яка складається з $N_2=20$ витків площею $S=0,3 \text{ см}^2$ кожна. Площина витків котушки утворює кут $\beta=37^\circ$ з віссю соленоїда. По обмотці соленоїда проходить струм силою $I_1=4$ А, по обмотці котушки – струм силою $I_2=0,1$ А. Знайти: 1) обертальний момент, який діє на котушку в початковому положенні; 2) роботу, яка виконується силами поля при повороті котушки до положення стійкої рівноваги.

$l=0,7$ м,
 $d=7$ см,
 $N_1=300$
 $N_2=20$
 $S=0,3 \text{ см}^2$
 $\beta=37^\circ$
 $I_1=4$ А,
 $I_2=0,1$ А.
 М-?
 А-?

Розв'язання

На котушку, яка знаходиться в магнітному полі соленоїда, діє обертальний момент

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

де $B = \mu_0 \frac{I_1 N_1}{L}$ – індукція поля соленоїда; $p_m = I_2 S N_2$ – магнітний момент котушки.

Вектор p_m спрямований нормально до площини витків котушки і зв'язаний правилом правого гвинта з напрямком струму I_2 . Вектор індукції B спрямований вздовж осі соленоїда в ту чи іншу сторону. Оскільки напрямки струмів I_1 і I_2 в умові не зазначені, то кут між векторами p_m і B

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \beta \quad \text{або} \quad \alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \beta.$$

Замінімо векторне рівняння для M скалярним:

$$M = \mu_0 I_1 I_2 N_1 N_2 S \sin \alpha_1 / L = \\ \mu_0 I_1 I_2 N_1 N_2 S \sin \beta / L.$$

Підставимо числові значення

$$M = 4,3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 4,0,1,300 \times 10^{-4} \cdot \sin 37^\circ \frac{1}{0,7} = \\ 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Робота сили поля під час руху котушки зі струмом дорівнює:

$$A = I_2 (\Phi_2 - \Phi_1),$$

де Φ_1 і Φ_2 – магнітні потоки, що пронизують котушку в початковому і кінцевому положеннях.

В початковому положенні потік, що пронизує один виток котушки $\Phi = BS \cos \alpha_1$, причому залежно від α_1 $\cos \alpha_1 = \pm \sin \beta$. В положенні стійкої рівноваги потік $\Phi = B \cdot S$.

Враховуючи, що котушка містить N_2 витків, отримуємо

$$A = I_2 N_2 (BS - BS \cos \alpha_1) = \\ = B S I_2 N_2 (1 \mp \sin \beta) = \\ = \mu_0 I_1 I_2 \frac{N_1 N_2}{L} S (1 \mp \sin \beta).$$

Якщо $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \beta$, то

$$A_1 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 0,1 \cdot \frac{300 \cdot 20}{0,7} \times 0,3 \cdot 10^{-4} (1 - \sin 37^\circ) = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ (Дж)}.$$

Якщо $\alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \beta$, то $A_2 = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}.$

Задача 5. У скільки разів зменшуються втрати на нагрівання провідників лінії електропередачі, якщо вхідна напруга підвищувального трансформатора становить а вихідна (напруга на лінії високовольтної електропередачі)

$$U_1 = 11 \text{ кВ},$$

$$U_2 = 110 \text{ кВ}$$

$$n = ?$$

Розв'язання

Із закону Джоуля – Ленца кількість теплоти, що виділяється, та потужність втрат дорівнюють, відповідно:

$$Q = I^2 R t \quad P = I^2 R. \quad (1)$$

Оскільки в трансформаторі можна вважати :

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (2)$$

а потужність зв'язана з силою струму та напругою:

$$P = U/I \quad (3)$$

то враховуючи (1), отримаємо, що зменшення втрат на нагрівання при підвищенні напруги буде в n разів:

$$n = \frac{P_{\text{в1}}}{P_{\text{в2}}} = \frac{U_2^2}{U_1^2} \quad (4)$$

Підставивши числові значення напруги на вході та виході трансформатора отримаємо: $n = 100.$

Тобто втрати на нагрівання зменшуються у 100 разів

Питання для самоконтролю

1. Магнітне силове поле.
2. Магнітний момент плоского контуру із струмом.
3. Індукція магнітного поля і напрямок $\vec{B}$.
4. Силіві лінії магнітного поля.
5. Закон Біо - Савара – Лапласа.
6. Магнітне поле заряду, що рухається.
7. Магнітне поле прямого провідника із струмом.
8. Магнітне поле колового струму.
9. Магнітне поле соленоїда.
10. Циркуляція індукції магнітного поля.
11. Циркуляція індукції магнітного поля тороїда.
12. Закон Ампера, сила Лоренця.
13. Електрична складова сили Лоренця.
14. Сила взаємодії струмів.
15. Елементарний потік $d\Phi$ вектора індукції магнітного поля $\vec{B}$.
16. Теорема Остроградського-Гауса для магнітного поля.
17. Монополі Дірака.
18. Потокозчеплення.
19. Робота по переміщенню провідника із струмом у магнітному полі.
20. Момент сили та потенціальна енергія контура у магнітному полі.
21. Потік індукції та робота магнітного поля.
22. Ефект Холла.
23. Лінійні прискорювачі.
24. Циклотрон.
25. Синхрофазотрон.
26. Колайдери.
27. Мас – спектрометри.
28. Електронні лінзи.
29. Електронний мікроскоп.

30. Гіромагнітне відношення для електрона.
31. Прецесія електрона.
32. Ларморівська частота.
33. Намагніченість середовища.
34. Гіпотеза Ампера.
35. Магнітне поле у магнетиках.
36. Діамагнетики.
37. Парамагнетики.
38. Феромагнетики.
39. Магнітні домени.
40. Магнітний гістерезис.
41. Температура Кюрі.
42. Закон повного струму.
43. Закон Фарадея.
44. Правило Ленца.
45. Закон Фарадея і закон збереження енергії.
46. Закон Фарадея та електронна теорія.
47. МГД – генератор.
48. Вихрове електричне поле та його циркуляція.
49. Електромагнітна самоіндукції та взаємоіндукція.
50. Трансформатор.
51. Процес релаксації у контурі з індуктивністю.
52. Енергія магнітного поля соленоїда.
53. Густина енергії магнітного поля.
54. Явище електромагнітної самоіндукції.
55. Явище електромагнітної взаємоіндукції.
56. Енергія магнітного поля соленоїда.
57. Густина енергії магнітного поля.
58. Циркуляція індукції магнітного поля.
59. Гіромагнітне відношення для електрона.

60. Вектор намагніченості середовища, коефіцієнт магнітної сприйнятливості.
61. Діамагнетизм, парамагнетики, феромагнетики.
62. Індукція магнітного поля в магнетику.
63. Магнітна проникливість, напруженість магнітного поля в магнетику.
64. Закон повного струму.

Завдання для самостійного опрацювання

1. По двох нескінченно довгих прямих паралельних проводах течуть струми силою $I_1=50\text{A}$ і $I_2=100\text{A}$ в протилежних напрямках. Відстань d між проводами дорівнює 20см. Визначити магнітну індукцію B в точці, віддаленій на $r_1=25\text{см}$ від першого і $r_2=40\text{см}$ від другого проводу.

2. Напруженість H магнітного поля в центрі кругового витка радіусом $r=8\text{ см}$ дорівнює 30А/м. Визначити напруженість H_1 на осі витка в точці, розташованій на відстані $d=6\text{ см}$ від центра витка.

3. По двох нескінченно довгих прямих проводах, схрещених під прямим кутом, течуть струми силою $I_1=30\text{A}$ і $I_2=40\text{A}$. Відстань d між проводами дорівнює 20 см. Визначити магнітну індукцію B в деякій точці C , однаково віддаленій від обох проводів на відстань, рівну d (рис. 3.1).

4. Нескінченно довгий прямий провід зігнутий під прямим кутом. По провіднику тече струм силою $I=20\text{A}$. Яка магнітна індукція B в точці A (рис. 3.2), якщо $r=5\text{ см}$?

5. По провіднику у вигляді тонкого кільця радіусом $R=10\text{см}$ тече струм. Чому дорівнює сила F цього струму, якщо магнітна індукція B поля в точці A (рис. 3.3) дорівнює 1мкТл? Кут $\beta=10^\circ$.

6. Електрон у не збудженому атомі водню рухається навколо ядра по колу з радіусом $r = 53\text{ пм}$. Обчислити силу еквівалентного кругового струму I і напруженість поля в центрі кола.

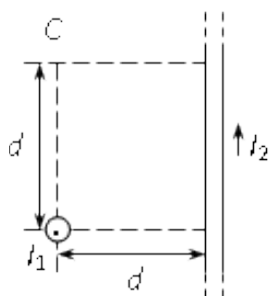


Рис. 3.1

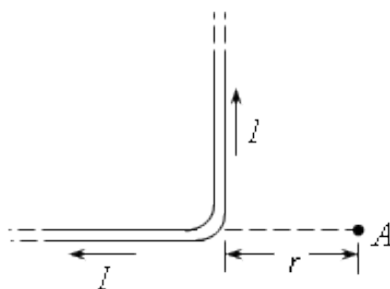


Рис. 3.2

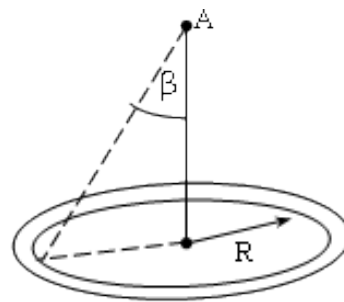


Рис. 3.3

7. На відстані $r=10$ нм від траєкторії прямолінійно рухомого електрона максимальне значення магнітної індукції $B = 160 \text{ мкТл}$. Визначити швидкість електрона.

8. Котушка довжиною $l=20$ см має $N=100$ витків. По обмотці котушки йде струм силою $I=5$ А. Діаметр d котушки дорівнює 20 см . Визначити магнітну індукцію B в точці A , яка лежить на осі котушки на відстані $a=10$ см від її кінця.

9. По довгому вертикальному проводі зверху вниз тече струм $I=8$ А. На якій відстані від нього напруженість поля, отримана від додавання земного магнітного поля і поля струму спрямована вертикально вгору? Горизонтальна складова земного магнітного поля $H_3=16$ А/м.

10. Два кругових витки розташовані у взаємно перпендикулярних площинах так, що центри цих витків збігаються (рис. 3.4). Радіус кожного витка $R=2$ см, струми $I_1=I_2=5$ А. Знайти напруженість магнітного поля в центрі цих витків.

11. Який опір провідника довжиною $l=3$ см, якщо в магнітному полі з індукцією $B=0,3 \text{ Тл}$ на нього діє сила $F=45$ Н, а напруга U , прикладена до провідника, дорівнює 20 В? Провідник розміщений перпендикулярно до ліній магнітної індукції, поле однорідне.

12. В однорідному горизонтальному магнітному полі знаходиться в рівновазі прямолінійний алюмінієвий провідник зі струмом $I=10$ А, розташований під кутом 30° до силових ліній. Визначити індукцію B магнітного поля, вважаючи радіус перерізу провідника $S=2 \text{ мм}$.

13. Напруженість магнітного поля в центрі кругового витка $H=159$ А/м, струм у витку $I=32$ А. Визначити магнітний момент витка.

14. По двох нескінченно довгих паралельних проводах течуть у протилежних напрямках струми $J_1 = J_2 = 10$ А. Відстань між проводами $d=30$ см. Визначити магнітну індукцію в точці, віддаленій від першого й другого провідників на відстані $r_1=15$ см й $r_2=20$ см.

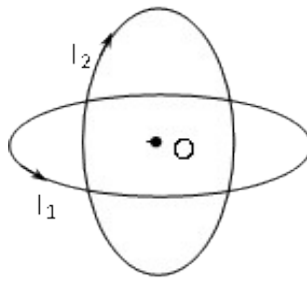


Рис. 3.4

15. По контурі у вигляді рівностороннього трикутника йде струм $J=40$ А. Сторона трикутника $a=30$ см. Визначити напруженість магнітного поля в точці перетинання висот.

16. По двох довгих паралельних проводах течуть у протилежних напрямках струми $J_1=J_2=10$ А. Відстань між провідниками $d=30$ см. Визначити напруженість магнітного поля в точці, віддаленої від кожного з проводів на 20 см.

17. Нескінченно довгий провідник зігнуто під прямим кутом. По провіднику тече струм $J=20$ А. Яка магнітна індукція в точці А, що лежить на продовженні однієї із сторін кута на відстані 5 см від вершини?

18. Відстань між двома довгими паралельними проводами $d=5$ см. По проводах в одному напрямку течуть струми $J_1=J_2=30$ А. Знайти напруженість магнітного поля в точці, що перебуває на відстані $r_1=4$ см від першого й $r_2=3$ см від другого проведення.

19. По нескінченно довгому провіднику, зігнутому під кутом $\alpha=30^\circ$, тече струм $J=50$ А. Знайти магнітну індукцію в точці, що лежить на бісектрисі кута й віддаленої від вершини на відстань $a=5$ см.

20. Два нескінченно довгих прямі провідники схрещені під прямим кутом. По провідниках течуть струми $J_1=80$ А і $J_2=60$ А. Відстань між провідниками $d=10$ см. Знайти магнітну індукцію в точці, однаково віддаленої від обох провідників.

21. По контурі АДС (рис. 3.5) іде струм $J=10$ А. Визначити напруженість магнітного поля в точці О, якщо радіус дуги $R=10$ см, кут $\alpha=45^\circ$.

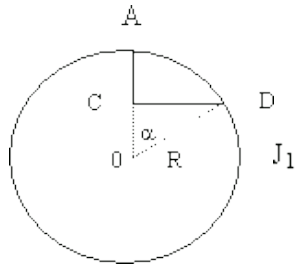


Рис. 3.5

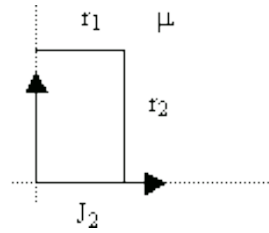


Рис. 3.6

22. Два прямолінійних нескінченно довгих провідники розташовані перпендикулярно друг до друга й перебувають в одній площині. Знайти напруженість магнітного поля в точці М (рис. 3.6), віддаленої від першого провідника на відстань $r_1 = 1$ см і від іншого на $r_2 = 2$ см. Струми в провідниках $J_1 = 2$ А і $J_2 = 3$ А.

23. По провіднику, зігнутому у вигляді квадрата зі стороною 10 см, тече струм $J = 4,5$ А. Визначити індукцію магнітного поля в центрі квадрата. Електрон в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1$ Тл рухається по колу. Знайти величину еквівалентного струму.

24. Алюмінієвий провідник, площа поперечного перерізу якого 1 мм^2 , підвішений у горизонтальній площині перпендикулярно до магнітного меридіана й по ньому тече струм (із заходу на схід) $J = 1,6$ А. Яку частку від ваги провідника становить сила, що діє на нього з боку земного магнітного поля? Щільність алюмінію 2700 кг/м^3 . Горизонтальна складова індукція магнітного поля Землі $B = 20 \text{ мкТл}$.

25. По трьох паралельних прямих проводах, що перебувають на відстані $a = 10$ см, течуть однакові струми по 100 А. У двох проводах напрямки струмів збігаються. Обчислити силу, що діє на одиницю довжини кожного провідника.

26. Тонкий мідний провід масою $m = 5$ г зігнутий у вигляді квадрату і кінці його замкнуті. Квадрат поміщено в однорідне магнітне поле ($B = 0,2$ Тл) так, що його площа перпендикулярна лініям поля. Визначити заряд Q , який потече по провіднику, якщо квадрат, потягнув за супротивні вершини, витягнути в лінію.

27. Рамка з проводу опором $R = 0,04$ Ом рівномірно обертається в однорідному магнітному полі ($B = 0,6$ Тл). Вісь обертання лежить в площині рамки і перпендикулярна лініям індукції. Площа рамки $S = 200 \text{ см}^2$. Визначити заряд Q , що

потече по рамці при зміні кута між нормальною до рамки і лініями індукції: 1) від 0 до 45° ; 2) від 45° до 90° .

28. Виток з провідника діаметром $D=5$ см і опором $R=0,02$ Ом знаходиться в однорідному магнітному полі ($B=0,3$ Тл). Площина витка складає кут $\alpha=40^\circ$ з лініями індукції. Який заряд Q потече по витку при виключенні магнітного поля?

29. Квадратна дротова рамка зі стороною $a=2$ см, що містить $N=100$ витків тонкого проведення, підвішена на пружній нитці, постійна крутіння якої $G=9,8 \cdot 10^{-6}$ Нм/град. Площина рамки збігається з напрямком ліній напруженості зовнішнього магнітного поля. Визначити напруженість зовнішнього магнітного поля, якщо при пропущенні по рамці струму силою $J = 1$ А вона повернулася на кут $\alpha=60^\circ$.

30. В однорідне магнітне поле з напруженістю $H=7,95 \cdot 10^3$ А/м поміщена квадратна рамка зі стороною $a=4$ см, що має $n=10$ витків. Площина рамки становить кут $\alpha=30^\circ$ з напрямком магнітного поля. Визначити роботу, зроблену магнітним полем при повороті рамки до положення рівноваги, якщо по витку пропустити струм $J=5$ А.

31. Горизонтальні рейки перебувають на відстані $0,3$ м. На них лежить стрижень, перпендикулярний до рейок. Яка повинна бути індукція магнітного поля для того, щоб стрижень почав рухатися, якщо по ньому пропустити струм $J=50$ А? Коефіцієнт тертя стрижня об рейки $k=0,2$. Маса стрижня $0,5$ кг.

32. По двох паралельних проводах довжиною 25 м кожний течуть однакові струми силою $J=10^3$ А. Відстань між проводами $d=20$ см. Визначити силу взаємодії проводів.

33. По двох паралельних проводах довжиною $l = 3$ м кожний, протікають однакові струми силою $I=500$ А. Відстань між провідниками $d=10$ см. Визначити силу F взаємодії провідників.

34. По трьох паралельних прямих проводах, що знаходяться на однаковій відстані $d=20$ см один від одного, протікають струми однакової сили $I = 400$ А. В двох проводах напрями струмів співпадають. Обчислити для кожного із проводів відношення сили, діючої на нього, до його довжини.

35. Квадратна рамка з проводу розташована в одній площині з довгим прямим

проводом так, що дві її сторони паралельні проводу. По рамці і проводу протікають однакові струми силою $I=200$ А. Визначити силу F , діючої на рамку, якщо ближня до проводу сторона рамки знаходиться від нього на відстані, рівному її довжині.

36. Виток з провідника радіусом $R=25$ см розташований в площині магнітного меридіана. В центрі установлена невелика магнітна стрілка, спроможна обертатися навкруг прямовисної осі. На який кут α відхиляється стрілка, якщо по витку пустити струм силою $I=15$ А? Горизонтальну що складає індукції земного магнітного поля прийняти рівної $B=20$ мкТл.

37. Магнітна стрілка поміщена в центр колового витка, площа якого розташована прямовисно і складає кут $\alpha = 30^\circ$ з площиною магнітного меридіана. Радіус витка $R=20$ см. Визначити кут α , на який повернеться магнітна стрілка, якщо по провіднику піде струм силою $I=25$ А (надати дві відповіді). Горизонтальну що складає індукції земного магнітного поля прийняти рівної $B=20$ мкТл.

38. По двох довгих паралельних приводах, відстань між якими $d=5$ см, протікають однакові струми $I=10$ А. Визначити індукцію B і напруженість H магнітного поля в точці, віддаленою від кожного проводу на відстань $r = 5$ см, якщо струми протікають: а) в однаковому, б) в супротивних напрямках.

39. Два нескінченно довгих прямих провідника схрещені під прямим кутом. По провідниках протікають струми силою $I_1=100$ А і $I_2=50$ А. Відстань між провідниками $d=20$ см. Визначити індукцію B магнітного поля в точці, що лежить на середині спільного перпендикуляру до провідників.

40. Струм силою $I=50$ А протікає по провіднику, зігнутому під прямим кутом. Знайти напруженість H магнітного поля в точці, що лежить на бісектрисі цього кута на відстані $b = 20$ см від шпиль кута. Вважати, що обидва кінці провідника знаходяться дуже далеко від шпиль кута.

41. По провіднику, зігнутому у вигляді кола, протікає струм. Напруженість магнітного поля в центрі кола $H_1 = 50$ А/м. Не змінюючи сили струму в провіднику, йому надали форму квадрату. Визначити напруженість H_2 магнітного поля в точці пересічення діагоналей цього квадрату.

42. По контуру у вигляді рівностороннього трикутника протікає струм

силою $I=50$ А. Сторона трикутника $a=20$ см. Визначити магнітну індукцію B в точці пересікання висот.

43. По провіднику, зігнутому у вигляді прямокутника з сторонами $a=8$ см і $b=12$ см, протікає струм силою $I=50$ А. Визначити напруженість H і індукцію B магнітного поля в точці пересікання діагоналей прямокутника.

44. По контуру, що має форму рівностороннього трикутника проходить струм силою 10 А см від точки згину провідника. Вважати, що обидва кінці провідника знаходяться досить. Сторона трикутника дорівнює 5 см. Визначити індукцію та напруженість магнітного поля в центрі трикутника.

45. По провіднику, який зігнуто у вигляді прямокутника зі сторонами 3 см і 4 см, протікає струм силою 20 А. Визначити напруженість та індукцію магнітного поля в точці перетину діагоналей прямокутника.

46. По провіднику, що зігнуто у вигляді кільця (кола), протікає струм. Напруженість магнітного поля в центрі кільця 20 А/м. Не змінюючи сили струму в провіднику, йому надали форму квадрату. Визначити напруженість та індукцію магнітного поля в точці перетину діагоналей цього квадрату.

47. Струм силою 10 А протікає по провіднику, що зігнуто під прямим кутом. Знайти напруженість та індукцію магнітного поля в точці, що лежить на бісектрисі цього кута на відстані 5 далеко від цієї точки.

48. По двох довгих, тонких, паралельних провідниках, що знаходяться на відстані 20 см один від одного, протікають однакові по величині струми по 10 А в протилежних напрямках. Визначити індукцію і напруженість магнітного поля в точці, що віддалена від кожного провідника на відстань 10 см.

49. По двох паралельних, тонких, достатньо довгих провідниках в вакуумі протікають однакові струми силою 10 А. Відстань між провідниками 5 см. Визначити силу взаємодії розраховану на кожний метр довжини провідників. Яким чином направлені сили взаємодії в залежності від напрямку струмів в провідниках?

50. По двох довгих, тонких, паралельних провідниках, що знаходяться на відстані 10 см один від одного, протікають струми в 5 А та 10 А в одному напрямі. Визначити індукцію та напруженість магнітного поля в точці, що віддалена від

кожного провідника на відстань 5 см.

51. По двох довгих, тонких, паралельних провідниках, що знаходяться на відстані 10 см один від одного, протікають однакові по величині струми по 50 А в протилежних напрямках. Визначити індукцію та напруженість магнітного поля в точці, що віддалена від кожного провідника на відстань 10 см.

52. Два нескінченно довгих, тонких, прямих провідників схрещені під прямим кутом. По провідниках протікають струми силою 10 А та 20 А. Відстань між провідниками 10 см. Визначити індукцію та напруженість магнітного поля в точці, що лежить на середині спільного перпендикуляру до провідників.

53. По двох нескінченно довгих, тонких, паралельних провідниках, що знаходяться на відстані 5 см один від одного, протікають однакові по величині струми по 20 А в одному напрямку. Визначити індукцію та напруженість магнітного поля в точці, що віддалена від кожного провідника на відстань 5 см.

54. Коловий виток з дроту радіусом 10 см розташований в площині магнітного меридіана. В центрі витка встановлена невеличка магнітна стрілка, що може обертатися навколо вертикальної осі. На який кут відхилиться стрілка, якщо по витку пустити струм силою 20 А? Горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі прийняти рівною 20 мкТл.

55. В центрі колового витка радіусом 20 см, що розташований в площині магнітного меридіана, встановлена невеличка магнітна стрілка, що може обертатися навколо вертикальної осі. Який струм необхідно пропустити через виток щоб стрілка відхилилась на 30° ? Горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі прийняти рівною 20 мкТл.

56. Відрізок прямого провідника довжиною 30 см, по якому проходить струм силою 10 А, рухається в однорідному магнітному полі із індукцією 2 Тл. Яку роботу виконають сили, що діють на провідник з боку поля, перемістивши його на відстань 1 м? Напрямок переміщення провідника перпендикулярний до провідника та ліній індукції магнітного поля.

57. Визначити механічну потужність, що виникає при переміщенні прямолінійного провідника довжиною $l=20$ см зі швидкістю $V=5$ м/с в однорідному

магнітному полі, індукція якого $B=0,1$ Тл. Кут між B і V дорівнює $\pi/2$, а струм у провіднику $I=50$ А.

58. По двох паралельних провідниках довжиною $l=1$ м кожний течуть струми однакової сили. Відстань між проводами $d=1$ см. Струми взаємодіють із силою $F=1$ мА. Знайти силу струму в провідниках.

59. Дротовий виток радіусом $R=5$ см знаходиться в однорідному магнітному полі напруженістю $H=2$ кА/м. Площина витка утворює кут $\beta=60^\circ$ з напруженістю H . По витку тече струм $I=4$ А. Знайти механічний момент M , що діє на виток.

60. Рамка гальванометра з $N=200$ витків має розміри 4 см $\times$ $1,5$ см. Який магнітний момент виникає в рамці при пропусканні по ній струму $I=1$ А?

61. Прямий провід довжиною $l=10$ см, по якому тече струм $I=20$ А, знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,01$ Тл. Знайти кут між напрямками вектора B і струму, якщо на провідник діє сила $F=10$ мН.

62. Рамка діаметром $d=20$ см може обертатися навколо вертикальної осі, яка співпадає з одним з діаметрів витка. Виток розташований у площині магнітного меридіана. По ньому пропустили струм $I=10$ А. Знайти механічний момент M , який потрібно прикласти до витка, щоб він повернувся в початкове положення. Горизонтальну складову B_H магнітної індукції поля Землі прийняти рівну 20 мкТл.

63. По двох тонких проводах, вигнутих у вигляді кільця радіусом $R=10$ см, течуть однакові струми силою $I=10$ А в кожному. Знайти силу взаємодії цих кілець, якщо площини, у яких лежать кільця, паралельні, а відстань d між центрами кілець дорівнює 1 мм.

64. Прямий провід довжиною $l = 40$ см, по якому проходить струм силою $I = 100$ А, рухається в однорідному магнітному полі із індукцією $B=0,5$ Тл. Яку роботу A вчинять сили, діючі на провід з боку поля, перемістивши його на відстань $s=40$ см, якщо напрямок переміщення перпендикулярний лініям індукції і проводу?

65. Напруженість H магнітного поля в центрі круглого витка рівна 500 А/м. Магнітний момент витка $p_m = 6$ А $\cdot$ м². Обчислити силу струму I у витку і радіус R витка.

66. Коротка котушка площиною поперечного перерізу $S=250$ см², що містить

$N=500$ витків проводу, по якому протікає струм силою $I=5$ А, поміщена в однорідне магнітне поле напруженістю $H=1000$ А/м. Знайти : 1) магнітний момент p_m котушки; 2) обертаючий момент M , діючий на котушку, якщо вісь котушки складає кут $\alpha = 30^\circ$ з лініями поля.

67. Виток діаметром $d=10$ см спробується обертатися навколо прямої осі, співпадаючої з одним із діаметрів витка. Виток установили в площині магнітного меридіана і пустили по нього струм силою $I=40$ А. Який обертаючий момент M треба прикласти до витка, щоб удержати його в початковому положенні? Горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі прийняти рівною $B_H=200$ мкТл.

68. Виток радіусом $R=20$ см, по якому протікає струм силою $I=50$ А вільно розташований в магнітному полі напругою $H=10^3$ А/м. Виток повернули щодо діаметру на кут $\alpha = 30^\circ$. Визначити виконану роботу A .

69. На осі плоского контура зі струмом знаходиться інший такий же контур. Модулі магнітних моментів контурів однакові ($p_{m1}=p_{m2}=A \cdot m^2$). Обчислити механічний момент M , діючий на другий контур, якщо його магнітний момент перпендикулярний магнітному моменту першого контура. Відстань r між контурами рівне 100 см. Розміри контурів малі у порівнянні з відстанню між ними.

70. Тонке кільце радіусом $R = 20$ см несе рівномірно розподілений заряд $Q=40$ нКл. Кільце обертається щодо осі, співпадаючої із одним із діаметрів кільця, з частотою $n=20$ с⁻¹. Визначити: 1) магнітний момент p_m , обумовлений обертанням зарядженого кільця; 2) відношення магнітного моменту до моменту імпульсу p_m / L якщо кільце має масу $m= 10$ г.

71. Диск радіусом $R=5$ см несе рівномірно розподілений по поверхні заряд $Q=0,1$ мкКл. Диск рівномірно обертається відносно осі, що проходить через його центр і перпендикулярний площині диска. Частота обертання $n=50$ с⁻¹. Визначити: 1) магнітний момент p_m кільцевого струму, створеного диском; 2) Відношення магнітного моменту, на час імпульсу p_m / L , якщо маса диска $m=100$ г.

72. По тонкому стержню довжиною $l=40$ см рівномірно розподілений заряд $Q=500$ нКл. Стержень приведений в обертання з постійною кутовою швидкістю

=20 рад/с щодо осі, перпендикулярної стержню і яка проходить через його середину. Визначити: 1) магнітний момент p_m , обумовлений обертанням зарядженого стержня; 2) відношення магнітного моменту до моменту імпульсу p_m/L якщо стержень має масу $m=10$ г.

73. Електрон в не збудженому атомі водню рухається навколо ядра по колу радіусом $R=0,53 \cdot 10^{-8}$ см. Вирахувати магнітний момент p_m еквівалентного кільцевого струму і механічний момент M , діючий на кільцевий струм, якщо атом поміщено у магнітне поле із індукцією $B=0,4$ Тл, спрямованої паралельно площині орбіти електрона.

74. Котушка з тонким провідником площею поперечного перерізу 50 см^2 , що містить 200 витків проводу, знаходиться в однорідному магнітному полі з напруженістю 10^3 А/м. Визначити магнітний момент котушки та обертальний механічний момент, що діє на котушку, якщо пропускати через неї струм в 2 А. Площина котушки складає кут 60° з лініями індукції магнітного поля.

75. Знайти магнітний момент рамки радіусом 5 см, якщо при проходженні через її витки струму в центрі рамки створюється індукція магнітного поля 0,5 Тл.

76. Напруженість магнітного поля в центрі колового витка рівна 100 А/м. Магнітний момент витка $5 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Знайти радіус витка і силу струму в витку.

77. Вважаючи, що електрон в атомі водню рухається навколо ядра по коловій орбіті деякого радіусу, знайти відношення магнітного моменту еквівалентного колового струму до моменту імпульсу орбітального руху електрона p_m/L . Заряд електрона та його масу рахувати відомими (див. Додаток). Показати на малюнку напрям векторів p_m та L .

78. Електрон в не збудженому атомі водню рухається навколо ядра по колу радіусом $0,53 \cdot 10^{-10}$ м. Визначити магнітний момент еквівалентного колового струму та механічний момент, що діяв би на цей струм, якщо атом знаходився б в магнітному полі з індукцією 0,4 Тл. Вектор індукції магнітного поля направлений паралельно площині орбіти електрона.

79. Рамка площею 10 см^2 може обертатися в однорідному магнітному полі з індукцією 5 мТл. Визначити максимальний механічний обертальний момент, що діє

на рамку, при проходженні в ній струму силою 5 А.

80. Протон рухається по колу в однорідному магнітному полі з індукцією 2 Тл. Визначити силу еквівалентного колового струму, що створюється рухом протона.

81. Тонкий провід у вигляді кільця масою $m=5$ г вільно підвішений на нитці однорідному магнітному полі. По кільцю тече струм силою $I=6$ А. Період T малих обертаючих коливань що до прямовисної осі рівне 2,2 с. Знайти індукцію B магнітного поля.

82. Із тонкої дроту масою $m=4$ г виготовлена квадратна рамка. Рамка вільно підвішена на не пружній нитці і по ній пропущений струм силою $I=1$ А. Визначити частоту малих коливань рамки в магнітному полі з індукцією $B=0$ мТл

83. Тонке кільце радіусом $R=20$ см несе рівномірно розподілений заряд $Q=40$ нКл. Кільце обертається що до осі, співпадаючої із одним із діаметрів кільця, з частотою $n=20$ с⁻¹. Визначити: 1) магнітний момент p_m , обумовлений обертанням зарядженого кільця; 2) відношення магнітного моменту до моменту імпульсу p_m/L якщо кільце має масу $m=10$ г.

84. Диск радіусом $R=5$ см несе рівномірно розподілений по поверхні заряд $Q=0,1$ мкКл. Диск рівномірно обертається відносно осі, що проходить через його центр і перпендикулярний площині диска. Частота обертання $n=50$ с⁻¹. Визначити: 1) магнітний момент p_m кільцевого струму, створеного диском; 2) Відношення магнітного моменту, на час імпульсу p_m/L , якщо маса диска $m=100$ г.

85. По тонкому стержню довжиною $l=40$ см рівномірно розподілений заряд $Q=500$ нКл. Стержень приведений в обертання з постійною наріжною швидкістю $\omega=20$ рад/с щодо осі, перпендикулярною стержню що проходить через його середину. Визначити: 1) магнітний момент p_m , обумовлений обертанням зарядженого стержня; 2) відношення магнітного моменту до моменту імпульсу p_m/L якщо стержень має масу $m=10$ г.

86. Електрон в атомі водню рухається навколо ядра по кільцевій орбіті деякого радіусі. Знайти відношення магнітного моменту еквівалентного кільцевого струму на час імпульсу орбітального руху електрона p_m/L . Заряд електрона і його масу рахувати відомими. Вказати на кресленні напрям векторів p_m і L .

87. Електрон в не збудженому атомі водню рухається навколо ядра по колу радіусом $R=0,53 \cdot 10^{-8}$ см. Вирахувати магнітний момент p_m еквівалентного кільцевого струму і механічний момент M , діючий на кільцевий струм, якщо атом поміщено у магнітне поле із індукцією $B=0,4$ Тл, спрямованої паралельно площині орбіти електрона.

88. Частка, що несе один елементарний заряд, влетіла в однорідне магнітне поле з індукцією $B=0,2$ Тл під кутом $\alpha = 30^\circ$ до напрямку ліній індукції. Визначити силу Лоренца F_L якщо швидкість частки $V=10,5$ м/с.

89. Частка, що несе один елементарний заряд, влетіла в однорідне магнітне поле із індукцією $B=0,01$ Тл. Визначити момент імпульсу L , яким оволоділа частка при русі в магнітному полі, якщо радіус траєкторія частки рівна $R=0,5$ мм.

90. α – частка, прискорена різницею потенціалів $U=1000$ В, влетіла в однорідне магнітне поле, спрямоване перпендикулярно швидкості частки. Визначити напруженість магнітного поля, знаючи, що момент імпульсу частки дорівнює $M=10^{21}$ кг·м²/с.

91. Протони в магнітному полі з індукцією $B=5 \cdot 10$ Тл рухаються у вакуумі по дузі кола радіусом $r=50$ см. Яку прискорену різницю потенціалів вони повинні пройти?

92. Заряджена частка пройшла прискорену різницю потенціалів $U=104$ В і влетіла в схрещені під прямим кутом електричне ($E=10$ кв/м) і магнітне ($B=0,1$ Тл) поле. Знайти відношення g/m заряду частки до її маси, якщо, рухаючись перпендикулярно до обох полів, частка не відхиляється від прямолінійної траєкторії.

93. Електрон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до силових ліній. Швидкість електрона $V=4 \cdot 10^7$ м/с. Індукція магнітного поля $B=10^3$ Тл. Чому дорівнює нормальне прискорення електрона в магнітному полі?

94. Частка з енергією $W=16$ МеВ, рухається в однорідному магнітному полі з індукцією $B=2,4$ Тл в колі радіусом $r=24,5$ см. Визначити заряд частки, якщо її швидкість $V=2,72 \cdot 10$ м/с.

95. Електрон рухається по колу в однорідному магнітному полі зі швидкістю $V=0,8c$ (c -швидкість світла). Магнітна індукція B поля дорівнює $0,01$ Тл. Визначити

радіус кола в двох випадках: 1) не враховуючи зміни імпульсу зі швидкістю; 2) враховуючи цю залежність.

96. Електрон, що має кінетичну енергію $W=1,5$ МеВ, рухається в однорідному магнітному полі по колу. Магнітна індукція B поля дорівнює $0,02$ Тл. Визначити період обертання T , враховуючи залежність імпульсу частинки від її швидкості.

97. Якою повинна бути швидкість електрона, щоб його траєкторія була прямолінійна при русі у взаємно-перпендикулярних магнітному й електричному полях. Поля однорідні і мають напруженість відповідно $H=100$ А/м і $E=500$ В/м.

98. Частка, що несе елементарний заряд, влетіла в однорідне магнітне поле з індукцією $B=0,5$ Тл. Визначити момент імпульсу L частинки при русі в магнітному полі, якщо її траєкторія – дуга кола радіусом $R=0,1$ см.

99. В однорідному магнітному полі з напруженістю $H=500$ А/м розміщена плоска кругла рамка $R=10$ см. Кут між нормаллю до площини й напрямом магнітного поля $\alpha=60^\circ$. Визначити магнітний потік Φ через дану площу, якщо $\mu=1$.

100. В електронно-променевої трубі пучок електронів, пройшовши прискорювальну різницю потенціалів 15 кВ, рухається потім від анода до екрана, створюючи в центрі його світлова пляма. При накладенні однорідного магнітного поля з індукцією $B=-0,45$ мТл, спрямованого перпендикулярно до осі трубки, пляма на екрані змістилася на $a=50$ мм. Знаючи, що екран віддалений від анода на 300 мм, визначити питомий заряд e/m електрона.

101. Електрон рухається в однорідному магнітному полі перпендикулярно лініям індукції. Визначити силу F , діючу на електрон з боку поля, якщо індукція поля $B=0,2$ Тл, а радіус кривизни траєкторії $R=0,2$ см.

102. Заряджена частка з кінетичною енергією $T=2$ кеВ рухається в однорідному магнітному полі по колу радіусом $R=4$ мм. Визначити силу Лоренца F_L , діючу на частку з боку поля.

103. Електрон рухається по колу в однорідному магнітному полі із напруженістю $H=5 \cdot 10^3$ А/м. Визначити частоту поведження n електрона.

104. Електрон рухається в магнітному полі з індукцією $B=4$ мТл по колу радіусом $R=0,8$ см. Яка кінетична енергія T електрона?

105. Протон залетів в однорідне магнітне поле під кутом $\alpha=60^\circ$ до напрямку ліній поля і рухається по спіралі, радіус якої $R=2,5$ см. Індукція магнітного поля $B=0,05$ Тл. Знайти кінетичну енергію T протона.

106. Протон і α - частка, прискорені однаковою різницею потенціалів, влітають в однорідне магнітне поле. В скільки раз R_1 кривизни траєкторії протона більше радіусу R_2 кривизни траєкторії α - частки?

107. Два іони з однаковими зарядами, пройшовши одну і ту ж що прискорює різницю потенціалів, влетіли в однорідне магнітне поле перпендикулярно лініям індукції. Один іон, маса якого $m_1=12$ а.о.м., описав дугу окружності радіусом $R_1=2$ см. Визначити масу m_2 (в а.о.м.) іншого іона, що описав дугу окружності радіусом $R_2=2,31$ см.

108. Протон рухається по колу в однорідному магнітному полі ($B=2$ Тл). Визначити силу еквівалентного колового струму I , що створюється рухом протона.

109. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 10$ мТл по гвинтовій лінії, радіус якої $R = 1,5$ см і крок $h = 10$ см. Визначити період T поведінки електрона і його швидкість v .

110. В однорідному магнітному полі з індукцією $B=2$ Тл рухається α - частка. Траєкторія її руху становить гвинтову лінію з радіусом $R=1$ см і кроком $h=6$ см. Визначити кінетичну енергію T протона.

111. Перпендикулярно магнітному полю ($H=1$ кА/м) збуджено електричне поле ($E=200$ В/см). Перпендикулярно полям рухається, не відхиляючись від прямолінійної траєкторії, заряджена частка. Визначити швидкість α частки.

112. Заряджена частка пройшла прискорюючу різницю потенціалів і влетіла в схрещене під прямим кутом електричне ($E=400$ В/м) і магнітне ($B=0,2$ Тл) поля. Визначити що прискорить різницю потенціалів U , якщо, рухаючись перпендикулярно полям, частка не випробовує відхилень від прямолінійної траєкторії. Відношення заряду до маси частки $e/m=9,64 \cdot 10^7$ Кл/кг.

113. Частка, що несе один елементарний заряд, влетіла в однорідне магнітне поле із індукцією $B=0,01$ Тл. Визначити момент імпульсу L , яким оволоділа частка при русі в магнітному полі, якщо радіус траєкторія частки рівна $R=0,5$ мм.

114. Електрон рухається в однорідному магнітному полі перпендикулярно лініям індукції. Визначити сил F , діючу на електрон з боку поля, якщо індукція поля $B=0,2$ Тл, а радіус кривизни траєкторії $R=0,2$ см.

115. Заряджена частка з кінетичною енергією $T=2$ кеВ рухається в однорідному магнітному полі по колу радіусом $R=4$ мм. Визначити силу Лоренца F_L , діючу на частку з боку поля.

116. Електрон рухається по колу в однорідному магнітному полі із напруженістю $H=5 \cdot 10^3$ А/м. Визначити частоту поведження електрона.

117. Електрон рухається в магнітному полі з індукцією $B=4$ мТл по колу радіусом $R=0,8$ см. Яка кінетична енергія T електрона?

118. Протон залетів в однорідне магнітне поле під кутом $\alpha = 60^\circ$ до напрямку ліній поля і рухається по спіралі, радіус якої $R = 2,5$ см. Індукція магнітного поля $B = 0,05$ Тл. Знайти кінетичну енергію T протона.

119. Протон і α - частка, прискорені однаковою різницею потенціалів, влітають в однорідне магнітне поле. В скільки раз R_1 кривизни траєкторії протона більше радіусу R_2 кривизни траєкторії α - частки?

120. Два іони з однаковими зарядами, пройшовши одну і ту ж що прискорює різницю потенціалів, влетіли в однорідне магнітне поле перпендикулярно лініям індукції. Один іон, маса якого $m_1 = 12$ а.о.м., описав дугу окружності радіусом $R_1 = 2$ см. Визначити масу m_2 (в а.о.м.) іншого іона, що описав дугу кола радіусом $R_2 = 2,31$ см.

121. Протон рухається по колу в однорідному магнітному полі ($B=2$ Тл). Визначити силу еквівалентного колового струму I , що створюється рухом протона.

122. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 10$ мТл по гвинтовій лінії, радіус якої $R = 1,5$ см і крок $h = 10$ см. Визначити період T поведження електрона і його швидкість v .

123. В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 2$ Тл рухається α - частка. Траєкторія її руху становить гвинтову лінію з радіусом $R = 1$ см і кроком $h = 6$ см. Визначити кінетичну енергію T протона.

124. Перпендикулярно магнітному полю ($H=1$ кА/м) збуджено електричне

поле ($E=200$ В/см). Перпендикулярно полям рухається, не відхиляючись від прямолінійної траєкторії, заряджена частка. Визначити швидкість частки.

125. Заряджена частка пройшла прискорюючу різницю потенціалів і влетіла в схрещене під прямим кутом електричне ($E=400$ В/м) і магнітне ($B=0,2$ Тл) поля. Визначити що прискорить різницю потенціалів U , якщо, рухаючись перпендикулярно полям, частка не випробовує відхилень від прямолінійної траєкторії. Відношення заряду до маси частки $e/m = 9,64 \cdot 10^7$ Кл/кг.

126. Протон і альфа-частинка, що прискорені однаковою різницею потенціалів, влітають в однорідне магнітне поле. В скільки разів радіус кривизни траєкторії протона буде більшим, чим радіус кривизни траєкторії альфа-частинки?

127. Елементарна частинка, що несе один елементарний заряд, влетіла в однорідне магнітне поле із індукцією $0,01$ Тл. Визначити момент імпульсу частинки L при русі в цьому магнітному полі, якщо радіус її траєкторії дорівнює $0,5$ мм.

128. Електрон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно лініям індукції. Визначити силу, що діє на електрон з боку поля, якщо індукція поля $0,5$ Тл, а радіус кривизни траєкторії 1 см.

129. Заряджена частинка з кінетичною енергією 10 кеВ рухається в однорідному магнітному полі по колу радіусом 5 мм. Визначити силу Лоренца, що діє на частинку з боку поля. Врахувати, що 1 еВ $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

130. Електрон рухається в магнітному полі з індукцією 5 мТл по колу радіусом 1 см. Визначити кінетичну енергію електрона (в Дж та еВ).

131. Протон влетів в однорідне магнітне поле під кутом 60° до напрямку ліній індукції магнітного поля і рухається по спіралі, радіус якої 2 см. Індукція магнітного поля $0,1$ Тл. Знайти кінетичну енергію протона (в Дж та еВ).

132. Два іони з однаковими зарядами, що пройшли одну і ту ж прискорюючу різницю потенціалів, влетіли в однорідне магнітне поле перпендикулярно лініям індукції. Перший іон, маса якого 12 а.о.м., описав дугу кола радіусом 2 см. Визначити масу (в атомних одиницях маси) другого іона, якщо він описав дугу радіусом $2,31$ см.

133. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 10 мТл

по гвинтовій лінії, радіус якої 1,5 см і крок 10см. Визначити період обертання електрона та його швидкість.

134. Елементарна частинка, що несе один елементарний заряд, влітає в однорідне магнітне поле з індукцією 0,2 Тл під кутом 30° до напрямку ліній індукції магнітного поля. Визначити величину сили Лоренца, якщо швидкість частинки 10^5 м/с.

135. Перпендикулярно однорідному магнітному полю з індукцією 2 мТл створено електричне поле 5 кВ/м. Перпендикулярно полям влітає альфа-частинка зі швидкістю 2 Мм/с. Визначити нормальне та тангенціальне прискорення частинки в момент входження її в поля.

136. Перпендикулярно до магнітного поля з напруженістю 10^3 А/м створено електричне поле напруженістю 10^4 В/м. Перпендикулярно до обох полів рухається без відхилення від прямолінійної траєкторії заряджена частинка. Визначити швидкість частки.

137. Плоский конденсатор, між пластинами якого створено електричне поле напруженістю 1000 В/м, поміщений в магнітне поле так, що силові лінії полів взаємно перпендикулярні. Яка повинна бути індукція магнітного поля, щоб електрон з початковою енергією 5кеВ, що влетів в простір між пластинами конденсатора перпендикулярно до силових ліній магнітного поля, не змінив напрямку руху?

138. Заряджена частинка пройшла прискорюючу різницю потенціалів і влетіла в схрещене під прямим кутом електричне (з напруженістю 10^4 В/м) і магнітне (з індукцією 0,5 Тл) поля. Визначити прискорюючу різницю потенціалів, якщо, рухаючись перпендикулярно полям, частинка не відхиляється від прямолінійної траєкторії.

139. Плоский конденсатор, між пластинами якого створено електричне поле ($E=100$ В/м), поміщений в магнітне поле так, що силові лінії полів взаємно перпендикулярні. Яка повинна бути індукція В магнітного поля, щоб електрон з початковою енергією $T=4$ кеВ, що влетів в простір між пластинами конденсатора перпендикулярно силовим лініям магнітного поля, не змінив напрямки швидкості?

140. Перпендикулярно однорідному магнітному полю ($B=1$ мТл) збуджено

однорідне електричне поле ($E=1$ кВ/м). Перпендикулярно полям влітає α - частка зі швидкістю $v=Мм/с$. Визначити нормальне a_n і тангенціальне a прискорення a частки в момент входження її в поле.

141. Стержень довжиною $l=1$ м обертається в однорідному магнітному полі навколо осі, що проходить через кінець стержня паралельної лінії магнітної індукції. Знайти магнітну індукцію поля. Якщо стержень перетинає за один оберт потік $\Phi=2$ Вб.

142. Циркуляція магнітного поля по контуру, що охоплює чотирьохжильний підводний кабель, дорівнює 15А. Знайти величину й напрямок струму у четвертій жилі, якщо знаємо. Що по двом першим жилам протікають струми однакового напрямку, рівні 5А, а по третій іде струм 3А, напрям цього струму протилежний напрямку перших двох.

143. Потік магнітної індукції Φ крізь соленоїд (без серцевини) дорівнює 5мкВб. Знайти магнітний момент цього соленоїда, якщо його довжина $l=25$ см.

144. Вирахувати циркуляцію вектора індукції вздовж контуру, що охоплює струм $I_1=10$ А, $I_2=15$ А, які течуть в одному напрямі, й струм $I_3=20$ А, що тече у протилежному напрямі.

145. Соленоїд довжиною $l=1$ м і перерізом $S=16$ см² має $N=2000$ витків. Визначити потокозчеплення ψ при силі струму I в обмотці 10А.

146. Плоский контур, площа якого $S=25$ см², знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,04$ Тл. Визначити магнітний потік, пронизуючий контур, якщо площа його складає кут $\beta=30^\circ$ з лініями індукції.

147. Плоский контур із струмом $I=5$ А вільно розташувався в однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,4$ Тл, площа контуру $S=200$ см², підтримуючи струм в контурі незмінним, його повернули відносно вісі, що лежить у площині контуру, на кут $\alpha=40^\circ$. Визначити здійснену при цьому роботу.

148. В однорідному магнітному полі перпендикулярно до ліній індукції розташований плоский контур площею $S=100$ см², підтримуючи у контурі постійний струм $I=50$ А, контур змістили з поля в область простору, де поле відсутнє. Встановити індукцію B магнітного поля, якщо при переміщенні контуру була

здійснена робота $A=0,4$ Дж.

149. Рамка з $N=1000$ витків, площею $S=100\text{см}^2$, рівномірно обертається з частотою $n=10\text{ с}^{-1}$ в магнітному полі напруженістю $H=10^4$ А/м. Вісь обертання лежить у площині рамки й перпендикулярна до ліній напруженості. Визначити максимальну ЕДС індукції $\mathcal{E}_{\text{max}}$, що виникає в рамці.

150. У однорідному магнітному полі, індукція якого $B=0,5$ Тл, рівномірно рухається провідник довжиною $l=10$ см. по провіднику тече струм $I=2$ А. Швидкість руху провідника $V=20$ см/с й направлена перпендикулярно до вектора індукції B . знайти роботу переміщення провідника за час $t=10$ с.

151. У однорідному магнітному полі з напруженістю $H=500$ А/м вміщена кругла рамка радіуса $R=10$ см. кут між нормаллю до площини рамки та напрямом магнітного поля $\varphi=60^\circ$. Визначити магнітний потік Φ через дану рамку, якщо $\mu=1$.

152. Скільки ампер-витків на одному метрі довжини має замкнутий соленоїд перерізом $S=10\text{см}^2$ з залізною серцевиною ($\mu=1400$), якщо магнітний потік Φ всередині нього дорівнює $5 \cdot 10^4$ Вб?

153. В однорідному магнітному полі, індукція якого $B=0,8$ Тл рівномірно обертається рамка з кутовою швидкістю $\omega = 15$ рад/с. Площа рамки $S = 150\text{ см}^2$. Вісь обертання перебуває в площині рамки й становить $\alpha=30^\circ$ напрямком силових ліній магнітного поля. Знайти максимальну Е.Р.С. індукції в обертівій рамці.

154. На відстані $d = 1$ м від довгого прямого провідника зі струмом $J = 1,1 \cdot 10^3$ А перебуває кільце радіусом $r=1$ см. Кільце розташоване так, що потік, що пронизує його, максимальний. Чому дорівнює кількість електрики q , що протече по кільцю, якщо струм у провіднику буде виключений? Опір кільця $R=10$ Ом.

155. Соленоїд має сталевий, повністю розмагнічений сердечник об'ємом $V=200\text{ см}^3$. Напруженість магнітного поля соленоїда при силі струму $J=0,5$ А дорівнює $H = 700$ А/м. Визначити індуктивність соленоїда.

156. Контури I й II (рис. 3.7) перебувають у змінних магнітних полях. Потік вектора індукції в першому контурі міняється за законом $\Phi_1 = A_1 t$, а в другому контурі – за законом $\Phi_2 = A_2 t$. На інших ділянках ланцюга магнітне поле відсутнє. Знайти струми в цих контурах, якщо $R_1=100$ Ом; $R_2=200$ Ом; $A_1=100$ Вб/з; $A_2=60$ Вб/с.

157. При деякій силі струму щільність енергії магнітного поля соленоїда (без сердечника) дорівнює $W = 0,2 \text{ Дж/м}$. У скільки разів збільшиться щільність енергії поля при тій же силі струму, якщо в соленоїд вставити залізний сердечник?

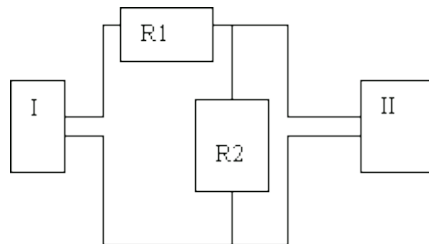


Рис. 3.7

158. По котушці, індуктивність якої дорівнює $0,03 \text{ мГн}$, тече струм $I=0,6 \text{ А}$. При розімкненні кола струм зменшується практично до нуля за час $\Delta t=120 \text{ мкс}$. Визначити середню ЕРС самоіндукції $\langle E_c \rangle$, виникаючої в контурі.

159. Індуктивність котушки $L=2 \text{ мГн}$. Струм частотою $V=50 \text{ Гц}$, що протікає по котушці, змінюється по синусоїдальному закону. Визначити середню ЕРС самоіндукції $\langle E_c \rangle$, що виникає за інтервал часу Δt , на протязі якого струм в котушці змінюється від мінімального до максимального значення. Амплітудне значення струму $I_0=10 \text{ А}$.

160. Соленоїд з площиною перерізу S , яке дорівнює 5 см^2 , містить $N=1200$ витків. Індукція B магнітного поля всередині соленоїда при силі струму $I=2 \text{ А}$ дорівнює $0,01 \text{ Тл}$. Визначити індуктивність L соленоїда.

161. Соленоїд містить $N=1000$ витків. Площа S перерізу серцевини дорівнює 10 см^2 . По обмотці тече струм, утворюючи поле з індукцією $B=1,5 \text{ Тл}$. Знайти середню ЕРС індукції $\langle E_c \rangle$, виникаючої в соленоїді, якщо струм зменшити до нуля за час $\Delta t=500 \text{ мкс}$.

162. В колі проходить струм силою $I_0=50 \text{ А}$. Джерело струму можна відключити від кола, не розриваючи його. Визначити силу струму I у цьому колі через $t=0,01 \text{ с}$ після відключення її від джерела струму. Опір R кола дорівнює 20 Ом , її індуктивність $L=0,1 \text{ Гн}$.

163. Джерело струму замкнене на котушку з опором $R=10 \text{ Ом}$ і індуктивністю $L=1 \text{ Гн}$. Через який час сила струму замикання дійде до $0,9$ максимального значення?

164. По котушці, на якій намотано $N=590$ витків дроту, проходить струм

силою $I=2\text{А}$. Індуктивність котушки $L=0,16\text{Гн}$, поперечний переріз $S=25\text{см}^2$. Визначити магнітний потік в середині котушки й індукцію магнітного поля.

165. По котушці, яка має індуктивність $L=0,15\text{Гн}$, пропускають струм силою $I=4\text{А}$. Визначити потокозчеплення ψ й магнітний потік Φ котушки, якщо на неї намотано 30 витків дроту.

166. На котушку діаметром $d=2\text{см}$ намотано $N=100$ витків мідного дроту перерізом $S=0,5\text{мм}^2$, коефіцієнт самоіндукції котушки $L=62,6\cdot 10^{-8}\text{Гн}$. Яка напруга буде на її кінцях, якщо вона підключена до джерела постійного струму і по ній тече струм силою $I=5\text{А}$?

167. Плоский контур площею $S=20\text{ см}^2$ знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,03\text{ Тл}$. Визначити магнітний потік Φ , що пронизує контур, якщо площа його складає кут $\alpha = 60^\circ$ з напрямом ліній індукції.

168. Магнітний потік Φ через перетин соленоїда дорівнює 50 мкВб . Довжина соленоїда 50 см . Знайти магнітний момент p_m соленоїда, якщо його витки щільно прилягають один до одного.

169. На довгий картонний каркас діаметром $d=5\text{ см}$ укладена одношарова обмотка (виток до витка) із дроту діаметром $d=0,2\text{ мм}$. Визначити магнітний потік Φ , що створюється таким соленоїдом при силі струму $I=0,5\text{А}$.

170.445. Квадратний контур з стороною $a=10\text{ см}$, в якому тече струм силою $I=6\text{ А}$, знаходиться в магнітному полі з індукцією $B=0,8\text{ Тл}$ під кутом $\alpha=50^\circ$ до ліній індукції. Яку роботу A треба вчинити, щоб при незмінній силі струму в контурі змінити його форму на коло?

171. Плоский контур з струмом силою $I=5\text{ А}$ вільно встановився в однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,4\text{ Тл}$. Площа контура $S=200\text{ см}^2$. Піддержуючи струм в контурі незмінним, його повернули відносно осі, що лежить в площині контура, на кут $\alpha=40^\circ$. Визначити досконали при цьому роботу A .

172. Виток, в якому підтримується постійна сила струму $I=60\text{ А}$, вільно установився в однорідному магнітному полі ($B=20\text{ мТл}$). Діаметр витка $d=10\text{ см}$. Яку роботу треба виконати, щоб повернути виток відносно осі, співпадаючої з діаметром, на кут $\alpha=\pi/3$?

173. В однорідному магнітному полі перпендикулярно лініям індукції розташований плоский контур площею $S=100 \text{ см}^2$. Підтримуючи в контурі постійну силу струму $I=50 \text{ А}$, його перемістили з поля в область простору де поле відсутнє. Визначити індукцію B магнітного поля, якщо при переміщуванні контура була виконана робота $A=0,4 \text{ Дж}$.

174. Рамка площею $S=0,01 \text{ м}^2$ рівномірно обертається з частотою $n=5 \text{ с}^{-1}$ щодо осі, що лежить в площині рамки і перпендикулярній лініям індукції однорідного магнітного поля ($B=0,5 \text{ Тл}$) визначити середнє значення е.р.с. індукції $\langle E_i \rangle$ за час, протягом якого магнітний потік, що пронизує рамку, зміниться від нуля до максимального значення.

175. Рамка, що містить $N=1000$ витків площею $S=100 \text{ см}^2$ рівномірно обертається з частотою $n=10 \text{ с}^{-1}$ в магнітному полі напруженістю $H=10^4 \text{ А/м}$. Вісь обертання лежить в площині рамки і перпендикулярна лініям напруженості. Визначити максимальну е. д. с. Індукції S_{max} , що виникає в рамці.

176. В однорідному магнітному полі ($B=0,1 \text{ Тл}$) рівномірно з частотою $n=5 \text{ с}^{-1}$ обертається стержень довжиною 50 см так, що площина його обертання перпендикулярна лініям напруженості, а вісь обертання відбувається через один з його кінців. Визначити індуковану на кінцях стержня різницю потенціалів U .

177. В однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,5 \text{ Тл}$ обертається з частотою $n=10 \text{ с}^{-1}$ стержень довжиною 20 см . Вісь обертання паралельна лініям індукції і проходить крізь один з кінців стержня перпендикулярно його осі. Визначити різницю потенціалів U на кінцях стержня.

178. В кільце із провідника, приєднане до балістичного гальванометру, помістили магніт. При цьому по ланцюгу пройшов заряд $Q=50 \text{ мкКл}$. Визначити зміну магнітного потоку $\Delta\Phi$ через кільце, якщо опір ланцюга гальванометру $R = 10 \text{ Ом}$.

179. Соленоїд перетином $S=10 \text{ см}^2$ містить $N=1000$ витків. Індукція B магнітного поля всередині соленоїда при силі струму $I=5 \text{ А}$ рівна $0,1 \text{ Тл}$. Визначити індуктивність L соленоїда.

180. На картонний каркас довжиною $l=0,8 \text{ м}$ і діаметром $D=4 \text{ см}$ намотаний

в один шар провід діаметром $d=0,25$ мм так, що витки щільно прилягають один до одного. Обчислити індуктивність L отриманого соленоїда.

181. Котушка, намотана на немагнітний циліндричний каркас, має $N=250$ витків і індуктивність $L_1=36$ мГн. Щоб збільшити індуктивність котушки до $L_2 = 100$ мГн, обмотку котушки зняли і замінили обмоткою з більш тонкого дроту з таким розрахунком, щоб довжина котушки залишилась початковою. Скільки витків опинилося в котушці після перемотки?

182. Індуктивність соленоїда, намотаного в один шар на не магнітний каркас, $L=0,5$ мГн. Довжина соленоїда $l=0,6$ м, діаметр $D=2$ см. Визначити відношення n числа витків соленоїда до його довжини.

183. Соленоїд містить $N=600$ витків. При силі струму $I=10$ А магнітний потік $\Phi=80$ мкВб. Визначити індуктивність L соленоїда.

184. Соленоїд має сталений повністю розмагнічений сердечник обсягом $V = 500$ см³. Напруженість H магнітного поля соленоїда при силі струму $I=0,6$ А рівна 1000 А /м. Визначити індуктивність L соленоїда

185. Силу струму в котушці рівномірно збільшують за допомогою реостата на $\Delta I=0,6$ А в секунду. Знайти середнє значення е.р.с. $\langle S_i \rangle$ самоіндукції, якщо індуктивність котушки $L=5$ мГн.

186. Соленоїд містить $L=800$ витків. Перетин сердечника (із немагнітного матеріалу) $S=0$ см². По обмотці протікає струм, утворюючий поле з індукцією $B=8$ мТл. Визначити середнє значення е.р.с. $\langle S_s \rangle$ самоіндукції яка з'являється на клемх соленоїда, якщо сила струму зменшується практично до нуля за час $\Delta t = 0,8$ мс.

187. По котушці індуктивністю $L=8$ мкГн протікає струм силою $I=6$ А. При виключенні струму його сила змінюється практично до нуля за час $\Delta t=5$ мс. Визначити середнє значення е.р.с. $\langle S_s \rangle$ самоіндукції, що виникає в контурі.

188. Плоский контур площею 50 см² знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $0,03$ Тл. Визначити величину магнітного потоку, що пронизує контур, якщо площина його складає кут 60° до напрямку ліній індукції магнітного поля.

189. Всередині соленоїда, що містить 10 витків на один см, помістили

коловий виток діаметром 5 см. Площина витка розташована під кутом 60° до осі соленоїда. Визначити магнітний потік, що пронизує виток, якщо по обмотці соленоїда протікає струм, силою 1 А.

190. На довгий картонний каркас діаметром 10 см вкрито в один шар обмотку (виток до витка) із дроту діаметром 0,3 мм. Визначити магнітний потік, що створюється таким соленоїдом при силі струму в 1А.

191. Магнітний потік через поперечний переріз соленоїда дорівнює 0,5 мВб. Довжина соленоїда 30 см. Знайти магнітний момент p_m соленоїда, якщо його витки щільно прилягають один до одного.

192. В однорідному магнітному полі перпендикулярно лініям індукції розташований плоский контур площею 200см^2 . Підтримуючи в контурі постійну силу струму в 10А, його перемістили з магнітного поля в простір, де магнітне поле відсутнє. Визначити індукцію магнітного поля, якщо при переміщенні контуру була виконана робота 5 Дж.

193. Плоский контур зі струмом силою 10А вільно встановився в однорідному магнітному полі з індукцією 0,5 Тл. Площа контуру рівна 500см^2 . Підтримуючи струм в контурі незмінним, його повернули відносно осі, що лежить в площині контуру, на кут 60° . Визначити виконану при цьому роботу.

194. Квадратний контур зі стороною 5 см, в якому тече струм силою 2 А, знаходиться в магнітному полі з індукцією 0,1 Тл. Площина контуру розміщена під кутом 60° до ліній індукції магнітного поля. Яку роботу треба виконати, щоб при незмінній силі струму в контурі змінити його форму на коло?

195. В витку, що має форму кола, підтримується постійна сила струму 10 А. Виток вільно встановився в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 5 мТл. Діаметр витка 20см. Яку роботу треба виконати, щоб повернути виток відносно осі, що лежить в площині витка, на кут рівний 45° ?

196. Плоский квадратний контур зі стороною 20 см, по якому проходить струм силою 10А, вільно встановився в однорідному магнітному полі з індукцією 5Тл. Яку роботу потрібно виконати при повороті контуру відносно осі, що проходить через середину його протилежних сторін, на кут рівний 90° .

197. Рамка площею 200см^2 рівномірно обертається з частотою 10 обертів за секунду відносно осі, що лежить в площині рамки і перпендикулярна лініям індукції однорідного магнітного поля з індукцією 2 Тл. Визначити середнє значення е.р.с. індукції за час, протягом якого магнітний потік, що пронизує рамку, зміниться від нуля до максимального значення.

198. Напруженість H магнітного поля замкненого кільцевидного соленоїда дорівнює 5600А/м . Середній діаметр d кільця дорівнює 20см , площа перерізу S магнітопроводу 5см^2 , магнітна проникність серцевини $\mu=800$. Знайти енергію магнітного поля соленоїда.

199. Обмотка тороїда містить $n=10$ витків на кожний сантиметр довжини. Серцевина не магнітна. При якій силі струму I в обмотці густина енергії ω магнітного поля дорівнює 1Дж/м^3 ?

200. На залізне кільце намотано в один шар $N=200$ витків. Визначити енергію W магнітного поля, якщо при струмі $I=2,5\text{А}$ магнітний потік Φ у залізі дорівнює $0,5\text{мВб}$.

201. При індукції B поля, яка дорівнює 1Тл , густина енергії ω магнітного поля у залізі 200Дж/м^3 . Визначити магнітну проникність μ заліза в цих умовах.

202. Індуктивність L контуру (без серцевини) дорівнює $0,1\text{мГн}$. При якій силі струму I енергія магнітного поля W дорівнює 100мкДж ?

203. Визначити об'ємну густину енергії ω магнітного поля у сталій серцевині, якщо індукція B магнітного поля дорівнює $0,5\text{Тл}$.

204. Напруженість магнітного поля тороїда зі сталюю серцевиною збільшилася від $H_1=200\text{А/м}$ до $H_2=800\text{А/м}$. Визначити, у скільки разів змінилася об'ємна густина енергії ω магнітного поля.

205. По обмотці тороїда тече струм силою $I=0,6\text{А}$. Витки дроту діаметром $d=0,4\text{мм}$ щільно прилягають один до одного (товщину ізоляції не враховувати). Знайти енергію W магнітного поля у сталій серцевині тороїда, якщо площа перерізу S його дорівнює 4см^2 , діаметр D середньої лінії дорівнює 30см .

206. По обмотці соленоїда індуктивністю $L=0,2\text{Гн}$ тече струм силою $I=10\text{А}$. Визначити енергію W магнітного поля.

207. Соленоїд містить 100 витків. Сила струму у його області дорівнює 1А, магнітний потік Φ через поперечний переріз соленоїда дорівнює 0,1мВб. Визначити енергію W магнітного поля.

208. Виток, в якому підтримується постійний струм $I=60\text{А}$, вільно розташований в однорідному магнітному полі з індукцією $B=20\text{ мТл}$. Діаметр витка $d=10\text{см}$. Яку роботу A потрібно здійснити для того, щоб обернути виток відносно осі, яка співпадає з діаметром, на кут $\alpha=\pi/3$?

209. В однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,4\text{Тл}$ у площині, перпендикулярної до ліній індукції поля, обертається стержень довжиною $l=10\text{см}$. вісь обертання проходить крізь один з його кінців. Визначити різницю потенціалів на кінцях стержня при частоті $n=16\text{с}^{-1}$.

210. Дротовий виток радіусом $r=4\text{см}$, який має опір $R=0,01\text{Ом}$, знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,04\text{Тл}$. Площина рамки складає кут $\alpha=30^\circ$ з лініями індукції поля. Яка кількість електрики Q пройде по витку, якщо магнітне поле зникне?

211. Прямий провідник довжиною $l=10\text{см}$ поміщений в однорідне магнітне поле з індукцією $B=1\text{ Тл}$. Кінці його замкнені гнучким дротом, що знаходиться за межами поля. Опір цього кола $R=0.4\text{ Ом}$. Яка потужність P потрібна для того, щоб рухати провідник перпендикулярно лініям індукції зі швидкістю $V=20\text{м/с}$?

212. Виток діаметром 20 см може обертатися біля вертикальної осі, що збігається з одним з діаметрів витка. Виток установлений у площині магнітного меридіана й по ньому пустили струм 10А. Який обертаючий момент потрібно прикласти до гвинта, щоб утримати його в початковому положенні? Горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі прийняти рівною $B=20\text{ мкТл}$.

213. Плоский контур зі струмом $J=10\text{А}$ и площею $S=100\text{ см}^2$ вільно встановлений в однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,1\text{Тл}$. Підтримуючи струм у контурі незмінним, контур повернули щодо осі, що лежить у площині контуру, на кут $\alpha=45$. Визначити зроблену при цьому роботу.

214. Літак летить горизонтально зі швидкістю $V = 900\text{ км/ч}$. Яка величина е.р.с. індукції E_i , що виникає на кінцях крил, якщо вертикальна складова

напруженості магнітного поля Землі $H_g=40$ А/м. Розмах крил 36,5 м. Чому дорівнює максимальна Е.Р.С., що може виникнути при польоті літака? Горизонтальна складова поля Землі $Hr= 16$ А/м.

215. Дротовий виток радіусом $R = 4$ см й опором $r = 0,01$ Ом перебуває в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,04$ Тл. Площина витка становить кут $\alpha = 45^\circ$ з лініями індукції. Яка кількість електрики q протече по витку, якщо магнітне поле виключити?

IV. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

1. Коливальний контур

1. Коливальним RLC-контуром називається замкнений електричний контур, у якому є конденсатор із ємністю C , омичний опір R та соленоїд з індуктивністю L . В цей контур може бути ввімкнено джерело струму із примусовою електрорушійною силою $E = E_0 \cos \omega t$. У загальному випадку протікання струму I в контурі на елементах контуру виникає

- напруга на опорі $U_R = IR$,
- напруга на конденсаторі $U_C = \frac{q}{C}$,
- ЕРС індукції у соленоїді $\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt}$.

2. Незгасаючі електромагнітні коливання

1. Незгасаючі вільні електромагнітні коливання, або близькі до них, виникають, коли в контурі без зовнішнього джерела енергії ($E = 0$) можна знехтувати омичним опором ($R \rightarrow 0$). В цьому випадку рівняння незгасаючих електромагнітних коливань буде мати вигляд

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0, \quad (4.1)$$

а його розв'язком є

$$q = q_0 \cos(\omega_0 t + \alpha). \quad (4.2)$$

Сталі розв'язку q_0 та α знаходяться з початкових умов, наприклад, якщо задано величини заряду на конденсаторі та струму у контурі в деякий момент часу t .

2. Характеристики коливань

- q_0 — амплітуда коливань,
- $\Phi = \omega_0 t + \alpha$ — фаза коливань,
- $\Phi_0 = \alpha$ — початкова фаза,

- частота коливань

$$\nu_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (4.3)$$

- період коливань

$$T_o = 1/\nu_o = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (4.4)$$

струм у колі

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega_o q_o \sin(\omega_o t + \alpha) = I_o \cos(\omega_o t + \alpha + \pi/2), \quad I_o = \omega_o q_o. \quad (4.5)$$

Коливання струму випереджають коливання заряду за фазою на $\pi/2$.

Напруга на обкладках конденсатора

$$U_{C0} = X_C I_o, \quad X_C = \frac{1}{\omega_o C}. \quad (4.6)$$

Напруга на соленоїді

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = -L\omega_o^2 q_o \cos(\omega_o t + \alpha) = U_{0L} \cos(\omega_o t + \alpha + \pi), \quad (4.7)$$

$$U_{0L} = L\omega_o^2 q_o = L\omega_o \cdot q_o \omega_o, \quad U_{0L} = X_L I_o, \quad X_L = L \omega_o. \quad (4.8)$$

Величини X_C та X_L , що фігурують в (4.7) та (4.8) називаються реактивними опорами конденсатора та індуктивності відповідно. Магнітну енергію можна записати у вигляді

$$W_m = \frac{q_o^2}{4C} [1 - \cos(2\omega_o t + 2\alpha)]. \quad (4.9)$$

Таким чином одержимо

$$\langle W_e \rangle = \langle W_m \rangle = \frac{q_o^2}{4C},$$

а повна енергія буде такою

$$W = \langle W_e \rangle + \langle W_m \rangle = \frac{q_o^2}{2C} = \frac{1}{2} L \omega_o^2 q_o^2. \quad (4.10)$$

- Хвильовий опір контуру змінному струмові визначається так

$$\rho = \frac{\mathcal{E}_{0L}}{I_0} = L\omega_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.11)$$

3. Вільні згасаючі електромагнітні коливання

1. Вільні згасаючі електромагнітні коливання виникають у RLC-контурі у тому випадкові, коли в ньому відсутнє зовнішнє джерело енергії ($\mathcal{E}=0$). Рівняння цих коливань запишеться у вигляді

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\gamma \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \quad (4.12)$$

а його розв'язком є

$$q = A(t) \cdot \cos(\omega t + \alpha), \quad A(t) = A_0 \cdot e^{-\gamma t}, \quad (4.13)$$

де

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad \omega = \frac{R}{2L} \sqrt{\left(\frac{2\rho}{R}\right)^2 - 1} \quad (4.14)$$

циклічна частота.

2. Характеристики згасаючих коливань

- **амплітуда коливань є спадною функцією часу**

$$A(t) = A_0 e^{-\gamma t}, \quad (4.15)$$

- **період коливань**

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} = \frac{4\pi L}{R} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2\rho}{R}\right)^2 - 1}}, \quad (4.16)$$

- **час релаксації**

$$\tau = \frac{1}{\gamma} = \frac{2L}{R}, \quad (4.17)$$

- **число повних коливань за час релаксації**

$$N_e = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{\gamma T} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{2\rho}{R}\right)^2 - 1}, \quad (4.18)$$

- **логарифмічний декремент згасання**

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+\tau)} = \frac{R}{2L} T = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\rho}{R}\right)^2 - 1}}, \quad (4.19)$$

- **добротність контура**

$$Q = 2\pi \frac{A^2(t)}{A^2(t) - A^2(t+T)} = \frac{2\pi}{1 - e^{-2\gamma T}}, \quad (4.20)$$

У випадку малого опору, коли $R \ll 2\rho$ добротність буде

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.21)$$

Повний опір контуру (імпеданс) визначається так

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (4.22)$$

4. Вимушені коливання

Рівняння вимушених коливань у контурі, що виникають внаслідок дії

періодичного джерела струму $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos \omega t$ має вид

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\gamma \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = e_0 \cdot \cos \omega t \quad (4.23)$$

Струм у контурі має величину

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{Z}, \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (4.24)$$

Величина Z називається імпедансом і є повним опором струмові у RLC-контурі. Для зручності подальших викладок фазових співвідношень приймемо початкову фазу струму у вигляді

$$\phi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (4.25)$$

Тепер струм у колі запишеться у вигляді

$$I = I_0 \cos(\omega t - \phi), \quad (4.26)$$

а заряд

$$q = q_0 \cos(\omega t - \phi - \pi/2). \quad (4.27)$$

Напруга на опорі R становить

$$U_R = IR = U_{0R} \cos(\omega t - \phi), \quad U_{0R} = I_0 R \quad (4.28)$$

Напруга на індуктивності L.

$$U_L = U_{0L} \cos(\omega t - \phi + \pi/2) \quad (4.29)$$

є напруга на індуктивності з амплітудою

$$U_{0L} = X_L I_0. \quad (4.30)$$

Величина

$$X_L = \omega L \quad (4.31)$$

має розмірність опору і називається **реактивним опором індуктивності**.

Напруга на індуктивності випереджає напругу на опорі R за фазою на $\pi/2$.

Напруга на конденсаторі C

$$U_C = \frac{\mathcal{E}_o}{\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \cos(\omega t - \phi - \pi/2) \quad , \quad (4.32)$$

де

$$U_{0C} = X_C I_0 \quad (4.33)$$

є амплітуда напруги на конденсаторі. Величина

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (4.34)$$

має розмірність опору і називається **реактивним опором конденсатора**.

Напруга на конденсаторі U_C запізнюється відносно напруги на омичному опорі U_R за фазою на $\pi/2$.

Резонанс напруги. Напруга та заряд на конденсаторі є функцією зовнішньої частоти ω . Положення екстремуму задається резонансною частотою

$$\omega_{q\text{рез}} = \sqrt{\omega_o^2 - 2\gamma^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}} \leq \omega_o \quad (4.35)$$

і визначає їх максимальне значення. Для малих R коли, $\gamma \ll \omega_o$, резонансну частоту можна покласти рівною ω_o , і

$$U_{C\text{max}} = \frac{\mathcal{E}_o}{\omega_o RC} = \mathcal{E}_o \frac{\sqrt{LC}}{CR} = \frac{\mathcal{E}_o}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \mathcal{E}_o Q. \quad (4.36)$$

В одержаному виразі Q - є добротність контуру і вона показує у скільки разів напруга на конденсаторі при резонансі може перевищити прикладену напругу $\mathcal{E}_o$.

Резонанс струму. Максимальне значення струму в контурі задається мінімальним значенням імпедансу Z, яке визначається умовою $X_C = X_L$, тобто

$$\min \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R. \quad (4.37)$$

При цьому резонансна частота становить

$$\omega_{резI} = \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.38)$$

При резонансі струму його амплітуда буде максимальною

$$I_{o\text{рез}} = \frac{\mathcal{E}_o}{R}. \quad (4.39)$$

5. Змінний струм

Коли у контурі встановляться вимушені коливання, то їх можна розглядати як протікання змінного струму у колі, що містить у собі активний омичний опір R, індуктивність L та ємність C, викликаного прикладеною змінною напругою джерела струму

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_o \cos \omega t. \quad (4.40)$$

Струм у колі задається виразом

$$I = I_o \cos(\omega t - \varphi), \quad (4.41)$$

що відстає за фазою від $\mathcal{E}$ на φ . Амплітуда струму визначається виразом

$$I_o = \frac{\mathcal{E}_o}{Z}, \quad Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (4.42)$$

де величина Z називається повним електричним опором або імпедансом.

Таку ж потужність розвиває сталий струм, сила якого дорівнює

$$I_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0. \quad (4.43)$$

Величина I_{ef} називається діючим або ефективним значенням сили змінного струму I_0 , а величина

$$U_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathcal{E}_0. \quad (4.44)$$

називається діючим або ефективним значенням напруги. В термінах ефективних величин середню потужність можна записати у вигляді

$$P = I_{ef} U_{ef} \cos \phi. \quad (4.45)$$

6. Рівняння Максвелла

Повна система інтегральних або диференціальних рівнянь, що описують рух електромагнітного поля у просторі та часі називається рівняннями Максвелла.

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0;$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV,$$

i

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S};$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

6.1. Теорема Остроградського-Гауса

Потік вектора $\vec{a}$, що визначає деяке силове поле, через довільну замкнену поверхню S_V у цьому полі, дорівнює інтегралові від дивергенції вектора $\vec{a}$, взятому по об'єму V_S , обмеженого поверхнею S_V

$$\oint_{S_V} \vec{a} d\vec{S} = \iiint_{V_S} \text{div} \{ \vec{a} dV \} , \quad (4.46)$$

де

$$\text{div} \{ \vec{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} \} , \quad (4.47)$$

$d\vec{S} = \vec{n} dS$, $\vec{n}$ – вектор нормалі до елементу dS , a_x, a_y, a_z – проекції вектора $\vec{a}$ на осі x, y, z .

6.2. Теорема Стокса.

Циркуляція вектора $\vec{a}$, що визначає деяке силове поле, через довільний замкнутий контур L_S у цьому полі, дорівнює потокові вектора $\text{rot} \vec{a}$ (ротор $\vec{a}$) через поверхню S_L , натягнуту на контур L_S

$$\oint_{L_S} \vec{a} d\vec{l} = \iint_{S_L} \text{rot} \{ \vec{a} d\vec{S} \} . \quad (4.48)$$

6.3. Струм зміщення

Струм зміщення характеризує "магнітну дію" змінного електричного поля.

Максвелл висунув гіпотезу, згідно якої через діелектрик протікає струм $I_{зм}$ рівний струму I , який було названо струмом зміщення. Густина струму зміщення можна записати у виді

$$\vec{j}_{зм} = \frac{d\vec{D}}{dt} . \quad (4.49)$$

Протікання струму зміщення в діелектрику на відміну від струму провідності в електричному колі не супроводжується виділенням джоулевого тепла, хоча процес переполаризації діелектрика відбувається з поглинанням тепла, але він не описується законом Джоуля - Ленца.

6.4. Перше рівняння Максвелла.

Перше рівняння Максвелла випливає із закону Фарадея і зв'язує напруженість поля електромагнітної індукції з індукцією змінного магнітного поля $\vec{B}$. Дійсно, якщо $\vec{E}$ напруженість індукованого електричного поля, що діє в контурі L_S , то електрорушійна сила індукції в контурі дорівнює

$$\mathcal{E}_i = \oint \vec{E} d\vec{l} \quad (4.50)$$

6.5. Друге рівняння Максвелла.

Друге рівняння Максвелла представляється законом повного струму з врахуванням струму зміщення

$$\oint_{L_S} \vec{H} d\vec{l} = I + I_{зм} \quad (4.51)$$

де I - струм, створюваний вільними носіями струму, $I_{зм}$ - струм зміщення. Інтегрування проводиться по замкненому контуру L_S , що охоплює поверхню S_L .

6.6. Третє рівняння Максвелла.

Третє рівняння Максвелла випливає з теореми Остроградського - Гауса для індукції електричного поля

$$\oint_{S_V} \vec{D} d\vec{S} = q \quad (4.52)$$

а саме: потік зміщення $\vec{D}$ електричного поля через довільну замкнену поверхню S_V дорівнює алгебраїчній сумі вільних зарядів, які знаходяться в об'ємі V_S з поверхнею S_V .

6.7. Четверте рівняння Максвелла.

Четверте інтегральне рівняння Максвелла представляється теоремою Остроградського - Гауса для індукції магнітного поля

$$\oint_{S_V} \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad (4.53)$$

а саме: потік індукції $\vec{B}$ магнітного поля через довільну замкнену поверхню S_V дорівнює нулю.

6.8. Матеріальні рівняння Максвелла.

До матеріальних рівнянь належать рівняння, що зв'язують індукцію та напруженість електричного поля

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \quad (4.54)$$

через діелектричну проникливість середовища ϵ та магнітного поля через магнітну проникливість μ .

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (4.55)$$

7. Диференціальні рівняння Максвелла у діелектрику

Аналогічно можна одержати хвильове рівняння і для напруженості магнітного поля $\vec{H}$

$$\Delta \vec{H} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \quad (4.56)$$

8. Плоска електромагнітна хвиля

Для плоскої електромагнітної хвилі, що розповсюджується в напрямкові ОХ, складові поля в загальному випадку можна представити у вигляді

$$\vec{E} = \vec{f}(t - \frac{x}{V}), \quad \vec{H} = \vec{\phi}(t - \frac{x}{V}). \quad (4.57)$$

Всі частинні похідні від проекцій E_y, E_x цих векторів на осі координат ОУ, ОZ дорівнюють нулю. Таким чином три вектори $\vec{E}, \vec{H}, \vec{V}$ утворюють праву трійку векторів. Прийmemo напрям ОХ вздовж вектора $\vec{H}$, напрям вектора ОZ вздовж вектора $\vec{E}$ і тоді напрям швидкості $\vec{V}$ буде вздовж осі ОУ.

9. Поляризація хвилі

Лінійна поляризація. Площина, утворена векторами $\vec{E}, \vec{V}$ хвилі, називається площиною поляризації хвилі. Якщо площина поляризації зберігає своє положення в просторі, то така хвиля є лінійно поляризованою (плоско поляризованою).

Еліптична поляризація. Якщо в площині $\perp \vec{V}$, вершина вектора $\vec{E}$ описує еліпс, то така хвиля еліптично поляризована. Це означає, що вектор $\vec{E}$ має дві складові, зсунуті по фазі

$$E_x = A_1 \cos(\omega t - ky), \quad E_z = A_2 \cos(\omega t - ky + \phi). \quad (4.58)$$

В цьому випадку можна розглянути задачу додавання двох взаємно перпендикулярних коливань із зсувом по фазі, результатом якого маємо рівняння для траєкторії, яку описує вершина вектора $\vec{E}$ з часом

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_z^2}{A_2^2} - 2 \frac{E_x E_z}{A_1 A_2} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (4.59)$$

π

Для випадку $\varphi = \pm(2m+1)\frac{\pi}{2}$ траєкторіями є еліпси. Коли ж ще й $A_1 = A_2$, то еліпси перетворюються в кола і така хвиля називається **циркулярно поляризованою** (поляризованою по колу).

Природна поляризація. Якщо в площині перпендикулярній вектору $\vec{V}$ вектор $\vec{E}$ кожної миті займає рівно ймовірні напрямки, то така хвиля називається природно поляризованою.

10. Енергія, інтенсивність та тиск електромагнітної хвилі

Об'ємна густина енергії електромагнітного поля w дорівнює сумі об'ємних густин енергії електричного w_e та магнітного w_m полів

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2. \quad (4.60)$$

Якщо $H \cdot \sqrt{\mu \mu_0} = E \cdot \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0}$, то одержимо $w = \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0} E H = \frac{1}{V} E H$, (4.61)

де $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}$ - швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в

середовищі, $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ - показник заломлення середовища, $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$ - швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в вакуумі.

11. Випромінювання електричного диполя

Миттєва потужність випромінювання диполя з дипольним моментом $p = ql$ дорівнює

$$N = \frac{\mu_0}{6\pi c} \left| \frac{d^2 \vec{p}}{dt^2} \right|^2. \quad (4.62)$$

Середня потужність за період T визначається середнім значенням $\langle \cos^2 \omega t \rangle = 1/2$ і становитиме

$$\langle N \rangle = \frac{\mu_0 \omega^4 p_0^2}{12\pi c}. \quad (4.63)$$

Індикатриса випромінювання осцилятора у хвильовій зоні визначає залежність інтенсивності випромінювання від кута ϑ між віссю диполя й напрямком випромінювання $\vec{r}$. І задається співвідношенням

$$I \sim \frac{1}{r^2} \sin^2 \vartheta. \quad (4.64)$$

У Таблиці представлена структура випромінювання різних джерел від радіохвиль до γ -випромінювання.

Таблиця 1. Діапазони електромагнітного випромінювання

Вид випромінювання	Довжина хвилі λ , м	Частота хвилі ν , Гц	Джерело випромінювання
Радіохвилі	$10^{-4} \div 10^3$	$3 \cdot 10^5 \div 10^{12}$	Коливальний контур Вібратор Герца Генератори
Оптичне	$5 \cdot 10^{-4} \div 8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{11} \div 3.75 \cdot 10^{14}$	

інфрачервоне видиме ультрафіолетове	$8 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-7}$ $4 \cdot 10^{-7} \div 10^{-8}$	$3.75 \cdot 10^{14} \div .5 \cdot 10^{14}$ $7.5 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{16}$	Лампи Лазери
Рентгенівське	$2 \cdot 10^{-9} \div 6 \cdot 10^{-12}$	$1.5 \cdot 10^{17} \div 5 \cdot 10^{19}$	Трубки Рентгена
γ — випромінювання	$\lambda < 6 \cdot 10^{-12}$	$\nu > 5 \cdot 10^{19}$	Радіоактивний розпад Ядерні реакції Космічне випромінювання

Приклади розв'язування задач

Задача 1. На яку довжину хвилі буде резонувати контур, утворений котушкою з індуктивністю $L = 4$ мкГн і конденсатором ємністю $C = 1$ мкФ?

Дано:

$$L = 4 \text{ мкГн}$$

$$C = 1 \text{ мкФ}$$

λ - ?

Розв'язання

Період T електромагнітних коливань в коливальному контурі визначають за формулою Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (1)$$

де L і C відповідно індуктивність і ємність контура. Швидкість поширення електромагнітних коливань в повітрі дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі:

$$c = \lambda \cdot \nu,$$

де λ - довжина хвилі; ν - частота коливань $T = 1/\nu$, де T - період коливань.

Отже, $c = \lambda/T$. Звідси $\lambda = T \cdot c$.

Враховуючи формулу (1), знаходимо формулу для розрахунку довжини хвилі λ , на яку буде резонувати даний контур LC

$$\lambda = c \cdot 2\pi\sqrt{LC} \quad (2)$$

Запишемо в системі одиниць СІ числові значення величин, що входять в (2):

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}; \pi = 3,14; L = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}; C = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Підставимо в (2) і вирахуємо:

$$\lambda = 3,78 \cdot 10^3 \text{ м}.$$

Задача 2. Залежність миттєвого значення електричного струму у коливальному контурі описується рівнянням $i = 0,6 \sin(628t)$. Визначити амплітудне значення сили струму у колі, період власних коливань контуру і миттєве значення струму в момент $t = 0,01$ с.

Розв'язання

$$i = 0,6 \sin(628t)$$

$$t = 0,01 \text{ с}$$

I_m -?

Частота вільних коливань визначається параметрами кола. Якщо знехтувати активним опором у колі, то коливання

можна вважати незгасаючими. Порівнюючи залежність сили струму від часу з умови задачі із законом гармонічних коливань:

$$i = I_m \sin \omega t,$$

знаходимо:

$$I_m = 0,6 \text{ А}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 628, \quad T = 0,01 \text{ с}$$

$$I = 0,6 * \sin(628 * 0,1) = 0,6 * \sin(2\pi) = 0$$

Таким чином, амплітудне значення сили струму у колі $I_m = 0,6 \text{ А}$; період власних коливань контуру $T = 0,01 \text{ с}$; миттєве значення струму в момент $t = 0,01 \text{ с}$ дорівнює нулю.

Задача 3. Заряд конденсатора коливального контуру генератора незгасаючих електромагнітних коливань залежить від часу за законом: $Q = 4 \pi * 10^{-3} \sin(100 \pi t)$. Описати залежність сили струму в контурі від часу, визначити значення сили струму в контурі у момент часу $t = 0,01 \text{ с}$. Яку індуктивність має котушка контуру, якщо значення ємності конденсатора становить 1 мкФ ?

Розв'язання

$$Q = 4 \pi * 10^{-3} \sin(100 \pi t)$$

$$t = 0,01 \text{ с}$$

$$C = 1 \text{ мкФ}$$

$$L = ?$$

В генераторі незгасаючих коливань втратами енергії в контурі можна знехтувати. Тому розглядаємо вільні електромагнітні коливання в цьому коливальному контурі.

Залежність сили струму від часу описується похідною від залежності заряду на обкладинках конденсатора. Тому:

$$i = Q' = 4 \pi 10^{-3} \sin(100 \pi t)' = 0,4 \pi \cos(100 \pi t) = 1,26 * \cos(100 \pi t)$$

Порівнюючи опис залежності сили струму від часу із загальним виглядом закону гармонічних коливань без початкової фази

$$x = A * \sin(\omega t), \text{ знаходимо: } \omega = 100\pi; \quad \nu = \omega / 2\pi = 100\pi / 2\pi = 50 \text{ Гц};$$

$$\text{Враховуючи, що, } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ знайдемо індуктивність контуру: } L = \frac{1}{\omega^2 C}$$

Перевіримо розмірність отриманої величини: $L = \frac{c^2}{\Phi} = \frac{c^2 B}{K\ell} = \Gamma_H$.

Підставимо числові значення величин:

$$L = \frac{1}{(100 \cdot \pi)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} (\Gamma_H) = 10 \Gamma_H$$

Таким чином, сила струму в контурі в момент часу $t=0,01\text{с}$ буде рівна:

$$i(0,01) = 0,4 \cdot 3,14 \cdot \cos(100\pi \cdot 0,01) = 1,26 \cdot (-1) = -1,26\text{А}.$$

Це є амплітудне значення сили струму.

Задача 4. Інтенсивність плоскої електромагнітної хвилі, що поширюється у

вакуумі вздовж осі X дорівнює $I = 1,06 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мкВм}}{\text{м}^2}$. Визначити амплітуду напруженості магнітного поля хвилі.

Розв'язання

Оскільки інтенсивність електромагнітної хвилі – це середня енергія, що проходить через одиницю площі поверхні за одиницю часу, то $I = \langle S \rangle$, де S – модуль вектора Умова-Пойнтинга:

$$S = EH,$$

де E і H – відповідно миттєві значення напруженостей електричного і магнітного полів хвилі, які описуються рівняннями

$$E = E_0 \cos(\omega t - kx),$$

$$H = H_0 \cos(\omega t - kx),$$

де E_0 і H_0 – відповідно амплітуди напруженостей електричного і магнітного

полів хвилі, ω – кругова частота, $k = \frac{\omega}{v}$ – хвильове число.

Миттєве значення модуля вектора Умова-Пойнтинга

$$S = E_0 H_0 \cos^2(\omega t - kx),$$

а його середнє значення

$$\langle S \rangle = \frac{1}{2} E_0 H_0,$$

оскільки $\langle \cos^2(\omega t - kx) \rangle = \frac{1}{2}$.

Миттєві значення E_0 і H_0 у довільній точці зв'язані співвідношеннями

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} E_0 = \sqrt{\mu_0 \mu} H_0,$$

де ϵ_0 і μ_0 – відповідно електрична і магнітна сталі; ϵ і μ – відповідно електрична і магнітна проникність середовища у вакуумі $\epsilon = 1$ і $\mu = 1$.

Тоді

$$E_0 = H_0 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}.$$

В результаті

$$\langle S \rangle = \frac{1}{2} E_0 H_0 = \frac{1}{2} H_0^2 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}.$$

Звідси

$$H_0 = \sqrt{2 \langle S \rangle \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}}.$$

Підставимо числові значення фізичних величин і проведемо розрахунок:

$$H_0 = \sqrt{2 \cdot 1,06 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12}}{12,56 \cdot 10^{-7}}} \frac{\text{А}}{\text{м}}} = 0,237 \cdot 10^{-3} \frac{\text{А}}{\text{м}} = 0,237 \frac{\text{мА}}{\text{м}}.$$

Задача 5. Коливальний контур складається з конденсатора ємністю $C = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$ і котушки індуктивністю $L = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$ з кількістю витків $N = 300$. Омічним опором контуру можна знехтувати. Максимальна напруга на обкладках конденсатора $U_0 = 120 \text{ В}$. Визначити максимальний магнітний потік, що пронизує котушку.

Розв'язання

$$\begin{aligned}C &= 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} \\L &= 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} \\N &= 300. \\U_0 &= 120 \text{ В.} \\ \Phi_0 &= ?\end{aligned}$$

Напруга на обкладках конденсатора змінюється з часом за гармонічним законом:

$$U = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

де U_0 – максимальна напруга на обкладках конденсатора;

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – циклічна частота; φ – початкова фаза.

Сила струму в контурі змінюється також за гармонічним законом з

такою самою частотою ω_0 , як і напруга, але зі зміщенням за фазою на $\frac{\pi}{2}$, тобто

$$I = -C \frac{dU}{dt} = CU_0 \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

Амплітуда сили струму

$$I_0 = CU_0 \omega_0 = CU_0 \frac{1}{\sqrt{LC}} = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Магнітний потік може бути знайдений із рівності

$$LI = N\Phi.$$

Магнітний потік змінюється з часом синхронно із силою струму i , отже, досягає екстремальних значень тоді ж, коли і сила струму.

Тоді максимальний магнітний потік

$$\Phi_0 = U_0 \frac{\sqrt{LC}}{N}.$$

Підставимо числові значення:

$$\begin{aligned}\Phi_0 &= 120 \frac{\sqrt{5 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-8}}}{300} = \\ &= 4 \cdot 10^{-7} \text{ Вб}.\end{aligned}$$

Питання для самоконтролю

1. Електромагнітний коливальний контур RLC.
2. Незгасаючі електромагнітні коливання
3. Хвильовий опір контуру змінному струмові
4. Вільні згасаючі електромагнітні коливання
5. Вимушені коливання у контурі
6. Диференціальне рівняння коливань у електромагнітному контурі.
7. Розв'язок рівняння згасаючих коливань в електричному коливальному контурі.
8. Реактивні опори та імпеданс.
9. Резонанс напруги та струму в коливальному контурі.
10. Змінний струм: напруга, сила струму, потужність, фазові співвідношення.
11. Струм зміщення.
12. Теореми Стокса та Остроградського-Гауса.
13. Струм зміщення
14. Циркуляція вихрового електричного поля.
15. Рівняння Максвела у інтегральній формі.
16. Рівняння Максвела у диференціальній формі.
17. Диференціальне рівняння електромагнітної хвилі.
18. Плоска електромагнітна хвиля.
19. Поляризація хвилі.
20. Енергія, інтенсивність та тиск електромагнітної хвилі.
21. Потужність випромінювання диполя
22. Неоднорідне рівняння руху у електричному коливальному контурі.
23. Електричний диполь: потужність випромінювання, індикатриса випромінювання.

Завдання для самостійного опрацювання

1. Індуктивність L контуру, що коливається, дорівнює $0,5\text{Гн}$. Якою повинна бути електроємність C контуру, щоб він резонував на довжину хвилі $\lambda=300\text{м}$?
2. Котушка індуктивністю $L=1\text{мГн}$ і повітряний конденсатор з двох круглих пластин діаметром $D=20\text{см}$ кожна, з'єднані паралельно. Відстань d між пластинами дорівнює 1см . Визначити період T коливання.
3. Коливальний контур має індуктивність $L=0,6\text{мГн}$, електроємність $C=0,004\text{мкФ}$ й максимальна напруга $U_{\max}$ на затискачах дорівнює 200В . Визначити максимальну силу струму $I_{\max}$ у контурі. Опір контуру дуже малий.
4. Конденсатор електроємністю $C=500\text{пФ}$ з'єднаний паралельно з котушкою довжиною $l=40\text{см}$ й площею перерізу 5см^2 . Котушка має $N=1000$ витків. Серцевина не магнітна. Визначити період T коливань.
5. Коливальний контур складається з паралельно з'єднаних конденсатора електроємністю $C=1\text{мкФ}$ й котушки індуктивністю $L=2\text{мГн}$. Опір контуру дуже малий. Знайти частоту коливань.
6. На яку довжину хвилі λ буде резонувати контур, який складається з котушки індуктивністю $L=4\text{мГн}$ й конденсатора енергоємністю $C=1,11\text{нФ}$?
7. Коливальний контур складається з електроємності $C=8\text{пФ}$ і котушки індуктивності $L=0,5\text{мГн}$. Яка максимальна напруга $U_{\max}$ на обкладинках конденсатора, якщо максимальна сила струму $I_{\max}=40\text{мА}$?
8. Котушка (без серцевини) довжиною $l=50\text{см}$ й площиною S_1 січення, яка дорівнює 3см^3 , має $N=1000$ витків і з'єднана паралельно з конденсатором. Конденсатор складається з двох плоских пластин $S_2=75\text{см}^2$ кожна. Відстань між пластинами $d=5\text{мм}$. Діелектрик – повітря. Встановити період T коливання контуру.
9. В однорідному магнітному полі з індукцією 1Тл рівномірно обертається стержень довжиною 10см , що робить 5 обертів за секунду. Вісь обертання паралельна лініям індукції і проходить крізь один з кінців стержня перпендикулярно до його осі. Визначити різницю потенціалів, що виникатиме на кінцях стержня.
10. Рамка з дроту опором $0,05\text{Ом}$ рівномірно обертається в однорідному магнітному полі з індукцією $0,5\text{Тл}$. Вісь обертання лежить в площині рамки і

перпендикулярна до ліній індукції. Площа рамки 100 см^2 . Визначити заряд, що протече по рамці при зміні кута між нормаллю до рамки і лініями індукції: а) від 0 до 45° ; б) від 45 до 90° .

11. Рамка, що містить 800 витків площею 50 см^2 рівномірно обертається з частотою 20 с^{-1} в магнітному полі напруженістю 5000 А/м . Вісь обертання лежить в площині рамки і перпендикулярна до ліній напруженості магнітного поля. Визначити максимальну е. р. с. індукції, що виникає в рамці.

12. В однорідному магнітному полі з індукцією $0,5 \text{ Тл}$ рівномірно обертається з частотою 10 с^{-1} рамка, що містить 500 витків, які щільно прилягають один до одного. Площа рамки рівна 200 см^2 . Визначити миттєве значення е. р. с. індукції для кута повороту рамки 30° та 60° .

13. В однорідному магнітному полі з індукцією 1 Тл рівномірно з частотою 5 с^{-1} обертається стержень довжиною 20 см так, що площина його обертання перпендикулярна лініям напруженості магнітного поля, а вісь обертання проходить через один із його кінців. Визначити індуковану на кінцях стержня різницю потенціалів.

14. Виток з дроту діаметром 15 см і опором $0,03 \text{ Ом}$ знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $0,5 \text{ Тл}$. Площина витка складає кут 45° з лініями індукції. Який заряд пройде через виток при виключенні магнітного поля.

15. В кільце з дроту, що приєднане до балістичного гальванометру, вставили прямий постійний магніт. При цьому в колі пройшов сумарний заряд $0,01 \text{ мКл}$. Визначити зміну магнітного потоку через кільце, якщо опір кола з гальванометром рівний 8 Ом .

16. Соленоїд з сердечником з немагнітного матеріалу містить 1000 витків дроту, що щільно прилягають один до одного. При силі струму в 5 А магнітний потік рівний 10 мкВб . Визначити індуктивність соленоїда та енергію його магнітного поля.

17. Індуктивність соленоїда, обмотка якого намотана в один шар на немагнітний каркас, дорівнює $0,8 \text{ мГн}$. Довжина соленоїда $0,5 \text{ м}$, діаметр 5 см . Визначити відношення числа витків соленоїда до його довжини (число витків на

одиницю довжини).

18. Соленоїд з поперечним перерізом 20 см^2 містить 1500 витків. Індукція магнітного поля всередині соленоїда при силі струму 10 А рівна $0,5 \text{ Тл}$. Визначити індуктивність соленоїда.

19. На немагнітному каркасі довжиною $1,0 \text{ м}$ і діаметром 5 см намотаний в один шар дріт діаметром $0,2 \text{ мм}$ так, що витки щільно прилягають один до одного. Обчислити індуктивність отриманого соленоїда.

20. Котушка, що намотана на немагнітний циліндричний каркас, має 400 витків і індуктивність 50 мГн . Щоб збільшити індуктивність котушки вдвічі, обмотку котушки зняли і замінили обмоткою з більш тонкого дроту з таким розрахунком, щоб довжина котушки залишилась початковою. Скільки витків виявилось в котушці після перемотки?

21. Соленоїд містить 1000 витків. При силі струму 5 А магнітний потік становить $0,1 \text{ мВб}$. Визначити індуктивність соленоїда.

22. Соленоїд має сталений повністю розмагнічений сердечник об'ємом 400 см^3 . Напруженість магнітного поля соленоїда при силі струму $0,6 \text{ А}$ дорівнює 10^3 А/м . Визначити індуктивність соленоїда.

23. В котушці з індуктивністю $0,01 \text{ мГн}$ протікає струм силою 5 А . При виключенні струму його сила змінюється практично до нуля за час рівний 8 мс . Визначити середнє значення е. р. с. самоіндукції, що виникає в контурі.

24. Силу струму в котушці рівномірно збільшується за допомогою реостата на $0,5 \text{ А}$ за одну секунду. Знайти середнє значення е.р.с. самоіндукції, якщо індуктивність котушки 10 мГн .

25. В замкнутому контурі з опором 10 Ом проходить струм. Через 10 мілісекунд після розмикання контуру сила струму в ньому зменшилась в 10 разів. Чому дорівнює індуктивність контуру?

26. Поперечний переріз сердечника соленоїда з немагнітного матеріалу 20 см^2 . Соленоїд містить 1000 витків. В ньому проходить струм, що створює магнітне поле з індукцією 10 мТл . Визначити середнє значення е.р.с. самоіндукції соленоїда, якщо сила струму в соленоїді зменшується практично до нуля за час рівний 5 мілісекунд.

27. В замкнутому контурі, що має опір $15\ \text{Ом}$ та індуктивність $50\ \text{мГн}$, проходить струм силою $10\ \text{А}$. Визначити силу струму через $0,1$ мілісекунди після розмикання кола.
28. В котушці індуктивністю $10\ \text{мкГн}$ проходить струм силою $15\ \text{А}$. При виключенні струму його сила зменшується практично до нуля за час рівний $6\ \text{мс}$. Визначити середнє значення е. р. с. самоіндукції, що виникає в контурі.
29. Коло складається з котушки індуктивністю $0,5\ \text{Гн}$ та джерела струму. Джерело струму відключили, не розриваючи кола. За 20 мілісекунд сила струму зменшилась в п'ятсот разів від початкового значення. Чому дорівнює опір котушки.
30. Джерело струму замкнули на котушку опором $10\ \text{Ом}$. Через час рівний $0,1\ \text{с}$ сила струму досягла 90% максимального значення. Визначити індуктивність котушки.
31. Джерело струму замкнули на котушку опором $20\ \text{Ом}$ та індуктивністю $0,4\ \text{Гн}$. За який час сила струму в колі досягне 95% від максимального значення?
32. В електричному колі, з опором $r=20\ \text{Ом}$ та індуктивністю $L=0,06\ \text{Гц}$, протікає струм силою $I=0\ \text{А}$. Визначити силу струму в колі через $t=0,2\ \text{мс}$ після її розмикання.
33. По замкнутому ланцюгу з опором $R=20\ \text{Ом}$ протікає струм. Через час $t=8\ \text{мс}$ після розмикання ланцюга сила струму в ній зменшилась в 20 раз. Визначити індуктивність L ланцюга.
34. Ланцюг складається із котушки індуктивністю $L = 0,1\ \text{Гн}$ і джерела струму. Джерело струму відключили, не розриваючи ланцюга. Час, крізь який сила струму зменшиться до $0,001$ первинного значення рівний $t=0,07\ \text{с}$. Визначити опір R котушки.
35. Джерело струму замкнули на котушку опором $R=10\ \text{Ом}$ і індуктивністю $L=0,2\ \text{Гц}$. Через який час сила струму в ланцюзі досягне 50% максимального значення?
36. Джерело струму замкнули на котушку опором $R=20\ \text{Ом}$. Через час $t=0,1\ \text{с}$ сила струму I замикаання досягнула $0,95$ граничного значення. Визначити індуктивність L котушки.

37. В соленоїді перетином $S=5 \text{ см}^2$ створений магнітний потік $\Phi=20 \text{ кВб}$. Визначити об'ємну густину енергії магнітного поля соленоїда. Сердечник відсутній. Магнітне поле у всьому об'ємі соленоїда вважати однорідним.

38. Магнітний потік Φ в соленоїді, що містить $N=1000$ витків, дорівнює $0,2 \text{ мВб}$. Визначити енергію W магнітного поля соленоїда, якщо сила струму у витках соленоїда, $I=1 \text{ А}$. Сердечник відсутній. Магнітне поле у всьому об'ємі соленоїда вважати однорідним.

39. Діаметр тороїда (по середній лінії) $D=50 \text{ см}$. Тороїд містить $N=2000$ витків і має площину перетину $S=20 \text{ см}^2$. Обчислити енергію W магнітного поля тороїда при силі струму $I=5 \text{ А}$. Вважати магнітне поле тороїда однорідним. Сердечник виконаний з не магнітного матеріалу.

40. По провіднику, вигнутому у вигляді кільця радіусом $R=20 \text{ см}$, що містить $N=500$ витків, протікає струм силою $I=1 \text{ А}$. Визначити об'ємну густину w енергії магнітного поля в центрі кільця.

41. При якій силі струму I в прямолінійному проводі нескінченної довжини на відстані $r=5 \text{ см}$ від нього об'ємна густина енергії магнітного поля буде $w=1 \text{ мДж/м}^3$?

42. Обмотка тороїда має $n=10$ витків на кожний сантиметр довжини (по середній лінії тороїду). Розрахувати об'ємну густину енергії ρ магнітного поля при силі струму $I=10 \text{ А}$. Сердечник виконаний з не магнітного матеріалу, поле у всьому об'ємі однорідне.

43. Обмотка соленоїда містить $n=20$ витків на кожний сантиметр довжини. При якій силі струму I об'ємна густина енергії магнітного поля буде $w=0,1 \text{ Дж/м}^3$? Сердечник виконаний з не магнітного матеріалу, а магнітне поле у всьому об'ємі однорідне.

44. Соленоїд має довжину $l=0,6 \text{ м}$ і площу перетину $S=10 \text{ см}^2$. При деякій силі струму, що протікає по обмотці, в соленоїді створює магнітний струм $\Phi=0,1 \text{ мВб}$. Чому рівна енергія W магнітного поля соленоїда? Сердечник виконано з немагнітного матеріалу, і магнітне поле у всьому об'ємі однорідне.

45. Магнітний потік в соленоїді, що містить 500 витків, дорівнює $0,5 \text{ мВб}$. Визначити енергію магнітного поля соленоїда, якщо сила струму, що проходить в

соленоїді, дорівнює 5 А. Сердечник з немагнітного матеріалу. Магнітне поле у всьому об'ємі соленоїда вважати однорідним.

46. Соленоїд містить 25 витків на кожний сантиметр його довжини. При якій силі струму об'ємна густина енергії магнітного поля буде дорівнювати $0,5 \text{ Дж/м}^3$? Вважати, що сердечник виконаний з немагнітного матеріалу, а магнітне поле у всьому об'ємі соленоїда однорідне.

ДОВІДНИК

Таблиця 1. Одиниці системи СІ

Величина	Одиниця вимірювання	Позн.
Довжина	метр	м
Маса	кілограм	кг
Час	секунда	с
Сила струму	ампер	А
Температура	кельвін	К
Сила світла	кандела	кд
Кількість речовини	моль	моль
Плоский кут	радіан	рад
Тілесний кут	стерадіан	ср
Частота	герц	Гц
Сила	ньютон	Н
Енергія	джоуль	Дж
Потужність	ват	Вт
Тиск	паскаль	Па
Світловий потік	люмен	лм
Освітленість	люкс	лк
Електричний заряд	кулон	Кл
Потенціал	вольт	В
Опір	ом	Ом
Електроємність	фарад	Ф
Магнітний потік	вебер	Вб
Магнітна індукція	тесла	Тл
Індуктивність	генрі	Гн
Електрична провідність	сименс	См

Таблиця 2. Десяткові приставки СІ

Кратність	Приставка	Позн.	Приклад
10^{24}	йота	Й	ЙБ – йотабайт
10^{21}	цета	З	Зг – цетаграм
10^{18}	екза	Е	ЕДж – екзаджоуль
10^{15}	пета	П	Пфлоп – петафлоп
10^{12}	тера	Т	ТВ – теравольт
10^9	гіга	Г	ГГц – гігагерц
10^6	мега	М	МПа – мегапаскаль
10^3	кіло	к	кН – кілоньютон
10^2	гекто	г	гОм – гектоом
10^1	дека	да	дал – декалітр
10^{-1}	деци	д	дБ – децибел
10^{-2}	санти	с	см – сантиметр
10^{-3}	мілі	м	мТл – мілітесла
10^{-6}	мікро	мк	мкГн – мікрогенрі
10^{-9}	нано	н	нм – нанометр
10^{-12}	піко	п	пФ – пікофарад
10^{-15}	фемто	ф	фс – фемтосекунда
10^{-18}	атто	а	ас – аттосекунда
10^{-21}	цепто	ц	цН – цептоньютон
10^{-24}	йокто	й	йг – йоктограм
10^{-10} м	ангстрем	Å	ангстрем

Таблиця 3. Деякі фундаментальні фізичні сталі

Величина	Символ	Значення
Маса Землі		$5,97 \cdot 10^{24}$ кг
Радіус Землі		$6,37 \cdot 10^6$ м
Прискорення вільного падіння	g	$9,81$ м/с ²
Швидкість світла у вакуумі	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	G	$6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$
Стала Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль
Об'єм одного моля газу	V_m	$22,4 \cdot 10^{-3}$ м ³ /моль
Стала Лошмідта	$L = \frac{N_A}{V_m}$	$2,69 \cdot 10^{25}$ м ⁻³
Стала Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Універсальна газова стала	$R = kN_A$	$8,314$ Дж/(моль·К)
Стала Планка	h	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Елементарний заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса електрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Маса протона	m_p	$1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса нейтрона	m_n	$1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг
Атомна одиниця маси	1 а.о.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Електрична стала	ε_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Стала Фарадея	$F = eN_A$	96485 Кл/моль
Атмосферний тиск	atm	101325 Па

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Антоняк О.Т. Загальна фізика. Основи електрики і магнетизму: навч. посіб. / О.Т. Антоняк. – Львів: Вид. центр ЛНУ ім. І.Франка, 2009. – 239 с. – ISBN 978-966-613-664-3.
2. Бойко В.В., Сукач Г.О., Кідалов В.В. Фізика. Підручник для студентів нефізичних спеціальностей вищих навчальних закладів (гриф Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, лист № 1/11 - 11440 від 06 02. 2011 р. вищих навчальних закладів // Донецьк: Вид-во та друк ТОВ «Юго-Восток, Лтд», 2012. – 488с.
3. Бойко В.В.,Булах Г.І.,Гуменюк Я.О.(за редакцією В.В.Бойка). Фізика. Частина І. Механіка. Молекулярна фізика та термодинаміка. Електрика //Навчальний посібник (з грифом МОН України за № 1/11- 7330 від 04.08.10 р.), видання третє, перероблене і доповнене. - Київ, ВЦ «Азбука», 2012.- 371 с.
4. Бойко В.В.,Булах Г.І.,Гуменюк Я.О.(за редакцією В.В.Бойка). Фізика Частина ІІ. Електромагнетизм. Електромагнітні коливання та хвилі. Оптика. Елементи квантової фізики, фізики твердого тіла, атома та ядра //Навчальний посібник (з грифом МОН України за № 1/11- 7330 від 04.08.10 р.), видання третє, перероблене і доповнене. - Київ, ВЦ «Азбука», 2012.- 319 с.
5. Венгреневич Р. Д. Курс фізики. У 3-х ч. Ч.2. Електрика та магнетизм : навч. посіб. / Р. Д. Венгреневич, М. Ю. Стасик; за ред. проф. Р.Д. Венгреневича. – Чернівці: Видавничий дім “Букрек”, 2008. – 456 с. – ISBN 978-966-399-124-5.
6. Курс загальної фізики. Електрика і магнетизм. Навчальний посібник. / Понеділок Г. В., Данилов А. Б. Львів: Видавництво Львівської політехніки – 2010 – 516с.
7. Фізика електромагнітних явищ. Електро- і магнітостатика : навч. посіб. [для студентів фіз.-техн. та інж.-техн. спец. ВНЗ] / Г. В. Понеділок ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2016. – 464 с.

8. Фізика і комп'ютерні технології. Навчальний посібник / І. Р. Зачек, І. Є. Лопатинський, С. О. Юр'єв, О. В. Рибак, С. П. Дубельт. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 360 с.

9. Фізика. Навчальний посібник для студентів технічних та технологічних спеціальностей вищих навчальних закладів України // Навчальний посібник (з грифом МОН України за № 1.4 /18 – Г - 1434 від 27.08.07 р.) , видання друге, перероблене і доповнене. - Київ.: Видавництво „Профі”, 2012. –576 с.

Збірники задач та завдань:

1. Бойко В.В. Фізика. Збірник задач та завдань для самостійної роботи студентів інженерних спеціальностей. Частина 1. – К.: Видавництво Національного аграрного університету, 2004. – 110 с.

2. Бойко В.В. Фізика. Збірник задач та завдань для самостійної роботи студентів інженерних спеціальностей. Частина 2. – К.: Видавництво Національного аграрного університету, 2005. – 130 с.

3. Бойко В.В. Фізика (Кредитно – модульна система). Збірник задач та завдань з основами теорії та прикладами розв'язування задач. – К.: Видавництво „Арістей”, 2005. – 263 с.

4. Збірник задач з фізики. Навчальний посібник / Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О., Біленька О. Б., Гончар Ф. М., Горіна О. М., Дубельт С. П., Захар'яш О. С., Ільчук Г. А., Каркульовська М. С., Коломієць О. В., Кравчук І. М., Лобойко В. І., Покладок Н. Т., Рибак О. В., Романюк М. М., Рудка М. М., Товстюк Н. К., Українець Н. А., Ющук С. І. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. - 244 с.