2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. СИСТЕМА РІВНЯНЬ МАКСВЕЛЛА.

2.1 Мета заняття

Вивчити закони електромагнітної індукції та рівняння Максвелла. Навчитися користуватися ними для розв’язання задач.

2.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Під час підготовки до практичного заняття вивчити теоретичний матеріал за конспектом або підручником [1, розд. 7, 10; 3, § 60-71; 5, розд. 5.3, 5.5]. Особливу увагу зверніть на закон Фарадея, правило Ленца, явища самоіндукції та взаємоіндукції. З’ясуйте фізичний зміст та межі застосування рівнянь Максвелла. Дайте відповіді на контрольні запитання, проаналізуйте розв’язання завдань, наведених, як приклад.

2.3 Основні закони і формули

1. Закон Фарадея (закон електромагнітної індукції)

$$\varepsilon_i = -d\Phi/dt,$$

де ε_i – електрорушійна сила (ЕРС) електромагнітної індукції, $\Phi = BS\cos\alpha$ – потік вектора магнітної індукції $\vec{B}$ крізь площину S, α – кут між вектором нормалі $\vec{n}$ до площини S і вектором магнітної індукції $\vec{B}$, N – кількість витків котушки.

2. ЕРС самоіндукції

$$\varepsilon_i = -L\frac{dI}{dt},$$

де $L = \Phi/I$ – індуктивність контуру, I – сила струму у контурі.

3. Індуктивність соленоїда

$$L = \mu_0\mu n^2 V,$$

де $n = N/l$ – кількість витків на одиницю довжини соленоїда, $V = Sl$ – об’єм соленоїда.

4. Магнітна індукція соленоїда

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

5. Миттєве значення сили струму у колі, яке має опір R та індуктивність L:

а) при замиканні кола

$$I = I_0(1 - e^{-\frac{R}{L}t}),$$

б) при розмиканні кола

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t},$$

де I_0 – сила струму у колі при $t = 0$; t – час, який минув після замикання чи розмикання кола.

6. ЕРС взаємоіндукції

$$\varepsilon_{i12} = -L_{12}\frac{dI_2}{dt};\ \varepsilon_{i21} = -L_{21}\frac{dI_1}{dt},$$

де $L_{12}I_2 = \Phi_1$, $L_{21}I_1 = \Phi_2$ – магнітні потоки у першому та другому контурах, створені струмами I_2 та I_1 відповідно.

7. Енергія магнітного поля, зчепленого з контуром

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

8. Об'ємна густина енергії магнітного поля

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

9. Перше рівняння Максвелла в інтегральній формі

$$\oint_l \vec{E}d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}d\vec{S}.$$

10. Друге рівняння Максвелла в інтегральній формі

$$\oint_l \vec{H}d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}\right)d\vec{S}.$$

2.4 Контрольні запитання та завдання

1. У чому полягає явище електромагнітної індукції?
2. Сформулюйте закон електромагнітної індукції.
3. Поясніть правило Ленца.
4. У чому полягає явище самоіндукції? Чому дорівнює ЕРС самоіндукції?. Дайте визначення індуктивності.
5. Як змінюється з часом сила струму при включенні електричного поля з індуктивністю?
6. Запишіть закони зміни струму у колі з індуктивністю при замиканні та розмиканні кола. Поясніть за допомогою графіка.
7. У чому полягає явище взаємної індукції? Чому дорівнює ЕРС взаємної індукції? Дайте визначення взаємної індуктивності.
8. Охарактеризуйте природу вихрового електричного поля та його зв'язок зі змінним магнітним полем.
9. Які величини характеризують електромагнітне поле?
10. Запишіть та проаналізуйте рівняння Максвелла.

2.5 Приклади розв'язання задач

Задача 1. Прямий провідник довжиною l рухається зі швидкістю $\upsilon = const$ в однорідному магнітному полі з індуктивністю $\vec{B}$ так, що площина dS його траєкторії перпендикулярна вектору $\vec{B}$ (рис. 2.1). Користуючись електронною теорією провідності, виведіть формулу закону електромагнітної індукції і з'ясуйте сутність природи цього явища, відкритого М. Фарадеєм.

Дані: l; $\vec{B}$; $\vec{\upsilon}$; dS;

ε_i – ?

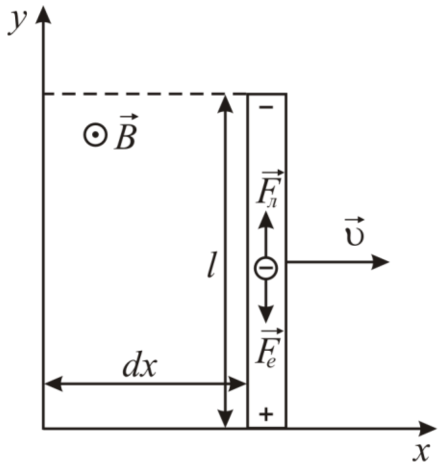

Рисунок 2.1

Аналіз і розв'язання

Вільні електрони провідності, що знаходяться у провіднику, разом із ним рухаються у магнітному полі зі швидкістю $\vec{\upsilon}$. Отже на кожен з них діє сила Лоренца

$$\vec{F}_л = e\left[\vec{\upsilon}, \vec{B}\right].$$

Результатом цього є впорядковане переміщення цих електронів вздовж провідника в один його кінець з утворенням там надлишку від'ємного заряду. На протилежному боці утворюватиметься недостача електронів із позитивним зарядом. У результаті такого перерозподілу між цими зарядами виникає електричне поле з напруженістю $\vec{E}$, яке викликає дію на електрони ще однієї сили – сили електричного поля

$$\vec{F}_e = e\vec{E}.$$

Електрони рухатимуться під дією рівнодіючої цих сил, доки вона не стане рівною нулю, тобто при

$$\vec{F}_e = -\vec{F}_л$$

або з урахуванням їх значень

$$e\vec{E} = -e\left[\vec{\upsilon}, \vec{B}\right].$$

Звідси

$$\vec{E} = -\left[\vec{\upsilon}, \vec{B}\right].$$

З останнього виразу видно, що напруженість поля сил, які рухають електрони проти сил електростатичного поля, має неелектростатичну природу. Тому її називають напруженістю поля сторонніх сил $\vec{E}_{ст} = \left[\vec{\upsilon}, \vec{B}\right]$. Вона однакова за величиною з напруженістю електричного поля $\vec{E}$, але протилежна їй за напрямком $\vec{E} = -\vec{E}_{ст}$.

Робота поля сторонніх сил $dA = F_л dl \cos\varphi$ з переміщення зарядів проти сил електричного поля зумовлює появу ЕРС, індукованої магнітним полем

$$\varepsilon_i = \int_0^l \vec{E} d\vec{l} = -\int_0^l \vec{E}_{cm} d\vec{l} = -\int_0^l \left[\vec{\upsilon}, \vec{B}\right] d\vec{l} = -\int_0^l \upsilon B dl = -\upsilon B l .$$

Враховуючи, що $\upsilon = dx/dt$, маємо:

$$\varepsilon_i = -\upsilon B l = -B\frac{ldx}{dt} = -B\frac{dS}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt},$$

де $d\Phi = BdS$ – магнітний потік через площину dS.

Отже ми вивели формулу ЕРС електромагнітної індукції $\varepsilon_i = -d\Phi/dt$ як роботу сторонніх сил з переміщення зарядів вздовж провідника, що рухається у магнітному полі, а також з'ясували, що поле цих сил не є електростатичним.

Задача 2. Між полюсами магніту з індукцією $\vec{B}$ знаходиться підвішений провідний плоский контур із джерелом електрики. Опір контуру R. Його площина dS розташована паралельно лініям магнітної індукції (рис. 2.2). Після замикання ключа К за час dt контур повертається на деякий кут. При цьому магнітний потік через нього змінюється на величину $d\Phi$. З'ясувати природу електромагнітних явищ, які відбуваються при цьому, їх кількісні характеристики та зв'язок між ними.

Дані: $\vec{B}$; R; dS; dt; $d\Phi$

ε_i – ?

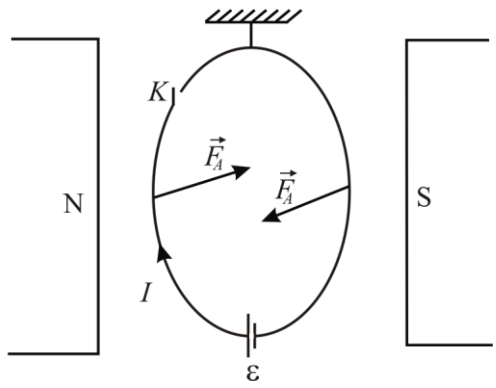

Рисунок 2.2

Аналіз і розв'язання

Після замикання ключа К відбувається протікання струму I по контуру, його нагрівання та кутове переміщення. Ці явища супроводжуються енергетичними змінами у джерелі електрики $\varepsilon I dt$, тепловими в електричному опорі контуру $Q = I^2 R dt$ та механічною роботою пари сил Ампера при зміні кутового положення контуру у магнітному полі $dA = Id\Phi$, де $d\Phi$ – зміна потоку магнітної індукції через площу контуру dS за час dt. Всі ці зміни врівноважені законом збереження енергії

$$\varepsilon I dt = I^2 R dt + I d\Phi .$$

Після очевидних перетворень цього виразу маємо еквівалентне йому рівняння закону Ома

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

або

$$I = \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{R},$$

де $\varepsilon_i = -d\Phi/dt$ – ЕРС індукції магнітного поля.

Струм, індукований у контурі магнітним полем, виражається формулою

$$I_i = -\frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt}.$$

До речі, з цих виразів видно, що цей струм існуватиме й за відсутності джерела електрики, коли $\varepsilon = 0$, тільки б відбувалася зміна магнітного потоку в часі.

Зробимо вслід за Максвеллом ще один важливий висновок з отриманих результатів. При повороті контуру силами Ампера чи силами будь-якої іншої природи змінюється у часі величина магнітного потоку через його площину dS зі швидкістю $\frac{d\Phi}{dt}$, де $\Phi = \int\limits_S \vec{B}d\vec{S}$. Отже

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\int\limits_S \vec{B}d\vec{S}\right).$$

Оскільки площина контуру при цьому не змінюється у часі, операції диференціювання за часом та інтегрування по поверхні можна поміняти місцями і записати зміну потоку Φ через контур як частинну похідну від $\vec{B}$ за часом. Тоді ЕРС індукції магнітного поля матиме такий вигляд:

$$\varepsilon_i = -\int\limits_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Звернемо увагу на те, що ЕРС у будь-якому контурі дорівнює циркуляції вектора напруженості сторонніх сил, тобто

$$\varepsilon_i = \oint\limits_L \vec{E}_{cm} d\vec{l},$$

де $\vec{E}_{cm} = \vec{E}$ – вектор напруженості вихрового електричного поля за висновком Максвелла. Прирівняємо праві частини останніх двох виразів

$$\oint\limits_L \vec{E}d\vec{l} = -\int\limits_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Це перше рівняння Максвелла. Воно дає можливість стверджувати, що вихрове магнітне поле неминуче породжує вихрове електричне поле, і вони існують невід’ємно одне від одного, причому незалежно від існування провідникового контуру. Адже у цьому рівнянні відсутні його електричні чи магнітні характеристики. Тому контур є тільки індикатором наявності вихрового електричного поля.

Задача 3. Контур радіусом 0,2 м розташований у площині, перпендикулярній вектору магнітної індукції, яка змінюється з часом за законом $B = 6\cdot 10^{-3} e^{-2\cdot 10^5 t}$. У просторі це поле однорідне. Знайдіть напруженість вихрового електричного поля, що збуджується у контурі у момент часу $t = 3\cdot 10^{-5}$с.

Дані: R=0,2 м; $B = 6\cdot 10^{-3} e^{-2\cdot 10^5 t}$; $t = 3\cdot 10^{-5}$с

E – ?

Аналіз і розв'язання

За першим рівнянням Максвела в інтегральній формі $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$ можна визначити залежність E від B таким чином:

$$E \cdot 2\pi R = -\pi R^2 \frac{\partial B}{\partial t},$$

звідки

$$E = -\frac{R}{2}\frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{R}{2}\frac{\partial}{\partial t}\left(6\cdot 10^{-3} e^{-2\cdot 10^5 t}\right) = 1{,}2\cdot 10^3 \frac{R}{2} e^{-2\cdot 10^5 t} =$$

$$= 1{,}2\cdot 10^3 \frac{0{,}2}{2} e^{-2\cdot 10^5 \cdot 3\cdot 10^{-3}} = 0{,}3 \text{ (А/м)}.$$

Задача 4. По довгому прямому соленоїду радіусом R проходить струм, який можна змінювати так, що магнітне поле у середині соленоїда змінюється за законом $B = \beta t^2$, де β – стала величина. Знайдіть густину струму зміщення як функцію відстані r від соленоїда.

Дані: R; $B = \beta t^2$

$j_{зм}(r)$ – ?

Аналіз і розв'язання

Густина струму зміщення $\vec{j}_{зм} = d\vec{D}/\partial t$, де $\vec{D}$ – вектор електричного зміщення $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$. Знайдемо спочатку зміщення вихрового електричного поля $\vec{E}$. Для цього використаємо рівняння Максвелла для циркуляції вектора $\vec{E}$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \qquad (2.1)$$

Якщо $r < R$, то рівняння (2.1) має вигляд

$$2\pi r E = -\pi r^2 \frac{\partial B}{\partial t} \text{ або } E = \frac{r}{2}\left(\frac{\partial B}{\partial t}\right).$$

Знаходимо $\partial B/\partial t = 2\beta t$. Тоді $E(r) = r\beta t$, ($r < R$).

Для $r > R$ теорему про циркуляцію вектора $\vec{E}$ запишемо у вигляді:

$$2\pi r E = \pi R^2 \frac{\partial B}{\partial t}.$$

Звідси $E(r) = \frac{\beta R^2 t}{r}$, ($r > R$).

Знаючи залежність напруженості вихрового електричного поля від відстані $E(r)$, знайдемо густину струму зміщення

$$j_{зм} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} = \varepsilon_0 \beta r,\ (r < R),$$

$$j_{зм} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\varepsilon_0 \beta R^2}{r},\ (r > R).$$

Залежність $j_{зм}(r)$ можна зобразити графічно (рис. 2.3)

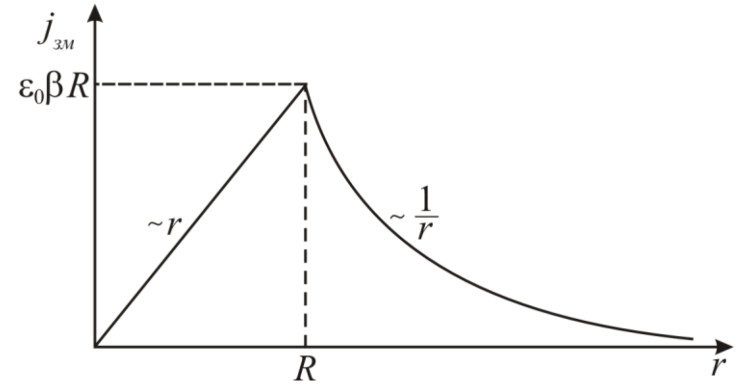

Рисунок 2.3

2.6 Задачі для самостійної роботи

Задача 1. Прямий провідник довжиною l=0,4 м рухається в однорідному магнітному полі зі швидкістю υ=5 м/с перпендикулярно лініям індукції. Різниця потенціалів між кінцями провідника дорівнює 0,6 В. Знайти індукцію магнітного поля.

Відповідь: B = 0,3 Тл.

Задача 2. Прямий провідник довжиною l=0,1 м знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією B=1 Тл. Кінці його замкнуто гнучким провідником, що не знаходиться у магнітному полі. Опір цього електричного кола дорівнює 0,4 Ом. Яка потужність витрачається, якщо провідник рухається перпендикулярно лініям індукції з швидкістю υ = 20 м/с?

Відповідь: P=10 Вт.

Задача 3. В однорідному магнітному полі з індукцією B=0,4 Тл обертається стержень довжиною l=0,1 м. Вісь обертання проходить через один із кінців стержня. Визначити різницю потенціалів між кінцями стержня при частоті обертання n = 16 с$^{-1}$.

Відповідь: U =0,2 В.

Задача 4. В однорідному магнітному полі з індукцією B=0,35 Тл рівномірно обертається з частотою n = 8 с$^{-1}$ рамка. Вісь обертання лежить у площині рамки і перпендикулярна лініям індукції. Площа рамки S=50 см^2, кількість витків N=1500. Визначити максимальну ЕРС індукції, яка виникає у рамці.

Відповідь: ε_{max} = 132 В.

Задача 5. По П-подібному провіднику (рис. 2.4) переміщується зі сталою швидкістю υ під дією сили F перемичка. Контур знаходиться у перпендикулярному його площині однорідному магнітному полі. Чому дорівнює сила F, якщо кожної секунди у контурі виділяється кількість теплоти Q?

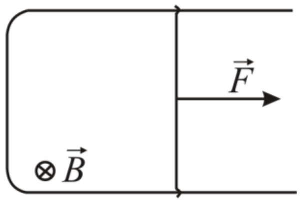

Рисунок 2.4

Відповідь: $F = \dfrac{Q}{\upsilon t}$.

Задача 6. Провідник, що має форму параболи $y = kx^2$, знаходиться у однорідному магнітному полі з індукцією B (рис. 2.5). З вершини параболи в момент часу $t = 0$ почати переміщувати перемичку 1-2. Знайти ЕРС індукції у контурі як функцію y, якщо перемичка рухається зі сталою швидкістю υ.

Відповідь: $\varepsilon_i = 2B\upsilon\sqrt{y/k}$.

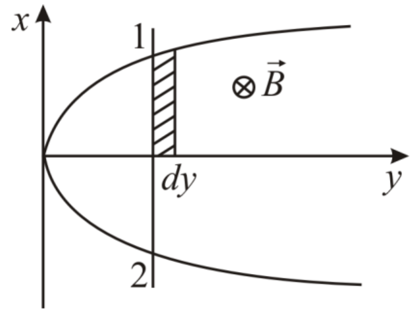

Рисунок 2.5

Задача 7. Кільце з провідника радіусом a = 0,1 м лежить на столі. Який електричний заряд пройде по кільцю, якщо його перевернути з однієї сторони на іншу? Опір кільця R=1 Ом. Вертикальна складова індукції магнітного поля Землі B = 10 мТл.

Відповідь: q = 3,14 мкКл.

Задача 8. Квадратна рамка зі струмом а=5 см і опором R=10 мОм знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією B=40 мТл. Нормаль до площини рамки розташована під кутом α=30° до ліній магнітної індукції. Знайти заряд, що пройде по рамці, якщо магнітне поле виключити.

Відповідь: q = 8,67 мКл.

Задача 9. Тонкий провідник довжиною l=1 м зігнуто у вигляді квадрата, кінці якого замкнено. Квадрат знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією B=0,1 Тл. Визначити заряд, що пройде по провіднику, якщо квадрат, протягнувши за протилежні вершини, витягнути у лінію. Опір провідника дорівнює 3 Ом.

Відповідь: $q = 2{,}08 \cdot 10^{-3}$ Кл.

Задача 10. Магнітна індукція B поля між полюсами двополюсного генератора дорівнює 0,8 Тл. Ротор має N=100 витків площею S=400 см^2. Визначити частоту обертання якоря, якщо максимальне значення ЕРС індукції ε_{max}=200 В.

Відповідь: n=10 с$^{-1}$.

Задача 11. Соленоїд площею перерізу 5 см^2 має N = 1200 витків. При силі струму I = 2 А індукція магнітного поля всередині соленоїда B = 0,01Тл. Знайти індуктивність соленоїда.

Відповідь: L = 3 мГн.

Задача 12. Ізольований металевий диск радіусом r = 0,25 м обертається з кутовою швидкістю ω = 100 с$^{-1}$ навколо осі, що проходить через його центр перпендикулярно площині диска. Визначити різницю потенціалів між центром та краєм диска, яка виникає за відсутності магнітного поля та в однорідному магнітному полі, перпендикулярному площині диска (B = 10 млТл).

Відповідь: 1,8 нВ; $3{,}08 \cdot 10^{-2}$ В.

Задача 13. Котушка з індуктивністю L = 250 мГн і опором R = 0,3 Ом підключається до джерела постійної напруги. Через який проміжок часу τ сила струму у котушці досягне 50% від усталеного значення?

Відповідь: τ = 0,58 с.

Задача 14. У колі проходив струм I_0 = 50 А. Джерело струму можна включити, не розриваючи кола. Визначити силу струму в цьому колі через t 0,01 с після відключення його від джерела струму. Опір кола дорівнює 20 Ом, індуктивність L = 0,1 Гн.

Відповідь: I = 6,86 А.

Задача 15. До джерела струму з внутрішнім опором r= 2 Ом підключили котушку індуктивністю L = 0,5 Гн і опором R = 8 Ом. Знайти проміжок часу, за який струм у котушці, збільшуючись, досягне значення, що відрізняється від максимального на 1%.

Відповідь: t =0,23 с.

Задача 16. Дві котушки знаходяться на невеликій відстані одна від одної. Коли сила струму у першій котушці змінюється зі швидкістю $\Delta I/\Delta t$=5 А/с, у другій виникає ЕРС індукції Ξ_1 = 0,1В. Визначити коефіцієнт взаємної індукції.

Відповідь: 20 мГн.

Задача 17. Магнітний потік через нерухомий контур з опором R змінюється протягом часу τ за законом $\Phi(t) = at(\tau - t)$. Знайти кількість теплоти, яка виділяється за цей час у контурі. Індуктивністю контуру знехтувати.

Відповідь: $Q = \frac{a^2\tau^3}{R}$.

Задача 18. Скільки метрів тонкого дроту потрібно для виготовлення соленоїда довжиною 100 см та індуктивністю 1 мГн, якщо діаметр перерізу соленоїда значно менший за його довжину.

Відповідь: l = 100 м.

Задача 19. Через котушку радіусом 2 см, яка має 500 витків, проходить струм силою 2 А. Визначити індуктивність котушки, якщо напруженість магнітного поля у центрі дорівнює 10 кА/м.

Відповідь: L = 4 мГн.

Задача 20. Знайти індуктивність одиниці довжини кабеля, що складається з двох тонкостінних коаксіальних металевих циліндрів радіусами R_1 та R_2 ($R_1 < R_2$). Сили струмів у циліндрах однакові та протилежно напрямлені. Магнітна проникність середовища дорівнює одиниці.

Відповідь: $\frac{L}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}$.

Задача 21. Дві котушки, індуктивності яких дорівнюють L_1 = 3 мГн та L_2 = 5 мГн, з’єднані послідовно. При цьому індуктивність системи L =11 мГн. Як зміниться індуктивність системи, якщо в одній з котушок напрям струму змінити на протилежний, не змінюючи взаємне положення котушок?

Відповідь: L = 5 мГн.

Задача 22. Два соленоїда однакової довжини l та з радіусами R_1 та R_2 ($R_1 < R_2$) мають відповідно n_1 та n_2 витків на одиницю довжини. Менший соленоїд цілком помістили всередину більшого так, що осі їх співпали. Визначити модуль взаємної індуктивності $|L_{12}|$ соленоїдів.

Відповідь: $|L_{12}| = \sqrt{L_1 L_2}$.

Задача 23. Довжина соленоїда 1 м, площа його поперечного перерізу 20 см^2, індуктивність L=0,4 мГн, об’ємна густина енергії $w = 0{,}1$ Дж/м^2. Визначити силу струму у соленоїді.

Відповідь: $I = \sqrt{\frac{2wSl}{L}} = 1$А.

Задача 24. Одношаровий соленоїд довжиною 0,4 м із площею поперечного перерізу 50 см^2, намотаний дротом діаметром 0,5 мм, підключено до напруги 10 В. Який струм тече по обмотці, якщо за 0,5 мс в ній виділяється кількість теплоти, яка дорівнює енергії магнітного поля всередині соленоїда? Поле однорідне.

Відповідь: $I = 995$ мА.

Задача 25. Визначити енергію магнітного поля соленоїда, який має 300 витків, що намотані на картонний каркас радіусом 3 см та довжиною 6 см, якщо по ньому проходить струм 4 А.

Відповідь: 8,5 мДж.

Задача 26. Довести, використовуючи рівняння Максвелла, що змінне магнітне поле не може існувати без електричного поля; що однорідне електричне поле не може існувати за наявності змінного магнітного поля.

Задача 27. Показати, що наслідком рівнянь Максвелла є закон збереження електричного заряду, тобто $div\vec{j} = -\dfrac{\partial\rho}{\partial t}$.

Задача 28. Сила струму у прямому нескінченному провіднику дорівнює I. На відстані r_0 (рис. 2.6) від провідника знаходиться плоский контур, утворений двома паралельними шинами, по яких переміщується прямий провідник, та резистором з опором R. Відстань між шинами дорівнює a, швидкість руху провідника υ. Знайти, за якими законами змінюється з часом: магнітний потік, що пронизує контур, $\Phi(t)$; ЕРС індукції $\varepsilon_i(t)$; індукційний струм у контурі $I_i(t)$ кількість теплоти Q, що виділяється у контурі за проміжок часу від t_1 до t_2.

Відповідь: $\Phi(t) = \dfrac{\mu_0 Ia}{2\pi}\ln\dfrac{r_0+\upsilon t}{r_0}$;

$$\varepsilon_i(t) = \frac{\mu_0 Ia}{2\pi}\cdot\frac{\upsilon}{r_0+\upsilon t};$$

$$I_i(t) = \frac{\mu_0 Ia}{2\pi R}\cdot\frac{\upsilon}{r_0+\upsilon t};$$

$$Q = \frac{\mu_0^2 I^2 a^2 \upsilon}{4\pi^2 R}\left(\frac{1}{r_0+\upsilon t_1} - \frac{1}{r_0+\upsilon t_2}\right).$$

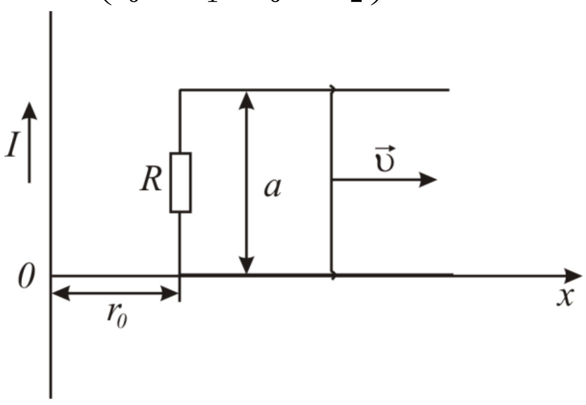

Рисунок 2.6

Задача 29. Квадратна рамка і довгий прямий провідник зі струмом I знаходиться в одній площині (рис. 2.7). Сторона рамки дорівнює a. Рамку переміщують вправо зі сталою швидкістю υ. Знайти ЕРС індукції як функцію відстані x.

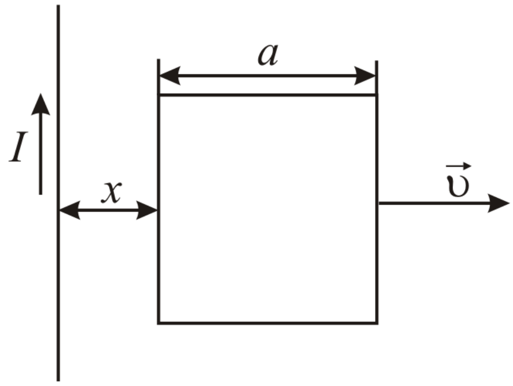

Рисунок 2.7

Відповідь: $\varepsilon_i = \dfrac{\mu_0 I a^2 \upsilon}{2\pi x(x+a)}$.

Задача 30. Визначити величину заряду, який пройшов по соленоїду зі струмом 0,5 А після замикання його кінців. Діаметр соленоїда 3 см, дріт обмотки (алюміній, $\rho = 2{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) має діаметр 0,3 мм.

Відповідь: $q = 42{,}7$ мкКл.