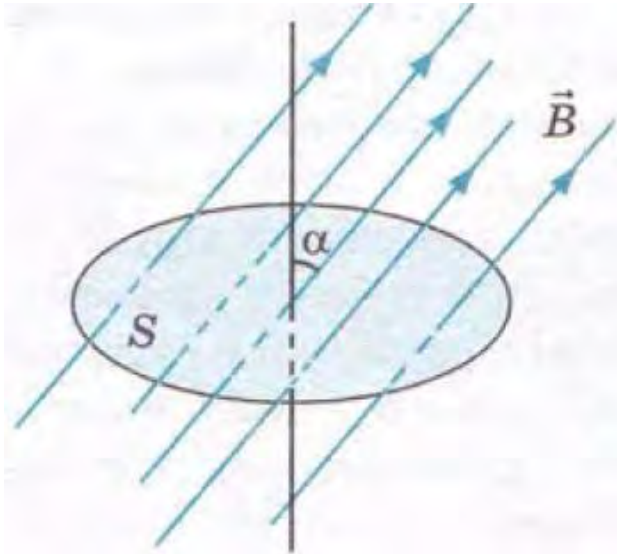


Тема 24. Електромагнітна індукція.

Явище електромагнітної індукції полягає у виникненні електрорушійної сили в замкненому контурі при зміні магнітного потоку, що його пронизує.



Потік магнітної індукції (магнітний потік) Φ – це фізична величина, яка характеризує розподіл магнітного поля по поверхні, обмеженій замкненим контуром. Його обчислюють за формулою:

$$\Phi = BSc\cos\alpha,$$

де B – індукція магнітного поля, S – площа, обмежена контуром, α – кут між перпендикуляром

(нормаллю) до площини контуру та вектором \vec{B} .

Одиниця потоку магнітної індукції в СІ – **вебер (Вб)**, $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$.

Зазначимо, що остання формула використовується у випадку **однорідного** магнітного поля.

М. Фарадей здійснив ряд дослідів магнітного потоку, з яких можна зробити наступні висновки.

1. Електричний струм індукується (наводиться) тоді, коли змінюється магнітний потік, що пронизує поверхню, обмежену замкненим контуром.
2. Чим швидше змінюється магнітний потік, що пронизує замкнений контур, тим більшою є сила індукційного струму.
3. Напрямок індукційного струму залежить від того, збільшується чи зменшується магнітний потік, що пронизує контур.

Під час зміни магнітного потоку, що пронизує провідний контур, у контурі виникають сторонні (не кулонівські) сили, які переміщують електричні заряди по контуру, виконуючи при цьому роботу. В такому випадку робота сторонніх сил $A_{\text{ст}}$ з переміщення одиничного позитивного заряду називається **електрорушійною силою індукції (ЕРС індукції)** і визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

Закон Фарадея (основний закон електромагнітної індукції) стверджує: електрорушійна сила індукції (ЕРС), що наводиться у контурі, дорівнює зі знаком «мінус» швидкості зміни з часом магнітного потоку, що пронизує контур:

$$\varepsilon = -\Phi'(t) = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

де $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ – зміна магнітного потоку за час Δt

Останній вираз застосовується, коли магнітний потік лінійно змінюється із часом, або розглядаються його зміни за досить короткі проміжки часу.

Залежність напрямку струму від характеру зміни магнітного потоку сформульовано у **правилі Ленца**: індукційний струм у замкненому контурі завжди направлений так, щоб перешкоджати змінам магнітного потоку через цей контур.

Якщо прямиий стержень довжиною l , орієнтований вздовж осі X , рухається зі швидкістю \vec{v} вздовж осі Y в однорідному магнітному полі з вектором індукції \vec{B} , напрямленому вздовж осі Z , то ЕРС індукції між кінцями стержня дорівнює:

$$\varepsilon = Blv.$$

Зміна магнітного потоку може бути зумовлена зміною будь-якої або всіх величин, які входять до означення магнітного потоку: індукції поля \vec{B} , площі контуру S , кута α .

В більш складних випадках, коли провідник, вектор індукції магнітного поля та вектор швидкості напрямлені під довільними кутами один до одного, треба спочатку знайти напрямок сили Лоренца відносно провідника. Тоді ЕРС індукції визначається за формулою:

$$\varepsilon = Blv \cos\alpha \sin\varphi,$$

де φ – кут між векторами \vec{B} і \vec{v} .

При зміні магнітного потоку крізь площу замкненого контуру в ньому проходить заряд:

$$q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R},$$

де R – опір контуру, Φ_1 , Φ_2 – початкове та кінцеве значення магнітного потоку.

Якщо в ізолюваному контурі тече струм I , то магнітний потік через площу контуру утворюється власним магнітним полем цього струму і дорівнює:

$$\Phi = LI,$$

де L називається коефіцієнтом самоіндукції або **індуктивністю контуру**.

Явище самоіндукції полягає у виникненні ЕРС в контурі (в котушці) при протіканні по ньому струму I , що змінюється з часом.

Величина ЕРС самоіндукції становить:

$$\varepsilon_c = -LI'(t),$$

де L – індуктивність контуру, $I'(t)$ – похідна сили струму по часу. Знак «мінус» в останньому виразі є наслідком **правила Ленца**, тобто ЕРС самоіндукції має таку полярність, щоб викликаний нею індуктивний струм у контурі перешкоджав змінам магнітного потоку в котушці, пов'язаним зі змінами струму I .

Індуктивність залежить від форми та розмірів контуру (а для котушки – ще й від кількості витків, а також матеріалу, з якого виготовлено її осердя). Індуктивність вимірюється в **генрі** (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{А}$.

При лінійних змінах сили струму I , або при зміні сили струму за малий проміжок часу Δt , ЕРС самоіндукції можна знаходити за формулою:

$$\varepsilon_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

де $\Delta I = I_2 - I_1$ – зміна сили струму за час Δt .

Енергія магнітного поля є енергією електричних струмів, які створюють це магнітне поле. Тому при протіканні електричного струму силою I по котушці, в ній накопичується магнітна енергія, яка дорівнює:

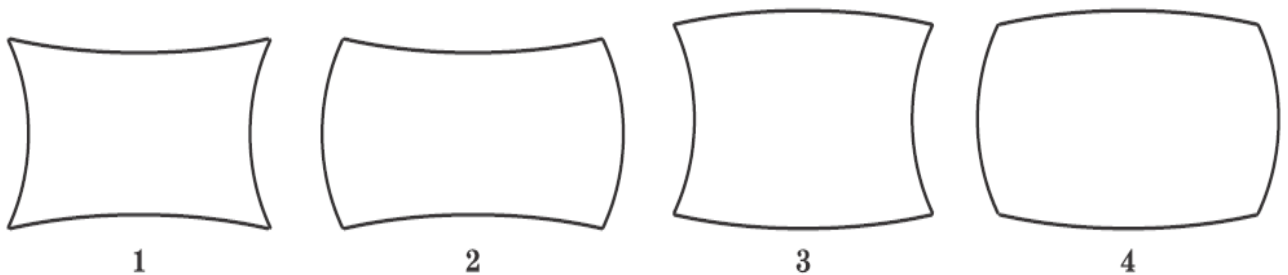
$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Приклад 1. Магнітний потік всередині контуру з площею поперечного перерізу 10 см^2 становить $0,2 \text{ мВб}$. Визначте індукцію магнітного поля всередині контуру. Поле вважайте однорідним.

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad B = \frac{\Phi}{S} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} = 0,2 \text{ Тл}$$

Відповідь: $0,2 \text{ Тл}$.

Приклад 2. Прямокутник із гнучкого дроту підключено до джерела струму. Внаслідок магнітної взаємодії прямокутник змінив свою форму. Оберіть рисунок, який відповідає описаній взаємодії.



Відповідь: 4. За рахунок магнітної взаємодії прямокутник намагається набути форми кільця.

Приклад 3. У кільці, виготовленому з провідника з електричним опором $0,15 \text{ Ом}$, яке перебуває в рівномірно зростаючому магнітному полі, існує індукційний струм. Сила струму становить 9 А . Визначте, на скільки змінюється щосекунди магнітний потік через кільце.

$$q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}, \quad I = \frac{q}{t}, \quad q = It,$$

$$\frac{\Delta\Phi}{R} = It, \quad \Delta\Phi = RIt = 0,15 \cdot 9 \cdot 1 = 1,35 \text{ Вб}.$$

Відповідь: $1,35 \text{ Вб}$.

Приклад 4. Магнітний потік усередині контуру з площею поперечного перерізу 20 см^2 становить 4 мВб . Визначте індукцію магнітного поля всередині контуру. Поле вважайте однорідним.

$$\Phi = BScos\alpha, \quad 4 \cdot 10^{-3} = B \cdot 20 \cdot 10^{-4}, \quad B = 2 \text{ Тл}$$

Відповідь: 2 Тл.

Приклад 5. ЕРС електромагнітної індукції, яка виникає в контурі під час зміни магнітного потоку на 2 Вб , дорівнює 4 В . Протягом якого часу спостерігалася ця ЕРС?

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad \Delta t = \frac{|\Delta\Phi|}{\varepsilon} = \frac{2}{4} = 0,5 \text{ с.}$$

Відповідь: 0,5 с.

Приклад 6. Потік магнітної індукції через площу поперечного перерізу котушки змінився на $0,04 \text{ Вб}$ внаслідок зміни струму в котушці від 5 до 15 А . Визначте індуктивність котушки.

$$\Phi = LI, \quad \Delta\Phi = L\Delta I, \quad L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta I} = \frac{0,04}{15 - 5} = 0,004 \text{ Гн.}$$

Відповідь: 4 мГн.

Приклад 7. У магнітному полі з індукцією 20 мТл рухається металевий стрижень довжиною 2 м . Чому дорівнює швидкість стрижня, якщо на його кінцях спостерігається різниця потенціалів $0,2 \text{ В}$? Вектор швидкості стрижня утворює кут 90° із самим стрижнем та лініями індукції магнітного поля.

$$\varepsilon = Blv, \quad v = \frac{\varepsilon}{Bl} = \frac{0,2}{0,02 \cdot 2} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с.}}$$

Відповідь: 5 м/с.

Приклад 8. У котушці індуктивності струм рівномірно спадає від 15 до 10 А впродовж 0,25 с. Якою є індуктивність котушки, якщо при цьому ЕРС на її кінцях становила 20 В?

$$\varepsilon_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad L = -\frac{\varepsilon_c \Delta t}{\Delta I} = -\frac{20 \cdot 0,25}{10 - 15} = 1 \text{ Гн.}$$

Відповідь: 1 Гн.

Приклад 9. Визначте різницю потенціалів, що виникає на кінцях крил літака, який рухається горизонтально зі швидкістю 900 км/год у магнітному полі Землі, індукція якого становить 50 мкТл і спрямована під кутом 60° до вертикалі. Розмах крил літака становить 10 м.

$$\varepsilon = Blv \cos \alpha \sin \varphi = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \cdot 250 \cdot \cos 60^\circ \cdot \sin 90^\circ = 62,5 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Відповідь: 62,5 мВ.

Приклад 10. Яка сила струму протікає в котушці, якщо енергія магнітного поля котушки становить 14,4 Дж? Індуктивність котушки дорівнює 0,2 Гн.

$$W = \frac{LI^2}{2}, \quad I = \sqrt{\frac{2W}{L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 14,4}{0,2}} = 12 \text{ А.}$$

Відповідь: 12 А.

Приклад 11. Установіть відповідність між напрямками перетворення енергії та пристроями, в яких це перетворення відбувається.

1	Електрична — на механічну
2	Електрична — на внутрішню
3	Механічна — на механічну
4	Механічна — на електричну

А	Індукційний генератор
Б	Електродвигун
В	Нагрівний елемент
Г	Тепловий двигун
Д	Простий механізм

Відповідь: 1 – Б, 2 – В, 3 – Д, 4 – А.

Приклад 12. Визначте ЕРС електромагнітної індукції, що виникає у замкненій котушці, яка має 1000 витків, під час виникнення магнітного поля протягом 25 мс. Індукція поля дорівнює 0,1 Тл, площа кожного витка котушки становить 20 см^2 , вісь котушки паралельна до ліній індукції поля.

$$\varepsilon_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad \Phi = LI = NBScos\alpha,$$
$$\varepsilon_c = \frac{NBScos\alpha}{\Delta t} = \frac{1000 \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} = 8 \text{ В.}$$

Відповідь: 8 В.

Приклад 13. У котушці з індуктивністю 250 мГн за 5 мс сила струму зросла на 10 А. Визначте ЕРС самоіндукції, яка виникла в котушці.

Відповідь: 500 В.

Приклад 14. В обмотці котушки з індуктивністю 0,6 Гн сила струму дорівнює 5 А. Визначте густину енергії магнітного поля котушки, якщо її об'єм 150 см^3 .

Відповідь: 50 кДж/м^3 .

Домашнє завдання:

основне: 3.144, 3.145, 3.147, 3.152, 3.155, 3.162, 3.163, 3.165, приклади 13, 14.

додаткове: 3.146, 3.151, 3.153, 3.156, 3.164.