

Явище електромагнітної індукції

Лекції з електрики та магнетизму

Пономаренко С. М.

Зміст

1. Явище електромагнітної індукції

Явище електромагнітної індукції в рухомих провідниках

Явище електромагнітної індукції в нерухомих провідниках

Вихрове електричне поле

2. Явище самоіндукції

Перехідні процеси в колі з індуктивністю

3. Взаємна індукція

Принцип роботи трансформаторів

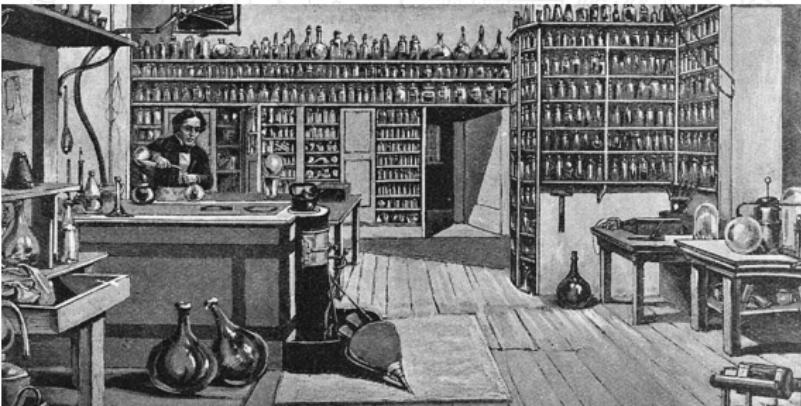
4. Енергія магнітного поля

5. Пондеромоторні сили в магнітному полі

Явище електромагнітної індукції

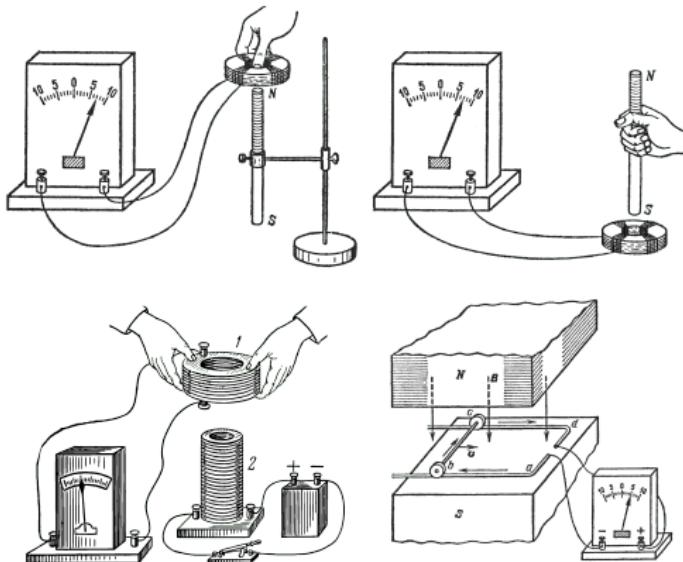
Фарадей зробив фундаментальне відкриття в електродинаміці – **явище електромагнітної індукції**. Воно полягає в тому, що в замкненому провідному контурі при зміні магнітного потоку, охопленого цим контуром, виникає електричний струм (який називається **індукційним**).

Восени 1831 року Майкл Фарадей виконав завдання, яке ще в 1822 року записав собі в пам'ятній книжці, «**перетворити магнетизм на електрику**».



Явище електромагнітної індукції

Фарадей зробив фундаментальне відкриття в електродинаміці – **явище електромагнітної індукції**. Воно полягає в тому, що в замкненому провідному контурі при зміні магнітного потоку, охопленого цим контуром, виникає електричний струм (який називається **індукційним**).



Досліди Фарадея



Закон електромагнітної індукції

На основі дослідів Фарадея було сформульовано закон електромагнітної індукції

Закон Електромагнітної індукції

Електрорушійна сила (ЕРС), що виникає в контурі пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує площину, охоплену даним контуром:

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}.$$

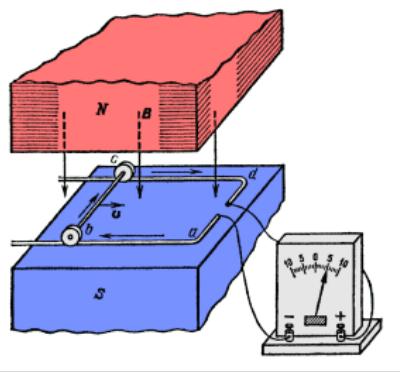
Магнітний потік може змінюватись у двох випадках:

- При зміні площини самого контура, що пронизується магнітним полем.
- При зміні величини магнітного поля, що пронизує контур;

Виникнення ЕРС за рахунок зміни площі контура

Електрорушійна сила (ЕРС), що виникає в контурі пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує площину, охоплену даним контуром:

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{1}{c} \vec{B} \cdot \frac{d}{dt} \iint_S \vec{S} = -\frac{1}{c} \vec{B} \cdot \frac{dS}{dt}.$$



Зміна площі контура при русі перемички bc довжиною ℓ :

$$\frac{dS}{dt} = -\ell v.$$

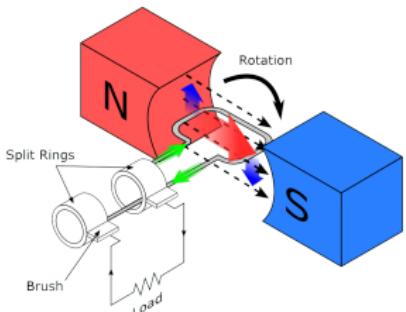
ЕРС індукції:

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = Bl \frac{v}{c}.$$

Якщо зовнішня сила рухає перемичку зі швидкістю v , то на рухомі електрони в перемичці діє сила Лоренца з боку магнітного поля: $\vec{F} = -e \frac{1}{c} [\vec{v} \times \vec{B}]$, тобто, ЕРС індукції в рухомих провідниках зумовлена сумісною дією на носії струму магнітного поля та зовнішніх сил, які підтримують рух. При цьому саме зовнішні сили надають необхідну для цього енергію.

Принцип роботи генераторів змінного струму

Явище електромагнітної індукції використовують у механічних джерелах електричного струму (генераторах електричної енергії), без яких неможливо уявити сучасну електроенергетику. У таких генераторах механічна енергія перетворюється на електричну.



Простий генератор складається з рамки, яка кінцями рамка кріпиться до кілець, що обертаються разом з нею. До кілець також щільно прилягають щітки, які виконують роль контактів. Якщо обертати рамку в магнітному полі, то швидкість зміни потоку, що пронизує рамку:

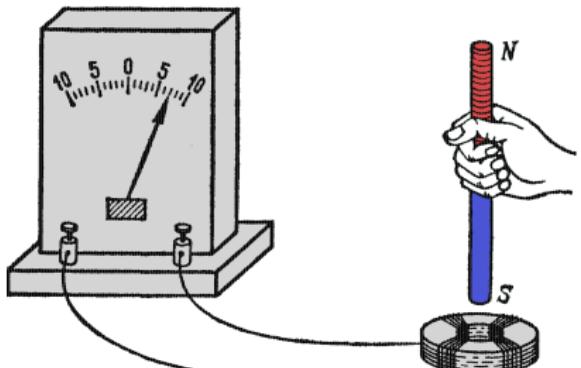
$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} (BS \cos(\omega t)) = -BS \sin(\omega t).$$

В результаті виникне ЕРС індукції: $\mathcal{E}_{\text{інд}} = \frac{1}{c} BS \sin(\omega t)$. І якщо на щітки подати навантаження, то в рамці виникає змінний індукційний струм: $I = \frac{\mathcal{E}_{\text{інд}}}{R} = \frac{1}{c} \frac{BS}{R} \sin(\omega t)$. Цей струм змінюється за законом синуса з частою ω , тобто з частотою обертання рамки.

Виникнення ЕРС за рахунок зміни магнітного поля

Електромоторна сила (ЕРС), що виникає в контурі пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує площе, охоплену даним контуром:

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{1}{c} \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot \vec{S}.$$

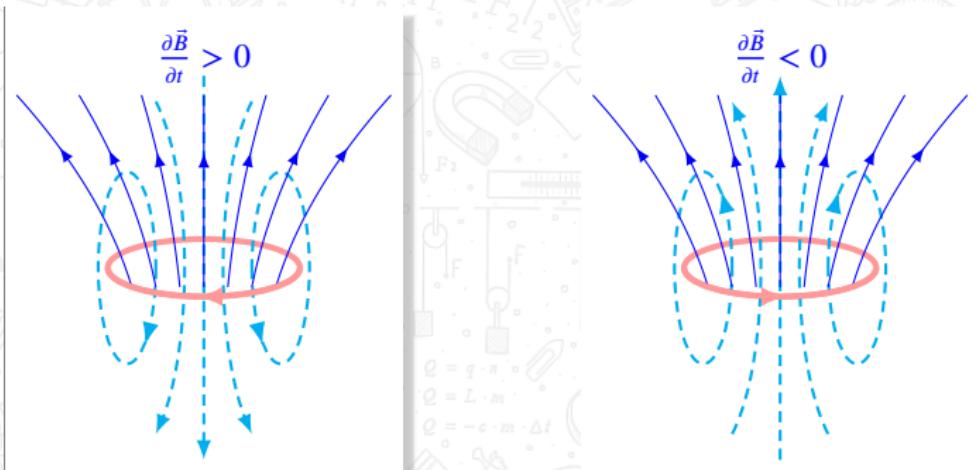


Яка причина виникнення ЕРС? Адже магнітне поле не діє на нерухомі заряди, то за рахунок чого вони прискорюються?

Правило Ленца

Правило Ленца

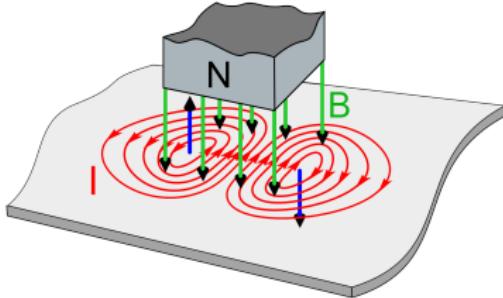
Індукційний струм має такий напрямок, щоб за допомогою **створованого ним магнітного поля** перешкоджати зміні **магнітного потоку**, тобто щоб послабити причину, яка збуджує цей струм.



Правило Ленца диктується законом збереження енергії і є одним із проявів загального принципу Ле Шательє-Брауна, за яким **усякий зовнішній вплив, що намагається вивести систему із стійкої рівноваги, продукує в ній компенсаційні процеси, спрямовані на нівелювання цього впливу.**

Струми Фуко

Струми Фуко – вихрові індукційні струми, які виникають у провіднику під час зміни магнітного потоку через поверхню провідника.

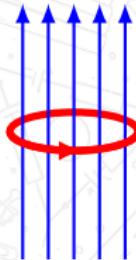


Струми Фуко, як і індукційні струми в лінійних провідниках, підпорядковані правилу Ленца: їх магнітне поле направлене так, щоб протидіяти змінам магнітного потоку, що індукували ці струми.

Відео-демонстрація струмів Фуко

Закон збереження магнітного потоку

Нехай замкнутий виток з опором R перебуває в зовнішньому магнітному полі.

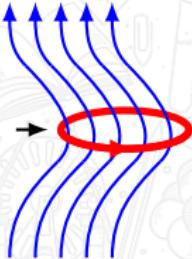


За будь-якої зміни магнітного поля у витку збуджується ЕРС індукції. Струм, що виникає у витку:

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{cR} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Якщо опір контуру $R = 0$ (для надпровідника), то:

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0, \Rightarrow \Phi = \text{const}$$



інакше навіть малі зміни Φ викликали б нескінчені струми. Тобто, **магнітний потік через контур з малим опором зберігається**.

Це означає, що **число силових ліній, що пронизують виток незмінне**.

Силові лінії ніби «вморожені» в провідний контур, при зміщенні контура він захоплює силові лінії магнітного поля.

Вихрове електричне поле

Оскільки магнітний потік дорівнює $\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$, а ЕРС індукції $\mathcal{E} = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$, то із закону індукції випливає:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{1}{c} \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}.$$

Теорема про циркуляцію

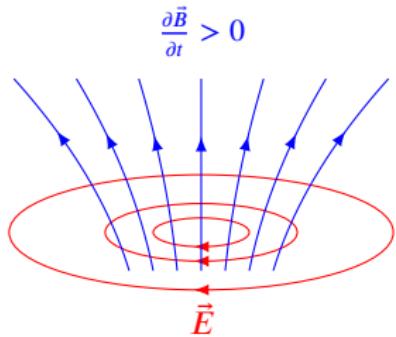
Циркуляція напруженості вихрового електричного поля по довільному контуру дорівнює взятому з протилежним знаком потокові швидкості зміни індукції магнітного поля через довільну поверхню обмежену цим контуром.

Скориставшись теоремою Стокса, останнє інтегральне рівняння можна переписати у диференціальній формі:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

Вихрове електричне поле

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$



Згідно Максвелла **явище електромагнітної індукції** полягає в тому, що будь-яке змінне магнітне поле збуджує в просторі електричне поле; провідники для цього не потрібні. Індукційні ж струми збуджуються в провідниках індукованим електричним полем.

На відміну від електростатики, де $\text{rot } \vec{E} = 0$, у випадку змінного в чай магнітного поля $\text{rot } \vec{E} \neq 0$. Це означає, що індуковане електричне поле, індукується (виникає) за рахунок зміни магнітного поля і не є потенційним, а вихровим.

Чому вихрове поле – електричне?

Електричне поле, що виникає при зміні магнітного поля, має зовсім іншу структуру, ніж електростатичне. Воно не пов'язане безпосередньо з електричними зарядами, і його силові лінії не можуть на них починатися і закінчуватися. Вони взагалі ніде не починаються і ніде не закінчуються, являючи собою замкнуті лінії, подібні до силових ліній магнітного поля. Це так зване вихрове поле.

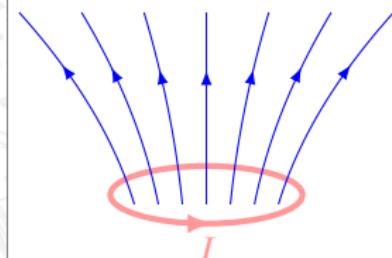
При зміні поля сильного електромагніту з'являються потужні вихори електричного поля, які можна використовувати для прискорення електронів до швидкостей, близьких до швидкості світла. На цьому принципі ґрунтуються пристрій прискорювача електронів – бетатрона. Електричний струм у бетатроні виникає безпосередньо у вакуумній камері без введення будь-яких металевих провідників. Може виникнути запитання: **а чому, власне, це поле називається електричним?** Адже воно має інше походження та іншу конфігурацію, ніж статичне електричне поле. Відповідь проста: **вихрове поле діє на заряд точно так само, як і електростатичне, а це ми вважали і вважаємо головною властивістю поля.**

В.І. Григорій
Г. Я. Мікайло



Явище самоіндукції

Зміна струму в контурі викликає зміну магнітного поля, що створює змінний магнітний потік через цей же контур і, як наслідок, ЕРС індукції. Це явище називають **самоіндукцією**.



Якщо в просторі, де розташований контур зі струмом I , немає феромагнетиків, поле \vec{B} , а отже, і повний магнітний потік Φ через контур будуть пропорційні силі струму I :

$$\Phi = \frac{1}{c} LI$$

L – називається **індуктивністю контуру**.

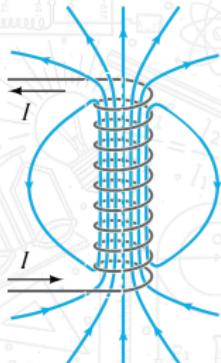
При зміні сили струму в контурі згідно закону Фарадея виникає ЕРС самоіндукції:

$$\mathcal{E}_{\text{si}} = -L \frac{dI}{dt}$$

Знак мінус показує, що ЕРС завжди спрямована так, щоб перешкоджати зміні сили струму відповідно до правила Ленца. Ця ЕРС прагне зберегти струм незмінним: вона протидіє струму, коли він збільшується, і підтримує струм, коли він зменшується.

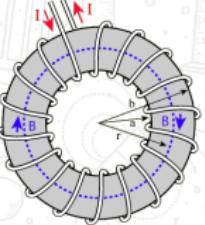
Приклади розрахунку індуктивності

Соленоїд



Магнітне поле в середині соленоїда $B = \frac{4\pi\mu NI}{cl}$. Магнітний потік через всі витки $\Phi = NBS = N \frac{4\pi\mu}{c} \frac{N}{l} IS$. Порівнюючи з формулою $\Phi = \frac{1}{c} LI$, індуктивність соленоїда дорівнює: $L = \frac{4\pi\mu N^2 S}{l}$

Тороїд



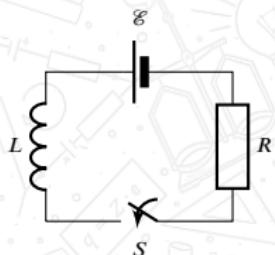
Нехай тороїд має прямокутний переріз шириною $b - a$ і висоту d .

$$L = 2N^2 d \ln \left(\frac{b}{a} \right)$$
.

Одиницею індуктивності в системі СГС є сантиметр: $[L] = \text{см}$. Це означає, що індуктивність є **геометричною** характеристикою.

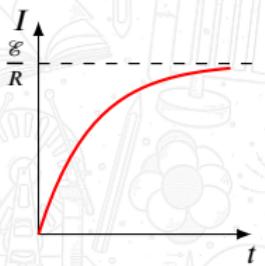
Перехідні процеси в колі з індуктивністю

Встановлення струму в LR -контурі



Закон Ома для кола $\mathcal{E} + \mathcal{E}_{si} = IR$. Враховуючи що $\mathcal{E}_{si} = -LdI/dt$, закон набуде вигляду

$$L \frac{dI}{dt} + IR = \mathcal{E}.$$



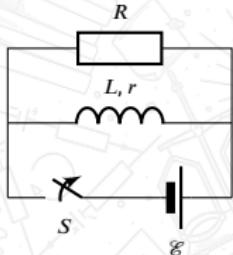
Після інтегрування ми отримаємо:

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right),$$

де $\tau = \frac{L}{R}$ – називають часом релаксації.

Перехідні процеси в колі з індуктивністю

Екстраструми при розмиканні

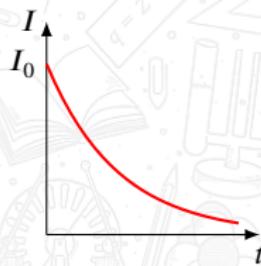


Спочатку ключ S замкнутий. Тоді через опір R і через катушку індуктивності L тече струм:

$$I_0 = \mathcal{E}/r.$$

Після розмикання ключа (відключення ЕРС) магнітне поле почне убувати. Це збудить електрорушійну \mathcal{E}_{si} силу та індукційний струм I у контурі. Такий струм називається **екстраструмом розмикання**. По закону Ома:

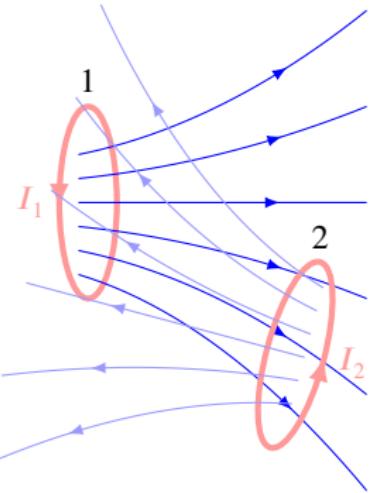
$$I(R + r) = -L \frac{dI}{dt}.$$



Після інтегрування ми отримаємо: $I(t) = I_0 e^{-\frac{R+r}{L}t}$.

Якщо $R \gg r$, то $\mathcal{E}_{si} = \frac{R}{r} \mathcal{E} e^{-\frac{R}{L}t}$. При розмиканні ця величина може значно перевершити ЕРС батареї, тобто може статись пробій, що спостерігається під час вимкнення струму в колах з великими індуктивностями.

Взаємна індукція



Нехай два нерухомих контури 1 і 2 розташовані близько один до одного. Якщо в контурі 1 тече струм I_1 , він створює через контур 2 магнітний потік Φ_2 , пропорційний струму I_1 :

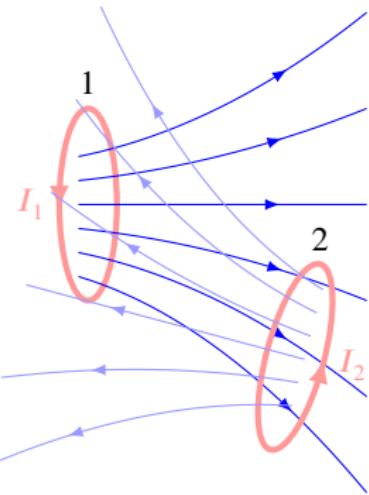
$$\Phi_{21} = \frac{1}{c} L_{21} I_1$$

Аналогічно, якщо в контурі 2 тече струм I_2 , то він створює через контур 1 магнітний потік:

$$\Phi_{12} = \frac{1}{c} L_{12} I_2.$$

Коефіцієнти пропорційності L_{12} і L_{21} називають **коефіцієнтами взаємної індуктивностю** контурів.

Взаємна індукція



Закони Ома для контурів:

$$\begin{cases} I_1 R_1 = \mathcal{E}_1 - \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} (L_{11} I_1) - \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} (L_{12} I_2), \\ I_2 R_2 = \mathcal{E}_2 - \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} (L_{21} I_1) - \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} (L_{22} I_2). \end{cases}$$

Наявність магнітного зв'язку між контурами проявляється в тому, що за будь-якої зміни струму в одному з контурів в іншому контурі виникає ЕСС індукції. Є явище називають **взаємною індукцією**.

L_{12} – алгебраїчна величина, яка може мати різний знак, а також дорівнювати нулю.



Розрахунок коефіцієнтів взаємної індуктивності

Приклад

Довгий парамагнітний циліндр об'ємом V має дві обмотки (одна на іншій). Одна обмотка містить n_1 витків на одиницю довжини, інша – n_2 . Знайдемо їхню взаємну індуктивність, нехтуючи крайовими ефектами.

Розв'язок

Оскільки $L_{21} = \Phi_2/I_1$. Це означає, що ми повинні створити струм I_1 в обмотці 1 і обчислити повний магнітний потік через всі витки обмотки 2. Якщо в обмотці 2 міститься N_2 витків, то

$$\Phi_2 = N_2 B_1 S,$$

де S – площа поперечного перерізу циліндра. Оскільки $N_2 = n_2 l$, l – довжина циліндра, $B_1 = \frac{4\pi}{c} \mu n_1 I_1$, то

$$\Phi_2 = \frac{4\pi}{c} \mu N_2 n_1 I_1 S.$$

Отже

$$L_{21} = 4\pi \mu \frac{N_2 N_1}{l} S.$$

Аналогічно знаходимо і L_{12} :

$$L_{12} = 4\pi \mu \frac{N_1 N_2}{l} S.$$



Розрахунок коефіцієнтів взаємної індуктивності

Приклад

Довгий парамагнітний циліндр об'ємом V має дві обмотки (одна на іншій). Одна обмотка містить n_1 витків на одиницю довжини, інша – n_2 . Знайдемо їхню взаємну індуктивність, нехтуючи крайовими ефектами.

Зауваження

В розглянутому прикладі коефіцієнти індуктивності задовольняють співвідношенням:

$$L_{21} = L_{12} = \sqrt{L_1 L_2}$$

Їх справедливість пов'язана, по-перше, з тим, що ми знехтували розсіюванням магнітного потоку, а по-друге, з тим, що магнітна проникність осердя не залежить від величини магнітного поля. Співвідношення $L_{21} = L_{12}$ не буде виконуватись для феромагнетика, для якого $\mu = \mu(H)$ і за умови що $N_1 \neq N_2$. Тоді обмотки при одинакових струмах створюють в осерді різні магнітні поля, так що вирази для L_{21} і L_{12} міститимуть різні коефіцієнти μ , що й призводить до нерівності.

Теорема взаємності

Теорема взаємності

ЕРС, що наводиться в контурі 1, коли струм в контурі 2 змінюється з певною швидкістю, дорівнює ЕРС, яка наводилася б в контурі 2, якби той самий змінний струм протікав в контурі 1:

$$\mathcal{E}_1 = -L_{12} \frac{dI}{dt} = \mathcal{E}_2 = -L_{21} \frac{dI}{dt}$$

Наслідок

Коефіцієнтами взаємної індуктивності контурів однакові:

$$L_{12} = L_{21}.$$

Завдяки цій теоремі можна не робити різниці між L_{12} і L_{21} і просто говорити про взаємну індуктивність двох контурів.

Практичне застосування

Якщо по контурам течуть одинакові струми I , то

$$\Phi_1 = \Phi_2$$

Це дає змогу спрощувати задачі.

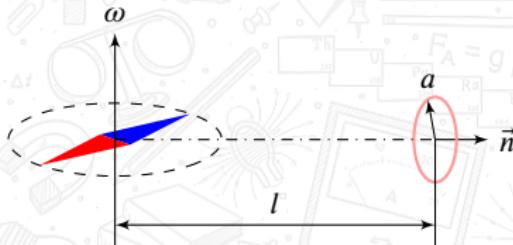
Задачі на застосування теореми взаємності

Задача 1

Два тонкі колові провідники, осі яких співпадають, лежать в одній площині. Радіус зовнішнього провідника R_1 внутрішнього R_2 ($R_2 \ll R_1$). Знайдіть магнітний потік, що пронизує площеу зовнішнього провідника, якщо по внутрішньому провіднику тече струм I .

Задача 2

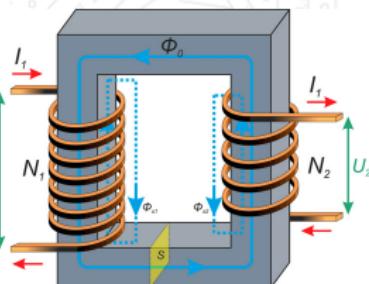
Магнітний диполь з моментом p_m обертається з частотою ω навколо осі, яка проходить через його центр і перпендикулярна магнітному моменту (див. рис.). Знайти струм в плоскому нерухомому кільці радіусом a з опором R , яке знаходитьться на відстані $l \gg a$ від диполя. Нормаль \vec{n} до площини кільця перпендикулярна осі обертання диполя. Самоіндукцією рамки знехтувати.



Трансформатор

Принцип роботи

Принцип дії трансформаторів – пристрой, що застосовуються для підвищення або зниження напруги змінного струму, заснований на явищі взаємної індукції.



Первинна і вторинна обмотки з N_1 і N_2 витками укріплені на замкнутому залізному осерді. Змінна напруга \mathcal{E}_1 у первинній обмотці створює струм I_1 і змінний магнітний потік Φ , локалізований в осерді. Потік пронизує витки вторинної обмотки, викликаючи ЕРС взаємної індукції, а в первинній – ЕРС самоіндукції.

Трансформатор

Теорія

Струм I_1 у первинній обмотці визначається за законом Ома:

$$\mathcal{E}_1 - \frac{d}{dt}(N_1\Phi) = I_1 R_1.$$

При швидкозмінних полях $I_1 R_1 \ll \mathcal{E}_1$, $\frac{d}{dt}(N_1\Phi)$:

$$\mathcal{E}_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

ЕРС у вторинній обмотці:

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{N_2}{N_1} \mathcal{E}_1, \quad \text{знак «--» вказує на протилежність фаз.}$$

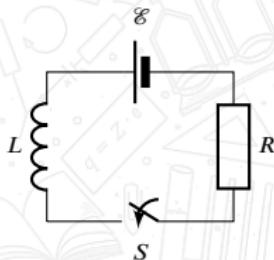
Відношення $\eta = \frac{N_2}{N_1}$ називається **коєфіцієнтом трансформації**.

Якщо $\eta > 1$, то це підвищувальний трансформатор, що збільшує ЕРС і зменшує струм.

Якщо $\eta < 1$, то це знижувальний трансформатор, що зменшує ЕРС і збільшує струм.

Енергія магнітного поля

Провідник зі струмом створює магнітне поле, яке з'являється та зникає разом зі струмом. **Магнітне поле є носієм енергії**, що дорівнює роботі струму на його створення.



Розглянемо роботу, яку виконує джерело при замиканні ключа в колі по переміщенню заряду $dq = Idt$:

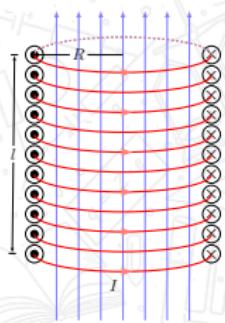
$$\begin{aligned} \delta A &= \mathcal{E} dq = I^2 R dt - \mathcal{E}_{\text{si}} Idt = \\ &= \underbrace{I^2 R dt}_{\text{Теплота}} + \underbrace{\frac{1}{c^2} L I dI}_{\text{Енергія магнітного поля}} \end{aligned}$$

Енергія магнітного поля:

$$W = \frac{1}{c^2} \int_0^I L I dI = \frac{1}{c^2} \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{c} \frac{I\Phi}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}.$$

Енергія магнітного поля

Енергію магнітного поля визначається через характеристики поля.



Розглянемо однорідне магнітне поле всередині довгого соленоїда.

Індуктивність соленоїда:

$$L = \frac{4\pi\mu N^2 S}{l}.$$

Магнітне поле в середині соленоїда:

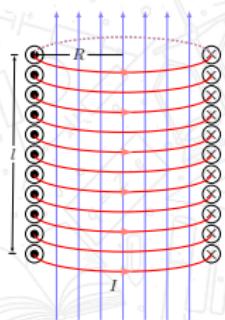
$$B = \frac{4\pi\mu NI}{cl}$$

Енергія магнітного поля:

$$W = \frac{1}{c^2} \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{c^2} \frac{(4\pi\mu NI)^2 Sl}{8\pi\mu l^2} = \frac{B^2}{8\pi\mu} V = \frac{BH}{8\pi} V.$$

Енергія магнітного поля

Енергію магнітного поля визначається через характеристики поля.



Розглянемо однорідне магнітне поле всередині довгого соленоїда.

Індуктивність соленоїда:

$$L = \frac{4\pi\mu N^2 S}{l}.$$

Магнітне поле в середині соленоїда:

$$B = \frac{4\pi\mu NI}{cl}$$

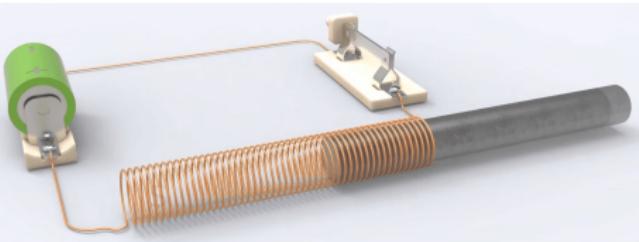
Густина енергії магнітного поля:

$$w = \frac{BH}{8\pi}.$$

Магнітна енергія зосереджена в об'ємі соленоїда – в тій області простору, де присутнє магнітне поле.

Пондеромоторні сили в магнітному полі

Закон збереження енергії



По закону збереження енергії робота, яку виконують джерела струму, йде на теплоту, на збільшення магнітної енергії і на механічну роботу:

$$\delta A_{\text{дж}} = \delta Q + dW + \delta A_{\text{мех.}}$$

З іншого боку, та ж робота визначається як (закон Ома):

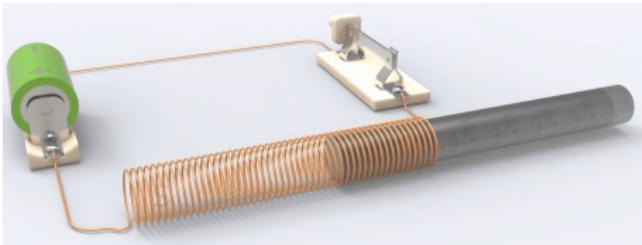
$$\delta A_{\text{дж}} = \delta Q - \mathcal{E}_{\text{си}} I dt,$$

Звідки

$$-\mathcal{E}_{\text{си}} I dt = dW + \delta A_{\text{мех}}$$

Пондеромоторні сили в магнітному полі

Випадок $I = \text{const}$



$$-\mathcal{E}_{\text{si}} I dt = dW + \delta A_{\text{мех}}$$

Розглянемо умову, коли в колі підтримується постійним струмом.

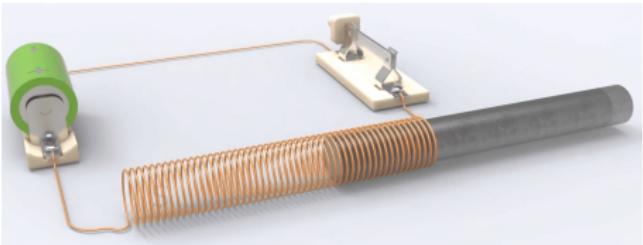
$$-\mathcal{E}_{\text{si}} I dt = + \frac{I^2}{c^2} dL.$$

При цьому, зміна магнітної енергії $dW = \frac{I^2}{2c^2} dL$. Отже, $\delta A_{\text{мех}} = +dW$, а сила втягування:

$$F_x = + \left(\frac{dW}{dx} \right)_I$$

Пондеромоторні сили в магнітному полі

Випадок $\Phi = \text{const}$



$$-\mathcal{E}_{\text{si}} Idt = dW + \delta A_{\text{мех}}$$

Розглянемо умову, коли в колі підтримується потік, що пронизує катушку (наприклад якщо катушка із надпровідника).

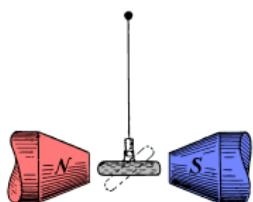
$$-\mathcal{E}_{\text{si}} Idt = 0.$$

Отже, $\delta A_{\text{мех}} = -dW$, а сила втягування:

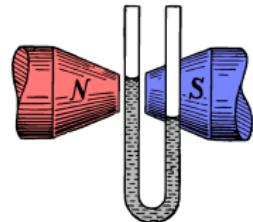
$$F_x = - \left(\frac{dW}{dx} \right)_{\Phi}$$

Приклади

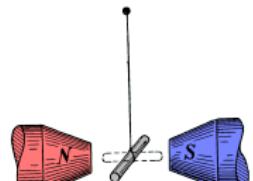
Поведінка різних тіл в магнітному полі



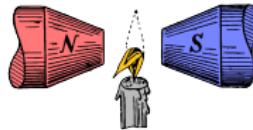
Ампула з парамагнітним розчином хлористого заліза в магнітному полі



Втягування розчину хлористого заліза в магнітне поле

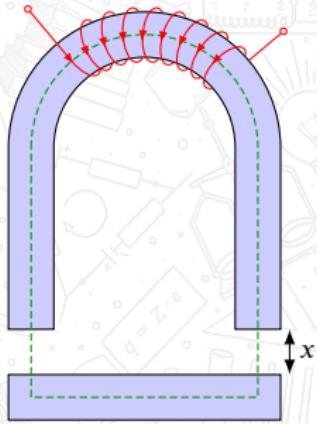


Діамагнітна паличка вісмута в магнітному полі



Діамагнетизм полум'я

Підйомна сила електромагніта



За теоремою про циркуляцію для \vec{H} :

$$\frac{B}{\mu}l + B \cdot 2x = \frac{4\pi}{c}IN, \Rightarrow B = \frac{4\pi\mu}{c} \frac{NI}{l + 2\mu x},$$

де l – довжина контура в середині магніту. Потік магнітного поля через площину перерізу S магніту:

$$\Phi = NBS = \frac{4\pi\mu}{c} \frac{N^2 I}{l + 2\mu x} S.$$

За умови, що струм постійний, зміна енергії магнітного поля при віртуальній зміні x дорівнює $dW = \frac{I d\Phi}{2c}$, і силу можна знайти як:

$$F_x = \left(\frac{dW}{dx} \right)_I = \frac{I}{2c} \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_I = -\frac{4\pi\mu^2}{c^2} \frac{N^2 I^2}{(l + 2\mu x)^2} S = -\frac{B^2}{8\pi} 2S.$$

Сила $F_x < 0$ означає, що це сила притягання.