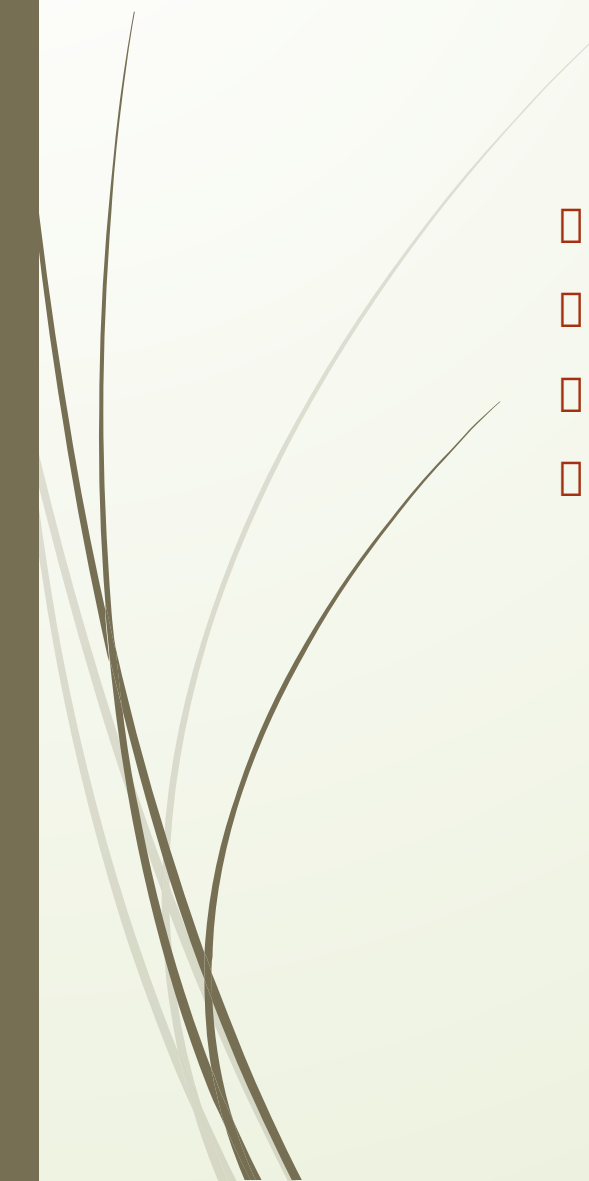


Електромагнітна індукція





План

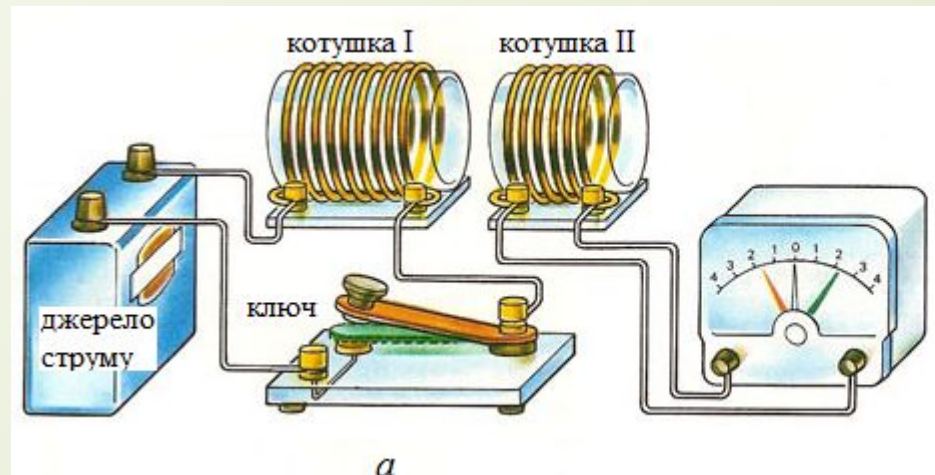
- 1) Явище електромагнітної індукції. Досліди Фарадея.
 - 2) Закон електромагнітної індукції. Правило Ленца.
 - 3) Явище самоіндукції. Індуктивність. Взаємоіндукція
 - 4) Енергія і густина енергії магнітного поля струму.
- 



1. Явище електромагнітної індукції. Досліди Фарадея

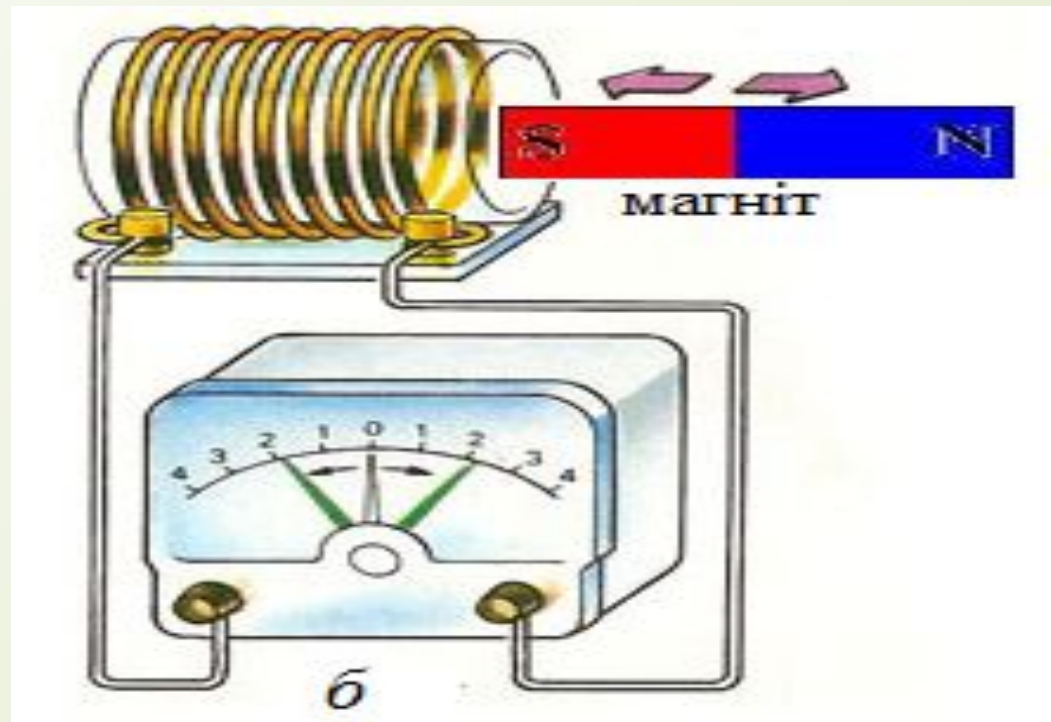
- Електричні струми створюють магнітне поле в навколишньому просторі. Можливим є і зворотнє явище: магнітне поле може викликати електричний струм. Таке явище, явище електромагнітної індукції, було відкрито англійським вченим М.Фарадеєм у 1831 р.
- Електромагнітна індукція — явище створення в просторі вихрового електричного поля змінним магнітним потоком.

Фарадей поставив ряд дослідів, в яких було вивчено явище. В першому досліді він використав дві котушки. Котушку I було приєднано до батареї, а котушка II – до гальванометра. Якщо котушки рухати одну відносно одної, то гальванометр покаже існування струму в котушці II, при чому напрямок струму змінюється при зміні напрямку руху котушок (а). Такий струм Фарадей назвав індукційним. Коли котушки залишити нерухомими, але змінювати струм в першій котушці за допомогою реостата чи навіть вимикаючи батарею ключем, то в котушці II фіксується існування струму, який також змінює напрямок при зміні напрямку струму в котушці I чи розмиканні і замиканні ключа. З цих дослідів слідує, що причиною виникнення індукційного струму є зміна магнітного поля електричних струмів.



Змінне магнітне поле можна отримати і за допомогою постійного магніту. Рухаючи постійний магніт в котушці або котушку відносно магніту (б), гальванометром теж фіксується електричний струм, напрямок якого змінюється при зміні напрямку руху котушки.

Цими дослідами Фарадей встановив, що в замкненому контурі де є зміна магнітного поля завжди виникає індукційний струм.



2. Закон електромагнітної індукції. Правило Ленца.

Визначимо кількісний зв'язок між зміною магнітного поля і струмом у провіднику.

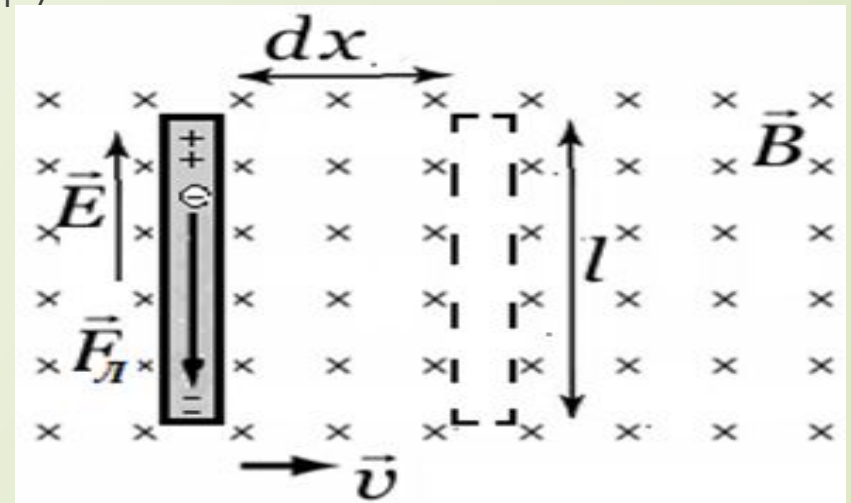
Нехай металевий провідник довжиною l переміщується у магнітному полі. Тоді на електрони провідника діє сила Лоренца, яка є сторонньою. Поле сторонніх сил, яке при цьому виникає,

$$\vec{E} = -\frac{\vec{F}_A}{e} = -[\vec{v} \cdot \vec{B}]$$

визначає електрорушійну силу індукції, як роботу сторонніх сил по переміщенні одиничного заряду по замкненому контуру:

$$\mathcal{E} = \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\oint_L [\vec{v} \cdot \vec{B}] d\vec{l}$$

$$\mathcal{E} = -B \frac{dx}{dt} l = -\frac{BdS}{dt}$$



Закон електромагнітної індукції:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

електрорушійна сила індукції, яка виникає в контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

Знак “-” виражає правило Ленца – напрям індукційного струму такий, що створене ним власне магнітне поле протидіє магнітному полю яке збудило індукційний струм.

Струм у контурі визначається електрорушійною силою індукції і повним опором контура :

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Враховуючи останню формулу отримаємо:

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

В більш загальній формі, враховуючи що:

$$\Phi = \int_S B_n dS$$

Закон електромагнітної індукції перепишеться :

$$\oint_L \vec{E} dl = - \frac{d}{dt} \int_S B_n dS$$

S-довільна поверхня, яка спирається на контур **L**

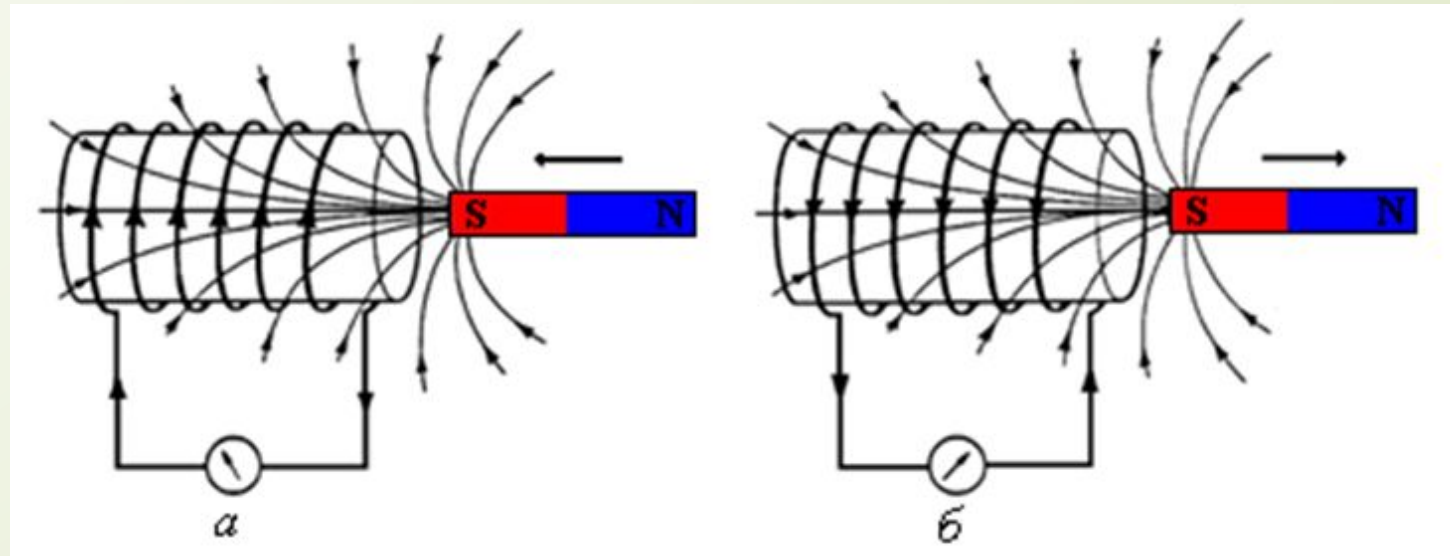
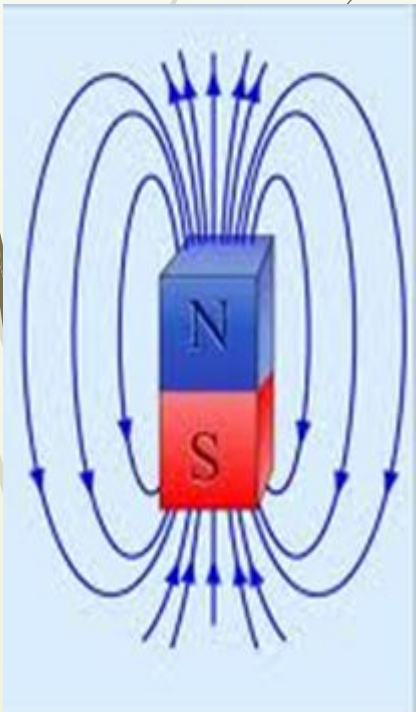
При всякій зміні магнітного поля збуджується вихрове електричне поле, циркуляція якого по замкненому контуру дорівнює швидкості зміни потоку магнітної індукції через поверхню, що спирається на контур **L**.

Максвел узагальнив закон Фарадея: електричне поле виникає всюди де змінюється магнітне, незалежно чи є в цій області провідний контур.

Приклад

Визначимо індукційний струм, що виникає в котушці, при русі постійного магніту в досліді Фарадея

Якщо магніт рухається південним полюсом до котушки, то лінії магнітного поля напрямлені так, як на рис. (а) Згідно правила Ленца індукційний струм в котушці буде створювати магнітне поле, що перешкоджатиме зміні поля магніту, яке в даному випадку збільшується. Напрямок цього магнітного поля до магніту. Тоді напрямок струму визначаємо за правилом свердлика (а).

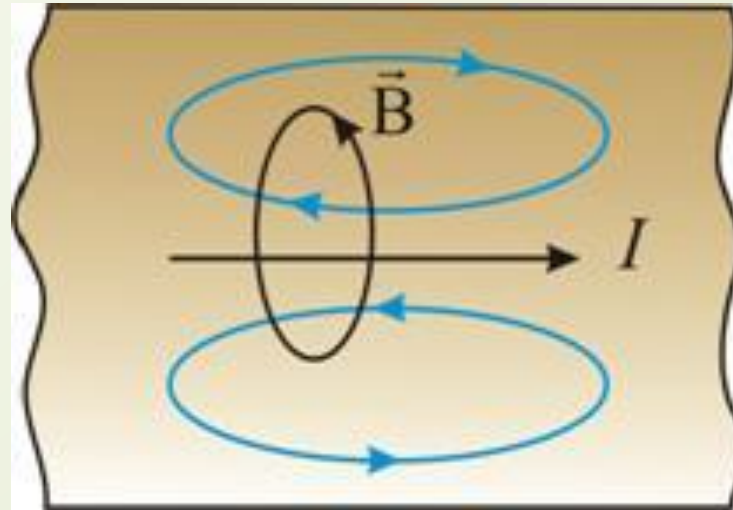


Вихрові струми

- Вихрові струми – струми Фуко – замкнені струми, що виникають у масивних провідниках внаслідок явища електромагнітної індукції при зміні магнітного потоку.,
- Струми Фуко відіграють корисну роль в роторах асинхронних двигунів в спеціальних високочастотних печах. Про те їх виникнення в осердях трансформаторів, електромагнітів – шкідливе бо веде до втрати електричної енергії і нагрівання осердь .
- Один з проявів явища електромагнітної індукції – скін-ефект. При проходженні по провіднику змінного струму в його об'ємі виникають вихрові струми які підсилюють основний струм біля поверхні і послаблюють всередині.

Товщина шару в якому концентрується змінний струм внаслідок скін-ефекту залежить від частоти. Для частоти струму 10^5 - 10^7 Гц в мідному провіднику струм існує у приповерхневій області $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ - $2 \cdot 10^{-3}$ см.

Високочастотний струм проходить в невеликій частині поперечного перерізу, що веде до збільшення ефективного опору провідника тому в радіотехніці використовують багатожильні провідники, антенні канатики, тощо. Також, як провідники високочастотних струмів використовують провідники в вигляді труб із посрібленою поверхнею.



3. Явище самоіндукції. Індуктивність. Взаємоіндукція

- Самоіндукція – явище виникнення індукційного струму внаслідок зміни магнітного потоку, викликаного зміною струму в тому самому провіднику. Струм самоіндукції напрямлений так, що протидіє зміні струму, який його викликав. Якщо $\frac{dI}{dt} > 0$

то струм самоіндукції I_s протидіє наростання основного струму I , якщо $\frac{dI}{dt} < 0$ то I_s протидіє спаданню струму I .

В згідно закону Біо-Савара-Лапласа вектор магнітної індукції пропорційний величині струму. Оскільки $\Phi = BS$ то

$$\Phi = LI$$

де коефіцієнт пропорційності L – індуктивність контура – залежить від форми і розмірів провідника, а також властивостей навколишнього середовища.

Закон Фаредея для самоіндукції :

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

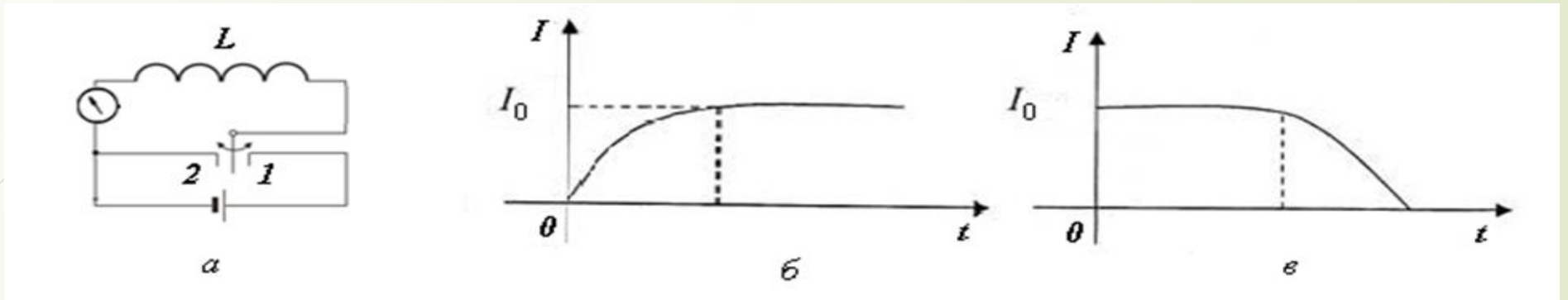
Одиниці вимірювання індуктивності в СІ $[L] = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = 1 \text{Гн}$

1 Гн – індуктивність такого провідника, в якому зміна струму **1А** за **1с** викликає електрорушійну силу самоіндукції **1В**.

Індуктивність провідника – міра його інерції у відношенні до зміни струму. Так, при ввімкненні котушки індуктивності **L** в коло, внаслідок явища самоіндукції струм зростає не миттєво, а за законом:

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

Тобто у витках котушки виникає струм самоіндукції, що протидіє наростанню струму основного струму **I** – екстраструм вмикання. Зміна струму з часом показана на рис.



- При вимиканні котушки індуктивності з кола де встановився струм у витках котушки виникає струм самоіндукції, що протидіє зменшенню струму I – екстраструм вимикання :

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{\mathcal{E}_0}{R} e^{-\frac{R}{L}t}$$

Чим більшою є індуктивність котушки L і менший опір кола R тим повільніше змінюється струм у колі.

Приклад

- Обчислимо індуктивність нормального соленоїда довжиною l площею перерізу S і кількістю витків N .
- Згідно закону Фарадея, е.р.с. самоіндукції, що виникає в N витках соленоїда:

$$\mathcal{E}_{\text{self}} = -\frac{d\Phi}{dt} N$$

$\Phi_1 = BS = \mu_0 I \frac{N}{l} S$ - магнітний потік, що пронизує один виток соленоїда.
Для N витків

$$\Phi = \mu_0 I \frac{N^2}{l} S \qquad \mathcal{E}_{\text{self}} = \mu_0 \frac{N^2}{l} S \frac{dI}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

Звідси індуктивність соленоїда:

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} V = \mu_0 n^2 V$$

Якщо котушки зі струмом розмішені так, що магнітні потоки кожної з них перетинаються витки сусідніх, то виникає явище взаємодукції. Е.р.с. в кожному контурі виникає за рахунок самоіндукції і взаємодукції. Розглянемо дві індуктивно зв'язані котушки. Повний потік через котушку 1:

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}$$

Φ_{11} – магнітний потік через котушку 1 створений струмом I_1 , Φ_{12} – магнітний потік через котушку 1, створений струмом I_2 . Аналогічно

$$\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21}$$

$$\Phi_{11} = L_{11}I_1$$

$$\Phi_{22} = L_{22}I_2$$

$$\Phi_{12} = L_{12}I_2$$

$$\Phi_{21} = L_{21}I_1$$

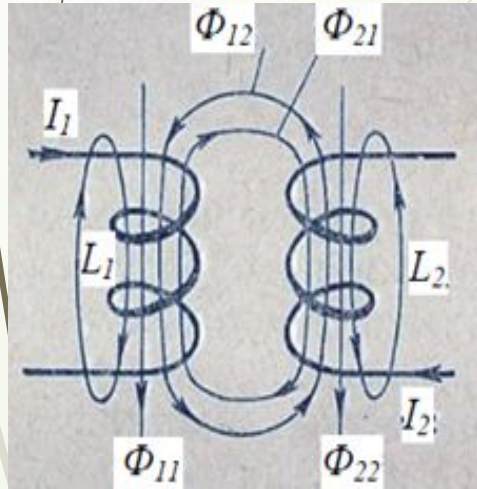
L_{11} і L_{22} – коефіцієнти самоіндукції (індуктивності) першої і другої котушок.

L_{21} і L_{12} – коефіцієнти взаємодукції першої і другої котушок.

Отже

$$\Phi_1 = L_{11}I_1 + L_{12}I_2$$

$$\Phi_2 = L_{22}I_2 + L_{21}I_1$$



Тоді е.р.с. у першій та другій котушці з врахуванням явища само- і взаємоіндукції:

$$\mathcal{E}_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -\left(L_{11}\frac{dI_1}{dt} + L_{12}\frac{dI_2}{dt}\right)$$

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -\left(L_{22}\frac{dI_2}{dt} + L_{21}\frac{dI_1}{dt}\right)$$

Коефіцієнт взаємоіндукції для тороїдальної котушки з витками N_1 і N_2 :

$$L_{12} = \mu_0\mu\frac{N_1N_2}{l}S$$

З останньої формули можна зробити висновок, що $L_{12} = L_{21}$.

4. Енергія і густина енергії магнітного поля струму.

- При вмиканні джерела струм в колі росте від нуля до максимального значення. В колі виникає е.р.с. індукції, що протидіє е.р.с. джерела. Щоб струм у колі зростав необхідно компенсувати е.р.с. індукції за рахунок роботи джерела, що йде на створення магнітного поля

$$dW_{\text{м}} = -dA$$

$$dA = \varepsilon_{\text{і}} Idt = \frac{d\Phi}{dt} Idt = Id\Phi$$

$$dW_{\text{м}} = Id\Phi = LI dI$$

Отже власна енергія магнітного поля струму:

$$W_{\text{м}} = \int_0^I LI dI = \frac{1}{2} LI^2$$

– визначає енергію магнітного поля контура зі струмом I та індукцією L . Свідчення наявності енергії магнітного поля – екстраструми вимикання: енергія магнітного поля переходить в енергію струму самоіндукції.

Енергія магнітного поля локалізована в просторі.
Розглянемо магнітне поле нормального соленоїда з струмом I у вакуумі.
Його індукція:

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

Тоді енергія магнітного поля, також пропорційна об'єму який охоплюється соленоїдом:

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 I^2 V = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} B^2 V = \frac{1}{2} BHV$$

Отже магнітне поле соленоїда має енергію, яка розподіляється у просторі з об'ємною густиною:

$$\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} \vec{B} \vec{H}$$

що повністю узгоджується з теорією близькодії