

## 4.2.1. Досліди Фарадея. Закон електромагнітної індукції.

Розглянемо досліди Фарадея, за допомогою яких було виявлено явище електромагнітної індукції.

**Досліди Фарадея** Котушку  $L$  замкнено на гальванометр (рис. 4.12). Постійний магніт  $NS$  всували в котушку й витягували з неї. В момент всування магніту і його витягування гальванометр фіксував наявність струму (виникав індукційний струм). Напрями відхилення стрілки при всуванні та витягуванні магніту протилежні, а її відхилення тим більше, чим більша швидкість руху магніту відносно котушки. При зміні полюсів магніту напрям відхилення стрілки змінюється. Індукційний струм можна отримати, також якщо котушку переміщувати відносно нерухомого магніту.

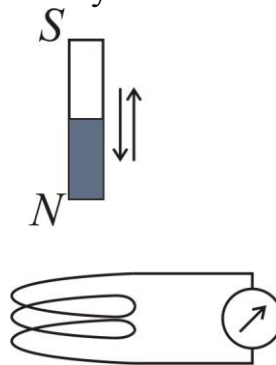


Рисунок 4.12

**Явище електромагнітної індукції**

Виникнення індукційного струму вказує на існування в колі електромагнітної сили, яка має назву *електрорушійної сили (ЕРС) електромагнітної індукції*.

Таким чином **явище електромагнітної індукції (ЕМІ)** – це виникнення *ЕРС індукції* у контурі при зміні магнітного потоку крізь його поверхню.

**Закон Електромагнітної індукції**

*Електрорушійна сила електромагнітної індукції в замкненому провідному контурі чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку крізь довільну поверхню,*

*обмежену цим контуром*

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.18)$$

**Правило Ленца**

*Індукційний струм завжди спрямований так, щоб протидіяти причині, що викликала його появу.*

Знак мінус у формули (4.18) відображає правило Ленца і вказує на те, що збільшення потоку  $\left(\frac{d\Phi}{dt} > 0\right)$  викликає ЕРС  $\mathcal{E}_i < 0$ , тобто магнітне поле

індукційного струму напрямлене назустріч потоку; зменшення потоку  $\left(\frac{d\Phi}{dt} < 0\right)$  викликає  $\mathcal{E}_i > 0$ , тобто напрями потоку й поля індукційного току збігаються.

#### 4.2.2. Явище самоіндукції. Індуктивність.

Відповідно до закону Біо-Савара-Лапласа величина індукції магнітного поля  $\vec{B}$  прямо пропорційна силі струму в контурі ( $B \sim I$ ). Зважаючи на визначення потоку  $\Phi$ , можна стверджувати, що потік магнітної індукції крізь певну фіксовану поверхню буде також пропорційним силі струму, тобто

**Індуктивність**

$$\Phi \sim I, \text{ або } \Phi = LI,$$

де  $L$  - коефіцієнт пропорційності, який має назву *індуктивності контуру*.

**Індуктивність** – характеристика здатності контуру утворювати магнітний потік крізь свою поверхню:

$$L = \frac{\Phi}{I}. \quad (4.19)$$

#### Властивості індуктивності:

1. *Індуктивність контуру*  $L$  не залежить ні від сили струму, ні від індукції магнітного поля, а є однозначною характеристикою провідного контуру. Вона залежить від форми й розмірів контуру, а також від магнітних властивостей навколишнього середовища.

2. За одиницю індуктивності взято індуктивність такого провідника, в якому при зміні сили струму в 1А за 1с виникає ЕРС самоіндукції 1В. Ця одиниця має назву генрі на честь американського фізика Дж. Генрі.

$$[L] = 1 \frac{B \cdot c}{A} = 1 \text{Гн}.$$

**Явище самоіндукції**

Електричний струм, що проходить в будь-якому контурі, утворює магнітний потік, який пронизує цей контур. Якщо в провідному замкненому контурі змінюється струм, то змінюється й потік магнітної індукції. Зміна магнітного потоку призводить згідно закону електромагнітної індукції до виникнення в цьому ж провіднику ЕРС індукції.

*Явище виникнення індукційної ЕРС у контурі внаслідок зміни струму в ньому має назву явища самоіндукції.*

Згідно правила Ленца індукційний струм буде завжди мати напрямок, при якому він буде перешкоджати зміні первинного струму.

**Закон самоіндукції**

При зміні струму в контурі виникає ЕРС самоіндукції  $\mathcal{E}_s$ , яка дорівнює:

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}. \quad (4.20)$$

Електрорушійна сила самоіндукції викликає в контурі струм, який за правилом Ленца перешкоджає змінюванню струму в контурі, уповільнюючи його зменшення або зростання.

Якщо струм з часом зростає, то  $\frac{dI}{dt} > 0$  а  $\mathcal{E}_s < 0$ , тобто струм самоіндукції напрямлений назустріч струму, обумовленому зовнішнім джерелом та гальмує його.

Якщо струм з часом зменшується, то  $\frac{dI}{dt} < 0$  а  $\mathcal{E}_s > 0$ , тобто індукційний струм співпадає за напрямком зі спадаючим струмом у контурі і тим самим уповільнює його спадання.

**Індуктивність  
соленоїда**

Обчислимо індуктивність соленоїда. Соленоїд – це рівномірно намотана на циліндричну поверхню проволочена спіраль по якій проходить електричний струм. Візьмемо соленоїд такої довжини, що його можна вважати безконечним. За законом Фарадея ЕРС індукції  $\mathcal{E}_s = -\frac{d\Psi}{dt}$ , де  $\Psi = \Phi N$  - повний магнітний потік крізь усі  $N$  витків соленоїда. Потік індукції крізь поверхню площею  $S$ , яку охоплює один виток довжиною  $l$  у вакуумі.

$$\Phi = BS = \mu_0 I \frac{N}{l} S,$$

тоді

$$\Psi = \Phi N = \mu_0 I \frac{N^2}{l} S,$$

а ЕРС індукції:

$$\mathcal{E}_s = -\mu_0 \frac{N^2}{l} S \frac{dI}{dt}.$$

З іншого боку:

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}.$$

Прирівнявши дві останні формули одержимо:

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

Оскільки  $S \cdot l = V$  - об'єм соленоїда, то

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} V = \mu_0 n^2 V, \tag{4.14}$$

де  $n$  – кількість витків, що припадає на одиницю довжини соленоїда (густина витків).

**4.2.3. Явище взаємоіндукції. Взаємоіндуктивність.**

**Зв'язані  
контури**

Розглянемо два нерухомих контури 1 і 2, що розташовані досить близько один від одного (рис.4.13). В них течуть струми  $I_1$  та  $I_2$ . Магнітні потоки кожного з контурів частково перекривають потік сусіднього.

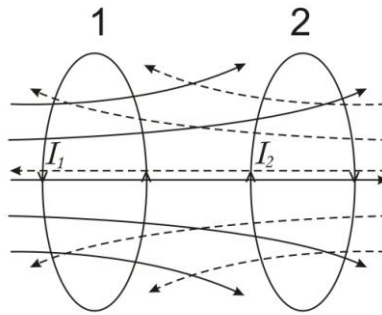


Рисунок 4.13

Якщо в першому контурі проходить струм  $I_1$ , то магнітний потік утворений цим струмом через другий контур пропорційний  $I_1$  і дорівнює:

$$\Phi_{21} = L_{21}I_1 \quad (4.22)$$

Магнітне поле, яке утворює цей потік, зображено на рис 4.13 суцільними лініями

Аналогічно, при проходженні у другому контурі струму  $I_2$  виникає пов'язаний з першим контуром потік:

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

Магнітне поле, яке утворює цей потік, на рис.4.13 зображено пунктирними лініями.

**Взаємоіндуктивність**

*Контури, що мають спільний магнітний потік називають зв'язаними.*

Контури 1 та 2 взаємопов'язані, коефіцієнти пропорційності  $L_{12}$  та  $L_{21}$  називаються *коефіцієнтами взаємної індукції*, або *просто взаємною індуктивністю*, що характеризує здатність одного контуру створювати магнітний потік крізь другий зв'язаний з ним контур.

**Властивості взаємоіндукції:**

1. Коефіцієнти  $L_{12}$  та  $L_{21}$  залежать від геометричної форми, розмірів і взаємного розташування контурів, а також від магнітної проникненості оточуючого середовища.

2. На основі **теорема взаємності** яка стверджує, що у неферромагнітному середовищі при зміні ролі контурів (струм проходить у контурі 2, а індукується у контурі 1 і навпаки) *взаємна індуктивність двох довільних контурів дорівнює одна одній*;

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

3.  $[L_{12}] = 1 \text{ Гн.}$

**Явище взаємоіндукції**

Якщо струм у одному з контурів буде змінюватись (наприклад,  $I_1$ ), то згідно з (4.22) буде змінюватись і магнітний потік крізь другий контур.

Отже у цьому контурі за законом Фарадея повинна виникнути ЕРС індукції.

Виникнення ЕРС індукції у одному із зв'язаних контурів при зміні сили струму в іншому називається **явищем взаємоіндукції**.

**Закон  
взаємоіндукції**

При зміні струму  $I_1$  у другому контурі індукується ЕРС  $\mathcal{E}_{21}$ , яка за законом Фарадея дорівнює:

$$\mathcal{E}_{21} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$

І навпаки, при зміні струму  $I_2$  у першому контурі виникає ЕРС:

$$\mathcal{E}_{12} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}.$$

Явище взаємоіндукції широко використовується у *трансформаторах* – пристроях для зниження або підвищення напруги змінного струму. Схематично трансформатор складається з двох (або більше) обмоток (соленоїдів) зі спільним осереддям (як правило з феромагнетика). На первинну обмотку подається змінна напруга (тече змінний струм), яка викликає у осередді змінний магнітний потік, що утворює змінну ЕРС (змінну напругу) у другій обмотці. Залежно від співвідношення кількості витків у обмотках, вторинна напруга буде меншою або більшою, ніж на вході.

#### 4.2.4. Енергія провідника зі струмом . Енергія магнітного поля.

Розглянемо схему, наведену на рис.4.14. Якщо ключ К знаходиться у нижньому положенні, то під дією ЕРС крізь соленоїд тече струм, який обумовлює зчеплене з витками соленоїда магнітне поле (рис 4.14). Якщо з електричного кола вилучити джерело ЕРС і замкнути соленоїд на опір R, то в

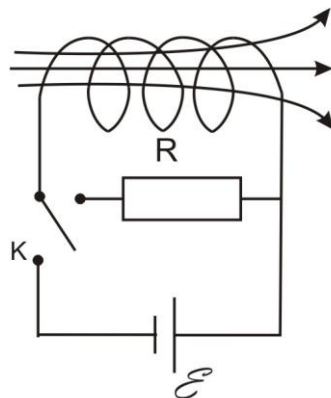


Рисунок 4.14

цьому колі деякий час за рахунок ЕРС самоіндукції буде проходити спадаючий з часом струм. Робота, яка здійснюється цим струмом за час  $dt$ , дорівнює:

$$dA = \varepsilon_s Idt = -L \frac{dI}{dt} Idt = -LI dI.$$

Розрахуємо роботу за весь час, за який сила струму зменшується до 0 (відбувається зникнення магнітного поля).

$$A = -\int_I^0 LIdI = L\int_0^I IdI = \frac{LI^2}{2}. \quad (4.23)$$

**Енергія провідника зі струмом**

Робота (4.23) йде на приріст внутрішньої енергії опору соленоїда та з'єднувальних провідників, тобто на їх нагрівання. Здійснення цієї роботи супроводжується зникненням магнітного поля, раніш існуючого в оточуючому соленоїд середовищі. Можна зробити висновок, що магнітне поле – є носієм енергії, за рахунок якої здійснюється робота нагрівання. Таким чином, провідник з індуктивністю  $L$  по якому проходить струм  $I$  має енергію:

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (4.24)$$

Оскільки енергія магнітного поля розподілена в усьому просторі, де локалізоване поле, то формула (4.24) визначає повну енергію магнітного поля струму.

Часто важливо знати не повну енергію, а енергію в окремих областях, а бува й окремих точках заданого магнітного поля.

Виразимо енергію магнітного поля як функцію величин, які є локальними характеристиками поля в кожній точці.

Для цього розглянемо окремий випадок – однорідне магнітне поле всередині дуже довгого соленоїда. Індуктивність такого соленоїда (за відсутності феромагнетиків):

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

де  $\mu_0$  - магнітна стала,  $n$  – густина витків,  $V$  – об'єм соленоїда.

**Енергія магнітного поля**

Індукція в середині соленоїда  $B = \mu_0 nI$ , звідки,  $I = \frac{B}{\mu_0 n}$ , тоді енергія магнітного поля соленоїда:

$$W = \frac{\mu_0 n^2 V \cdot B^2}{2\mu_0^2 n^2} = \frac{B^2}{2\mu_0} V \quad (4.25)$$

Введемо поняття *об'ємної густини магнітного поля*:

$$w = \frac{dW}{dV}, \quad (4.26)$$

де  $w$  – енергія одиниці об'єму.

Підставив (4.25) у (4.26), отримаємо вираз для об'ємної густини магнітного поля

$$w = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (4.27)$$

Отже, *об'ємна густина енергії магнітного поля* в околі кожної точки простору визначається значенням характеристик цього поля в цій точці.

Вираз (4.27) для об'ємної густини енергії магнітного поля має вигляд аналогічній формулі для об'ємної густини енергії електростатичного поля, з тією різницею, що електричні величини замінені магнітними.

**Контрольні запитання і завдання до підрозділу 4.2. Електромагнітна індукція:**

1. Сутність явища ЕМІ. Якими способами можна викликати це явище?
2. Що таке зв'язані контури? Пояснити малюнком.
3. Закон ЕМІ. Сутність правила Ленца.
4. Які пристрої засновані на явищі взаємоіндукції? Пояснити малюнком.
5. Сутність явища самоіндукції. Закон самоіндукції.
6. Що таке 1 Генрі? Як ця одиниця пов'язана з 1 Ампером?
7. Що таке індуктивність? Від чого вона залежить?
8. Чому дорівнює енергія котушки індуктивністю  $L$ , по якій протікає струм  $I$ ?
9. Чим визначається напрямок індукційного струму?
10. Що таке об'ємна густина енергії МП? Чому вона дорівнює?
11. Як обчислюється індуктивність соленоїда
12. Як обчислити енергію МП у заданому об'ємі простору  $V$ ?
13. Сутність явища взаємоіндукції. Закон взаємоіндукції.
14. Як змінюється індуктивність котушки, якщо усередині її помістити залізний сердечник?
15. Що таке взаємоіндуктивність? Від чого вона залежить?
16. Чому при розмиканні ланцюга струм миттєво не зникає?