

## Заняття (практичне) № 21

**Тема:** ЕЛЕКТРОДИНАМІКА. Самоіндукція. Індуктивність. Енергія магнітного Поля

Вихрове електричне поле виникає в провіднику в разі зміни магнітного поля, в якому розташований провідник. таке поле може бути створене й змінним струмом самого провідника, причому провідник не може «відрізнити» «своє» поле від «чужого». З'ясуємо, які виникають ефекти, якщо провідник перебуває у «своєму» змінному магнітному полі.

### У чому полягає явище самоіндукції

Складемо електричне коло (рис. 14.1). Після замкнення кола лампа 1 спалахне практично відразу, а лампа 2 — з помітним запізненням. Якщо коло розімкнати, то обидві лампи згаснуть одночасно, однак у момент розімкнення їхня яскравість на мить збільшиться. Чому так відбувається?

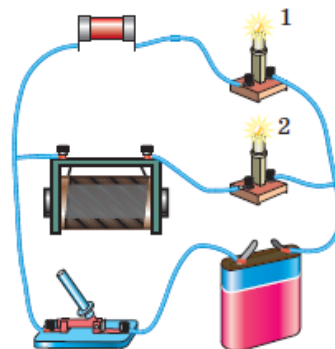


Рис. 14.1. Спостереження явища самоіндукції

Коло замикають	Коло розмикають
<p>Відразу після замкнення кола сила струму <math>I</math> в колі збільшується.</p>	<p>Відразу після розімкнення кола сила струму <math>I</math> в колі зменшується.</p>
<p>Усередині котушки виникає змінне магнітне поле, магнітна індукція <math>\vec{B}</math> якого теж збільшується. Змінне магнітне поле створює <i>вихрове електричне поле</i> <math>\vec{E}</math>, яке в цьому випадку буде <i>протидіяти струму</i> в котушці (правило Ленца).</p> <p style="text-align: right;"><math>I \uparrow \Rightarrow B \uparrow</math></p>	<p>Магнітна індукція <math>\vec{B}</math> поля, створеного струмом, теж зменшується. Змінне магнітне поле створює <i>вихрове електричне поле</i> <math>\vec{E}</math>, яке в цьому випадку <i>підтримуватиме струм</i> у котушці (правило Ленца).</p> <p style="text-align: right;"><math>I \downarrow \Rightarrow B \downarrow</math></p>
<p>Саме тому сила струму в колі котушки (а отже, і в лампі 2) зростатиме не відразу, а поступово. Зрозуміло, що в провідниках, які підводять струм до лампи 1, також виникає вихрове електричне поле, але створена ним ЕРС є незначною.</p>	<p>Здається, що лампа 2 повинна згаснути пізніше, ніж лампа 1, але обидві гаснуть одночасно! Річ у тім, що коло, яке складається із двох ламп, котушки і резистора, залишається замкненим. <i>Котушка</i> в цьому колі слугує <i>джерелом струму</i>: вихрове електричне поле, що виникло в котушці, підтримує в колі струм. Струм через котушку і лампу 2 продовжує йти в тому самому напрямку, а напрямку струму в лампі 1 і резисторі змінюється на протилежний.</p>

Явище виникнення вихрового електричного поля в провіднику, в якому тече змінний електричний струм, називають **явищем самоіндукції**.

### **ЕРС самоіндукції. Індуктивність.**

Електрорушійну силу індукції, що створюється в провіднику внаслідок зміни його власного магнітного поля, називають електрорушійною силою самоіндукції  $\mathcal{E}_{is}$ .

За законом Фарадея ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:  $\mathcal{E}_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$ . Оскільки магнітний потік прямо пропорційний магнітній індукції магнітного поля струму ( $\Phi \sim B$ ), а магнітна індукція прямо пропорційна силі струму в провіднику ( $B \sim I$ ), то *магнітний потік прямо пропорційний силі струму в провіднику*:  $\Phi = L \cdot I$  ( $L$  — коефіцієнт пропорційності). Відповідно зміна магнітного потоку прямо пропорційна зміні сили струму:  $\Delta\Phi = L \Delta I$ .

Отже, **закон самоіндукції**:

ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в провіднику:

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \text{ або } \mathcal{E}_{is} = -LI'(t)$$

Коефіцієнт пропорційності  $L$  називають **індуктивністю провідника**.

**Індуктивність**  $L$  — фізична величина, яка характеризує провідник і чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає в провіднику в разі зміни сили струму на 1 ампер за 1 секунду:

$$L = \frac{|\mathcal{E}_{is}|}{|\Delta I|/\Delta t}$$

Одиниця індуктивності в СІ — **генрі**:  $[L] = 1 \text{ Гн (Н)}$ ; названа на честь американського фізика *Джозефа Генрі* (1797–1878), який у 1831 р. відкрив явище самоіндукції.

*Індуктивність провідника дорівнює 1 генрі, якщо в ньому виникає ЕРС самоіндукції 1 В у разі зміни сили струму на 1 А за 1 с:*

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А/с}}.$$

Велику індуктивність мають обмотки генераторів і двигунів, тому під час розімкнення кола, коли сила струму швидко змінюється, ЕРС самоіндукції може сягнути такого значення, що відбудеться пробій ізоляції.

**Зверніть увагу!**

**Індуктивність** — це характеристика провідника, тому вона не залежить ані від сили струму в провіднику, ані від ЕРС самоіндукції, що виникає в провіднику внаслідок зміни струму.

*Індуктивність залежить:*

- від магнітних властивостей середовища, в якому розташований провідник;
- розмірів і форми провідника (так, індуктивність прямого проводу набагато менша, ніж індуктивність того самого проводу, намотаного на олівець);
- наявності та форми осердя.

Наприклад, індуктивність соленоїда обчислюють за формулою:

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

де  $\mu$  - магнітна проникність матеріалу, з якого виготовлено осердя;  $m\theta$  — магнітна стала;  $N$  — кількість витків у соленоїді;  $l$  і  $S$  — відповідно довжина і площа поперечного перерізу соленоїда.

### Як обчислити енергію магнітного поля

З'ясуємо, за рахунок якої енергії вихрове електричне поле підтримує струм у колі після відключення джерела живлення. Прості міркування приводять до висновку: *енергія була накопичена в магнітному полі провідника (катушки) раніше*. Дійсно (див. рис. 14.2):

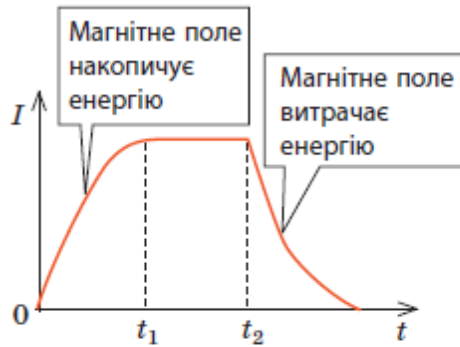


Рис. 14.2. Графік залежності сили струму в колі катушки від часу:  
 $t = 0$  — момент замкнення кола;  
 $t = t_2$  — момент розімкнення кола

1) джерело живлення починає працювати відразу після замикання кола, але струм у колі сягає максимального значення не миттєво. Це означає, що протягом інтервалу часу  $0 - t_1$  енергія джерела витрачається ще на щось;

2) протягом інтервалу часу  $0 - t_1$  біля катушки створюється досить помітне магнітне поле й окрім цього жодних змін не відбувається. Тобто енергія витрачається саме на створення магнітного поля.

Очевидно: чим більшої сили досяг струм у катушці (провіднику), тим більшою буде накопичена енергія. Енергія магнітного поля буде більшою і в разі більшої індуктивності  $L$  катушки, адже в такому випадку струм повільніше досягатиме максимального значення. Точні розрахунки із застосуванням інтегрування дають таку формулу для визначення енергії ( $W_M$ ) магнітного поля:

$$W_M = \frac{LI^2}{2}$$

*Енергія магнітного поля провідника зі струмом дорівнює половині добутку індуктивності провідника на квадрат сили струму в провіднику.*

### Зверніть увагу!

Індуктивність подібна до маси в механіці.

• Щоб зрушити тіло ( надати йому швидкості), потрібно виконати роботу:

$$A = E_k = \frac{mv^2}{2};$$

чим більша маса тіла, тим більшу роботу треба виконати; під час гальмування тіло саме виконує роботу.

• Аналогічно для створення струму потрібно виконати роботу проти сил вихрового поля:

$$A = W_M = \frac{LI^2}{2}$$

чим більша індуктивність провідника, тим більшу роботу треба виконати; під час зменшення струму вихрове електричне поле саме виконує роботу.

### Приклад розв'язання задачі

**Задача.** Надпровідну котушку індуктивністю 5,0 Гн замикають на джерело струму з ЕРС 20 В і нехтовно малим внутрішнім опором. Вважаючи, що сила струму в котушці збільшується рівномірно, визначте час, за який сила струму досягне 10 А.

Дано:  
 $R = 0$   
 $L = 5,0$  Гн  
 $I_0 = 0$   
 $\mathcal{E}_{\text{дж}} = 20$  В  
 $r = 0$   
 $I = 10$  А  
 $t = ?$

*Пошук математичної моделі, розв'язання.*

Сила струму в котушці зростає поступово внаслідок явища самоіндукції.

Для розв'язання задачі скористаємося законом Ома для повного кола:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ , або  $I(R+r) = \mathcal{E}$ . Тут  $\mathcal{E}$  — повна ЕРС кола, яка в цьому випадку складається з ЕРС джерела та ЕРС самоіндукції:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{дж}} + \mathcal{E}_{\text{іс}}, \text{ де } \mathcal{E}_{\text{іс}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Маємо:  $I(R+r) = \mathcal{E}_{\text{дж}} - L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ .

$(R+r) = 0$ , тому  $\mathcal{E}_{\text{дж}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ , звідки  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}}}{L}$ , де  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  — швидкість зміни сили струму.

Струм у котушці змінюється рівномірно, тому час, за який він досягне значення 10 А, дорівнює:  $t = \frac{I}{\Delta I / \Delta t} = \frac{I}{\mathcal{E}_{\text{дж}} / L} = \frac{IL}{\mathcal{E}_{\text{дж}}}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[t] = \frac{\text{А} \cdot \text{Гн}}{\text{В}} = \frac{\text{А} \cdot \text{В}}{\text{А} / \text{с} \cdot \text{В}} = \text{с}; \quad t = \frac{10 \cdot 5,0}{20} = 2,5 \text{ (с)}.$$

**Відповідь:**  $t = 2,5$  с.