



## § 14. 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.

### 1 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 розімкнути, то обидві лампи згаснуть одночасно, однак у момент розімкнення їхня яскравість на мить збільшиться. Чому так відбувається?

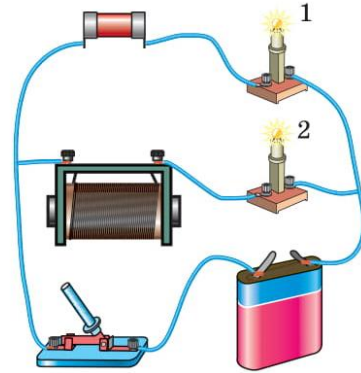
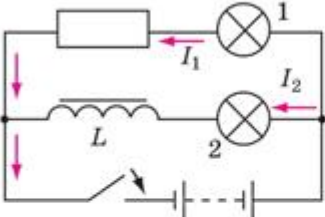
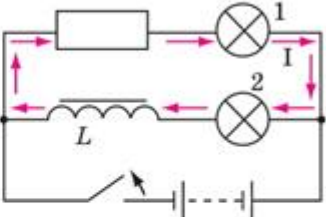
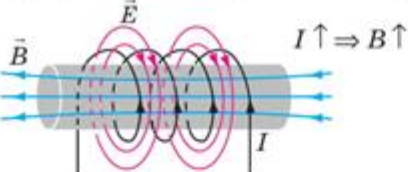
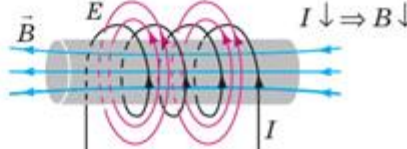


Рис. 14.1. Спостереження явища самоіндукції

Коло замикають	Коло розмикають
Відразу після замкнення кола сила струму $I$ в колі збільшується.	Відразу після розімкнення кола сила струму $I$ в колі зменшується.
	
<p>У середині котушки виникає змінне магнітне поле, магнітна індукція <math>\vec{B}</math> якого теж збільшується. Змінне магнітне поле створює вихрове електричне поле <math>\vec{E}</math>, яке в цьому випадку буде протидіяти струму в котушці (правило Ленца).</p> 	<p>Магнітна індукція <math>\vec{B}</math> поля, створеного струмом, теж зменшується. Змінне магнітне поле створює вихрове електричне поле <math>\vec{E}</math>, яке в цьому випадку підтримуватиме струм у котушці (правило Ленца).</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. Котушка в цьому колі слугує джерелом струму: вихрове електричне поле, що виникло в котушці, підтримує в колі струм. Струм через котушку і лампу 2 продовжує йти в тому самому напрямку, а напрямком 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.

### 2 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:  $\Phi = LI$*  ( $L$  — 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.

### 3 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):

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

*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.

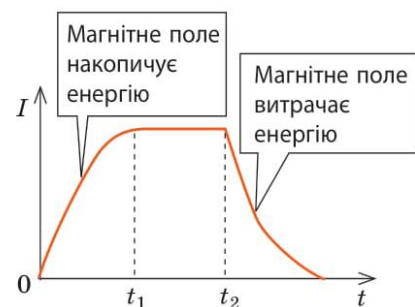
*Індуктивність залежить:*

- 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 (див. § 15);  $\mu_0$  — магнітна стала;  $N$  — кількість витків у соленоїді;  $l$  і  $S$  — відповідно довжина і площа поперечного перерізу соленоїда.



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

*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 самé 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 самé виконує роботу.

поле й окрім цього жодних змін не відбувається. Тобто енергія витрачається саме на створення магнітного поля.

Очевидно: чим більшої сили досяг струм у котушці (провіднику), тим більшою буде накопичена енергія. Енергія магнітного поля буде більшою і в разі більшої індуктивності  $L$  котушки, 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.**

#### 4 Учимся розв'язувати 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:

$$R = 0$$

$$L = 5,0 \text{ Гн}$$

$$I_0 = 0$$

$$\mathcal{E}_{\text{дж}} = 20 \text{ В}$$

$$r = 0$$

$$I = 10 \text{ А}$$

$$t = ?$$

*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:

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

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

$(R+r) = 0$ , 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

$$10 \text{ А, дорівнює: } t = \frac{I}{\Delta I / \Delta t} = \frac{I}{\mathcal{E}_{\text{дж}} / L} = \frac{IL}{\mathcal{E}_{\text{дж}}}.$$

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:**  $t = 2,5 \text{ с}$ .



## Підбиваємо підсумки

- Явище виникнення вихрового електричного поля в провіднику, в якому тече змінний електричний струм, називають явищем самоіндукції.
- Електрорушійну силу індукції, яка створюється в провіднику внаслідок зміни його власного магнітного поля, називають електрорушійною силою самоіндукції. ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в провіднику:  $\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ;  $\mathcal{E}_{is} = -LI'(t)$ .
- Фізичну величину, яка характеризує провідник і чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає в провіднику в разі зміни сили струму на 1 А за 1 с, називають індуктивністю провідника:  $L = \frac{|\mathcal{E}_{is}|}{|\Delta I|/\Delta t}$ . Одиниця індуктивності в СІ — генрі (Гн).
- Енергія магнітного поля провідника зі струмом дорівнює половині добутку індуктивності провідника на квадрат сили струму в провіднику:  $W_M = \frac{LI^2}{2}$ .



## Контрольні запитання

1. Опишіть дослід, який демонструє, що після замкнення кола, яке містить котушку індуктивності, струм у колі зростає поступово. Чим зумовлене це явище?
2. Дайте означення самоіндукції.
3. Сформулюйте закон самоіндукції.
4. Дайте означення індуктивності. Назвіть її одиницю в СІ.
5. Доведіть, що магнітне поле має енергію. За якою формулою її обчислюють?
6. Проведіть аналогію між масою та індуктивністю.



## Вправа № 14

1. Ключі в колі (рис. 1) одночасно замикають. Чи одночасно спалахнуть лампи 1 і 2? Якщо ні, то яка лампа спалахує раніше? Чи одночасно погаснуть лампи 1 і 2 після одночасного розімкнення ключів?
2. За 0,1 с сила струму в котушці рівномірно збільшилась від 0 до 1,5 А. Якою є індуктивність котушки, якщо ЕРС самоіндукції в ній — 2 В?
3. Чому в момент розімкнення кола (див. рис. 14.1) яскравість світіння ламп на мить збільшується?
4. Чому для розімкнення кола з великою індуктивністю не користуються рубильником, а зменшують силу струму в колі поступово, використовуючи реостат?
5. Унаслідок зменшення сили струму в котушці від 10 до 4 А енергія її магнітного поля зменшилась на 16 Дж. Якою є індуктивність котушки?
6. Провідне кільце радіуса 2 см розташоване перпендикулярно до лінії магнітного поля електромагніту. Магнітна індукція поля всередині кільця 0,32 Тл. Кільце перевели в надпровідний стан. Визначте індуктивність кільця, якщо після вимкнення електромагніту в кільці виник струм силою 12 А.
7. На явищі самоіндукції заснована дія багатьох електричних пристроїв. Дізнайтеся про такі пристрої. Підготуйте короткі презентації про їх застосування, об'єднавшись у групи.

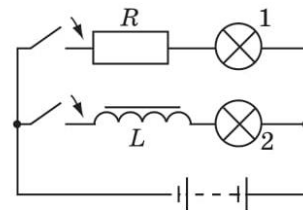


Рис. 1