



Вихрове електричне поле і, як наслідок, ЕРС індукції виникають у провіднику в разі зміни магнітного поля, в якому він перебуває. Таке поле може бути створене й самим провідником, якщо сила струму в ньому змінюється, причому провідник не може відрізнити «своє» поле від «чужого». З'ясуємо, які виникають ефекти, якщо провідник перебуває у «своєму» змінному магнітному полі.

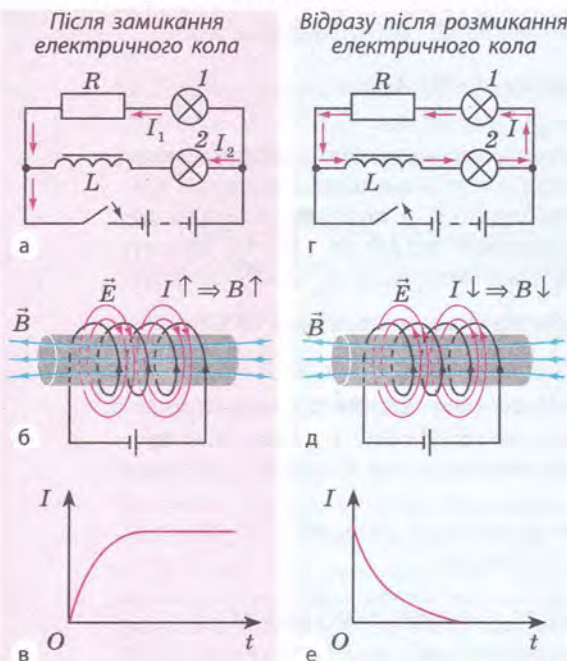


Рис. 23.1. Спостереження явища самоіндукції після замкнення та відразу після розімкнення електричного кола: а, с — напрямки електричного струму в колі; б, д — виникнення вихрового електричного поля навколо котушки; е, е — графік залежності сили струму в котушці від часу

Явище самоіндукції — явище виникнення вихрового електричного поля в провіднику, в якому тече змінний електричний струм.

Електрорушійну силу індукції, яка створюється в провіднику внаслідок зміни його власного магнітного поля, називають *електрорушійною силою самоіндукції* \mathcal{E}_s .

Після розімкнення кола також виникає вихрове електричне поле, яке в цьому випадку підтримує струм (рис. 23.1, д), і в результаті струм у колі котушки зникає не відразу, а зменшується поступово (рис. 23.1, е). У разі швидкого розімкнення кола ЕРС самоіндукції може бути значно більшою, ніж ЕРС джерела струму, тому лампочки яскраво спалахують.

* У провідниках, які підводять струм до лампочки 1, також виникає вихрове електричне поле, але створена ним ЕРС самоіндукції є незначною.

1 У чому полягає явище самоіндукції

Складемо електричне коло (див. рис. 23.1, а, с). Після замкнення кола лампочка 1 спалахне практично відразу, а лампочка 2 — з помітним запізненням. Якщо коло розімкнути, то обидві лампочки загаснуть одночасно, однак у момент розімкнення їхня яскравість збільшиться. Чому ж так відбувається?

Відразу після замкнення кола сила струму в колі збільшується. Усередині котушки виникає змінне магнітне поле, магнітна індукція якого також збільшується. Змінне магнітне поле створює вихрове електричне поле, яке відповідно до правила Ленца буде направлене проти напрямку струму в котушці (рис. 23.1, б), тому струм у колі котушки (а отже, і в лампочці 2) зростатиме не відразу, а поступово* (рис. 23.1, е).

Чому ж лампочки гаснуть одночасно? Річ у тім, що після розімкнення кола поле джерела «не працює». Але коло, що складається з двох лампочок і котушки, лишається замкненим. Струм у цьому колі підтримується тільки за рахунок вихрового електричного поля, що створюється в котушці, яка в цьому випадку слугує джерелом струму. Струм через котушку і лампочку 2 продовжує йти в тому самому напрямку, а напрямок струму в лампочці 1 змінюється на протилежний (див. рис. 23.1, з).

2 Що таке індуктивність

Явище самоіндукції — це окремий випадок явища електромагнітної індукції. Відповідно до закону Фарадея ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:

$$\mathcal{E}_{\text{is}} = \mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t). \quad (1)$$

Магнітний потік через поверхню, обмежену провідником, прямо пропорційний магнітній індукції магнітного поля, яке існує навколо провідника зі струмом ($\Phi \sim B$), а ця магнітна індукція прямо пропорційна силі струму в провіднику ($B \sim I$). Отже, *магнітний потік прямо пропорційний силі струму в провіднику:*

$$\Phi = LI, \quad (2)$$

де L — коефіцієнт пропорційності.

Зважаючи на формули (1) і (2), одержимо **закон самоіндукції**:

ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в провіднику:

$$\mathcal{E}_{\text{is}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad \text{або} \quad \mathcal{E}_{\text{is}} = -LI'(t) \quad (3)$$

Коефіцієнт пропорційності L називають *індуктивністю провідника*.

Індуктивність L — це фізична величина, яка характеризує електричні властивості провідника і чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції в разі зміни сили струму в провіднику на 1 ампер за 1 секунду:

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

Одиниця індуктивності в СІ — **генрі (Гн)***. Індуктивність провідника дорівнює 1 Гн, якщо в ньому виникає ЕРС самоіндукції 1 В у разі зміни сили струму на 1 А за 1 с: $1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А/с}}$.

Індуктивність провідника залежить від магнітних властивостей середовища, в якому розташований провідник, розмірів і форми провідника, але не залежить від сили струму в ньому. Наприклад,

* На честь американського фізика Джозефа Генрі (1797–1878).

індуктивність соленоїда: $L = \mu \mu_0 n^2 V$, де μ — магнітна проникність середовища; μ_0 — магнітна стала; n — кількість витків на одиницю довжини $\left(n = \frac{N}{l}\right)$; V — об'єм соленоїда ($V = Sl$).

Велику індуктивність мають обмотки генераторів та двигунів, тому під час вимкнення кола, коли швидкість зміни струму є великою, ЕРС самоіндукції може досягнути такого значення, що відбудеться пробій ізоляції.

3 Чому можна стверджувати, що магнітне поле має енергію, і як її обчислити

Розглянемо явище самоіндукції з погляду закону збереження енергії. Звідки береться енергія, за рахунок якої протягом певного часу після відключення джерела живлення підтримується електричний струм у колі? Очевидно, що ця енергія була раніше запасена у вигляді енергії магнітного поля.

Відразу після замкнення кола, коли струм починає зростати, в провіднику з'являється вихрове електричне поле, яке протидіє електричному полю джерела живлення. Джерело виконує додаткову роботу проти сил вихрового поля. Відповідно до закону збереження енергії ΔW_m — енергія, яку накопичує магнітне поле за невеликий інтервал часу Δt , — дорівнює самій додатковій роботі, яку виконує джерело для створення струму:

$$\Delta W_m = -A_{\text{ст}} = -\mathcal{E}_{\text{is}} q = -\mathcal{E}_{\text{is}} I_{\text{інд}} \Delta t,$$

де $A_{\text{ст}}$ — робота вихрового поля, яка дорівнює за модулем і протилежна за знаком додатковій роботі джерела живлення за інтервал часу Δt ; $I_{\text{інд}}$ — середня сила струму в провіднику за інтервал часу Δt .

Оскільки $\mathcal{E}_{\text{is}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, маємо: $\Delta W_m = L \frac{\Delta I}{\Delta t} I_{\text{інд}} \Delta t = LI_{\text{інд}} \Delta I$.

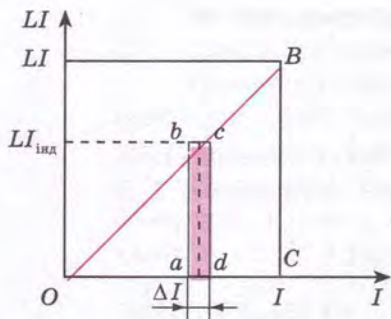


Рис. 23.2. До виведення формули для обчислення енергії магнітного поля

Щоб знайти повну енергію W_m магнітного поля, звернемося до графіка залежності $LI(I)$ (рис. 23.2). Енергія ΔW_m чисельно дорівнює площі ділянки $abcd$ зі сторонами $LI_{\text{інд}}$ і ΔI (ΔI — зміна сили струму за інтервал часу Δt). Повна енергія W_m , яку накопичує магнітне поле за час зростання сили струму від 0 до I , чисельно дорівнюватиме площі трикутника OBC зі сторонами I і LI : $W_m = \frac{LI \cdot I}{2}$. Отже, повна енергія магнітного поля прямо пропорційна квадрату сили струму в провіднику:

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

Зверніть увагу: індуктивність подібна до маси в механіці. Щоб зрушити тіло (надати йому швидкості), потрібно виконати роботу:

$$A = W_k = \frac{mv^2}{2}; \text{ чим більша маса тіла, тим більшу роботу треба ви-}$$

конати; під час гальмування тіло саме виконує роботу. Аналогічно для створення струму потрібно виконати роботу проти сил вихро-

$$\text{вого поля: } A = W_m = \frac{LI^2}{2}; \text{ чим більша індуктивність провідника, тим}$$

більшу роботу треба виконати; під час зменшення струму вихрове електричне поле саме виконує роботу.

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.

$t = ?$

Дано:

$$R = 0$$

$$L = 5,0 \text{ Гн}$$

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

$$r = 0$$

$$I = 10 \text{ А}$$

Аналіз фізичної проблеми. Пошук математичної моделі.

Розв'язання. Сила струму в котушці зростає поступово внаслідок явища самоіндукції.

Для розв'язання задачі скористаємося законом Ома

для повного кола: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, де \mathcal{E} — повна ЕРС кола, що

в нашому випадку складається з ЕРС джерела та ЕРС

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

Отже, закон Ома набуває вигляду:

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

Оскільки $(R+r)=0$, то $\mathcal{E}_{\text{дж}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, 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

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

Визначимо значення шуканої величини:

$$[t] = \frac{\text{А} \cdot \text{Гн}}{\text{В}} = \frac{\text{А} \cdot \text{В}}{\text{А/с} \cdot \text{В}} = \text{с}; \quad \{t\} = \frac{10 \cdot 5,0}{20} = 0,25, \quad t = 0,25 \text{ с}.$$

Відповідь: час, за який струм у котушці досягне значення 10 А, становить $t = 0,25 \text{ с}$.

! Підбиваємо підсумки

Явище самоіндукції — це явище виникнення вихрового електричного поля в провіднику, в якому тече змінний електричний струм.

Закон самоіндукції: ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швид-

кості зміни сили струму в провіднику: $\mathcal{E}_{\text{is}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$; $\mathcal{E}_{\text{is}} = -LI'(t)$.

Індуктивність L — це фізична величина, яка характеризує електричні властивості провідника та чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції в разі зміни сили струму в провіднику на 1 А за 1 с: $L = \frac{|\mathcal{E}_{is}|}{\Delta I / \Delta t}$.

Одиниця індуктивності в СІ — генрі (Гн).

Енергія магнітного поля прямо пропорційна квадрату 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 наростає поступово. Чим зумовлене це явище?
2. Дайте визначення самоіндукції.
3. Сформулюйте закон самоіндукції.
4. Дайте визначення індуктивності.
5. Назвіть одиницю індуктивності в СІ, дайте її визначення.
6. Доведіть, що магнітне поле має енергію.
7. Виведіть формулу для обчислення енергії магнітного поля.
8. Проведіть аналогію між масою та індуктивністю.



Вправа № 21

1. Чому для вимкнення кола з великою індуктивністю не користуються рубильником, а струм вимикають поступово, уводячи реостат?
2. За 0,1 с сила струму в котушці змінилась від 0 до 1,5 А. Визначте індуктивність котушки, якщо ЕРС самоіндукції в ній дорівнює 2 В. Вважайте, що сила струму змінювалась рівномірно.
3. Унаслідок зменшення сили струму в котушці від 10,0 до 4,0 А енергія магнітного поля котушки зменшилась на 16 Дж. Якою є індуктивність котушки?
4. Провідне кільце радіусом 2,0 см перебуває в магнітному полі електромагніта, магнітна індукція якого 0,32 Тл, а лінії індукції перпендикулярні до площини кільця. Кільце переводять у надпровідний стан. Визначте індуктивність кільця, якщо після вимкнення електромагніта сила струму в кільці дорівнюватиме 12 А.
- 5*. Замкнена котушка опором 20 Ом та індуктивністю 0,01 Гн перебуває у змінному магнітному полі. Коли створюваний цим полем магнітний потік збільшився на 1,0 мВб, сила струму в котушці збільшилась на 0,05 А. Який заряд пройшов по котушці за цей час?