

План уроку 89

Тема: Електродинаміка.

Тема уроку: Закон електромагнітної індукції. Самоіндукція, Індуктивність.

Мета. Дати учням уявлення про явище самоіндукції. Ввести поняття індуктивності котушки. Встановити формулу для енергії магнітного поля струму.

II ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

1. Самоіндукція

Кожен провідник, у якому існує електричний струм, має «власне» магнітне поле. Це поле виявляється в момент, коли замикається електричне коло і в провіднику з'являється електричний струм.

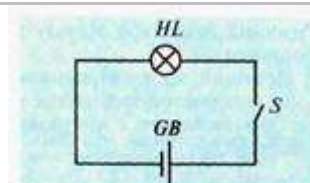
Якщо індукція магнітного поля перед замиканням кола дорівнювала нулю ($B_0 = 0$), то через деякий час після замикання вона матиме певне значення B , відмінне від нуля.

Отже, момент замикання електричного кола можна вважати моментом зміни магнітного потоку. А будь-яка зміна магнітного потоку, за законом електромагнітної індукції, зумовлює появу вихрового електричного поля, яке спричинює появу ЕРС в усіх замкнутих провідниках, які знаходяться в цьому полі. Не може бути винятком і провідник, який є «джерелом» цього поля. Вихрове електричне поле і в ньому індукує ЕРС індукції.

Явище самоіндукції виявив Д. Генрі у 1832 р.

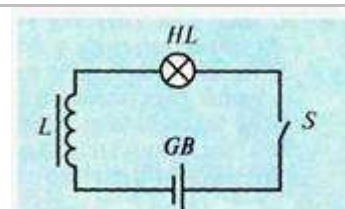
Складемо електричне коло з джерела струму GB , вимикача S та електричної лампочки HL (мал. 1.21).

Якщо замкнути коло, уважно спостерігаючи за лампочкою, то побачимо, що лампочка засвітиться практично миттєво.

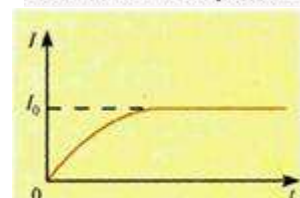


Мал. 1.21. Лампа загорасться відразу після замикання ключа S

Якщо ж у коло послідовно з лампочкою ввімкнути котушку із залізним осердям (мал. 1.22), то процес встановлення струму в колі проходитиме інакше. Після замикання кола яскравість свічення нитки розжарення лампочки збільшуватиметься поступово. Це засвідчує, що і струм у колі зростає поступово впродовж певного часу. Хід цього процесу ілюструє графік, наведений на мал. 1.23.



Мал. 1.22. Лампа загорасться поступово



Мал. 1.23. Графік струму при замиканні кола з котушкою індуктивності

Зрозуміти результати дослідів можна, пригадавши правило Ленца, згідно з яким ЕРС, індукована у провіднику вихровим електричним полем, має знак, протилежний знаку ЕРС джерела струму. І лише робота сторонніх сил у джерелі струму поступово зменшує швидкість наростання напруженості індукованого електричного поля і виникнення ЕРС індукції. "Оскільки зміна магнітного потоку і явище електромагнітної індукції відбуваються одночасно в одному колі, то на відміну від попередніх випадків це явище

називають самоіндукцією. Розрахувати значення ЕРС самоіндукції можна, застосувавши закон електромагнітної індукції:

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

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

Електрорушійною силою самоіндукції називають електрорушійну силу індукції, яка створюється в провіднику внаслідок зміни його власного магнітного поля.

Дослідження явища самоіндукції показали, що значення ЕРС самоіндукції залежить від параметрів електричного кола. На мал. 1.24—1.26 наведено графіки, які ілюструють процес встановлення струму в колах із різними котушками.

Неважко помітити, що струм у колі, в якому є котушка, що має 100 витків (мал. 1.24), наростає швидше, ніж у колі, в яке ввімкнено котушку із 4000 витків, і має такий самий опір R (мал. 1.25). На процес встановлення струму в колі істотно впливає феромагнітне осердя (мал. 1.26).

Оскільки ЕРС самоіндукції протидіє ЕРС джерела струму, то за результатами дослідів, які ілюструють мал. 1.24—1.26, можна дійти висновку, що ЕРС самоіндукції залежить від характеристик котушки, ввімкненої в електричне коло. Однією з таких характеристик є індуктивність.



2. Індуктивність

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

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

Індуктивність є індивідуальною характеристикою не лише котушки, а й будь-якого провідника. Тому загалом говорять про індуктивність провідника.

Спосіб розрахунку значення індуктивності ґрунтується на тому, що магнітний потік у котушці зі струмом пропорційний силі струму в ній. У математичній формі це записують формулою

$$\Phi = LI,$$

де Φ — магнітний потік у котушці; I — сила струму в ній; L — стала для даної котушки величина.

Звідси зміна магнітного потоку дорівнюватиме:

$$\Delta\Phi = L\Delta I.$$

З урахуванням отриманої залежності, закон електромагнітної індукції для випадку самоіндукції можна записати так:

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t},$$

звідси

$$L = \frac{|\mathcal{E}_{si}\Delta t|}{\Delta I}.$$

Одиниця вимірювання індуктивності

Якщо внаслідок зміни сили струму в провіднику на 1 А за 1 с ньому індукується ЕРС самоіндукції 1 В, то цей провідник має індуктивність 1 генрі (1 Гн).

Одиниця індуктивності названа на честь американського фізика Д. Генрі, який зробив вагомий внесок у розвиток науки про електромагнітні явища.

Одиниця 1 генрі досить велика, тому застосовують її частки:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Гн} &= 1000 \text{ мГн} = 1\,000\,000 \text{ мкГн}, \\ \text{або } 1 \text{ мкГн} &= 10^{-3} \text{ мГн} = 10^{-6} \text{ Гн}. \end{aligned}$$

Індуктивність котушки визначається її фізичними характеристиками

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

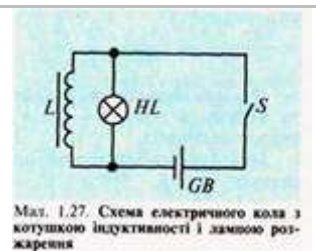
Індуктивність залежить від форми провідника, розмірів та магнітної проникності середовища, в якому знаходиться провідник.

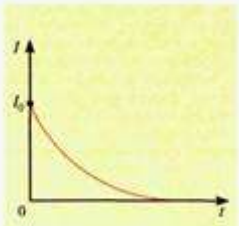
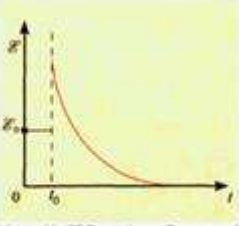
Явище самоіндукції спостерігається і при розмиканні електричного кола.

Складемо електричне коло з джерела струму, вимикача, котушки і лампи розжарення. Лампу розжарення, опір якої значно менший за опір котушки, увімкнемо паралельно котушці, (мал.1.27).

Якщо замкнути коло, то нитка розжарення буде розжарюватись і випромінювати світло. Струм проходитиме і в котушці, створюючи магнітний потік.

Якщо тепер розімкнути коло, то лампочка гаснутиме поступово. Це явище також є наслідком самоіндукції. У результаті зміни магнітного потоку при розмиканні кола з'являється ЕРС самоіндукції, яка підтримує в котушці струм



попереднього напрямку, оскільки зі зменшенням магнітного потоку, за правилом Ленца, ЕРС самоіндукції матиме такий самий знак, як і ЕРС джерела струму.	
Графік зміни сили струму в колі в момент розмикання наведено на мал. 1.28. Струм поступово зменшується від значення I_0, яке було перед розмиканням, до нуля, нагріваючи при цьому провідники. Якби обмотка котушки була виготовлена з надпровідного матеріалу і закорочена таким самим провідником, то струм у колі існував би нескінченно довго.	 Мал. 1.28. Струм у котушці при розмиканні кола
Повторимо попередній дослід за умови, що котушка має малий опір, а лампочка — великий. Джерело струму підберемо так, що в разі замикання кола струм у ньому проходитиме, але лампочка не світитиметься. Якщо ж розімкнути коло, то лампочка яскраво спалахне і поступово погасне. Це означає, що в колі з'явилася ЕРС набагато більша, ніж ЕРС джерела струму. Струм у колі вимикається майже миттєво, тому швидкість зміни магнітного потоку матиме велике значення, а ЕРС самоіндукції значно переважає значення ЕРС джерела струму в колі. Залежність ЕРС при розмиканні кола від часу наведено на мал. 1.29. До моменту t_0 в колі існувала лише ЕРС джерела струму $\mathcal{E}_0$. Після розмикання кола ця ЕРС зникла, але з'явилася значно більша ЕРС самоіндукції $\mathcal{E}_{si}$.	 Мал. 1.29. ЕРС самоіндукції в котушці індуктивності при розмиканні кола

3. Приклади виникнення ЕРС самоіндукції

- Появу великої ЕРС можна спостерігати в повсякденному житті. Наприклад, коли штанга тролейбуса з якихось причин від'єднується від контактної мережі і коло живлення електродвигуна, який має значну індуктивність, розривається, з'являється велика іскра. З цієї ж причини вимикачі, які працюють у колах з великими індуктивностями, виготовляють із розрахунком на значно більші напруги, ніж робочі напруги цих кіл.
- Поява іскри між контактами вимикача при розмиканні кола обумовлена явищем електромагнітної індукції в даному колі
- У потужних роз'єднувачах, які працюють на великих електророзподільних підстанціях, контакти занурюють у масляні ванни, які гасять електричну дугу, що виникає внаслідок самоіндукції при розмиканні кола.
- Для вимкнення потужних електродвигунів використовують спеціальні реостати, які поступово зменшують силу струму в колі і тим самим запобігають шкідливим проявам явища самоіндукції, які здатні вивести з ладу ізоляцію обмоток.

Приклад. Визначте індуктивність соленоїда, якщо сила струму в ньому мінюється на 50 А за 1 с і виникає ЕРС самоіндукції 0,08 В.

Дано:

$$\begin{aligned}\Delta I &= 50 \text{ А} \\ \Delta t &= 1 \text{ с} \\ \mathcal{E}_{si} &= 0,08 \text{ В}\end{aligned}$$

$L = ?$

Розв'язування

Відповідно до закону ЕРС самоіндукції дорівнює $|\mathcal{E}_{si}| = \frac{L\Delta I}{\Delta t}$. Звідси

$$L = \frac{\mathcal{E}_{si}\Delta t}{\Delta I}.$$

Підставивши відповідні числові значення, одержимо

$$L = \frac{0,08 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{50 \text{ А}} = 1,6 \text{ мГн}$$

Відповідь: Індуктивність соленоїда 1,6 мГн.

4. Енергія магнітного поля провідника зі струмом

Робота джерела струму, за законом збереження і перетворення енергії, виконується не безслідно. У котушці зі струмом чи навколо будь-якого провідника виявимо магнітне поле. Будь-які зміни сили струму в котушці викличуть появу ЕРС індукції і приведуть до виконання роботи джерелом струму. Ця робота змінить енергію магнітного поля котушки чи провідника довільної форми. Отже, магнітне поле провідника зі струмом має енергію, яка дорівнює роботі джерела струму впродовж встановлення стабільного значення сили струму в колі.

Нехай котушка індуктивності L увімкнена в електричне коло із джерела струму GB і вимикача S (мал.1.30).

У момент замикання електричного кола з'являється ЕРС самоіндукції, яка дорівнює

$$|\mathcal{E}_{si}| = \frac{L\Delta I}{\Delta t}.$$



Для компенсації цієї ЕРС джерело струму виконує роботу з переміщення заряджених частинок, загальний заряд яких дорівнює q . За визначенням, ця робота дорівнює

$$A = q\mathcal{E}_{si}, \text{ або } A = \frac{qL\Delta I}{\Delta t}.$$

При цьому сила струму в колі змінюється від нуля до $I_{\max}$. За

означенням

$$q = I\Delta t.$$

Однак при замиканні кола струм не має сталого значення. Для спрощення вважатимемо, що сила струму для розрахунку значення заряду лінійно змінюється з плином часу. Тоді візьмемо значення сили струму

$$I = \frac{I_{\max}}{2}.$$

Отже,

$$A = \frac{LI_{\max}\Delta t}{2} \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Зміна сили струму ΔI за інтервал часу Δt дорівнюватиме $I_{\max}$:

$$\Delta I = I_{\max}.$$

Робота, виконана джерелом струму, дорівнюватиме енергії магнітного поля котушки зі струмом. Отже,

$$W_M = \frac{LI_{\max}\Delta t}{2} \frac{I_{\max}}{\Delta t} = \frac{LI_{\max}^2}{2}.$$

Врахувавши, що $I_{\max} = I_0$, одержимо

$$W_M = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Робота в електричному колі при електромагнітній індукції

$$A = \frac{qL\Delta I}{\Delta t}.$$

Енергія магнітного поля залежить від індуктивності провідника і сили струму в ньому

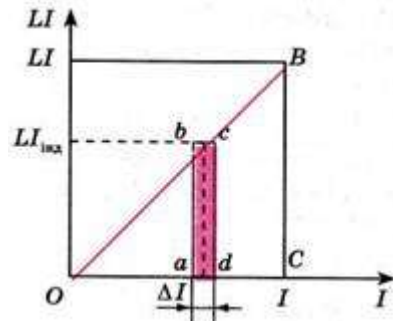
$$W_M = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Енергія магнітного поля котушки зі струмом пропорційна індуктивності котушки і квадрату сили струму в ній.

Висновок справедливий для будь-якого провідника зі струмом, крім біфілярного.

Порівняння формул для енергії магнітного поля і енергії рухомого тіла дає змогу дійти висновку, що індуктивність в електричному колі є аналогом маси у механічних взаємодіях, виступає «інерційним» елементом у колі і визначає швидкість зміни сили струму.

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



До виведення формули для обчислення енергії магнітного поля

ЗАПИТАННЯ

1. Як проявляється явище самоіндукції при замиканні електричного кола?
2. У чому проявляється явище самоіндукції при розмиканні електричного кола?
3. Як впливає індуктивність кола на перебіг самоіндукції?
4. Як пояснюють явище самоіндукції?
5. Яка роль джерела струму в колі у момент прояву явища самоіндукції?
6. Від чого залежить ЕРС самоіндукції?
7. Дайте означення одиниці індуктивності в СІ.
8. Від яких величин залежить енергія магнітного поля провідника зі струмом?
9. Які перетворення енергії відбуваються під час замикання електричного кола з індуктивністю?
10. Які перетворення енергії відбуваються під час розмикання електричного кола з індуктивністю?
11. Яка механічна величина аналогічна, індуктивності провідника?
12. Чим пояснюють появу дільника «2» у формулі енергії магнітного поля електричного струму?