

Змістовий модуль № 2. Електричне і магнітне поле
Тема 2.3 «Електромагнітна індукція»
Лекція № 7

План лекції

1. Закон Фарадея. Правило Ленца
2. Вихрові струми (струми Фуко)
3. Індуктивність контуру. Самоіндукція та взаємна індукція

1. Закон Фарадея. Правило Ленца

У попередній темі ми бачили, що електричні струми створюють навколо себе магнітне поле. Зв'язок магнітного поля зі струмом призвів до численних спроб збудити струм у контурі за допомогою магнітного поля. Це фундаментальне завдання було блискуче вирішене в 1831 г. англійським фізиком М. Фарадеєм, що відкрив явище електромагнітної індукції. Воно полягає в тому, що в замкненому провідному контурі при зміні потоку магнітної індукції, охоплюваного цим контуром, виникає електричний струм, що одержав назву індукційного.

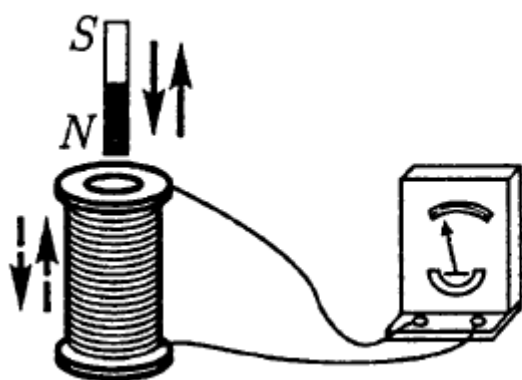


Рис. 2.11а

У моменти всування або висування постійного магніту виникає індукційний струм

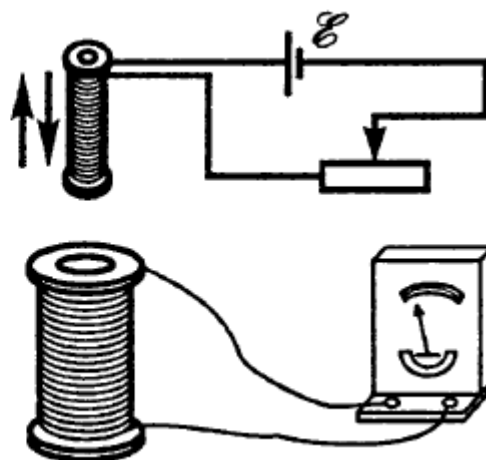


Рис. 2.11б

У моменти включення або вимикання струму, у моменти його збільшення або зменшення, при переміщенні котушок друг щодо друга виникає індукційний струм

Узагальнюючи результати своїх численних дослідів (мал. 2.11), Фарадей дійшов висновку, що індукційний струм виникає завжди, коли відбувається зміна зчепленого з контуром потоку магнітної індукції.

Наприклад, при повороті в одноріднім магнітнім полі замкненого провідного контуру в ньому також виникає індукційний струм. У цьому

випадку індукція магнітного поля поблизу провідника залишається постійною, а міняється тільки потік магнітної індукції крізь контур.

Дослідним шляхом було також встановлено, що значення індукційного струму зовсім не залежить від способу зміни потоку магнітної індукції, а визначається лише швидкістю його зміни (у дослідах Фарадея також доводиться, що відхилення стрілки гальванометра (сила струму) тим більше, чим більше швидкість руху магніту, або швидкість зміни сили струму, або швидкість руху котушок).

Відкриття явища електромагнітної індукції мало велике значення, тому що була доведена можливість одержання електричного струму за допомогою магнітного поля. Цим був встановлений взаємозв'язок між електричними й магнітними явищами, що послужило надалі поштовхом для розробки теорії електромагнітного поля.

Узагальнюючи результати своїх численних дослідів, М. Фарадей прийшов до кількісного закону електромагнітної індукції. Він показав, що щораз, коли відбувається зміна зчепленого з контуром потоку магнітної індукції, у контурі виникає індукційний струм, що вказує на наявність у ланцюзі електрорушійної сили, названою електрорушійною силою електромагнітної індукції. Значення індукційного струму, а отже, і ЕРС електромагнітної індукції визначаються тільки швидкістю зміни магнітного потоку, тобто

$$E_i \sim \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.26)$$

Якщо величини E , Φ и t виразити в одній системі одиниць, то можна записати:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.27)$$

Формула (2.27) виражає закон електромагнітної індукції Фарадея.

Знак «-» показує, що збільшення потоку $\left(\frac{d\Phi}{dt} > 0\right)$ викликає ЕРС $E_i < 0$, тобто поле індукційного струму спрямоване назустріч потоку; зменшення потоку $\left(\frac{d\Phi}{dt} < 0\right)$ викликає $E_i > 0$, тобто напрямки потоку й поля індукційного струму збігаються. Знак «-» у формулі (2.27) відповідає правилу Ленца (1833) - загальному правилу для знаходження напрямку індукційного струму.

Правило Ленца: індукційний струм у контурі має завжди такий напрямок, що створюване ним магнітне поле перешкоджає зміні магнітного потоку, яка викликає цей індукційний струм.

Закон Фарадея можна сформулювати в такий спосіб: ЕРС E_i електромагнітної індукції в контурі чисельно рівна й протилежна за знаком

швидкості зміни магнітного потоку крізь поверхню, обмежену цим контуром. ЕРС електромагнітної індукції виражається у вольтах.

Збудження ЕРС індукції при русі контуру в постійнім магнітнім полі пояснюється дією сили Лоренца, що виникає при русі провідника.

Згідно із законом Фарадея, виникнення ЕРС електромагнітної індукції можливо й у випадку нерухливого контуру, що перебуває в зміннім магнітнім полі. Однак сила Лоренца на нерухливі заряди не діє, тому в цьому випадку нею не можна пояснити виникнення ЕРС індукції. Максвелл для пояснення ЕРС індукції в нерухливих провідниках припустив, що всяке змінне магнітне поле збуджує в навколишньому просторі електричне поле, яке і є причиною виникнення індукційного струму в провіднику.

2. Вихрові струми (струми Фуко)

Індукційний струм виникає не тільки в лінійних провідниках, але й у масивних суцільних провідниках, поміщених у змінне магнітне поле. Ці струми виявляються замкненими в товщі провідника й тому називаються вихровими. Їх також називають струмами Фуко - по імені першого дослідника.

Вихрові струми викликають нагрівання провідників. Тому для зменшення втрат на нагрівання якорі генераторів і сердечники трансформаторів роблять не суцільними, а виготовляють із тонких пластин, відділених одна від іншої шарами ізолятора, і встановлюють їх так, щоб вихрові струми були спрямовані поперек пластин.

Джоулева теплота, виділювана струмами Фуко, використовується в індукційних металургійних печах. Індукційна піч являє собою тигель, що укладається усередину котушки, у якій пропускається струм високої частоти. У металі виникають інтенсивні вихрові струми, здатні розігріти його до плавлення. Такий спосіб дозволяє плавити метали у вакуумі, у результаті чого виходять надчисті матеріали.

3. Індуктивність контуру. Самоіндукція та взаємоіндукція

Електричний струм, що тече в замкненому контурі, створює навколо себе магнітне поле, індукція якого, за законом Біо - Савара - Лапласа, пропорційна струму. Зчеплений з контуром магнітний потік Φ тому пропорційний струму в контурі:

$$\Phi = LI, \quad (2.28)$$

де L - коефіцієнт пропорційності, називаний індуктивністю контуру.

При зміні сили струму в контурі буде змінюватися також і зчеплений з ним магнітний потік; отже, у контурі буде індукуватися ЕРС. Виникнення ЕРС індукції в провідному контурі при зміні в ньому сили струму називається самоіндукцією.

З вираження (2.28) визначається одиниця індуктивності генрі (Гн): 1 Гн - індуктивність такого контуру, магнітний потік самоіндукції якого при струмі в 1 А рівний 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А.}$$

Можна показати, що індуктивність контуру в загальному випадку залежить тільки від геометричної форми контуру, його розмірів і магнітної проникності того середовища, у якому він перебуває. У цьому смислі індуктивність контуру - аналог електричної ємності відокремленого провідника, яка також залежить тільки від форми провідника, його розмірів і діелектричної проникності середовища.

Застосовуючи до явища самоіндукції закон Фарадея, одержимо, що ЕРС самоіндукції

$$E_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -\left(L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt}\right). \quad (2.29)$$

Якщо контур не деформується й магнітна проникність середовища не змінюється (надалі буде показано, що остання умова виконується не завжди), то $L = \text{const}$ і

$$E_s = -L\frac{dI}{dt} \quad (2.30)$$

де знак «-» обумовлений правилом Ленца, згідно з яким наявність індуктивності в контурі приводить до вповільнення зміни струму в ньому.

Таким чином, контур, володіючи певною індуктивністю, здобуває електричну інертність, що полягає в тому, що будь-яка зміна струму гальмується тем сильніше, чим більше індуктивність контуру.

Якщо розглянути два нерухомих близько розташованих контури, явище виникнення ЕРС в одному з контурів при зміні сили струму в іншому називається взаємною індукцією.

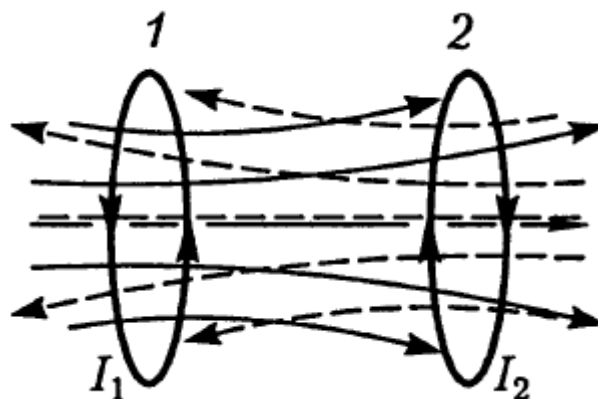


Рис. 2.12. Взаємна індукція

Питання для самоконтролю

1. Що є причиною виникнення ЕРС індукції в замкненому провідному контурі? Від чого і як залежить ЕДС індукції, що виникає в контурі?
2. У чому полягає явище електромагнітної індукції? Проаналізуйте досліди Фарадея.
3. Чому для виявлення індукційного струму краще використовувати замкнений провідник у вигляді котушки, а не у вигляді одного витка проводу?
4. Сформулюйте правило Ленца, проілюструвавши його прикладами.
5. Як спрямований індукційний струм?
6. Чи завжди при зміні магнітної індукції в провідному контурі в ньому виникає ЕРС індукції? Індукційний струм?
7. Чи виникає індукційний струм у провідній рамці, що поступально рухається в одноріднім магнітнім полі?
8. Яка природа ЕРС електромагнітної індукції?
9. Що таке вихрові струми? Шкідливі вони чи корисні?
10. Чому сердечники трансформаторів не роблять суцільними?
11. У чому полягає фізичний зміст індуктивності контуру? Взаємної індуктивності двох контурів? Від чого вони залежать?
12. У чому полягають явища самоіндукції й взаємної індукції? Обчислите ЕДС індукції для обох випадків.

Список літератури

1. Трофимова Т.И. Физика: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Т.И.Трофимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 352 с. (§§ 97-100).
2. Фирсов А.В. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / А.В.Фирсов; под ред. Т.И.Трофимовой. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 352 с. (§§ 142-144, 147-148).
3. Трофимова Т.И. Курс физики. Учеб. пособие для вузов / Т.И.Трофимова. – Изд. 9-е, перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 560 с. (§§ 122-123, 125-126, 128).