

Тема: Електромагнітна індукція

Явище електромагнітної індукції

Явище електромагнітної індукції відкрито в 1831 році М. Фарадеєм.

Електромагнітною індукцією називається явище виникнення вихрового електричного поля, яке є причиною виникнення електрорушійної сили в провідному контурі при будь-якій зміні магнітного потоку, що пронизує цей контур.

ЕРС, яка виникає, називається електрорушійною силою електромагнітної індукції \mathcal{E}_i . Якщо провідник замкнутий, то виникає струм, який називають *індукційним струмом*.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «—» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

Демонстрації:

1. Закон Фарадея. Гнучкий контур.

<https://youtu.be/WQP9CEuTjFo>

2. Вихрове електричне поле. Вмикання – вимикання.

<https://youtu.be/SIBqH-uSD40>

3. Переміщення провідника в магнітне поле

<https://youtu.be/JPgZzy0z7nI>

4. Закон Фарадея. Потокозчеплення.

<https://youtu.be/wHyCac0z4hk>

ЕРС індукції в рухомому провіднику

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційним магнітним полем створюється

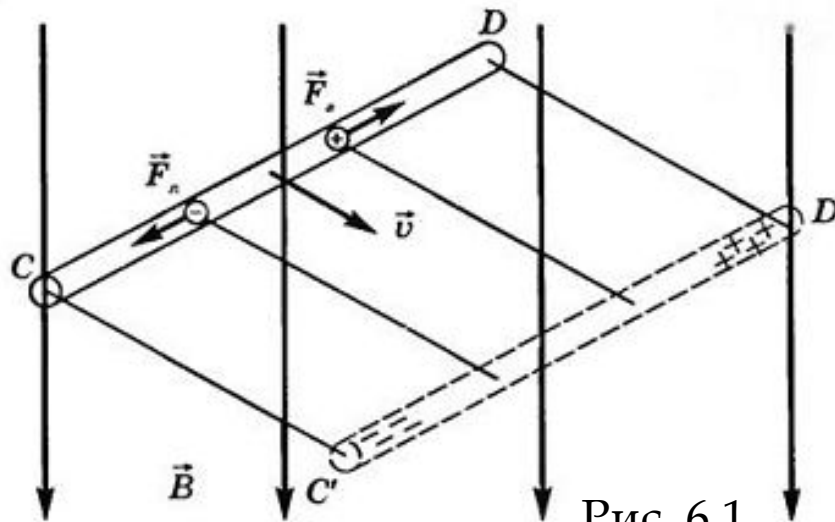
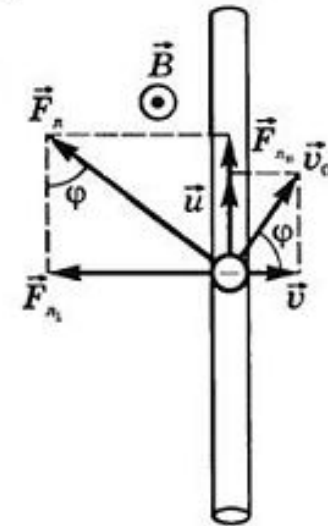


Рис. 6.1

б



створений потік,

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

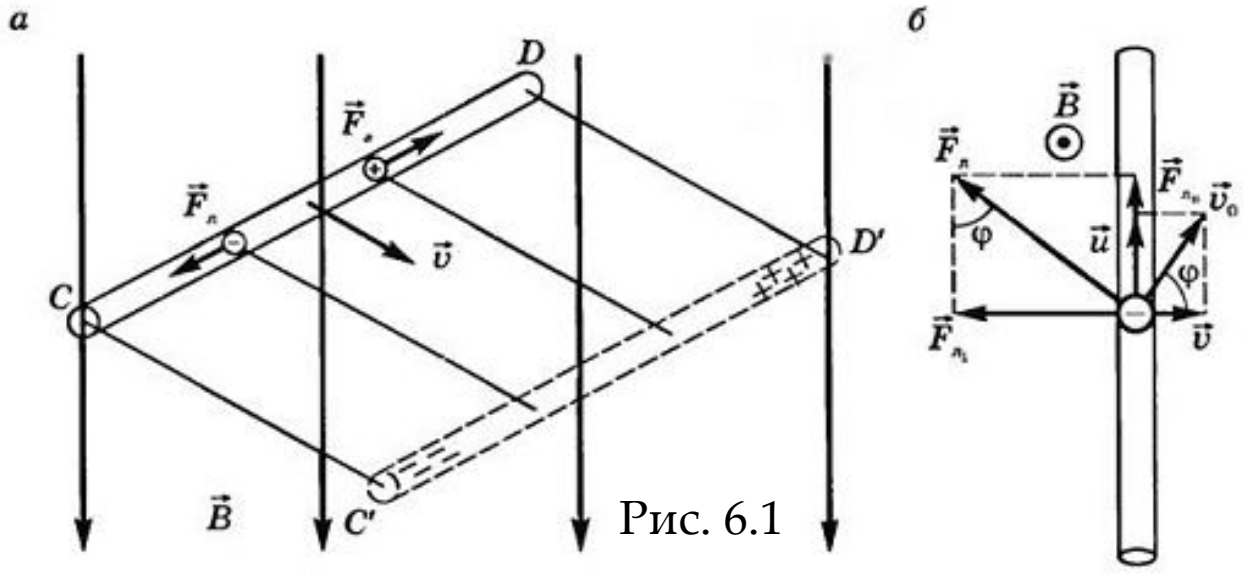


Рис. 6.1

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створеним ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку який викликав цей індукційний струм.

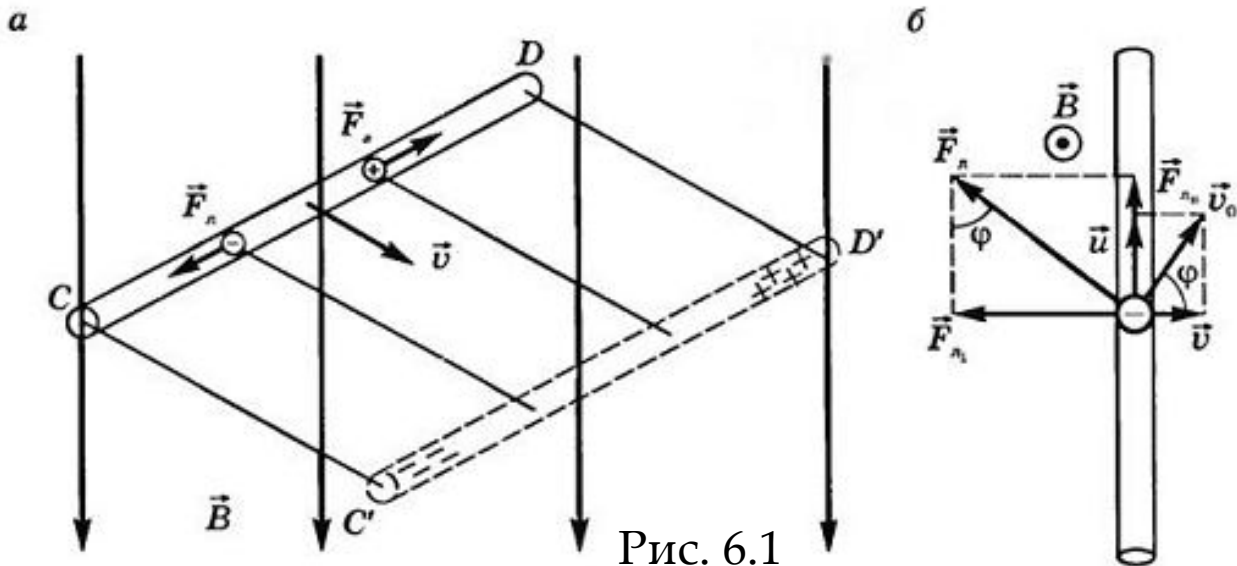


Рис. 6.1

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

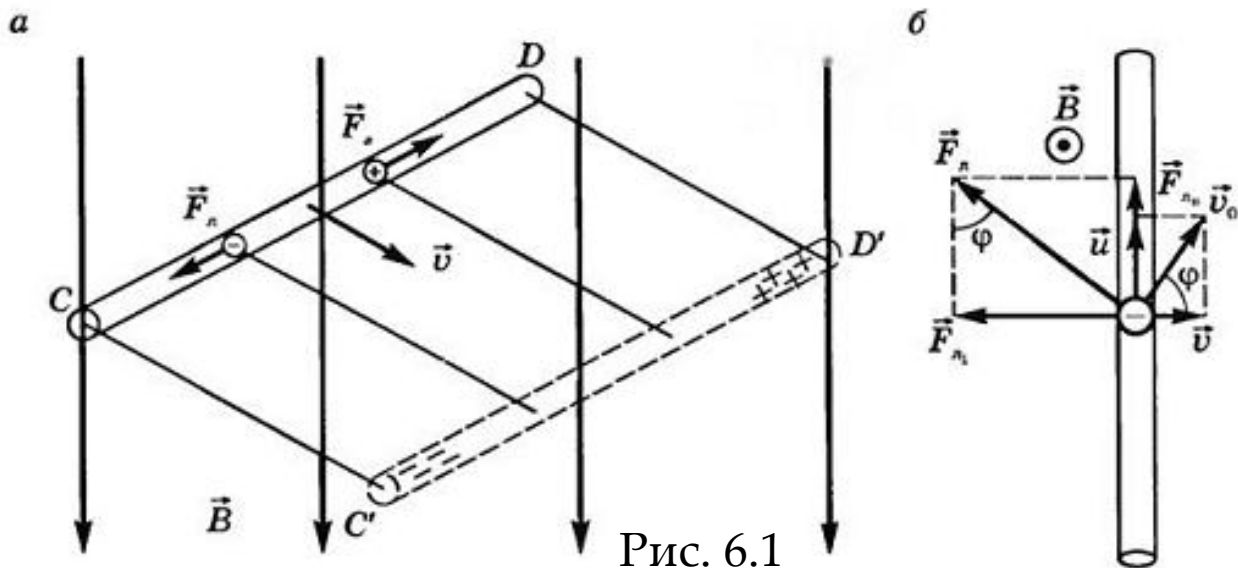


Рис. 6.1

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

Принцип роботи генератора змінного струму

Одним з найважливіших застосувань явища електромагнітної індукції є перетворення механічної енергії в електричну.

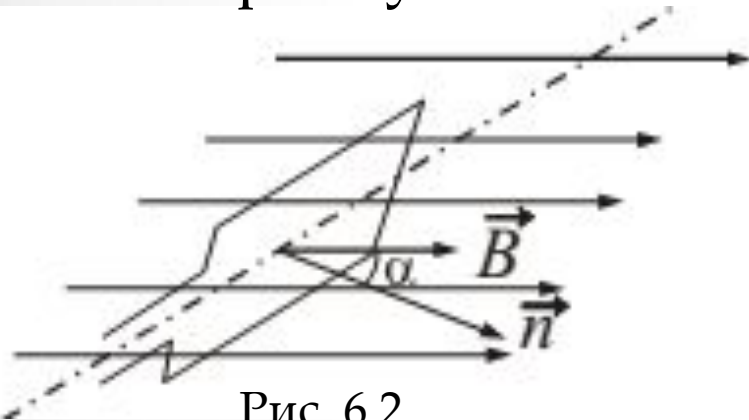


Рис. 6.2

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликає цей індукційний струм

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликає цей індукційний струм

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

Демонстрація.

Динамо-машина (генератор змінного струму).

<https://youtu.be/bhAT6-oiT8I>

Струми Фуко

Індукційні струми, які виникають в суцільних масивних провідниках, які знаходяться в змінних магнітних полях, називають *вихровими струмами* або *струмами Фуко*.

Відповідно до правила Ленца струми Фуко обирають всередині провідника такі напрямки, щоб своєю дією сильніше протидіяти причині, яка їх викликає. У зв'язку з цим провідники, які рухаються в сильному магнітному полі, відчують сильне гальмування, яке обумовлене взаємодією струмів Фуко з магнітним полем. Це використовують для демпфірування (заспокоєння) рухомих частин гальванометрів, сейсмографів і інших приладів.

Теплова дія струмів Фуко використовуються в індукційних печах. Таким способом здійснюють плавлення металів у вакуумі. Це дає можливість отримувати матеріали дуже високої чистоти.

Струми Фуко бувають і небажаними. В електричних машинах і трансформаторах вони призводять до значних втрат енергії. Тому сердечники трансформаторів набирають з тонких пластин, які розділені ізолюючими прошарками. Пластини розташовують так, щоб можливі напрямки струмів Фуко були до них перпендикулярними.

Демонстрації:

1. Електромагнітне гальмування: маятник.

<https://youtu.be/kC-MW67g-5M>

2. Паріння котушки зі струмом.

<https://youtu.be/3f8dglm9ua8>

3. Магніт, який парить. Постійний магніт над надпровідників.

<https://youtu.be/xviUT4IPROw>

Індуктивність контуру

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

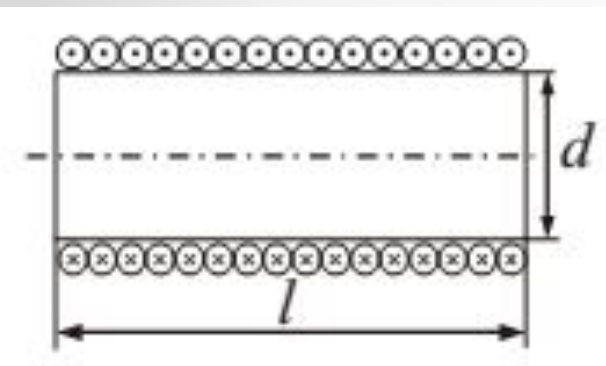


Рис. 6.3

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

ЕРС самоіндукції

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна

швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

Струми при розмиканні і замиканні ланцюга

При замиканні ланцюга, який містить постійну ЕРС, сила струму за рахунок ЕРС самоіндукції встановлюється не миттєво, а через деякий проміжок часу. При вимиканні джерела (роз'єднання ланцюга) струм не припиняється миттєво. Це пояснюється тим, що в контурі з'являється індукційний струм, який за правилом Ленца протидіє зміні струму в ланцюзі, що викликав явище самоіндукції. Індукційний струм, накладаючись на основний струм, уповільнює його зростання або перешкоджає його зменшенню.

а) Розмикання ланцюга.

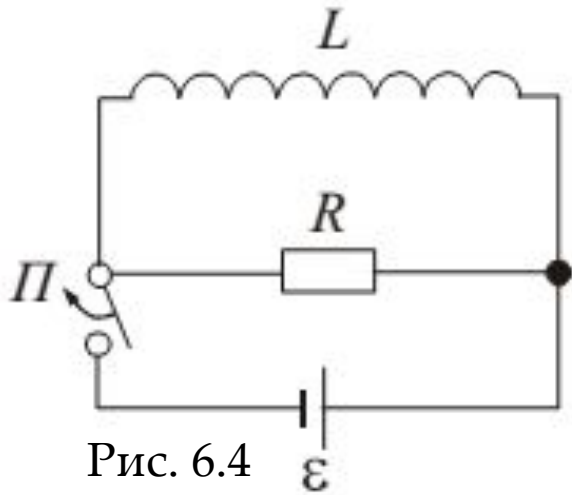


Рис. 6.4

До паралельно з'єднаних опору R і індуктивності $L = \text{const}$ за допомогою перемикача Π може бути підключене джерело, ЕРС якого ε (рис. 6.4). У момент часу $t=0$ відключимо джерело перемикачем Π . Сила струму почне спадати, в ланцюзі виникає ЕРС самоіндукції

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак « $-$ » введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

Після відключення джерела сила струму в ланцюзі зменшується за експоненціальним законом. Графік залежності $I=f(t)$ наведено на рис. 6.5. З графіка випливає, що чим більше індуктивність і чим менше опір, тим повільніше спадає струм в ланцюзі.

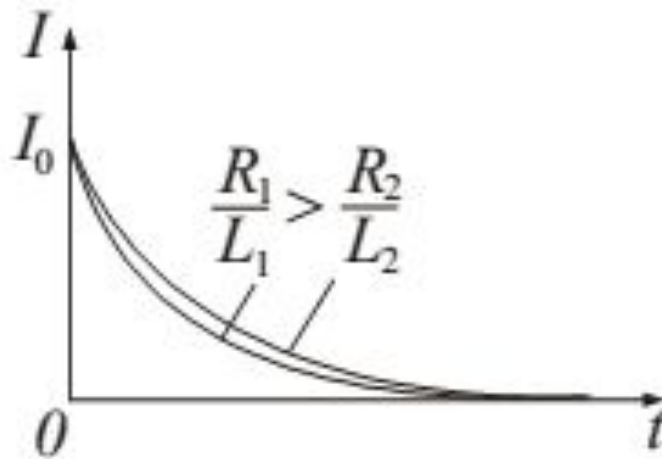


Рис. 6.5

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «—» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

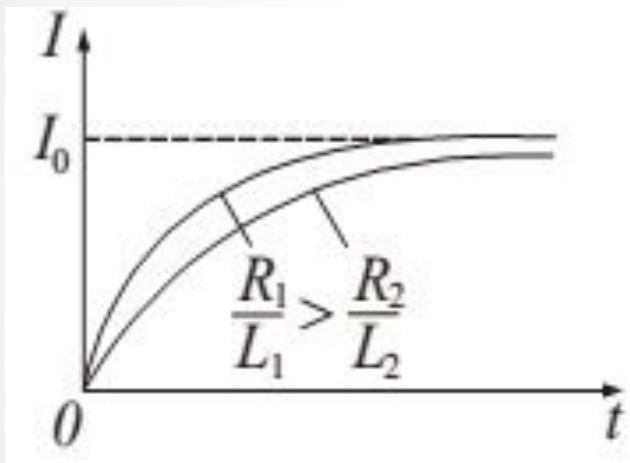


Рис. 6.6

Графік зростання сили струму наведено на рис. 6.6. З графіка випливає, що чим менше індуктивність ланцюга і більше її опір, тим швидше наростає струм.

Демонстрація:

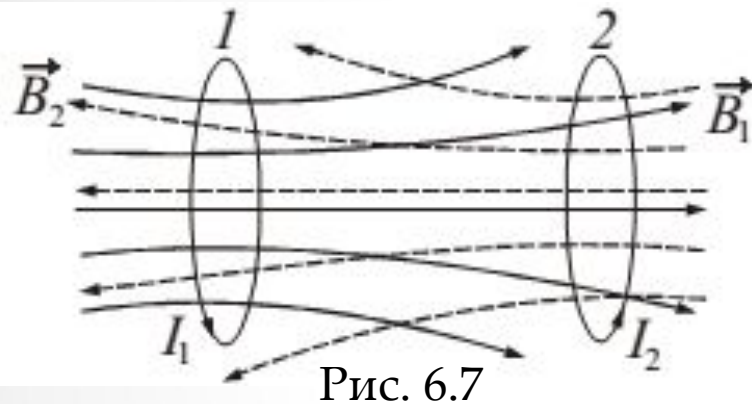
Струм при замиканні і розмиканні ланцюга з індуктивністю.

Чи можна, вимикаючи прилад, спалити його?

<https://youtu.be/gO3Uka6mgDU>

Взаємна індукція

Взаємної індукцією називається явище виникнення електрорушійної сили в одному з контурів при зміні струму в іншому.



Розглянемо два близько розташованих контури 1 і 2 (рис.6.7). Контури характеризують коефіцієнтом взаємної індуктивності.

Взаємна індуктивність – це скалярна фізична величина, яка характеризує магнітний зв'язок двох або більше контурів. Взаємна індуктивність залежить від розмірів і форми контурів 1 і 2, відстані між ними, від їх взаємного розташування, а також від магнітної проникності навколишнього середовища.

- Вимірюється взаємна індуктивність в Гн (генрі).

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

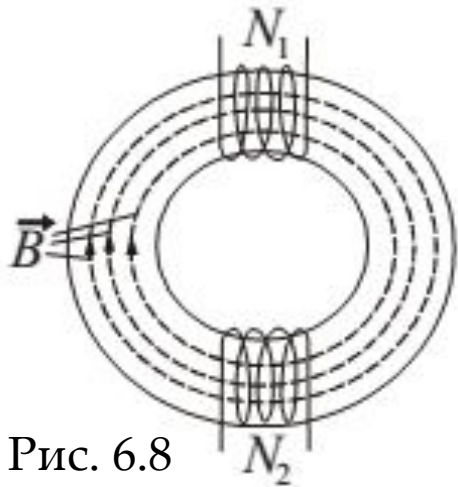


Рис. 6.8

Розрахуємо взаємну індуктивність двох котушок, намотаних на загальний тороїдальний сердечник. Цей випадок має велике практичне значення (рис. 6.8). Магнітна індукція поля, яка створюється першою котушкою з числом витків N_1 ,

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак « $-$ » введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

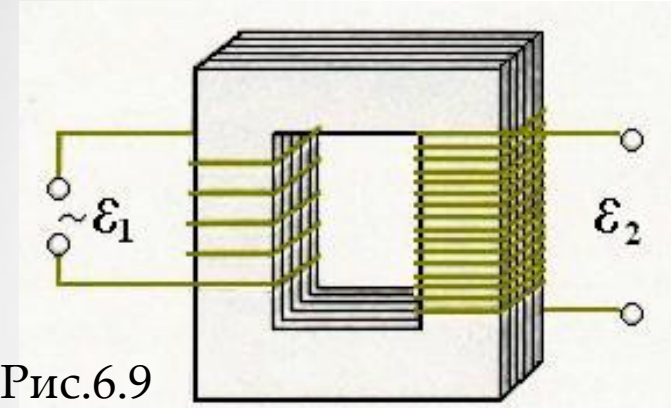
Вираз (6.1) називається **законом Фарадея** для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

Трансформатори

Принцип дії трансформаторів, що застосовуються для підвищення або зниження напруги змінного струму, заснований на явищі взаємної індукції.



Принципова схема трансформатора показана на рис.6.9. Первинна і вторинна котушки (обмотки), що мають відповідно N_1 і N_2 витків, укріплені на замкнутому

залізному сердечнику. Оскільки кінці первинної обмотки приєднані до джерела змінної напруги з ЕРС ε_1 , то в ній виникає змінний струм I_1 , який створює в осерді трансформатора змінний магнітний потік Φ , який практично повністю локалізований в залізному сердечнику і майже цілком пронизує витки вторинної обмотки. Зміна цього потоку викликає у вторинній обмотці появу ЕРС взаємної індукції, а в первинній – ЕРС самоіндукції.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

Якщо $N_2/N_1 < 1$, то маємо справу із *знижуючим трансформатором*, що зменшує ЕРС і підвищує струм (застосовуються, наприклад, при електрозварюванні, оскільки для неї потрібен великий струм при низькій напрузі).

Ми розглядали трансформатори, які мають тільки дві обмотки. Однак трансформатори, що використовуються в радіоприладах, мають 4 – 5 обмоток, які мають різні робочі напруги. Трансформатор, що складається з однієї обмотки, називається автотрансформатором. У разі підвищуючого автотрансформатора ЕРС підводиться до частини обмотки, а вторинна ЕРС знімається з усією обмотки. У знижуючому автотрансформаторі напруга мережі подається на всю обмотку, а вторинна ЕРС знімається з частини обмотки.

Енергія магнітного поля

Якщо замкнути перемикач Π , то по ланцюгу, який зображено на рис. 6.10, потече струм, який створює в котушці (соленоїді) магнітне поле. Якщо розімкнути перемикач, то через опір R буде текти спадаючий струм, який підтримується ЕРС самоіндукцією, яка виникає в соленоїді.

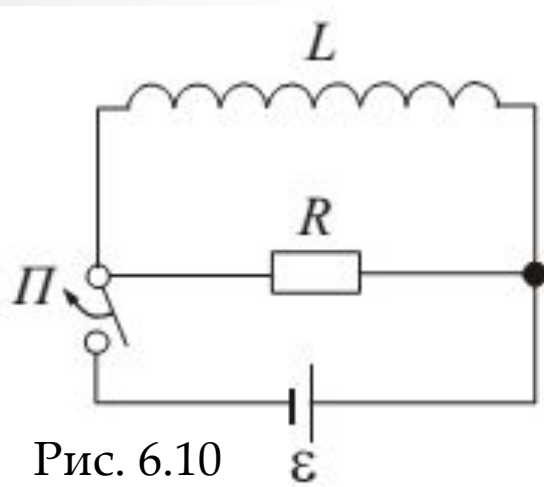


Рис. 6.10

Робота, що здійснюється в ланцюзі за весь час, протягом якого зникає магнітне поле, йде на нагрівання опору R , соленоїда і сполучних проводів. Оскільки ніяких інших змін не відбувається, можна зробити висновок, що магнітне поле є носієм енергії, за рахунок якої здійснюється робота.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

При цьому несуттєво, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

Вираз (6.1) називається *законом Фарадея* для електромагнітної індукції. Знак «-» введений в формулу відповідно до правила Ленца.

Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік протидіє зміні магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

Дякую за увагу!