

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія природничих дисциплін**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни «Фізика»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

**Аеронавігація**

**За темою - Електромагнітна індукція**

**Харків 2022**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ

Протокол від \_\_\_\_\_ 2022 № \_\_\_\_

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою Кременчуцького  
льотного коледжу ХНУВС

Протокол від \_\_\_\_\_ 2022 № \_\_\_\_

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін

Протокол від \_\_\_\_\_ 2022 № \_\_\_\_

Розглянуто на засіданні циклової комісії природничих дисциплін, протокол від 10.08.2022 № 1

**Розробник:** викладач циклової комісії природничих дисциплін, спеціаліст першої категорії, Москалик В.М.

**Рецензенти:**

1. Завідувач відділення фахової підготовки навчального відділу КЛК ХНУВС, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Владов С.І.
2. Доцент кафедри автомобілів і тракторів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, к.т.н., доцент Черниш А.А.

## Тема Електромагнітна індукція

### План лекції:

1. Електромагнітна індукція. Закон Фарадея.
2. Електрорушійна сила індукції. Правило Ленца.
3. Самоіндукція. Індуктивність.
4. Взаємоіндукція. Трансформатор.

### Література:

#### Основна література:

- 1.1 Дмитрієва В. Ф. Фізика : навчальний посібник / В. Ф. Дмитрієва. – К. : Техніка, 2008. – 608 с.
- 1.2 Трофімова Т.І. Курс фізики ; 11-е изд., стер. : навчальний посібник для вишів / Т.І. Трофімова. –К.: Видавничий центр «Академія», 2006. – 560 с.
- 1.3.Технічна термодинаміка ( Термодинаміка, теплопередача, теорія авіаційних двигунів) навчальний посібник: Л.В. Михненко. Міністерство цивільної авіації.

## 1. Електромагнітна індукція. Закон Фарадея

### *Електромагнітна індукція*

Взаємний зв'язок електричних і магнітних полів установив англійський фізик М. Фарадей, Електричні струми створюють навколо себе магнітне поле, А чи не може магнітне поле спричинити електричний струм?

У 1831 р. Фарадей експериментально встановив, що зі зміною магнітного потоку, який пронизує замкнений контур, у ньому виникає електричний струм. Це явище назвали електромагнітною індукцією («індукція» означає «наведення»).

Явище електромагнітної індукції Фарадей досліджував за допомогою двох ізольованих одна від одної дротяних спіралей, намотаних на дерев'яну котушку. Одну спіраль було з'єднано з гальванічною батареєю, а другу - з гальванометром, який реєструє слабкі струми. У моменти замикання і розмикання кола першої спіралі стрілка гальванометра в колі другої спіралі відхилялась.

Виконавши безліч дослідів, Фарадей установив, що в замкнених провідних контурах електричний струм виникає тільки тоді, коли вони розміщені в змінному магнітному полі, незалежно від того, як змінюється з часом потік індукції магнітного поля. Струм, який виникає під час явища електромагнітної індукції, називають індукційним. Точніше кажучи, під час руху контуру в магнітному полі генерується не певний струм (який залежить від опору), а певна ЕРС.

### *Закон Фарадея*

Розглянемо, як виникає ЕРС індукції, а отже, й індукційний струм. Нехай провідник без струму завдовжки  $l$  рухається в магнітному полі зі швидкістю  $V$  (рис. 1). Магнітне поле однорідне. Вектор магнітної індукції напрямлений перпендикулярно до площини рисунка від нас. Якщо провідник рухається праворуч, вільні електрони, які містяться в ньому, також рухатимуться праворуч, тобто виникає конвекційний струм. Напрямок цього струму обернений до напрямку руху електронів. На кожний рухомий електрон з боку магнітного поля діє сила Лоренца  $F_L$ . Заряд електрона негативний. Тому сила Лоренца напрямлена вниз. Під дією цієї сили електрони мають рухатися вниз, у кожній частині провідника  $l$  нагромаджуються негативні заряди, а у верхній - позитивні. Утворюється різниця потенціалів  $\varphi_1 - \varphi_2$ . У провіднику виникає електричне поле напруженістю  $E$ , яке перешкоджає дальшому переміщенню електронів.

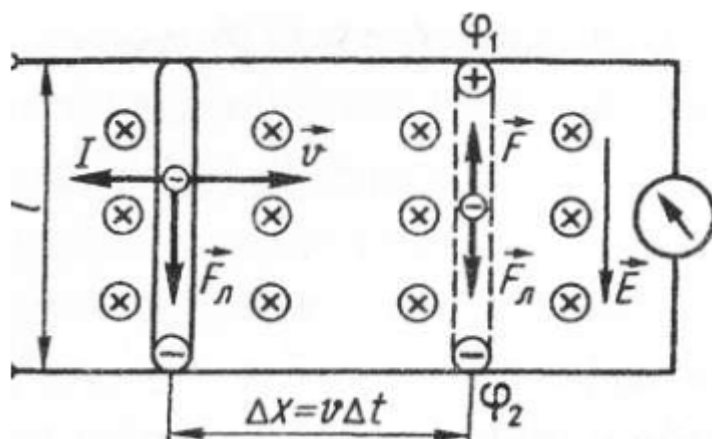


Рис. 1

У момент, коли сила  $F_{eL} = eE$ , яка діє на заряди з боку цього електричного поля, дорівнюватиме за модулем силі  $F_{eL} = eVB \sin \alpha$ , яка діє на заряди з боку магнітного поля, тобто при  $eE = eVB \sin \alpha$ , або  $E = VB \sin \alpha$ , переміщення зарядів припиниться.

Напруженість електричного поля  $E$  в рухомому провіднику завдовжки  $l$  і різниця потенціалів  $\varphi_1 - \varphi_2$  пов'язані між собою співвідношенням

$$\varphi_1 - \varphi_2 = El,$$

або

$$\varphi_1 - \varphi_2 = VBl \sin \alpha.$$

Якщо такий провідник замкнути, то по колу проходитиме струм. Отже, на кінцях провідника індукується ЕРС

$$\varepsilon_{\text{інд}} = VBl \sin \alpha.$$

Докладніше вивчення електромагнітної індукції показало, що ЕРС індукції в якому-небудь замкненому контурі дорівнює швидкості зміни магнітного

потoku через поверхню, яка обмежена цим контуром, взяту з протилежним знаком. Отже,

$$\varepsilon_{\text{інд}} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Останнє співвідношення виражає закон електромагнітної індукції або закон Фарадея:

ЕРС індукції дорівнює швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром.

## 2. Електрорушійна сила індукції. Правило Ленца

### *ЕРС індукції*

Електрорушійна сила в колі - це результат дії сторонніх сил, тобто сил неелектричного походження. У процесі руху провідника в магнітному полі роль сторонніх сил виконує сила Лоренца, під дією якої заряди розділяються, внаслідок чого на кінцях провідника виникає різниця потенціалів. ЕРС індукції в провіднику характеризує роботу щодо переміщення одиничного позитивного заряду вздовж провідника.

Якщо замкнений контур має  $N$  послідовно з'єднаних витків (наприклад, котушка або соленоїд), то ЕРС індукції дорівнює сумі ЕРС кожного витка:

$$\varepsilon_{\text{інд}} = -N \frac{d\Phi}{dt}.$$

Якщо замкнений провідний контур має опір  $R$ , то сила індукційного струму визначається за формулою

$$I_{\text{інд}} = \frac{\varepsilon_{\text{інд}}}{R}.$$

При цьому в контурі проходить кількість електрики

$$dQ = -\frac{d\Phi}{R}.$$

Явище електромагнітної індукції лежить в основі дії електричних генераторів. Якщо рівномірно обертати дротяну рамку в однорідному магнітному полі, то виникає індукований струм, який періодично змінює свій напрям. Навіть одинична рамка, яка обертається в однорідному магнітному полі, є генератором змінного струму. Складніші генератори звичайно є поліпшеними варіантами такого пристрою.

### *Правило Ленца*

Знак мінус у формулі  $\varepsilon_{\text{інд}} = -\frac{d\Phi}{dt}$  відображає правило Ленца:

індукційний струм завжди напрямлений так, що його дія протилежна дії причини, яка викликає струм.

Якщо магнітний потік зростає:

$$\frac{d\Phi}{dt} > 0, \text{ то } \varepsilon_{\text{інд}} < 0,$$

тобто ЕРС індукції спричинює струм такого напрямку, при якому його магнітне поле зменшує магнітний потік через контур.

Якщо магнітний потік зменшується:

$$\frac{d\Phi}{dt} < 0, \text{ то } \varepsilon_{\text{інд}} > 0,$$

тобто магнітне поле індукційного струму збільшує спадний магнітний потік через контур.

### 3. Самоіндукція. Індуктивність

#### Самоіндукція

Розглянемо коло (рис. 2), яке складається з батареї  $E$ , реостата  $R$ , котушки індуктивності  $L$ , гальванометра  $G$  і ключа  $K$ .

Якщо коло замкнене, то по гальванометру  $G$  і котушці індуктивності  $L$  проходить електричний струм. У момент розмикання кола стрілка гальванометра різко відхиляється у протилежний бік. Причина цього в тому, що при розмиканні кола магнітний потік у котушці зменшується, спричинюючи в ній ЕРС самоіндукції. Струм самоіндукції  $I_{ci}$ , за законом Ленца, перешкоджає спаданню магнітного потоку, тобто він напрямлений у котушці так само, як і спадний струм  $I_2$ . Цей струм цілком проходить через гальванометр, але його напрям протилежний напрямку  $I_1$ . Явище виникнення індукованого струму в колі внаслідок зміни струму в ньому називають самоіндукцією.

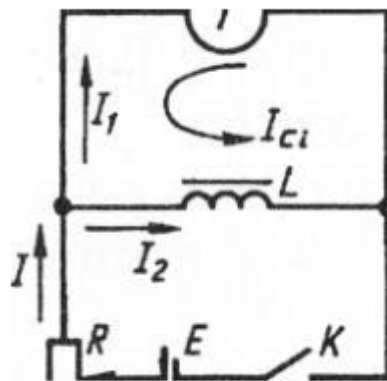


Рис. 2

Самоіндукція - це окремий випадок явищ електромагнітної індукції.

З'ясуємо, від чого залежить ЕРС самоіндукції. Індукція  $B$  пропорційна силі струму в котушці, тому магнітний потік, який виникає в котушці, також пропорційний силі струму:

$$\Phi = LI.$$

Коефіцієнт пропорційності  $L$  називають індуктивністю контуру.

Із зміною власного магнітного потоку в контурі, згідно з законом електромагнітної індукції, виникає ЕРС самоіндукції:

$$\varepsilon_{ci} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Підставивши у останній вираз формулу  $\Phi = LI$ , знаходимо, що ЕРС самоіндукції пропорційна швидкості зміни сили струму:

$$\varepsilon_{ci} = -L \frac{dI}{dt}.$$

### *Індуктивність*

З останньої формули випливає, що індуктивність - це фізична величина, яка чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, яка виникає в контурі при зміні сили струму на 1 А за 1 с. Індуктивність  $L$  контуру залежить від його геометричної форми, розмірів і магнітних властивостей середовища, в якому він розміщений. Наприклад, для соленоїда завдовжки  $l$  і площею перерізу витка  $S$  у вакуумі або повітрі

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l},$$

де  $N$  - загальна кількість витків соленоїда;  $\mu_0$  - магнітна стала.

Урахувавши, що об'єм соленоїда  $V = lS$ , а  $n = N/l$  - кількість витків, які припадають на одиницю довжини, останню формулу можна переписати у вигляді

$$L = \mu_0 n^2 V.$$

З формули  $\Phi = LI$  випливає, що  $L = \frac{\Phi}{I}$ . З цієї формули можна визначити одиницю індуктивності - генрі (Гн):

$$1\text{Гн} = 1\text{Вб}/\text{А} = 1\text{В}\cdot\text{с}/\text{А}.$$

Як випливає з дослідів, індуктивність усякого контуру залежить від властивостей середовища, в якому розміщений контур. У цьому можна впевнитись на досліді, схему якого зображено на рис. 2. Якщо в котушку  $L$  внести залізне осердя, то сила струму самоіндукції зростає в багато разів. Це свідчить про те, що збільшилась індуктивність котушки.

Величина, яка дорівнює відношенню індуктивності  $L$  контуру в однорідному середовищі до індуктивності  $L_0$  контуру у вакуумі, є магнітною проникністю середовища:

$$\mu = \frac{L}{L_0}.$$

Магнітна проникність, яка характеризує магнітні властивості речовини, - величина безрозмірна. З останніх формул випливає, що  $L = \mu\mu_0 n^2 V$ .

#### 4. Взаємодукція. Трансформатор

Якщо контур, який складається з провідника, помістити поблизу контуру із струмом, що змінюється з часом, то в провіднику ми зареєструємо індуковане електричне поле. Явище виникнення індукованого електричного поля в провідниках, розміщених поблизу інших провідників, по яких проходить змінний у часі електричний струм, називають взаємною індукцією. ЕРС взаємної індукції визначимо за законом електромагнітної індукції:

$$\varepsilon_{21} = - \frac{d\Phi_{21}}{dt}.$$

У цій формулі  $d\Phi_{21}$  - потік магнітної індукції, який створюється магнітним полем струму  $I_1$ , що проходить по контуру і пронизує площу поверхні, яку охоплює контур.

Магнітний потік  $d\Phi_{21}$  пропорційний струму  $I_1$ , що проходить по першому контуру:

$$\Phi_{21} = L_{21}I_1.$$

Коефіцієнт пропорційності  $L_{21}$  називають взаємною індуктивністю контурів;  $L_{21}$  залежить від розмірів, геометричної форми, відносної магнітної проникності середовища і взаємного розміщення контурів. З формул  $\Phi = LI$  і  $\Phi_{21} = L_{21}I_1$  видно, що  $L_{21}$  вимірюють тими самими одиницями, що й індуктивність, тобто в генрі (Гн).

На явищі взаємної індукції ґрунтується дія трансформатора - пристрою, призначеного для перетворення напруги і сили змінного струму.