

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

**Циклова комісія економіки, соціально-гуманітарних та  
фундаментальних дисциплін**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

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

**272Авіаційний транспорт  
Оператор безпілотних літальних апаратів**

**за темою - Електромагнітна індукція**

**Кременчук 2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 22.02.2024 №2

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного  
коледжу Харківського  
національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 17.01.2024 №6

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з гуманітарних та соціально-  
економічних дисциплін  
Протокол від 22.02.2024 №2

Розглянуто на засіданні циклової комісії економіки, соціально-гуманітарних та фундаментальних дисциплін, протокол від 05.01.2024 №14

**Розробник:**

*Викладач циклової комісії економіки, соціально-гуманітарних та фундаментальних дисциплін, Пузир М.С.*

**Рецензенти:**

*1.Доцент кафедри автомобілів та тракторів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, кандидат технічних наук, доцент Черниш А.А.*

*2.Начальник відділу організації наукової роботи та гендерних питань КЛК ХНУВС, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Владов С.І.*

## План лекції

1. Явище електромагнітної індукції.
2. Правило Ленца. Зв'язок правила Ленца з законом збереження енергії.
3. Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея).
4. Індуктивність.
5. Явище самоіндукції.
6. Явище взаємної індукції.

## Рекомендована література:

### Основна

1. Дмитрієва В. Ф. Фізика : навчальний посібник / В. Ф. Дмитрієва. – К.: Техніка, 2008. – 608 с.

### Додаткова

1. Курс фізики : навчальний посібник / [Зачек І. Р., Кравчук І. М., Романишин Б. М., Габа В. М., Гончар Ф. М.]. – Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2002. – 376 с.
2. Волков О. Ф. Курс фізики ; у 2-х т. – Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм : навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів / О. Ф. Волков, Т. П. Лумпієва. – Донецьк : ДонНТУ, 2009. – 224 с.
3. Волков О. Ф. Курс фізики ; у 2-х т. – Т.2: Коливання і хвилі. Хвильова і квантова оптика. Елементи квантової механіки. Основи фізики твердого тіла. Елементи фізики атомного ядра : навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів / О. Ф. Волков, Т. П. Лумпієва. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – 208 с.
4. Збірник задач з фізики : навчальний посібник / [Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Серeda В. М., Крушельницька Т. Д., Українець Н. А.]. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 124с.

## Текст лекції

### 1. Явище електромагнітної індукції.

Досі розглядалися стаціонарні електричні і магнітні поля, тобто ті, що не змінювалися в часі. В 1820-1821 роках були відкриті явища:

- 1) утворення магнітного поля електричним струмом;
  - 2) впливу магнітного поля на електричний струм та рухомий електричний заряд.
- Перед вченими постало питання: «Чи не може магнітне поле утворювати струм?»

Через 10 років Д.Генрі (швидше) та англійський фізик Майкл Фарадей (1791-1867) (пізніше) виявили даний ефект. Але Фарадей першим опублікував результати провівши більш детальні дослідження.

Фарадей розраховував, що при використанні достатньо потужної батареї (див. рис. 1) постійний струм в дротяній обмотці  $X$  створить достатньо сильне магнітне поле, що збудить електричний струм в ізольованій від попередньої, дротяній обмотці  $Y$ . У перших дослідах Фарадея котушки були намотані на дерев'яне осердя. Довгоочікуване короткочасне явище було помічено лише при замиканні і розмиканні кола. Через півтора місяця вчений усвідомив суть відкриття, реалізувавши дослід, зображений на наступному рисунку. А ще через 10 днів у нього працював принципово новий генератор струму.

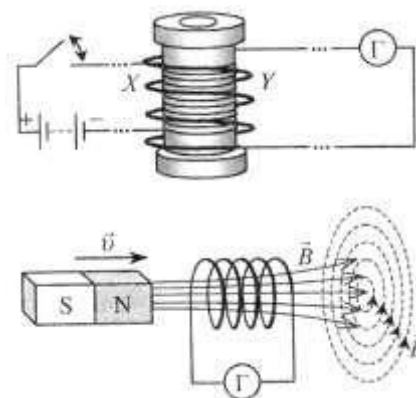


Рис. 1

Відкрите 29 серпня 1831 р. явище отримало назву явища електромагнітної індукції, а струм, що виникав - індукційним.

**Електромагнітна індукція** - явище виникнення у провіднику електрорушійної сили при зміні магнітного поля, що пронизує площу контура провідника. Якщо провідник замкнений, то в ньому виникне електричний струм.

**Індукційний струм** – це струм, що виникає у провіднику при електромагнітній індукції.

Виникнення індукційного струму завжди пов'язане із зміною магнітного потоку через контур провідника.

Ці зміни можуть відбуватися з різних причин, зокрема через:

- переміщення постійного магніту відносно нерухомого провідника;
- переміщення контура відносно нерухомого магніту;
- замикання та розмикання струму в обмотці нерухомого електромагніту, розміщеного поблизу провідника;
- відносне переміщення контура і електромагніту;
- зміну індукції магнітного поля електромагніту (виймання осердя при сталому струмі в обмотці або зміну струму реостатом);
- зміну комутатором напрямку струму в обмотці електромагніту;
- постійний рух контура в неоднорідному магнітному полі;
- обертальний рух контура в однорідному магнітному полі.

Отже, індукційний струм в замкненому контурі виникає тільки тоді, коли змінюється магнітний потік, який проходить через площу, охоплену контуром.

## 2. Правило Ленца. Зв'язок правила Ленца з законом збереження енергії.

Фарадей встановив, що напрямок індукційного струму в провіднику залежить від характеру зміни (збільшення чи зменшення) магнітного потоку ( $\Delta\Phi > 0$  чи  $\Delta\Phi < 0$ ) через його контур. Якщо при внесенні постійного магніту в котушку стрілка гальванометра відхиляється в один бік, то при вийманні магніту вона відхиляється в протилежний бік.

Загальне правило, за допомогою якого можна визначити напрямок індукційного струму в замкненому провіднику, сформулював Е.Х. Ленц (1804-1865): *індукційний струм у замкненому провіднику завжди має такий напрямок, що створений цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм.*

Правило Ленца можна наочно продемонструвати за допомогою легенького алюмінієвого кільця (див. рис. 2). Дослід показує, що при наближенні постійного магніту до кільця, воно відштовхується, а при віддаленні — притягується до магніту. Результат дослідів не залежить від полярності магніту.



Рис. 2

Явище виникнення індукційного струму фактично є наслідком прояву закону збереження енергії. Дійсно, якби кільце притягувалося до наближаючогося магніту і відштовхувалося від віддаляючогося, то зафіксувавши кільце горизонтально, а магніт причепивши до пружин достатньо було б один раз його вивести з положення рівноваги, щоб далі магніт коливався би сам собою, безперервно виробляючи струм (індукційний «вічний двигун»). Кінетична енергія магніту збільшувалась би. Це призвело б до зростання сили струму в кільці, що, в свою чергу, - до збільшення сили взаємодії між кільцем та магнітом, отже, до зростання кінетичної енергії магніту і т.д. Але це є порушення закону збереження енергії.

Із закону Ленца можна встановити, що енергія індукційного струму у провіднику утворюється за рахунок тієї енергії, яка витрачається на подолання протидії магнітного поля індукційного струму.

Завдяки явищу електромагнітної індукції можна перетворити механічну енергію в електричну, а також передавати електричну енергію з одного кола в інше.

Якщо індукційний струм виникає у прямому провіднику, який є ділянкою замкнутого кола і рухається в зовнішньому магнітному полі перпендикулярно до ліній індукції, напрямок струму можна визначити за правилами правої руки: *праву руку треба помістити з магнітному полі так, щоб лінії напруженості входили в долоню, а відставлений під прямим кутом великий палець збігався з напрямом переміщення провідника. Тоді чотири витягнуті пальці вкажуть напрямок індукційного струму в цьому провіднику.*

### 3. Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея).

Індукційний струм  $I_i$ , у замкнутому провіднику з опором  $R$  виникає під дією  $\varepsilon_i$ , яку можна виразити за законом Ома:

$$\varepsilon_i = I_i R. \quad (1)$$

Оскільки та сама Е.Р.С. у провідниках з різним опором створює неоднакові струми, то для кількісної характеристики явища електромагнітної індукції зручніше користуватися величиною  $\varepsilon_i$ , а не силою індукційного струму  $I_i$ .

Дослідження індукційного струму в контурах різної форми і розмірів показали, що Е.Р.С. електромагнітної індукції  $\varepsilon_i$  в контурі пропорційна до швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi$  через поверхню, обмежену цим контуром (закон Фарадея):

$$\varepsilon_i = k \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (2)$$

Е.Р.С. електромагнітної індукції в контурі вважають позитивною, якщо магнітний момент  $\vec{p}_m$  відповідного їй індукційного струму утворює гострий кут з лініями магнітної індукції того поля, яке наводить цей струм (див. рис. 4). Тоді для випадку, зображеного на рисунку ліворуч  $\varepsilon_i < 0$ , а для зображеного праворуч -  $\varepsilon_i > 0$ . В системі СІ  $k = -1$  і

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (3)$$

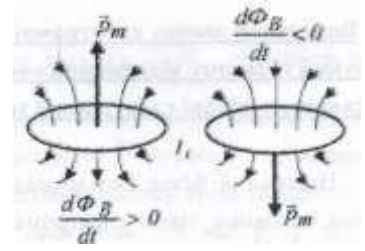


Рис. 4

Знак «-» є математичним виразом правила Ленца. Ця формула, яка об'єднує закони Фарадея і Ленца, є математичним виразом основного закону електромагнітної індукції: *електрорушійна ста електромагнітної індукції в замкненому контурі чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку крізь поверхню, обмежену контуром.*

Якщо Е.Р.С. індукції виникає при зміні магнітного потоку, який пронизує котушку з  $N$  витків, то її величина буде відповідно в  $N$  разів більшою, ніж для одного витка, тобто:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (4)$$

На основі закону електромагнітної індукції можна означити одиницю магнітного потоку вебер: 1 Вб — це такий магнітний потік при зменшенні якого до нуля протягом 1 с в колі, яке він пронизував, виникає Е.Р.С. індукції в 1 В.

#### 4. Індуктивність.

Навколо будь-якого провідника зі струмом існує магнітне поле, магнітна індукція  $d\vec{B}$  якого у точці, що лежить на відстані  $r$  від елемента  $d\vec{l}$  контуру струму  $I$ , дорівнює:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} I \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (5)$$

Якщо цей контур обмежений поверхнею  $S$ , то магнітний потік, який створений власним магнітним полем контуру, через поверхню  $S$  дорівнює:

$$\Phi_B = \int_S B_n dS, \quad (6)$$

де  $B_n$  - проекція вектора індукції  $\vec{B}$  магнітного поля струму, що тече в цьому контурі, на нормаль до елемента поверхні  $dS$ .

Проекцій векторної суми  $\vec{B}$  на даний напрямок дорівнює алгебраїчній сумі проекцій на цей напрямок всіх складових векторів. Тому

$$B_n = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_l \frac{\mu [d\vec{l}, \vec{r}]_n}{r^3}, \quad (7)$$

$$\Phi_B = LI \quad (8)$$

де  $L = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_S \left\{ \oint_l \frac{\mu [d\vec{l}, \vec{r}]_n}{r^3} \right\}$  - індуктивність контуру.

З цієї формули випливає, що індуктивність контуру залежить від геометричної форми контуру, його розмірів та магнітної проникливості середовища, в якому він знаходиться.

Індуктивність контуру *чисельно дорівнює магнітному потоку, створеному одиничним струмом*.  $[L] = 1 \text{ Генрі} = 1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}}$

При цьому вважається, що немає ніяких інших магнітних полів, крім магнітного поля, створеного струмом у контурі, що розглядається.

Індуктивність соленоїду:

$$L = \frac{\Phi_{\text{всол}}}{I} = \frac{N\Phi_B}{I}, \quad (9)$$

де  $N$  - число витків,  $\Phi_B$  - магнітний потік крізь площу  $S$ , обмежену одним витком.

$$\Phi_B = BS = \mu\mu_0 nIS = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} IS, \quad (10)$$

де  $l$  - довжина котушки.

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}, \text{ або} \quad (11)$$

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (12)$$

де  $V = Sl$  - об'єм соленоїду.

### 5. Явище самоіндукції.

Під час проходження по контуру непостійного струму магнітний потік змінюється і в контурі наводиться Е.Р.С. індукції.

**Самоіндукція** – явище виникнення Е.Р.С. індукції внаслідок зміни струму в колі.

Електрорушійна сила самоіндукції дорівнює:

$$\varepsilon_c = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt}(LI), \quad (13)$$

Якщо контур не деформується і магнітна проникність середовища не змінюється, то  $L = \text{const}$ :

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}, \quad (14)$$

Знак «-» означає, що струм самоіндукції завжди спрямований за правилом Ленца, тобто наявність індуктивності в електричному колі завжди приводить до уповільнення зміни струму в ньому.

Одиницю  $L$  (Генрі) зручніше ввести і виміряти, використовуючи явище самоіндукції, коли потік у котушці змінюється тільки внаслідок зміни струму:

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

## 6. Явище взаємної індукції.

Розглянемо два нерухомі контури, індуктивності яких  $L_1$  і  $L_2$ , що розміщені досить близько один від одного (див. рис. 8).

Якщо в контурі 1 тече струм  $I_1$ , то магнітний потік, що створюється цим струмом, пропорційний до  $I_1$ .

Позначимо  $\Phi_{B21}$  ту частину потоку, яка пронизує контур 2. Тоді

$$\Phi_{B21} = M_{21}I_1, \quad (15)$$

де  $M_{21}$  - коефіцієнт пропорційності.

Якщо струм  $I_1$  змінюється, то в контурі 1 індукція Е.Р.С.  $\mathcal{E}_{i2}$ , яка за законом Фарадея дорівнює швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi_{B21}$ :

$$\mathcal{E}_{i2} = - \frac{d\Phi_{B21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (16)$$

Аналогічно, при протіканні в контурі 2 струму  $I_2$  магнітний потік пронизує перший контур. Якщо  $\Phi_{B12}$  - частина потоку, що пронизує контур 1, то

$$\Phi_{B12} = M_{12}I_2. \quad (17)$$

Якщо струм  $I_2$  змінюється, то в контурі 1 індукується Е.Р.С.  $\mathcal{E}_{i1}$ :

$$\mathcal{E}_{i1} = - \frac{d\Phi_{B12}}{dt} = -M_{12} \frac{dI_2}{dt}. \quad (18)$$

Контури 1 і 2 називаються зв'язаними.

Взаємоіндукція - явище виникнення Е.Р.С. в одному з контурів при зміні сили струму в іншому.

Коефіцієнти  $M_{12}$  і  $M_{21}$  називаються взаємною індуктивністю контурів.

Розрахунки показують, що  $M_{12} = M_{21}$ .

Коефіцієнти  $M_{12}$  і  $M_{21}$  залежать від геометричної форми, розмірів, взаємного розміщення контурів і від магнітної проникності середовища, яке оточує контури.

Взаємна індуктивність двох котушок, які намотані на загальне тороїдальне осердя (див. рис. 9):

$$M_{12} = M_{21} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S, \quad (19)$$

де  $N_1, N_2$  - кількість витків в першій та другій котушках;  $S$  - площа поперечного перетину тороїда;  $l$  - довжина осердя по середній лінії.

Коефіцієнт взаємоіндукції рівний:

$$M_{12} = M_{21} = \sqrt{L_1 L_2}, \quad (20)$$

$L_1$  і  $L_2$  - індуктивності котушок першої та другої відповідно.

На явищі взаємної індукції заснований принцип дії електричних трансформаторів.

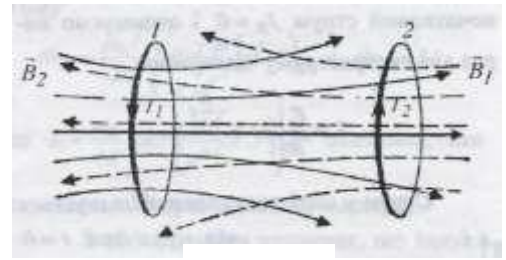


Рис. 8

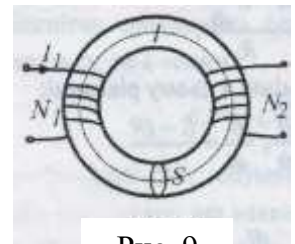


Рис. 9