

## § 22. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

?!

Ви довідалися, що під час зміни магнітного потоку, який пронизує замкнений контур, у контурі виникає індукційний струм, і встановили, як визначити його напрямок. З'ясуємо, чому виникає індукційний струм і як визначити його силу.

1

### Закон електромагнітної індукції

Проаналізувавши результати дослідів Фарадея, ми, здавалося б, маємо певну суперечність із вивченим раніше. Справді, електричний струм у замкненому колі існує, якщо виконуються дві обов'язкові умови: наявність вільних заряджених частинок і наявність електричного поля. А от у розглянутих дослідах у колі котушки, замкненій на гальванометр, немає електричного поля, створеного електричними зарядами, проте струм є! Це може означати тільки одне: *під час зміни магнітного потоку, що пронизує провідний контур, у контурі виникають сторонні (не кулонівські) сили, які й переміщують електричні заряди по контуру, виконуючи при цьому роботу. У такому випадку робота сторонніх сил ( $A_{\text{ст}}$ ) з переміщення одиничного позитивного заряду називається електрорушійною силою індукції (ЕРС індукції)  $\mathcal{E}_{\text{інд}}$ :*

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

Експериментально встановлено, що ЕРС індукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує контур:  $\mathcal{E}_{\text{інд}} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

### Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея):

Електрорушійна сила індукції в контурі чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує поверхню, обмежену цим контуром:

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Знак «мінус» у законі Фарадея відбиває правило Ленца.

Відповідно до закону Ома сила індукційного струму  $I_{\text{інд}}$  в контурі з опором  $R$  дорівнює:

$$I_{\text{інд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{інд}}}{R}.$$

Зверніть увагу:

1) якщо магнітний потік змінюється нерівномірно, то слід розглядати дуже малий інтервал часу ( $\Delta t \rightarrow 0$ ); тоді  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  і закон електромагнітної індукції набуде вигляду:

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\Phi'(t)$$

2) якщо контур містить  $N$  витків проводу, то в кожному витку ЕРС індукції дорівнює:  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$ , тому сумарна ЕРС індукції становить:  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N\Phi'(t)$ .

## 2 Вихрове електричне поле

Звідки ж беруться сторонні сили, що діють на заряди в провіднику? У випадку, коли провідник є нерухомим відносно спостерігача, причина появи сторонніх сил — змінне магнітне поле. Річ у тім, що змінне магнітне поле завжди супроводжується появою в навколишньому просторі вихрового електричного поля — саме воно діє на вільні заряджені частинки в провіднику та надає їм напрямленого руху, створюючи таким чином індукційний струм.

Явище створення в просторі вихрового електричного поля змінним магнітним полем називають **явищем електромагнітної індукції**.

★ Зупинимось на деяких властивостях вихрового електричного поля.

1. Вихрове електричне поле, як і поле, створене електричними зарядами, виявляється в силіній дії на заряджені частинки, тому основною характеристикою цього поля є вектор напруженості  $\vec{E}$ .

2. На відміну від електростатичного поля лінії напруженості вихрового електричного поля є замкненими. Напрямок цих ліній можна визначити за допомогою лівої руки, якщо магнітна індукція магнітного поля, яке створює вихрове поле, збільшується (рис. 22.1, а), або за допомогою правої руки, якщо магнітна індукція магнітного поля зменшується (рис. 22.1, б).

3. На відміну від електростатичного поля робота вихрового електричного поля на замкненій траєкторії не дорівнює нулю, адже під час переміщення заряду вздовж замкненої лінії напруженості робота на всіх ділянках шляху має той самий знак. ★

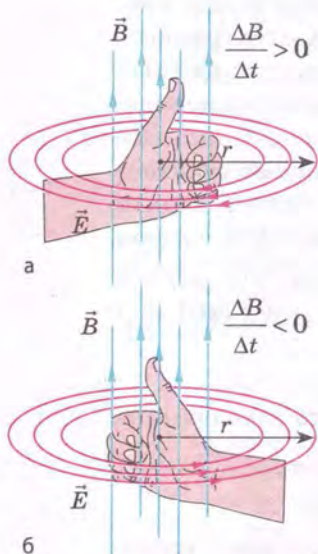


Рис. 22.1. Напрямок ліній напруженості вихрового електричного поля: а — магнітна індукція магнітного поля збільшується; б — магнітна індукція магнітного поля зменшується



### ★ 3 Де застосовують струми Фуко\*

**Струми Фуко** — вихрові індукційні струми, які виникають у провідниках при зміні магнітного потоку, що їх пронизує.

Якщо на шляху суцільної мідної пластини, що коливається, розташувати підковоподібний магніт, то в момент входження пластини в магнітне поле магніту вона практично зупиниться (рис. 22.2, а). Сповільнення руху пов'язане зі збудженням у пластині *струмів Фуко*, які (за правилом Ленца) створюють магнітне поле, що перешкоджає руху пластини. Чим більшим є опір провідника, тим меншою є сила струмів Фуко, що виникають (рис. 22.2, б).

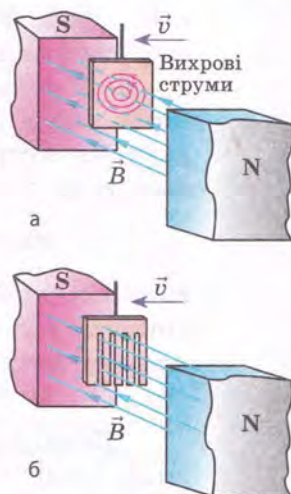
Дія струмів Фуко застосовується для демпфування\*\* рухливих частин гальванометрів, сейсмографів тощо. Теплову дію струмів Фуко використовують в індукційних печах для плавлення металів або для швидкого готування їжі. Провідник (метал або їжу) поміщують усередину котушки, по якій пропусकाють змінний струм високої частоти. Змінний струм створює змінне магнітне поле, яке спричиняє появу струмів Фуко в провіднику та його нагрівання.

Струми Фуко в осердях трансформаторів, роторах електричних генераторів та двигунів викликають непотрібне нагрівання та призводять до втрат енергії. Для ослаблення вихрових струмів опір таких деталей збільшують — їх виготовляють з листів сталі, розділених тонкими шарами діелектрика.★

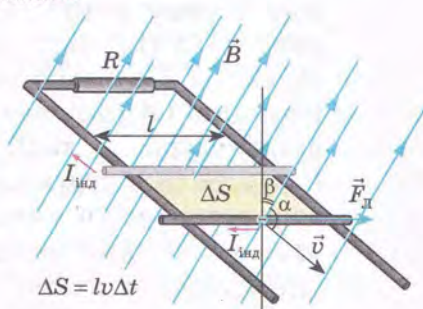
### 4 ЕРС індукції в рухомих провідниках

З'ясуємо природу *ЕРС індукції*, яка виникає в провіднику, що рухається в постійному магнітному полі.

Нехай металевий провідник довжиною  $l$  рухається в однорідному магнітному полі з деякою швидкістю  $\vec{v}$ , напрямленою під кутом  $\alpha$  до ліній індукції поля (рис. 22.3). На вільні заряди (у даному випадку електрони), що разом з провідником рухаються в магнітному полі, діє сила Лоренца  $\vec{F}_L$ . Під дією цієї сили відповідно до правила лівої руки електрони рухатимуться вздовж



**Рис. 22.2.** Суцільна мідна пластинка, що рухається між полюсами магніту, швидко зупиняється (а); швидкість руху мідного гребінця, що рухається між полюсами магніту, практично не змінюється (б)



**Рис. 22.3.** До виведення формули для розрахунку ЕРС індукції в провіднику, що рухається в магнітному полі

\* За ім'ям французького вченого *Леона Фуко* (1819–1868), який відкрив явище нагрівання металевих тіл, що обертаються в магнітному полі.

\*\* *Демпфування* — примусове гасіння коливань у динамічній системі внаслідок розсіювання енергії.



провідника. У результаті на одному кінці провідника з'явиться *надлишковий негативний заряд* (туди «прийшли» електрони), а на другому кінці — *позитивний заряд* (звідти «пішла» частина електронів). Якщо тепер провідник замкнути, то в замкненому колі виникне індукційний струм, джерелом якого буде рухомий провідник, а сторонньою силою, яка виконує роботу всередині джерела, — сила Лоренца.

За визначенням ЕРС індукції  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = \frac{A_{\text{ст}}}{|q|}$ , де  $A_{\text{ст}} = F_{\text{Л}} l$  — робота сили Лоренца з переміщення заряду від одного кінця провідника до другого. З огляду на те що  $F_{\text{Л}} = B|q|v \sin \alpha$ , маємо формулу для розрахунку ЕРС індукції в рухомому провіднику:

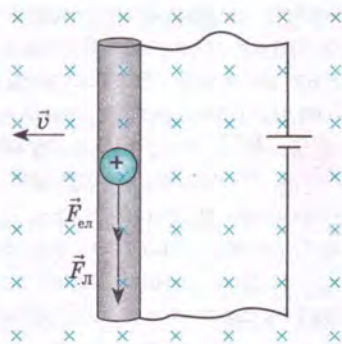
$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = B v l \sin \alpha$$

Дану формулу можна отримати й використовуючи закон Фарадея: зміна магнітного потоку  $\Delta \Phi = B \Delta S \cos \beta$ , де  $\Delta S = l v \Delta t$  — зміна площі контуру;  $\beta = 90^\circ - \alpha$  (див. рис. 22.3):  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{B l v \Delta t \cdot \cos(90^\circ - \alpha)}{\Delta t} = B v l \sin \alpha$ .

Таким чином, значення ЕРС індукції, яка виникає в рухомих і нерухомих провідниках, розраховується за одним законом — *законом Фарадея*, але фізичні причини виникнення сторонніх сил у цих випадках є різними. У випадку з рухомими провідниками сторонньою силою є сила Лоренца; у випадку з нерухомими провідниками сторонньою силою є сила, яка діє з боку вихрового електричного поля, що створюється змінним магнітним полем.

## 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** За допомогою гнучких провідів прямолінійний провідник завдовжки 60 см приєднаний до джерела постійного струму з ЕРС 12 В і внутрішнім опором 0,5 Ом (див. рисунок). Провідник рухається в однорідному магнітному полі індукцією 1,6 Тл зі швидкістю 12,5 м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначте силу струму в провіднику, якщо опір зовнішнього кола дорівнює 2,5 Ом.



$I$  — ?

Дано:

$$l = 0,6 \text{ м}$$

$$\mathcal{E}_{\text{дж}} = 12 \text{ В}$$

$$r = 0,5 \text{ Ом}$$

$$B = 1,6 \text{ Тл}$$

$$v = 12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 2,5 \text{ Ом}$$

**Аналіз фізичної проблеми.** Провідник рухається в магнітному полі, тому на заряди в провіднику діє сила Лоренца, напрямком якої визначимо за правилом лівої руки. На заряди в провіднику також діє сила з боку електричного поля джерела струму. Обидві сили «штовхають» заряди в одному напрямку (див. рисунок), тобто повна ЕРС кола  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{дж}} + \mathcal{E}_{\text{інд}}$ .

**Пошук математичної моделі. Розв'язання.** Силу струму в колі знайдемо, скориставшись законом Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}} + \mathcal{E}_{\text{інд}}}{R + r}.$$

У рухомому провіднику ЕРС індукції  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = B v l \sin \alpha$ .



Остаточно маємо: 
$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}} + Bv \sin \alpha}{R + r}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[I] = \frac{B + T_{\text{Л}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м}}{\text{Ом}} = \frac{B + \frac{H}{A \cdot \text{м}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м}}{\text{Ом}} = \frac{B + \frac{H \cdot \text{м}}{A \cdot \text{с}}}{\text{Ом}} = \frac{B + \frac{Дж}{Кл}}{\text{Ом}} = \frac{B \cdot A}{B} = A;$$

$$\{I\} = \frac{12 + 1,6 \cdot 12,5 \cdot 0,6}{2,5 + 0,5} = 8, \quad I = 8 \text{ А}.$$

**Відповідь:** сила струму в провіднику  $I = 8 \text{ А}$ .

### ! Підбиваємо підсумки

Під час зміни магнітного потоку, що пронизує контур, у контурі виникають сторонні сили. Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея): електрорушійна сила індукції в контурі чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує поверхню, обмежену цим контуром:  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$ .

Якщо контур містить  $N$  витків проводу, то сумарна ЕРС індукції  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N \Phi'(t)$ .

Змінне магнітне поле супроводжується появою в навколишньому просторі вихрового електричного поля. Явище створення в просторі електричного поля змінним магнітним полем називають явищем електромагнітної індукції.

Якщо провідник рухається в магнітному полі, то ЕРС індукції можна обчислити за формулою:  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = Bv \sin \alpha$ .

### ? Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон електромагнітної індукції. Якого вигляду набуде цей закон, якщо магнітний потік змінюється нерівномірно? якщо контур містить  $N$  витків проводу? 2. Чому в нерухомих провідниках, що розташовані в змінному магнітному полі, виникає індукційний струм? 3. Дайте визначення електромагнітної індукції. ★ 4. Назвіть основні властивості вихрового електричного поля. ★ 5. Що являють собою струми Фуко? Де їх застосовують? Як зменшують їхню негативну дію? 6. Яка природа ЕРС індукції в провіднику, що рухається в магнітному полі? Отримайте формулу для її визначення.

### Вправа № 20

- Провідник завдовжки 20 см рухається в однорідному магнітному полі індукцією 25 мТл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Знайдіть ЕРС індукції в провіднику, якщо швидкість його руху 2,0 м/с.
- Магнітний потік, що пронизує провідний контур опором 0,24 Ом, рівномірно змінюється на 0,6 Вб так, що ЕРС індукції виявилася рівною 1,2 В. Визначте час зміни магнітного потоку та силу струму в провіднику.
- Чому від удару блискавки іноді перегорять запобіжники навіть вимкненого з розетки електричного приладу?
- Замкненому мідному проводу довжиною 2 м та площею поперечного перерізу 17 мм<sup>2</sup> надали форми квадрата та помістили в однорідне магнітне поле індукцією 50 мТл перпендикулярно до ліній індукції поля. Людина, взявшись за два протилежні кути квадрата, різко (за 0,2 с) випрямила провід, не розірвавши його. Визначте середню силу струму, яка виникла в провіді.