

Рис. 3

§ 21. ДОСЛІДИ ФАРАДЕЯ. НАПРЯМОК ІНДУКЦІЙНОГО СТРУМУ

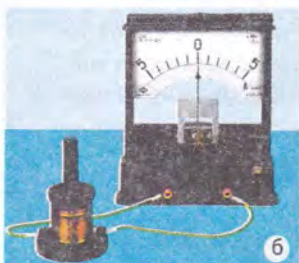
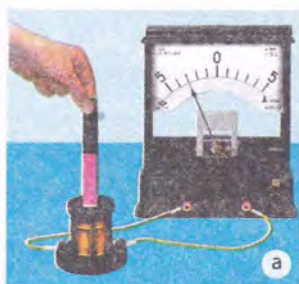


Рис. 21.1. Дослідження виникнення індукційного струму: *а* — якщо магніт вводити в котушку, то в колі виникає струм, наявність якого фіксує гальванометр; *б* — якщо магніт нерухомий, струм не виникає



Невдовзі після відкриття Г. К. Ерстеда *Майкл Фарадей* записав у своєму щоденнику: «Перетворити магнетизм на електрику». 29 серпня 1831 р., після численних дослідів, які він проводив протягом десяти років, Фарадей досяг своєї мети: він помітив, що в замкненому провіднику, який розташований у змінному магнітному полі, виникає електричний струм, — його вчений назвав *індукційним (наведеним) струмом*. Про досліди Фарадея, умови виникнення індукційного струму та правило визначення його напрямку ви дізнаєтесь із цього параграфа.



1 Як можна «перетворити магнетизм на електрику»

Проведемо низку дослідів, які є сучасним варіантом дослідів *М. Фарадея*.

Дослід 1. Візьмемо котушку, замкнемо її на гальванометр і введемо в котушку постійний магніт. Під час руху магніту стрілка гальванометра відхилиться, що свідчить про наявність електричного струму (рис. 21.1, *а*). Чим швидше рухати магніт, тим сильнішим буде струм; якщо рух магніту припинити, припиниться і струм — стрілка повернеться на нульову позначку (рис. 21.1, *б*). Виймаючи магніт із котушки, помітимо, що стрілка

гальванометра відхилиться в іншому напрямку; після припинення руху магніту стрілка повернеться на нульову позначку.

Якщо залишити магніт нерухомим, а котушку рухати то наближаючи, то віддаляючи її від магніту, побачимо, що електричний струм в котушці виникає тільки під час її руху.

Дослід 2. Візьмемо дві котушки та надінемо на спільне осердя (рис. 21.2). Якщо змінювати силу струму в котушці С, то в котушці А теж можна спостерігати наявність струму. У разі збільшення сили струму в котушці С стрілка гальванометра відхиляється в один бік, а в разі зменшення — в інший.

Дослід 3. Повертатимемо замкнену котушку поблизу полюса магніту — в котушці виникне електричний струм.

Дослід 4. Розмістимо поблизу полюса магніту замкнену котушку та будемо змінювати її площу (таке можливе, якщо котушка намотана на гумовий каркас) — у котушці виникне електричний струм.

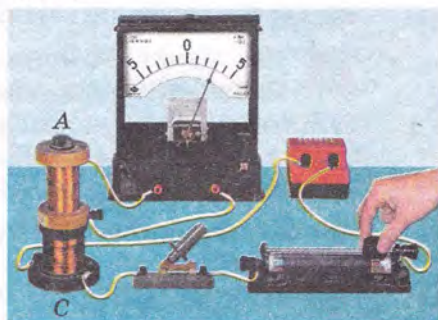


Рис. 21.2. Якщо розімкнути чи замкнути коло котушки С або змінити в ній силу струму, в котушці А виникне струм

2 Потік магнітної індукції

Проаналізувавши досліди 1–4, легко помітити, що індукційний струм у замкнутому провідному контурі (у цьому випадку — котушці) виникає тоді, коли змінюється кількість ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню, обмежену контуром (рис. 21.3). Фізичну величину, яку наочно можна розглянути як величину, прямо пропорційну кількості ліній магнітної індукції, що пронизують дану поверхню, називають *поток*ом магнітної індукції.

Потік магнітної індукції (магнітний потік) Φ — це фізична величина, яка характеризує розподіл магнітного поля по поверхні, обмеженій замкненим контуром, і чисельно дорівнює добуткові магнітної індукції B на площу S поверхні та на косинус кута α між вектором магнітної індукції і нормаллю до поверхні (рис. 21.4):

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

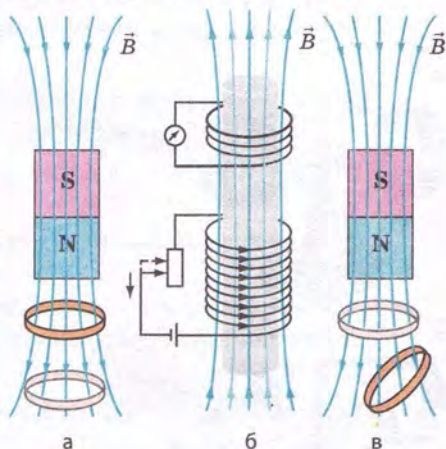


Рис. 21.3. Зміна кількості ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню, обмежену контуром (досліди Фарадея): а — дослід 1; б — дослід 2; в — дослід 3

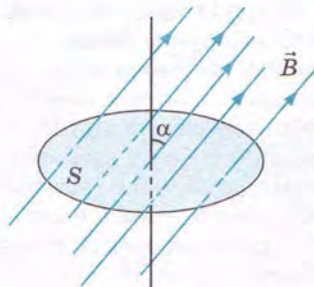


Рис. 21.4. До визначення магнітного потоку

Одиниця потоку магнітної індукції в СІ — **вебер (Вб)***;
 $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$.

Зверніть увагу: якщо магнітне поле неоднорідне, а (або) поверхня не є плоскою, то можна знайти магнітні потоки через невеликі ділянки ΔS поверхні та їх алгебраїчним додаванням визначити загальний магнітний потік.

3 Коли виникає індукційний струм

Зважаючи на визначення магнітного потоку, запишемо деякі загальні закономірності в дослідах Фарадея.

1. Електричний струм індукується тоді, коли змінюється магнітний потік, що пронизує поверхню, обмежену замкненим контуром. Справді: у дослідах 1 і 2 змінювалася магнітна індукція \vec{B} магнітного поля, в якому був розташований контур; у досліді 3 — кут α між вектором магнітної індукції і нормаллю до поверхні, обмеженої контуром; у досліді 4 — площа S поверхні.

2. Чим швидше змінюється магнітний потік, що пронизує замкнений контур, тим більшою є сила індукційного струму.

3. Напрямок індукційного струму залежить від того, збільшується чи зменшується магнітний потік, що пронизує контур.

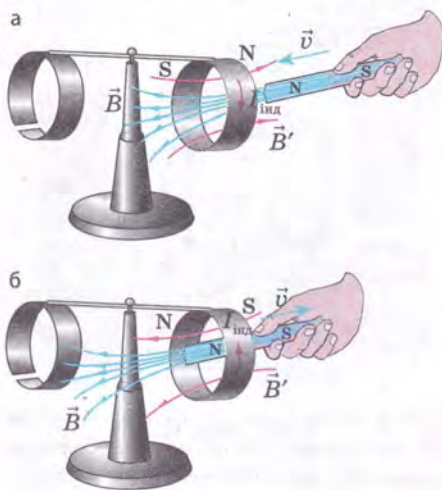


Рис. 21.5. «Кільця Ленца» — пристрій для демонстрації правила Ленца: а — якщо магніт наближати до суцільного кільця, то внаслідок виникнення в кільці індукційного струму воно виявиться оберненим до магніту однойменним полюсом і буде відштовхуватися від нього; б — якщо магніт віддаляти від суцільного кільця, то воно притягуватиметься до магніту

4 Як визначити напрямок індукційного струму

Залежність напрямку індукційного струму від характеру зміни магнітного потоку встановив російський учений *Генріх Ленц* (Емілій Християнович Ленц) (1804–1865). Він же сформулював правило, яке носить його ім'я, — **правило Ленца**:

Індукційний струм, який виникає в замкнутому провідному контурі, має такий напрямок, що створений цим струмом магнітний потік перешкоджає зміні магнітного потоку, який спричинив появу індукційного струму.

Для демонстрації правила Ленца зручно скористатися пристроєм конструкції самого Ленца (рис. 21.5). Пристрій являє собою два алюмінієві кільця (суцільне та розрізане), закріплені на алюмінієвому коромислі, яке може легко обертатися навколо вертикальної осі. Якщо вносити магніт у суцільне кільце, то воно «втікає» від магніту, повертаючи коромисло. Якщо висувати магніт із кільця, то воно прагне

* На честь німецького фізика Вільгельма Едуарда Вебера (1804–1891).

«наздогнати» магніт. Під час руху магніту відносно розрізаного кільця жодних ефектів не спостерігається.

Г. Ленц пояснював дію пристрою так. Якщо магніт наближається до замкненого кільця, то магнітний потік, створений магнітом, збільшується, тому в кільці виникає індукційний струм. Цей струм створює власне магнітне поле, лінії індукції \vec{B}' якого напрямлені протилежно напрямку ліній індукції \vec{B} магнітного поля магніту (рис. 21.5, а). Якщо магніт віддаляється від замкненого кільця, то магнітний потік, створений магнітом, зменшується, тому індукційний струм створює магнітне поле, лінії індукції \vec{B}' якого напрямлені за напрямком ліній індукції \vec{B} магнітного поля магніту (рис. 21.5, б). Якщо ж кільце розімкнене, то індукційний струм не виникає, отже, й не створює власного магнітного поля.

Правило Ленца має глибокий фізичний зміст — воно виражає закон збереження енергії. Справді, на створення індукційного струму потрібна енергія, отже, має бути виконана додаткова робота зовнішніх сил. Під час наближення магніту до контуру або віддалення від нього завжди виникає сила, що перешкоджає рухові (див. рис. 21.5). Щоб подолати цю протидію, й виконується робота.

5 Учимося розв'язувати задачі

Зважаючи на правило Ленца, для визначення напрямку індукційного струму слід дотримуватись такого алгоритму:

- 1) визначити напрямок вектора \vec{B} магнітної індукції зовнішнього магнітного поля;
- 2) з умови задачі з'ясувати, збільшується чи зменшується магнітний потік, що пронизує контур;
- 3) визначити напрямок вектора \vec{B}' магнітної індукції магнітного поля індукційного струму: якщо магнітний потік збільшується, то $\vec{B}' \uparrow \downarrow \vec{B}$; якщо зменшується, то $\vec{B}' \uparrow \uparrow \vec{B}$;
- 4) визначити напрямок індукційного струму, скориставшись правилом правої руки.

Задача. Котушки А і С надіто на спільне осердя (рис. 1). Визначте напрямок індукційного струму в котушці А під час переміщення повзунка реостата ліворуч.

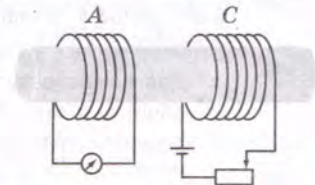


Рис. 1

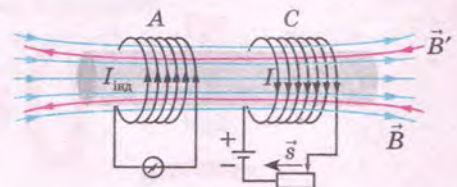


Рис. 2

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання

- 1) Покажемо напрямок електричного струму в котушці С і, скориставшись правилом правої руки, визначимо напрямок магнітної індукції \vec{B} зовнішнього магнітного поля (магнітного поля струму в котушці С) (рис. 2).

2) Під час переміщення повзунка реостата ліворуч опір реостата зменшується, отже, згідно із законом Ома, сила струму в колі котушки C збільшується, тому збільшується і магнітна індукція B зовнішнього магнітного поля, створеного цим струмом; оскільки $B \uparrow$, то й збільшується магнітний потік, що пронизує котушку ($R \downarrow \Rightarrow I \uparrow \Rightarrow B \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$).

3) Оскільки $\Phi \uparrow$, то вектор \vec{B}' магнітної індукції магнітного поля струму в котушці A напрямлений протилежно вектору \vec{B} магнітної індукції зовнішнього магнітного поля ($\Delta\Phi > 0 \Rightarrow \vec{B}' \uparrow \downarrow \vec{B}$).

4) Знаючи напрямок вектора \vec{B}' і скориставшись правилом правої руки, визначимо напрямок індукційного струму в котушці A .

Відповідь: індукційний струм у котушці A напрямлений по передній стінці котушки вгору.

Зверніть увагу: у випадку розв'язування *оберненої задачі* дії, зазначені в алгоритмі, залишаються, але їх послідовність змінюється.

! Підбиваємо підсумки

Потік магнітної індукції Φ — це фізична величина, яка характеризує розподіл магнітного поля по поверхні, обмеженій замкненим контуром, і чисельно дорівнює добуткові магнітної індукції B на площу S поверхні та на косинус кута α між вектором магнітної індукції і нормаллю до поверхні: $\Phi = BS \cos \alpha$. Одиниця потоку магнітної індукції в СІ — вебер (Вб); $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}$.

У замкнутому провідному контурі в разі зміни магнітного потоку, що пронизує поверхню, обмежену контуром, виникає електричний струм. Такий струм називають індукційним (наведеним). Індукційний струм має такий напрямок, що створений цим струмом магнітний потік перешкоджає зміні магнітного потоку, який спричинив появу індукційного струму.

? Контрольні запитання

1. Опишіть досліди Фарадея.
2. Дайте визначення магнітного потоку. Якою є одиниця магнітного потоку в СІ?
3. Доведіть, що індукційний струм у контурі з'являється тільки у випадку зміни магнітного потоку, який пронизує контур.
4. Від чого залежить сила індукційного струму?
5. Сформулюйте правило Ленца.
6. Опишіть дослід із кільцями Ленца та поясніть його результати.
7. Чому правило Ленца є наслідком закону збереження енергії?

✎ Вправа № 19

1. Для кожного випадку (рис. 1) визначте напрямок індукційного струму, що виникає в замкнутому провідному кільці.
2. Визначте напрямок індукційного струму в контурі A , поміщеному в магнітне поле контуру B (рис. 2), у разі: а) замикання ключа; б) розмикання ключа; в) переміщення повзунка реостата праворуч; г) переміщення повзунка реостата ліворуч.

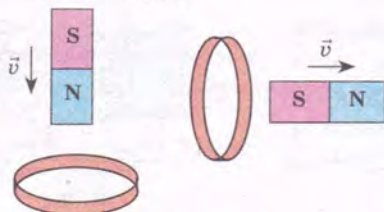


Рис. 1

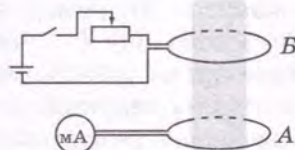


Рис. 2

3. Напрямок індукційного струму в котушці А показано на рис. 3. Визначте, коли виник індукційний струм — під час замикання чи під час розмикання ключа.
4. Алюмінієве кільце, вільно надіте на сталеве осердя, у разі замикання ключа підскакує вгору (рис. 4). Поясніть причину цього явища. Чи підскакуватиме кільце під час розмикання ключа?
5. Визначте потік магнітної індукції через поверхню, яку утворює горизонтальна (носійна) лопать гвинта гелікоптера, що завис над Землею. Вважайте, що довжина лопаті становить 14 м, а магнітна індукція магнітного поля Землі дорівнює $5,0 \cdot 10^{-5}$ Тл і утворює з поверхнею Землі кут 60° .

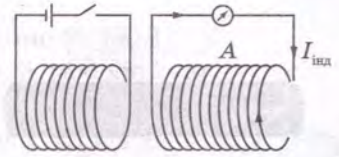


Рис. 3

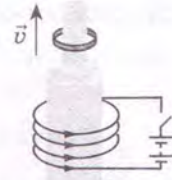


Рис. 4