

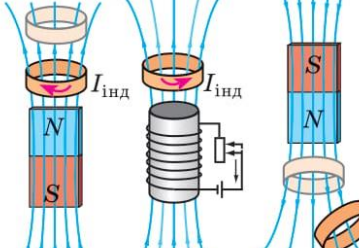


§ 13. ДОСЛІДИ М. ФАРАДЕЯ. ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

У березні 1821 р. Майкл Фарадей записав у своєму щоденнику: «Перетворити магнетизм на електрику». 29 серпня 1831 р. після численних дослідів учений досяг своєї мети — він отримав електричний струм за допомогою магнітного поля. Цей струм Фарадей назвав *індукційним (наведеним) струмом*. Дізнаємось, за яких умов магнітне поле може спричинити появу електричного струму, як визначити силу та напрямок індукційного струму.

1 Як можна «перетворити магнетизм на електрику»

Проведемо низку дослідів, що є сучасним варіантом дослідів М. Фарадея.

Досліди Фарадея	
Дослід 1. Замкнемо котушку на гальванометр і вводитимемо в котушку постійний магніт. Під час руху магніту стрілка гальванометра відхилиться — це свідчить про наявність струму. Що швидше вводити магніт, то більша сила струму. Якщо рух магніту припинити, стрілка повернеться на нульову позначку. Виймаючи магніт із котушки, бачимо, що стрілка гальванометра відхиляється в інший бік, що свідчить про зміну напрямку струму. Якщо залишити магніт нерухомим, а рухати котушку, в котушці теж виникне електричний струм.	
Дослід 2. Надінемо дві котушки — <i>A</i> і <i>B</i> — на спільне осердя. Котушку <i>B</i> (електромагніт) через реостат приєднаємо до джерела струму, котушку <i>A</i> замкнемо на гальванометр. Якщо розмикати чи замикати коло котушки <i>B</i> або за допомогою реостата змінювати в котушці <i>B</i> силу струму, то в котушці <i>A</i> виникне струм. Струм у котушці <i>A</i> виникатиме як під час збільшення, так і під час зменшення сили струму в котушці <i>B</i>, при цьому напрямок струму буде різним.	
Досліди 3, 4. Розташуємо котушку, замкнену на гальванометр, поблизу полюса потужного магніту і швидко повернемо котушку — гальванометр засвідчить появу електричного струму. Струм виникатиме і в разі зміни площі котушки (таке можливо, якщо котушка намотана на гумовий каркас).	
Проаналізувавши досліди 1–4, можна помітити, що індукційний струм у замкненому провідному контурі (у даному випадку — в котушці) виникає тоді, коли змінюється кількість ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню, обмежену контуром.	

2 Потік магнітної індукції

Кількість ліній магнітної індукції, що пронизують певну поверхню, характеризує фізична величина, яку називають *потік магнітної індукції* або *магнітний потік*. Розглянемо плоский замкнений контур, розташований у магнітному полі. Нормаль n , проведена до поверхні, що обмежує контур, утворює кут α з вектором магнітної індукції $\vec{B}$ (рис. 13.1, а).

Потік магнітної індукції (магнітний потік) Φ — це фізична величина, яка 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 магнітного потоку в СІ — **вебер** (названа на честь німецького фізика *В. Вебера* (рис. 13.2)):

$$[\Phi] = 1 \text{ Вб (Wb)}.$$

1 вебер — це максимальний магнітний потік, який створюється магнітним полем індукцією 1 тесла через поверхню площею 1 метр квадратний:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

Зверніть увагу!

- Магнітний потік буде максимальним, якщо поверхня перпендикулярна до ліній магнітної індукції (рис. 13.1, б), і дорівнюватиме нулю, якщо поверхня паралельна цим лініям (рис. 13.1, в).

- Якщо магнітне поле неоднорідне і (або) поверхня не є плоскою, можна знайти магнітні потоки через невеликі ділянки ΔS поверхні та їх алгебраїчним додаванням визначити загальний магнітний потік (рис. 13.1, г).

3 Закон електромагнітної індукції

Зважаючи на означення магнітного потоку, виділимо в дослідях Фарадея деякі загальні закономірності.

1. Електричний струм у замкненому провідному контурі індукується тільки тоді, коли змінюється магнітний потік через поверхню, обмежену контуром.

2. Чим швидше змінюється магнітний потік, тим більшою є сила індукційного струму в контурі.

3. Напрямок індукційного струму в контурі залежить від того, збільшується чи зменшується магнітний потік через поверхню, обмежену контуром.

Однак чому в контурі взагалі є електричний струм, адже контур не приєднаний до джерела живлення? Поява струму може означати тільки одне: під час зміни магнітного потоку виникають сторонні (не кулонівські) сили, які й «працюють» у контурі, переміщуючи в ньому електричні заряди.

Роботу сторонніх сил $A_{\text{ст}}$ із переміщення одиничного позитивного заряду називають **електрорушійною силою індукції (ЕРС індукції) $\mathcal{E}_i$** :

$$\mathcal{E}_i = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$$

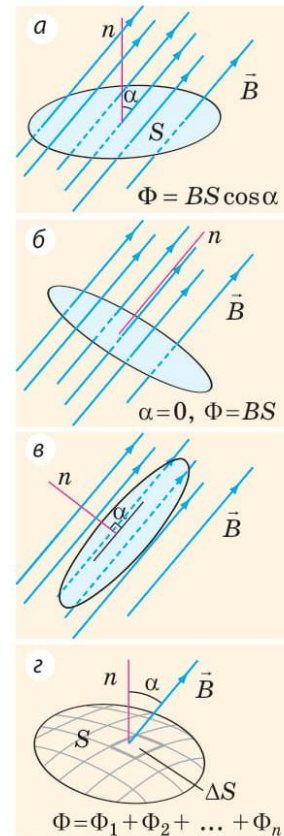


Рис. 13.1. До визначення магнітного потоку



Рис. 13.2. Вільгельм Едуард Вебер (1804–1891) — видатний німецький фізик. Розробив теорію електродинамічних явищ, створив велику кількість надточних електромагнітних приладів

Зверніть увагу!

■ Якщо магнітний потік змінюється нерівномірно, слід розглядати його зміну за дуже малий інтервал часу $\Delta t \rightarrow 0$; у такому випадку закон електромагнітної індукції набуває вигляду:

$$\mathcal{E}_i = -\Phi'(t)$$

■ Якщо контур містить N витків проводу, то ЕРС індукції дорівнює:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N \Phi'(t)$$

■ $\Phi = BS \cos \alpha$, тому:

• якщо змінюється магнітне поле, в якому перебуває контур, маємо:

$$\mathcal{E}_i = \frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha = B' S \cos \alpha ;$$

• якщо змінюється площа, обмежена контуром, маємо:

$$\mathcal{E}_i = B \frac{\Delta S}{\Delta t} \cos \alpha = BS' \cos \alpha ;$$

• якщо контур повертається в магнітному полі, маємо:

$$\mathcal{E}_i = BS \frac{\Delta \cos \alpha}{\Delta t} = BS \cos' \alpha$$

Силу індукційного струму I_i в контурі опором R визначають за законом Ома: $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$.

Закон, що встановлює залежність ЕРС індукції від швидкості зміни магнітного потоку, експериментально вивів М. Фарадей.

Закон електромагнітної індукції:

Електрорушійна сила індукції дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує поверхню, обмежену контуром:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Знак «мінус» відображає *правило Ленца*.

4 Правило Ленца

Правило для визначення напрямку індукційного струму сформулював російський учений *Генріх Ленц* (1804–1865). Це правило носить його ім'я — **правило Ленца**: *індукційний струм, який виникає в замкненому 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. Пристрій являє собою два алюмінієвих кільця (суцільне та розрізане), закріплених на коромислі, яке може легко обертатися навколо вертикальної осі (рис. 13.3).

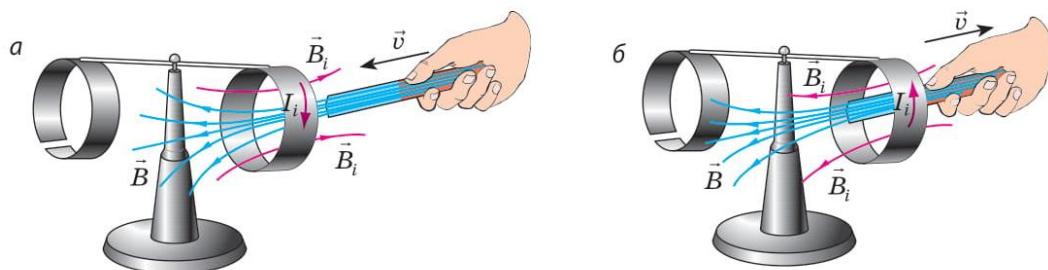
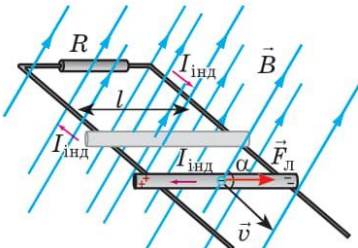
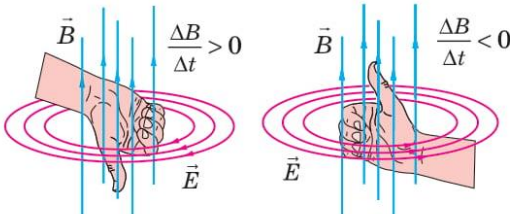


Рис. 13.3. «Кільця Ленца». Якщо магніт наближати до суцільного кільця, то в кільці виникне індукційний струм I_i . Цей струм створить біля кільця магнітне поле $\vec{B}_i$, напрямлене проти зовнішнього поля $\vec{B}$, тому кільце відштовхнеться від магніту (а). Якщо магніт віддаляти від суцільного кільця, то кільце притягуватиметься до магніту (б). Рухаючи магніт відносно розрізаного кільця, жодних ефектів не спостерігатимемо

Правило Ленца має глибокий фізичний зміст — воно відображає закон збереження енергії. Справді, на створення індукційного струму потрібна енергія, тому має бути виконана робота. Під час наближення магніту до контуру або під час його віддалення завжди виникає сила, що перешкоджає рухові. Щоб подолати цю протидію, й виконується робота.

5 Які причини виникнення ЕРС індукції

Звідки беруться сторонні сили, що діють на заряди в провіднику?

Причини виникнення ЕРС індукції	
Провідник рухається в магнітному полі	Магнітне поле, в якому перебуває нерухомий провідник, змінюється
У цьому випадку на вільні електрони, що рухаються разом із провідником, діє сила Лоренца: $F_L = q Bv \sin \alpha$. Під дією цієї сили електрони відповідно до правила лівої руки зміщуються вздовж провідника. У результаті провідник поляризується: один його кінець набуває <i>негативного заряду</i> (туди «прийшли» електрони), а другий кінець — <i>позитивного</i>.  Якщо провідник замкнути, то в колі виникне індукційний струм. Джерелом струму в колі буде рухомий провідник, а сторонньою силою, що виконує роботу всередині джерела, — сила Лоренца: $A_{ст} = F_L \cdot l = q Bv \sin \alpha \cdot l$. Оскільки $\mathcal{E}_i = \frac{A_{ст}}{ q }$, маємо формулу для розрахунку ЕРС індукції в рухомому провіднику: $\mathcal{E}_i = Bv \sin \alpha$ Отже, у випадку з рухомих провідником сторонні сили мають магнітну природу.	У цьому випадку сторонні сили мають електричну природу, адже змінне магнітне поле завжди супроводжується появою вихрового електричного поля. Саме вихрове електричне поле діє на вільні заряджені частинки в провіднику та надає їм напрямленого руху, створюючи індукційний струм. На відміну від електростатичного поля (поля, створеного нерухомими електричними зарядами) вихрове електричне поле має такі властивості. - Лінії напруженості вихрового електричного поля є замкненими. Напрямок цих ліній можна визначити за допомогою <i>правила правої руки</i>: якщо магнітна індукція магнітного поля, яке є причиною створення вихрового поля, збільшується, то великий палець спрямовуємо протилежно до напрямку $\vec{B}$; якщо магнітна індукція магнітного поля зменшується, то великий палець спрямовуємо за напрямком $\vec{B}$.  - Робота вихрового електричного поля на замкненій траєкторії зазвичай не дорівнює нулю.

Явище виникнення вихрового електричного поля або електричної поляризації провідника під час зміни магнітного поля або під час руху провідника в магнітному полі називають **явищем електромагнітної індукції**.

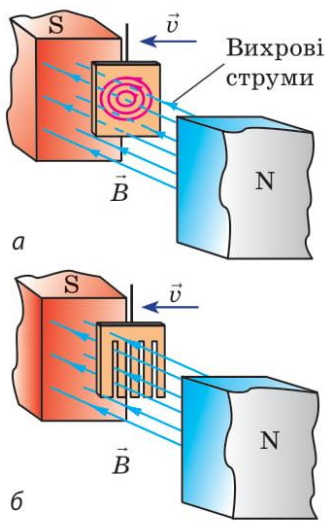


Рис. 13.4. У магнітному полі коливальний рух суцільної мідної пластини швидко припиняється (а); рух мідного гребінця майже не сповільнюється (б)

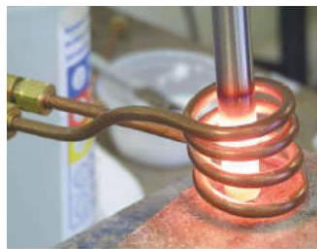


Рис. 13.5. Індукційне плавлення металу

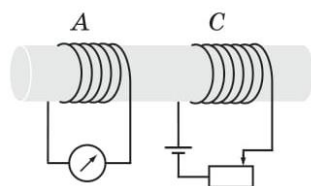


Рис. 1

6 Де застосовують струми Фуко

Якщо суцільній мідній пластині, підвішеній між полюсами магніту, надати коливального руху, то цей рух швидко припиниться (рис. 13.4, а). Це відбувається через збудження в пластині *вихрових струмів*, які (за правилом Ленца) створюють магнітне поле, що перешкоджає рухові пластини. Зрозуміло: чим більший електричний опір тіла, яке коливається, тим меншою є сила цих струмів (рис. 13.4, б).

Вихрові струми ретельно дослідив французький фізик *Леон Фуко* (1819–1868), тому їх називають *струмами Фуко*.

Струми Фуко — вихрові індукційні струми, які виникають у провіднику під час зміни магнітного потоку через поверхню провідника.

Сповільнення коливань унаслідок виникнення струмів Фуко застосовують для *демпфування* — примусового гасіння коливань рухливих частин гальванометрів, сейсмографів тощо.

Будь-який струм чинить *теплову дію*. Теплову дію чинять і струми Фуко: якщо масивний суцільний зразок металу помістити в змінне магнітне поле, зразок нагріється. Теплову дію струмів Фуко використовують в індукційних печах для нагрівання і плавлення металів (рис. 13.5). Метал поміщують усередину котушки, по якій пропускають змінний струм високої частоти (500–800 Гц). Змінний струм спричиняє виникнення змінного магнітного поля, яке, у свою чергу, спричиняє появу в металі струмів Фуко і нагрівання металу.

Струми Фуко в осердях трансформаторів, електричних генераторів і двигунів викликають нагрівання та призводять до суттєвих втрат енергії. Щоб послабити вихрові струми, опір таких деталей збільшують: їх виготовляють із листів сталі, розділених тонкими шарами діелектрика, або із феритів (*ферити* — це матеріали, які значно посилюють магнітне поле, проте мають низьку електропровідність).

7 Учимося розв'язувати задачі

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

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.

1. Покажемо напрямки електричного струму I в котушці C (від позитивного полюса джерела струму до негативного) і за допомогою правої руки визначимо напрямки ліній магнітної індукції $\vec{B}$ поля, створеного цим струмом, тобто напрямки зовнішнього для котушки A магнітного поля (рис. 2).

2. Повзунок реостата переміщують ліворуч, тому опір реостата зменшується. Згідно із законом Ома сила струму в колі котушки C збільшується, тому збільшується й магнітна індукція B магнітного поля, створеного цим струмом. Оскільки $B \uparrow$, то магнітний потік через котушку теж збільшується ($\Phi \uparrow$) ($R \downarrow \Rightarrow I \uparrow \Rightarrow B \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$).

3. $\Phi \uparrow$, тому магнітне поле, створене індукційним струмом у котушці A , напрямлене протилежно зовнішньому магнітному полю: $\vec{B}_i \uparrow \downarrow \vec{B}$.

4. За допомогою правої руки визначимо напрямки індукційного струму I_i у котушці A .

Відповідь: індукційний струм у котушці A напрямлений таким чином, що він іде по передній стінці котушки вгору.

Задача 2. За допомогою гнучких проводів прямий провідник завдовжки 60 см приєднаний до джерела постійного струму, що має ЕРС 12 В і внутрішній опір 0,5 Ом (рис. 3). Провідник рухається зі швидкістю 12,5 м/с в однорідному магнітному полі індукцією 1,6 Тл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначте ЕРС індукції і силу струму в провіднику, якщо опір зовнішнього кола — 2,5 Ом.

Дано:

$$l = 0,6 \text{ м}$$

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

$$r = 0,5 \text{ Ом}$$

$$v = 12,5 \text{ м/с}$$

$$B = 1,6 \text{ Тл}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 2,5 \text{ Ом}$$

$$\mathcal{E}_i \text{ — ?}$$

$$I \text{ — ?}$$

Розв'язання. Провідник рухається в магнітному полі, тому на заряди в провіднику діє сила Лоренца $\vec{F}_L$, напрямки якої визначимо за правилом лівої руки.

На заряди в провіднику також діє сила $\vec{F}_{\text{ел}}$ з боку електричного поля джерела струму. Обидві сили «штовхають» заряди в одному напрямку (див. рис. 3), тому повна ЕРС кола $\mathcal{E} = \mathcal{E}_i + \mathcal{E}_{\text{дж}}$.

У рухомому провіднику $\mathcal{E}_i = Bvl \sin \alpha$.

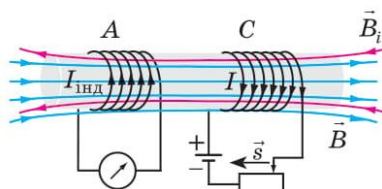


Рис. 2

Алгоритм визначення напрямку індукційного струму

1. Визначаємо напрямки ліній магнітної індукції $\vec{B}$ зовнішнього магнітного поля.

2. З'ясовуємо, збільшується чи зменшується магнітний потік через поверхню, обмежену контуром.

3. Визначаємо напрямки ліній магнітної індукції $\vec{B}_i$ магнітного поля індукційного струму:
 $\vec{B}_i \uparrow \downarrow \vec{B}$, якщо магнітний потік збільшується;
 $\vec{B}_i \uparrow \uparrow \vec{B}$, якщо магнітний потік зменшується.

4. Скориставшись правилом правої руки, визначаємо напрямки індукційного струму I_i .

Зверніть увагу: в разі розв'язання обернених задач дії, зазначені в алгоритмі, залишаються тими самими, але їх послідовність змінюється.

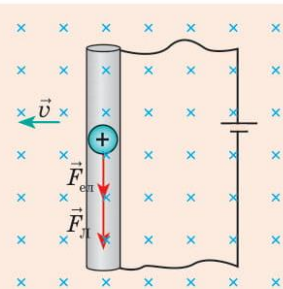


Рис. 3

За законом Ома для повного кола: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \Rightarrow I = \frac{\xi + \mathcal{E}_{дж}}{R+r}$.

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[\xi] = \text{Тл} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}, \quad \xi = 1,6 \cdot 12,5 \cdot 0,6 = 12 \text{ (В)}.$$

$$[I] = \frac{\text{В} + \text{В}}{\text{Ом} + \text{Ом}} = \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = \text{А}, \quad I = \frac{12 + 12}{2,5 + 0,5} = 8 \text{ (А)}.$$

Відповідь: $\xi = 12 \text{ В}$; $I = 8 \text{ А}$.



Якою буде сила струму, якщо провідник рухатиметься в протилежному напрямку?



Підбиваємо підсумки

- Фізичну величину, яка дорівнює добуткові магнітної індукції B на площу S поверхні й на косинус кута α між вектором магнітної індукції і нормаллю до поверхні, називають потоком магнітної індукції Φ : $\Phi = BS \cos \alpha$. Одиниця магнітного потоку в СІ — вебер: $[\Phi] = 1 \text{ Вб}$.

- Явище виникнення вихрового електричного поля або електричної поляризації провідника під час зміни магнітного поля або під час руху провідника в магнітному полі називають явищем електромагнітної індукції.

- Закон електромагнітної індукції: ЕРС індукції дорівнює швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром: $\xi = -\Delta \Phi / \Delta t$. Якщо провідник рухається в магнітному полі, то ЕРС індукції можна обчислити за формулою: $\xi = Bv \sin \alpha$.

- Струм, який виникає внаслідок явища електромагнітної індукції, називають індукційним (наведеним) струмом. 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. Коли виникає індукційний струм? 2. Дайте означення магнітного потоку. Якою є його одиниця в СІ? 3. Сформулюйте закон електромагнітної індукції. Якого вигляду набуде цей закон, якщо контур містить N витків проводу? 4. Що визначають за правилом Ленца? 5. Чому правило Ленца є наслідком закону збереження енергії? 6. Дайте означення електромагнітної індукції. 7. Якою є природа ЕРС індукції в таких випадках: провідник рухається в магнітному полі; нерухомий провідник перебуває у змінному магнітному полі? 8. Назвіть основні властивості вихрового електричного поля. 9. Де, коли і чому виникають струми Фуко?



Вправа № 13

- Провідник завдовжки 20 см рухається зі швидкістю 2 м/с в однорідному магнітному полі індукцією 25 мТл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Знайдіть ЕРС індукції в провіднику.
- Провідний контур обмежує поверхню площею 0,1 м², має опір 0,24 Ом і розташований перпендикулярно до ліній магнітної індукції магнітного поля. Магнітна індукція поля рівномірно змінилася від 2 до 4 мТл за 0,1 с. Визначте: а) зміну магнітного потоку за цей час; б) ЕРС індукції в контурі; в) силу індукційного струму в контурі.

3. Чому від удару блискавки іноді перегорять запобіжники навіть вимкненого з розетки електричного приладу?
4. Для кожного випадку (рис. 1) визначте напрямок індукційного струму в замкненому провідному кільці.
5. Контури *A* і *B* надіто на спільне осердя (рис. 2). Визначте напрямок індукційного струму в контурі *A*, розміщеному в магнітному полі контуру *B*, у разі: а) замкнення ключа; б) розімкнення ключа; в) переміщення повзунка реостата праворуч.
6. У вертикальну мідну трубу по черзі опустили алюмінієвий брусок і смуговий постійний магніт. Який предмет падатиме довше? Чому?
7. Замкненому мідному проволу, який має довжину 2 м і площу поперечного перерізу 17 мм^2 , надали форму квадрата і 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 при цьому виникла в проволі.

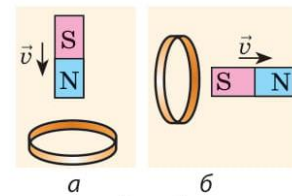


Рис. 1

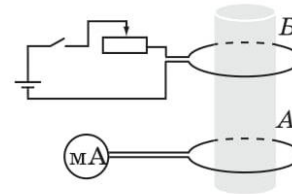


Рис. 2



Експериментальне завдання

Знайдіть в Інтернеті відео, яке ілюструє, що відбувається, якщо в мідну трубу кинути магніт. Обґрунтуйте результат експерименту. Якщо є можливість, проведіть подібний експеримент.

