

ВИДАВНИЦТВО  
**РАНОК**

І. М. Гельфгат



Інтернет-  
підтримка

# Фізика

ДЛЯ ЗАГАЛЬНООСВІТНІХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ  
З ПОГЛИБЛЕНИМ ВИВЧЕННЯМ ФІЗИКИ

9

клас



І. М. Гельфгат

# ФІЗИКА

ДЛЯ ЗАГАЛЬНООСВІТНІХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ  
З ПОГЛИБЛЕНИМ ВИВЧЕННЯМ ФІЗИКИ

Підручник для 9 класу  
загальноосвітніх навчальних закладів

Харків  
Видавництво «Ранок»  
2017

УДК  
ББК

**Гельфгат І. М.**

Фізика для загальноосвітніх навчальних закладів з поглибленим вивченням фізики : підруч. для 9 кл. загальноосвіт. навч. закл. / І. М. Гельфгат. — Х. : Вид-во «Ранок», 2017.

УДК  
ББК

**Інтернет-підтримка**  
Для користування  
електронними матеріалами  
до підручника увійдіть на сайт  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)



**Служба технічної підтримки:**  
тел. (057) 719-48-65, (098) 037-54-68  
(понеділок–п’ятниця з 10:00 до 18:00)  
E-mail: [interactive@ranok.com.ua](mailto:interactive@ranok.com.ua)

© Гельфгат І. М., 2017  
© Хорошенко В. Д., ілюстрації, 2017  
© ТОВ Видавництво «Ранок», 2017

## Дорогі друзі!

На вас чекає ще один рік шкільного навчання. Ви вже зробили певний самостійний вибір — вибрали поглиблене вивчення фізики.

Отже, для вас має бути цікавим курс фізики 9 класу. Ви багато про що дізнаєтеся: про електромагнітні та світлові явища, механічні та електромагнітні хвилі, будову атомного ядра та атомну енергетику, про закони механіки Ньютона. Ви наблизитеся до глибокого розуміння законів природи, навчитеся застосовувати ці закони.

Хотілося б поділитися з вами захопленням досягненнями фізичної науки. Шлях до цих досягнень торували геніальні вчені та рядові науки, що працювали в багатьох країнах, у тому числі й в Україні.

Зверніть увагу на те, що параграфи завершуються рубриками: *«Підбиваємо підсумки»*, *«Контрольні запитання»*, *«Вправа»*. Для чого вони потрібні і як з ними краще працювати?

У рубриці *«Підбиваємо підсумки»* подано відомості про основні поняття та явища, з якими ви ознайомилися в параграфі. Отже, ви маєте можливість іще раз звернути увагу на головне.

*«Контрольні запитання»* допоможуть з'ясувати, чи зрозуміли ви вивчений матеріал. Якщо ви зможете відповісти на кожне запитання, то все гаразд, якщо ж ні, знову зверніться до тексту параграфа.

Рубрика *«Вправа»* зробить вашу подорож у дивовижний світ фізики ще цікавішою, адже ви зможете застосувати отримані знання на практиці. Завдання цієї рубрики диференційовані за рівнями складності — від доволі простих, що потребують лише уважності, до творчих, розв'язуючи які, слід виявити кмітливість і наполегливість. Номер кожного завдання має відповідний колір (у порядку підвищення складності: синій, зелений, оранжевий, червоний, фіолетовий).

Серед завдань є такі, що слугують для повторення матеріалу, який ви вже вивчали в курсах природознавства, математики або на попередніх уроках фізики.

Курс фізики 9 класу об'ємний і змістовний. Тому під час написання кожного рядка цього підручника автор подумки вів діалог

з учнями — чи все їм буде зрозуміло? Чи вважатимуть вони цей матеріал цікавим? Які запитання у них виникатимуть?

От таким чином на сторінках підручника з'явилися ваші представники — хлопчики та дівчата. Вони ставлять запитання, висловлюють сумніви, задоволення або незадоволення... Проте головна оцінка — за вами.

Чимало цікавого ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання» ([interactiv.ranok.com.ua](http://interactiv.ranok.com.ua)). Це відеоролики, що показують у дії той чи інший фізичний дослід або процес; інформація, яка допоможе вам у виконанні завдань; тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою.

Фізика — наука насамперед експериментальна, тому в підручнику на вас очікують *експериментальні завдання та лабораторні роботи*. Обов'язково виконуйте їх — і ви будете краще розуміти й любити фізику.

Матеріали, запропоновані наприкінці кожного розділу в рубриках «*Підбиваємо підсумки розділу*» і «*Завдання для самоперевірки*», допоможуть систематизувати отримані знання, будуть корисними під час повторення вивченого та в ході підготовки до контрольних робіт.

Працюючи над навчальними проектами, радимо уважно ознайомитися з деякими порадами щодо їх створення і презентації, поданими в матеріалі «*Етапи роботи над навчальними проектами*».

Для тих, хто хоче більше дізнатися про розвиток фізичної науки й техніки в Україні та світі, знайдеться чимало цікавого й корисного в рубриках «*Фізика і техніка в Україні*» та «*Енциклопедична сторінка*».

Зверніть увагу на те, що в підручнику використано позначки, які допоможуть вам орієнтуватися в поданому матеріалі:

**R** Завдання на повторення



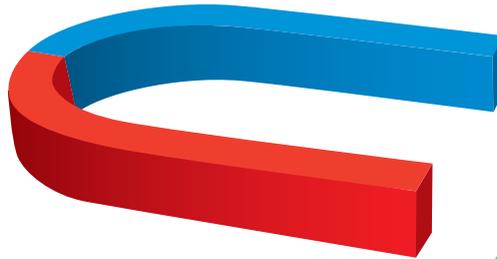
Інтернет-підтримка

{ Так виділено найскладнішу частину тексту, яку призначено для найбільш зацікавлених фізикою читачів. Якщо навіть пропустити її, це не заважатиме розуміти подальший текст. }

Цікавої подорожі світом фізики, нехай вам щастить!

# Розділ 1

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА



## Трохи історії

Дослідження магнітних явищ здійснив у XIII столітті французький учений Петро Перегрін. Подальше просування у вивченні магнетизму пов'язане з ім'ям Вільяма Гільберта (англійського фізика та водночас придворного лікаря королеви Єлизавети I). Його праця «Про магніт» вийшла друком у 1600 році.



Полюси магніту

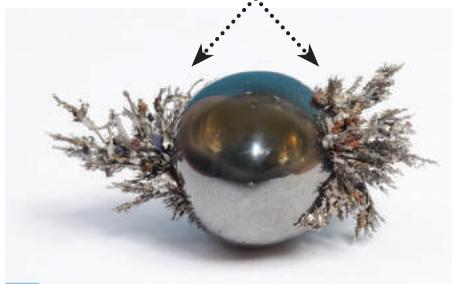


Рис. 1.1. Залізні ошурки найсильніше притягаються до полюсів магніту

Підковоподібний магніт



Рис. 1.2. Найпростіші типи постійних магнітів: штабовий та підковоподібний

# § 1. МАГНІТНІ ЯВИЩА. МАГНІТНЕ ПОЛЕ. МАГНІТНА ДІЯ СТРУМУ

## 1 Перше знайомство з магнітами

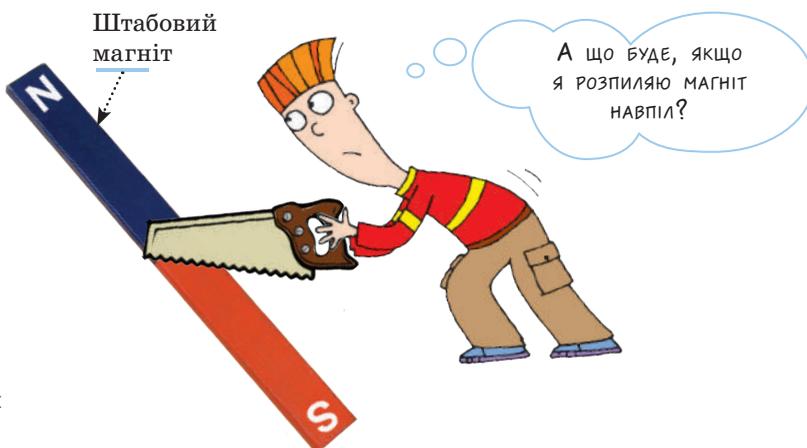
Магнітні явища відомі з далекої давнини. Люди підмітили, що деякі мінерали виявляють властивість притягати залізні предмети. Тіла з таких мінералів у Давній Греції стали називати **магнітами** (за назвою міста Магнесія, біля якого існували поклади відповідних мінералів). Властивості таких тіл назвали **магнітними**.

Тіла, що тривалий час зберігають магнітні властивості, називають **постійними магнітами**.

Перш ніж розбиратися в причинах магнітних явищ, необхідно як слід ознайомитися з відомими фактами. Що ж саме знали вчені про магніти та магнітні явища, наприклад, у XVII або XVIII столітті? Наведемо головні результати досліджень на той час.

1. Магнітна дія магніту є різною на різних ділянках його поверхні. Це можна продемонструвати за допомогою постійних магнітів, що мають різну форму (рис. 1.1). Ті ділянки поверхні магніту, де магнітні властивості найсильніші, називають полюсами магніту.

2. Хоч усі магніти притягають залізні предмети, між двома магнітами може спостерігатися не тільки притягання, а й відштовхування. Подібно до того як існують позитивні та негативні електричні заряди, існують різні типи магнітних полюсів. Якщо штабовий магніт підвісити або встановити на вістрі, він обов'язково орієнтується приблизно в напрямі південь — північ (саме на цьому ґрунтується дія компаса, стрілка якого — це легкий магніт). Магнітний полюс, що вказує на північ, називають північним, а інший полюс — південним. У штучних магнітів (рис. 1.2) північний магнітний полюс фарбують у синій колір і позначають літерою N, а південний — фарбують



у червоний колір і позначають літерою S. Ці позначення легко запам'ятати за першими літерами англійських слів «north» і «south», тобто «північ» і «південь». Якщо два магніти повернуті один до одного полюсами одного типу (однойменними), то магніти відштовхуються, якщо ж полюсами різного типу (різнойменними) — між магнітами спостерігається притягання (рис. 1.3).

3. Наша планета являє собою величезний магніт. Магнітні полюси Землі розташовані відносно недалеко від її географічних полюсів (докладніше див. § 2). Поблизу північного географічного полюса розташований південний магнітний полюс (і навпаки).

4. Жоден магніт не може мати лише один магнітний полюс або магнітні полюси тільки одного типу. Ми ще повернемося до цього питання, а поки що проілюструємо це важливе твердження простим прикладом. Якщо зробити спробу розділити магнітні полюси, розпилявши штабовий магніт, то кожна отримана половинка буде повноцінним магнітом з двома різнойменними полюсами.

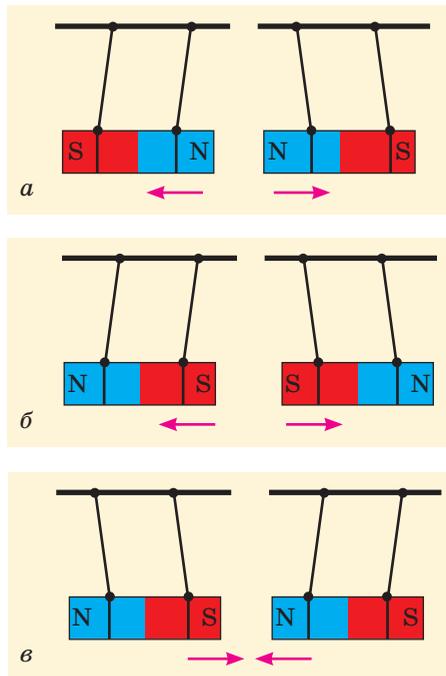


Рис. 1.3. Взаємодія постійних магнітів: відштовхування (а, б) та притягання (в)

## 2 Магнітне поле

Ви вже знаєте про існування електричного поля, яке створюють навколо себе заряджені частинки або тіла. Саме через це поле передається взаємодія між зарядженими частинками. Згідно із сучасними уявленнями магнітна взаємодія теж передається через поле, а саме через **магнітне поле**. Розгляньмо, наприклад, взаємодію двох магнітів, показано на рис. 1.3. Вони взаємодіють на певній відстані, іноді досить великій. Але їх взаємодія не є безпосередньою: кожен магніт створює власне магнітне поле, а вже це поле діє на інший магніт (рис. 1.4).

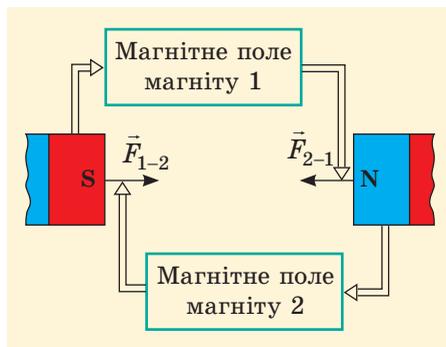


Рис. 1.4. Взаємодія між магнітами відбувається завдяки магнітному полю (тут  $\vec{F}_{1-2}$  — сила, що діє на магніт 1 з боку магнітного поля магніту 2,  $\vec{F}_{2-1}$  — сила, що діє на магніт 2 з боку магнітного поля магніту 1)

## Навколо фізики

- За легендою, поклади магнетиту (магнітного мінералу) на півострові Магнесія відкрив пастух. Проходячи ділянкою над цими покладами, він просто прилипнув до землі через те, що його сандалії було підбито залізними цвяхами.



Рис. 1.5. Ганс Крістіан Ерстед (1777–1851 рр.) — данський учений-фізик, дослідник електромагнетизму та хімік. У 1820 році відкрив дію електричного струму на магнітну стрілку

Часто кажуть, що людина не відчуває магнітного поля, тобто це поле не діє на наші органи чуттів. Це не завжди так, проте ми дійсно не можемо *безпосередньо* відчути магнітне поле навіть сильного магніту. Але ми завжди можемо «розпізнати» магнітне поле за його дією на певні тіла (наприклад, на магніт або залізний цвях).

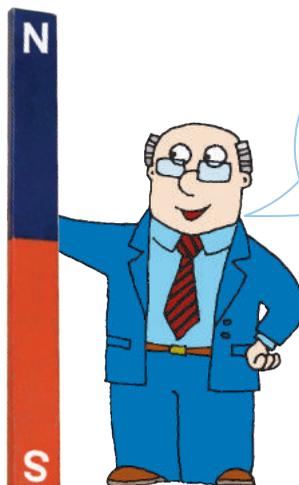
Слід розуміти, що попри свою уявну «непомітність» магнітне поле є абсолютно реальним — таким само реальним, як ті предмети, які можна зважити або яких можна торкнутися. Тому кажуть, що магнітне поле (як і електричне) є однією з форм *матерії*. Ми ще повернемося до властивостей магнітного поля під час вивчення цього розділу.

### 3 Магнітна дія струму. Дослід Ерстеда

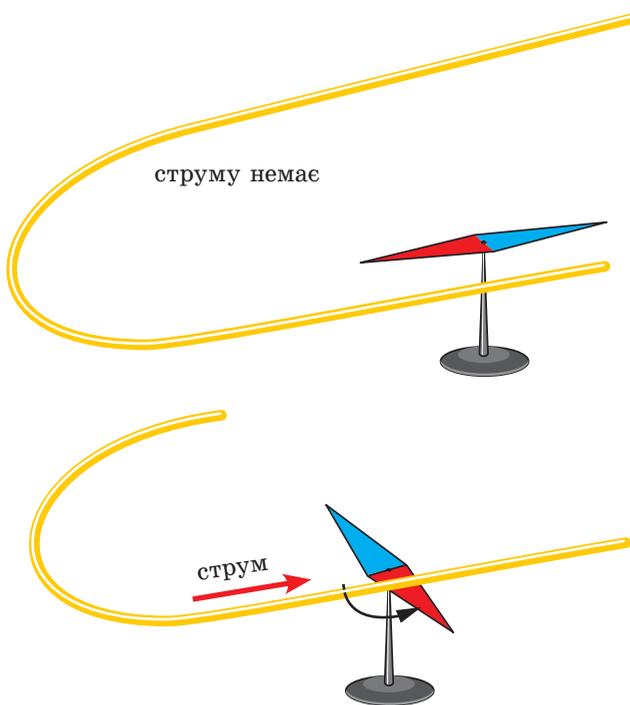
Протягом століть електричні та магнітні явища вважали не зв'язаними між собою, їх вивчали окремо. Проте 1820 року данський фізик Г. К. Ерстед (рис. 1.5) виявив дію електричного струму на магнітну стрілку (рис. 1.6). Нагадаємо, що про магнітну дію струму ви дізналися, вивчаючи фізику у 8 класі.

Незабаром виявилось, що магніт діє з певною силою на дрід, по якому тече струм (рис. 1.7). Отже, між електричними та магнітними явищами існує тісний зв'язок: електричний струм створює магнітне поле, а зовнішнє магнітне поле діє на провідник зі струмом (не випадково ж цей розділ підручника називається «Електромагнітні явища»). Відкриття взаємодії між електричним струмом та магнітом мало величезне значення. Воно стало початком нової епохи у вченні про електрику та магнетизм і зіграло важливу роль у розвитку фізики.

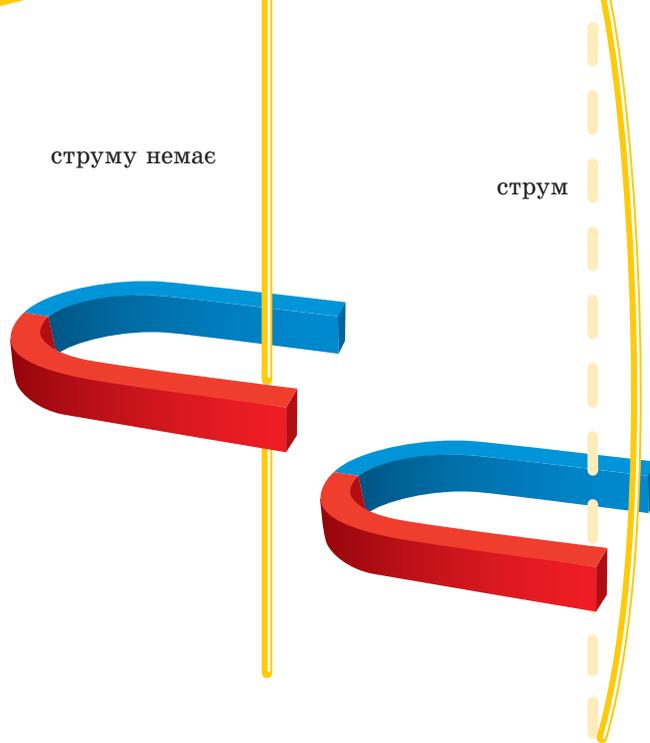
Я щось чула про взаємодію північного полюса магніту з південним... А як можна спостерігати взаємодію не між цілими магнітами, а між їх полюсами?



Звісно, що ніяк. Проте якщо магніти достатньо довгі, то часто говорять, що спостерігається саме взаємодія між найближчими полюсами.



**Рис. 1.6.** Демонстрація магнітної дії струму: після замикання кола магнітна стрілка відхиляється від початкового напрямку



**Рис. 1.7.** Під дією сили з боку магнітного поля магніту провідник зі струмом вигинається

Скоро ви дізнаєтеся про магнітне поле набагато більше. Проте дещо можна додати вже зараз. Адже електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок. Виходить, що такий рух породжує магнітне поле. З другого боку, магнітне поле можна виявити та дослідити за його дією на провідник зі струмом. Отже, магнітне поле діє на *рухомі* заряджені частинки (на *нерухомі* заряджені частинки воно не діє).



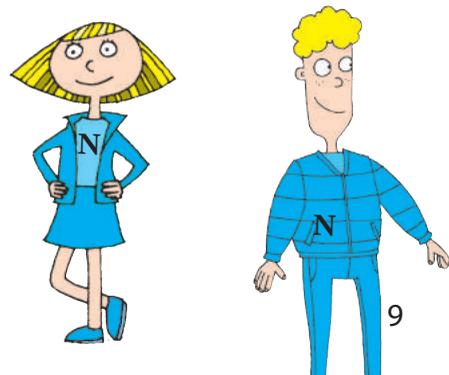
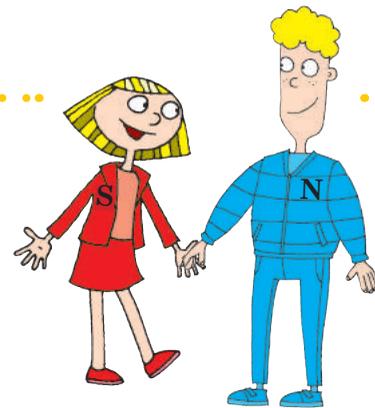
### Підбиваємо підсумки

Тіла, що тривалий час зберігають магнітні властивості, називають постійними магнітами. Їх основні властивості:

- магнітна дія магніту найсильніша на полюсах;
- існують два типи магнітних полюсів: північний і південний, які позначають відповідно N і S;
- якщо два магніти повернуті один до одного однойменними полюсами, то магніти відштовхуються, якщо ж різнойменними полюсами — притягаються;
- не існує магніту лише з одним магнітним полюсом.

Магнітна взаємодія передається через магнітне поле, що є однією з форм матерії.

Магнітне поле створюють не тільки магніти, а й провідники зі струмом (отже, рухомі заряджені частинки). Магнітне поле можна виявити за його дією на магніти, залізні предмети та провідники зі струмом (отже, на рухомі заряджені частинки).



## Контрольні запитання

1. Що таке постійний магніт? 2. Як можна відрізнити магніти від інших тіл? 3. Що таке полюси магніту? 4. Який полюс магніту називають північним, як його позначають? 5. Який полюс магніту називають південним, як його позначають? 6. У якому випадку два магніти відштовхуються? у якому випадку

притягаються? 7. Де розташовані магнітні полюси Землі? 8. Що відбуватиметься, якщо спробувати відділити один від одного полюси магніту? 9. Яка роль магнітного поля в магнітних взаємодіях? 10. У чому полягав дослід Ерстеда та про що свідчать результати цього досліду?

## Вправа № 1

1. Магніт підносять північним полюсом до підвешеного на нитці залізного цвяха. Що спостерігатиметься при цьому? Як зміниться відповідь, якщо піднести магніт до цвяха південним полюсом?

2. Штабовий магніт підносять північним полюсом до підвешеного на нитках іншого штабового магніту (рис. 1). Куди відхилиться підвешений магніт? Як зміниться відповідь, якщо піднести магніт з того самого боку південним полюсом?

3. Кільцеві магніти можуть «ширяти» один над одним (рис. 2). Зробіть у зошиті схематичний рисунок і покажіть можливе розташування магнітних полюсів кожного магніту. Чому в досліді не можна обійтися без центрального вертикального стрижня?

4. Чому на сучасних судах недоцільно застосовувати компас для визначення правильного курсу?

5. Чому магнітна стрілка під час грози може хаотично обертатися?

6. Один із двох однакових сталевих брусків намагнітили, перетворивши його на постійний магніт. Як можна відрізнити цей брусок від іншого, якщо магніт ще не пофарбували? Якщо зможете, запропонуйте кілька способів.

7. Знайдіть в Інтернеті інформацію про пошуки вченими магнітного монополя — елементарного магнітика з одним полюсом. Підготуйте коротке повідомлення про ці пошуки для своїх однокласників.

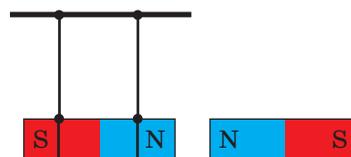


Рис. 1



Рис. 2

## Експериментальні завдання

1. Перевірте, біля яких предметів або працюючих пристроїв у вас удома стрілка компаса найпомітніше відхиляється від напрямку південь — північ.

2. Візьміть кювету або тазик з водою (рівень води приблизно 8 см), на дні розташуйте кільцевий магніт. Зробіть із пінопласту шість або сім невеликих поплавців та проткніть кожний із них сталеву голкою таким чином,

щоб поплавець плавав при вертикальному положенні голки. Опустіть у воду спочатку один поплавець, потім ще один і так далі. Спостерігайте та накресліть розташування поплавців над магнітом. Переконайтеся, що це розташування є сталим (якщо перемістити поплавці, їх початкове розташування відновиться).

## § 2. ЛІНІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ. МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

### 1 Як створити «портрет» магнітного поля

Хоч ми й не бачимо безпосередньо магнітне поле, дуже бажано навчитися створювати його наочне зображення. Виявляється, це можна зробити за допомогою такого простого засобу, як маленька магнітна стрілка. Кожна така стрілка — це маленький легкий постійний магніт з двома різнойменними магнітними полюсами на вістрях, який легко повертається під дією магнітного поля (рис. 2.1).

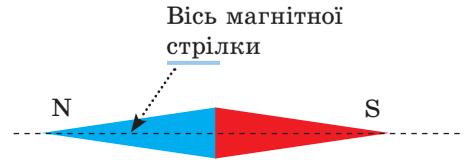
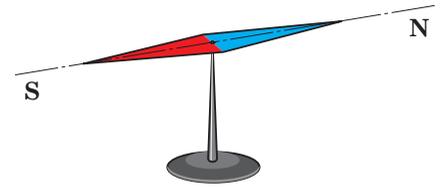
Якщо розташувати навколо штабового магніту велику кількість маленьких магнітних стрілок, то стрілки в різних точках орієнтуються в різних напрямках. Проте спостерігається закономірність: стрілки «шикуються» уздовж певних уявних ліній (рис. 2.2). Саме за допомогою цих ліній зображують магнітне поле.

**!** Умовні лінії, уздовж яких у магнітному полі орієнтуються осі маленьких магнітних стрілок, називають **лініями магнітного поля** або **магнітними лініями**\*.

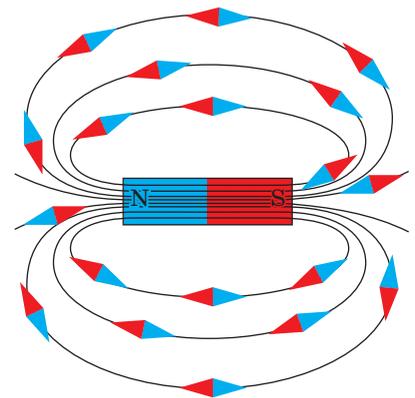
Картину ліній магнітного поля легко отримати й за допомогою залізних ошурок: адже в магнітному полі кожна маленька крихта заліза намагнічується та нібито теж перетворюється на магнітну стрілку. Якщо накрити магніт скляною пластинкою, насипати на неї тонким шаром залізні ошурки та злегка постукати по пластинці, то отримаємо картину ліній магнітного поля (рис. 2.3). Ви можете самі порівняти зображення на рис. 2.2 і 2.3.



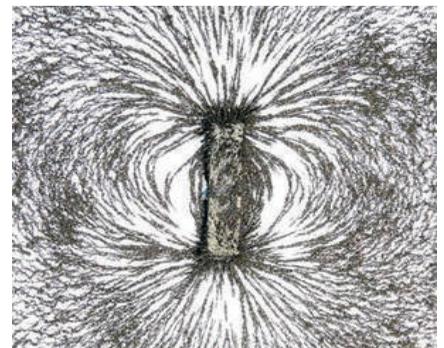
Лініям магнітного поля приписують певний напрям: це напрям, який вказує північний полюс магнітної стрілки. Отже, лінії магнітного поля магніту завжди *виходять із північного полюса цього магніту і входять у його південний полюс* (див. рис. 2.2).



**Рис. 2.1.** Магнітна стрілка — це маленький легкий постійний магніт. Штриховою лінією показано вісь магнітної стрілки

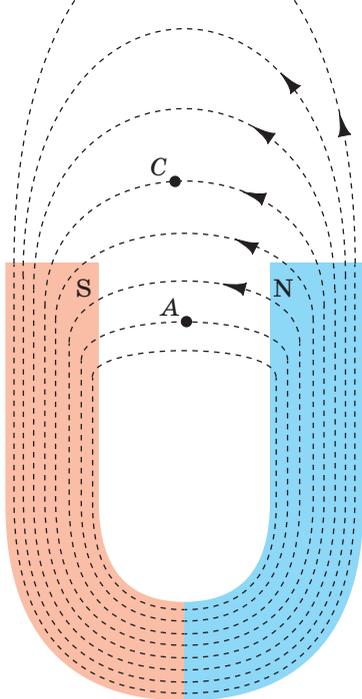


**Рис. 2.2.** Лінії магнітного поля штабового магніту. Маленькі магнітні стрілки орієнтуються вздовж цих ліній



**Рис. 2.3.** Картина ліній магнітного поля штабового магніту, отримана за допомогою залізних ошурок

\* Під час подальшого вивчення курсу фізики ви дізнаєтеся, що лінії магнітного поля називають також *лініями магнітної індукції*.



**Рис. 2.4.** Картина ліній магнітного поля підковоподібного магніту. За цією картиною можна визначити, що магнітне поле в точці *A* сильніше, ніж в точці *C*

Лінії магнітного поля ніде не перетинаються та не дотикаються одна одної. Оскільки ці лінії є уявними, їх можна зобразити на рисунку більше або менше, вибравши найбільш зручний варіант. Але домовилися, що густина ліній завжди має бути більшою там, де магнітне поле сильніше\* (рис. 2.4). Отже, за картиною магнітних ліній поля можна визначити ділянки більш сильного та менш сильного поля. Зрозуміло, що лінії магнітного поля будь-якого магніту проходять найбільш густо поблизу його полюсів. Отже, можна сказати: *північний полюс* магніту — це та ділянка його поверхні, з якої найбільш густо *виходять* магнітні лінії, а *південний полюс* — ділянка поверхні магніту, куди магнітні лінії найбільш густо *входять*.

Комусь може здатися, що лінії магнітного поля існують лише ззовні магніту (адже не можна вставити магнітну стрілку або залізні ошурки всередину магніту). Проте насправді можна визначити й вигляд магнітних ліній усередині самого магніту (про це ви дізнаєтесь у старшій школі). Численні дослідження показали, що *лінії магнітного поля завжди замкнені* (тобто вони не мають ані початку, ані кінця).

**?** Обґрунтуйте зв'язок між замкнутістю магнітних ліній і неможливістю отримати магніт з одним полюсом.

Усі перелічені властивості ліній магнітного поля спостерігаються як для магнітних полів магнітів, так і для магнітних полів провідників зі струмом.

## 2 Знайомимося з магнітним полем Землі

Вільям Гільберт свого часу виготовив модель Землі з намагніченого заліза. Дослідник установив, що на поверхні цієї моделі та на поверхні Землі стрілка компаса поводиться аналогічно. Якщо застосувати спеціальний прилад, у якому магнітна стрілка може обертатися не тільки в горизонтальній площині, то можна переконалися, що лінії магнітного поля майже всюди поблизу поверхні Землі напрямлені не горизонтально (рис. 2.5).

Біля магнітних полюсів лінії магнітного поля Землі вертикальні. Отже, орієнтуватися там за допомогою компаса неможливо. Зазначимо, що відстань між північним географічним полюсом Землі та її південним магнітним полюсом становить багато сотень кілометрів, а відстань між південним географічним полюсом і північним

\* Можна сказати й інакше: сусідні лінії магнітного поля проходять ближче одна до одної там, де магнітне поле сильніше.

### Навколо фізики

- Найбільший магніт, з яким має справу кожний із нас, — планета Земля. Фактично це встановили ще в далеку давнину, коли почали застосовувати компас для визначення напрямку на місцевості. Без цього приладу не могли обійтися моряки та мандрівники. Деякі живі істоти (риби, птахи тощо) мають «вбудовані» природні компаси, що дозволяють цим істотам орієнтуватися під час далеких мандрів.



магнітним полюсом ще більша. Тому стрілка компаса не показує точний напрям географічного меридіана, до показів компаса необхідно вносити певні поправки. На додаток магнітні полюси Землі ще й «непосидючі», вони переміщуються за рік на відстань близько 60 км!

Магнітне поле Землі в десятки разів перевищує магнітне поле Венери, яка близька до нашої планети за розміром і масою.

На Землі є такі місця, де магнітне поле різко відрізняється від поля в сусідніх місцевостях. Це так звані *магнітні аномалії*. Причиною виникнення магнітних аномалій зазвичай є поклади магнітних мінералів. Але інколи в будь-якому місці Землі виникають різкі короткочасні зміни магнітного поля, які називають *магнітними бурями*. Як правило, тривалість магнітної бурі становить кілька годин. Такі бурі зазвичай відбуваються через одну або кілька діб після *сонячних спалахів*. Це не випадково: причини магнітних бур слід шукати саме на Сонці. Біля його поверхні речовина за високої температури ніколи не буває спокійною, вона «вирує». Через це від Сонця до нас летять потоки швидких заряджених частинок — *сонячний вітер*. Інтенсивність сонячного вітру значно збільшується під час сонячних спалахів. А потік швидких заряджених частинок створює власне магнітне поле та впливає на магнітне поле Землі.

Магнітні бурі є важливим елементом «космічної погоди». Вони нібито не так помітні, як шторми або смерчі, але серйозно впливають на життя людини: спричиняють порушення зв'язку, роботи електронних пристроїв і навіть руйнування енергетичних систем. Магнітні бурі впливають на здоров'я та самопочуття людей, їхній психічний стан. Статистичні дані свідчать про існування зв'язку між магнітними бурями та підвищенням кількості катастроф, випадків травматизму, погіршенням стану хворих і фізично ослаблених людей.

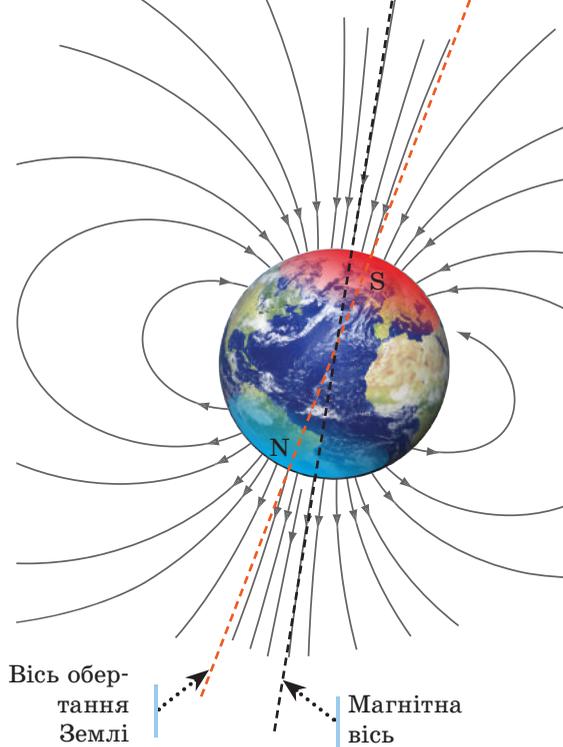


Рис. 2.5. Схематичне зображення ліній магнітного поля Землі. N, S — магнітні полюси

### 3 Магнітне поле провідника зі струмом. Правило свердлика

Розгляньмо тепер магнітне поле довгого прямолінійного провідника зі струмом. Для експериментального дослідження такого поля можна пропустити вертикальний провідник через горизонтальну пластинку, на яку

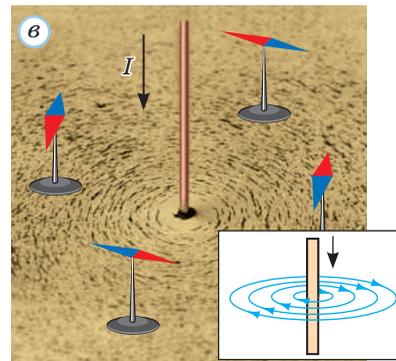
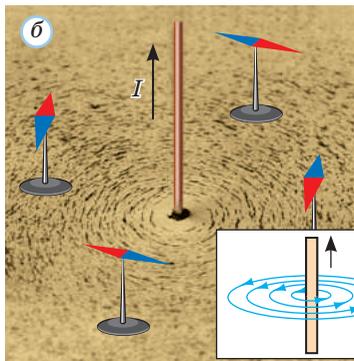
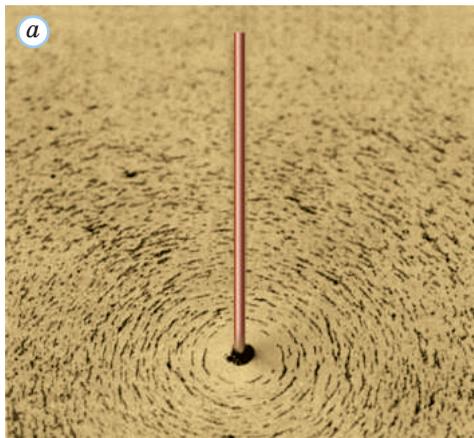


Рис. 2.6. Магнітне поле прямолінійного провідника зі струмом

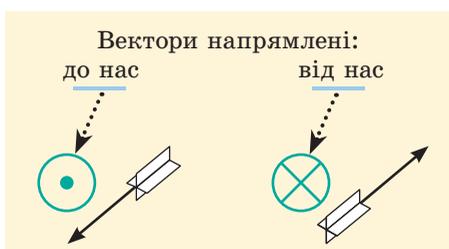
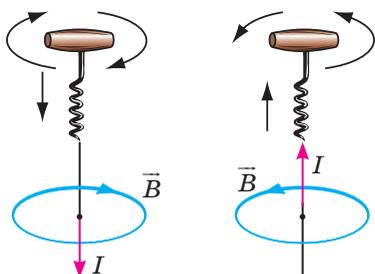


Рис. 2.7. Позначення напрямів, перпендикулярних до площини рисунка: точка — до нас, косий хрестик — від нас. Зазвичай ми будемо виділяти ці позначення, помістивши їх усередину кола

насипані залізні ошурки. Як видно з рис. 2.6, *a*, лінії магнітного поля є коловими та лежать у площині, перпендикулярній до провідника. Що ж до *напрям*у цих ліній, то він залежить від напрямку струму в провіднику: якщо напрям струму змінити на протилежний, то й напрями магнітних ліній зміняться на протилежні. На рис. 2.6, *б*, *в* показано випадки, коли струм тече вгору та вниз.

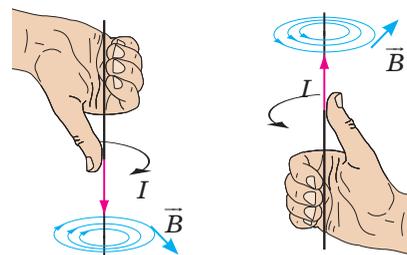
Уже з цього простого прикладу видно, що коли йдеться про магнітне поле, рисунки важко «вмістити» у площину. Якась лінія (це може бути напрям струму, лінія магнітного поля тощо) часто не належатиме площині рисунка. Для зручності встановили умовні зображення напрямів, перпендикулярних до площини рисунка, за допомогою хрестиків або точок (рис. 2.7).

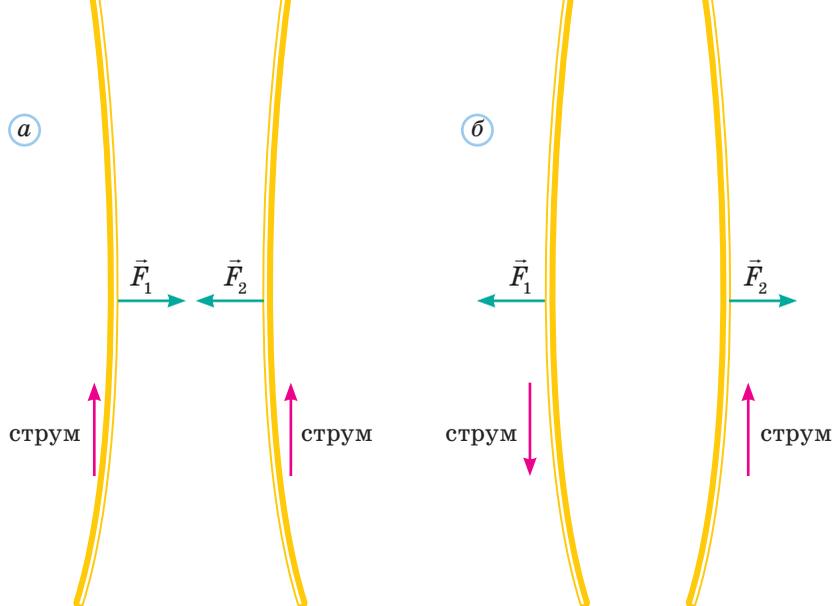
Зв'язок між напрямом електричного струму та створеного цим струмом магнітного поля дає **правило свердлика**: якщо під час закручування вістря свердлика рухається в напрямі струму в провіднику, то напрям обертання ручки свердлика збігається з напрямом ліній магнітного поля струму.



Червоні лінії показують напрям струму; сині — це лінії магнітного поля

Багато хто вважає більш зручним еквівалентне **правило правої руки**: якщо відігнутий великий палець правої руки вказує напрям струму в провіднику, то чотири зігнуті пальці вказують напрям ліній магнітного поля струму.





**Рис. 2.8.** Взаємодія двох паралельних провідників зі струмом. Якщо струми по провідниках протікають в одному напрямі, провідники притягаються (а); якщо в протилежних — відштовхуються (б)

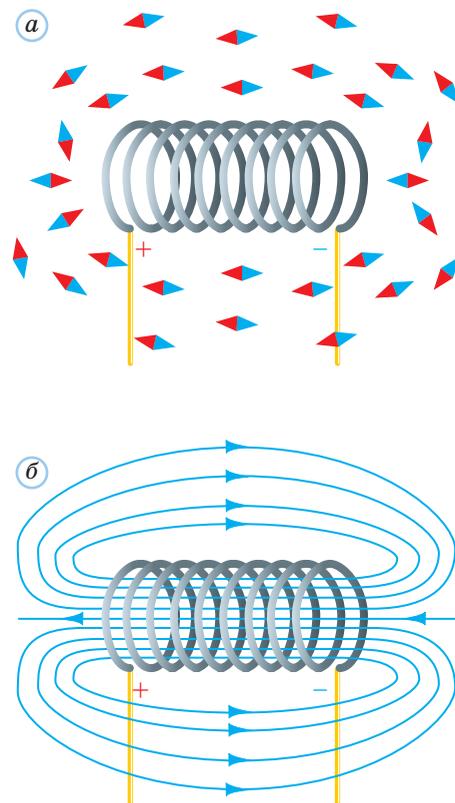
Оскільки провідник зі струмом створює навколо себе магнітне поле, має відбуватися магнітна взаємодія між двома провідниками зі струмом. Її передбачив французький фізик А. Ампер невдовзі після повідомлення про дослід Ерстеда. У дослідах Ампера дійсно спостерігалось притягання або відштовхування двох паралельних провідників зі струмом (рис. 2.8). Така взаємодія має ту саму природу, що й взаємодія між двома магнітами. Проте, на відміну від магніту, прямолінійний провідник зі струмом не має магнітних полюсів.

#### 4 Котушка зі струмом — «двійник» штабового магніту

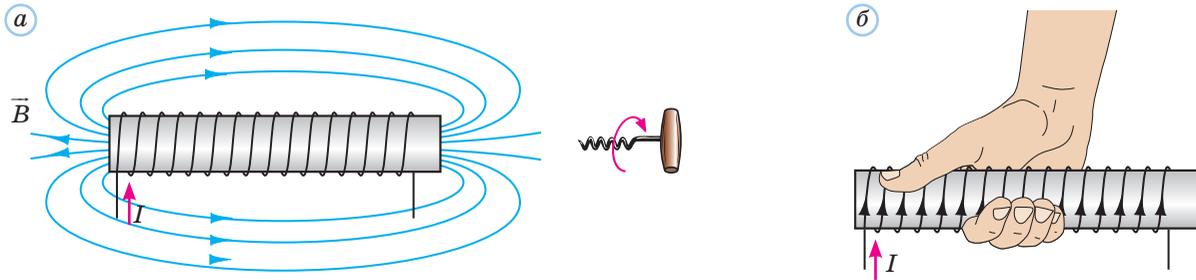
Коли провідник зі струмом застосовують як джерело магнітного поля, провідник зазвичай намотують на трубку або циліндр, тобто беруть котушку зі струмом. Котушка (її називають також *соленоїдом*) за тієї самої сили струму дає більш сильне магнітне поле порівняно з прямолінійним провідником. Дослідимо картину магнітних ліній поля котушки зі струмом за допомогою магнітних стрілок (рис. 2.9).

Для котушки вже добре помітні магнітні полюси — вони розташовані на її торцях. Зрозуміло, що розташування цих полюсів залежить від напрямку струму: якщо напрям змінити на протилежний, то магнітні полюси поміняються місцями.

Зв'язок між напрямками електричного струму в котушці та створеного ним магнітного поля знов дає правило свердлика. Але тепер напрямку струму відповідає напрям обертання ручки свердлика, а напрямку магнітного поля *всередині котушки* — напрям руху вістря свердлика (рис. 2.10, а).



**Рис. 2.9.** Магнітне поле котушки зі струмом: а — розташування магнітних стрілок біля котушки; б — картина магнітних ліній



**Рис. 2.10.** Визначення напрямку ліній магнітного поля котушки зі струмом: *a* — за правилом свердлика; *б* — за правилом правої руки

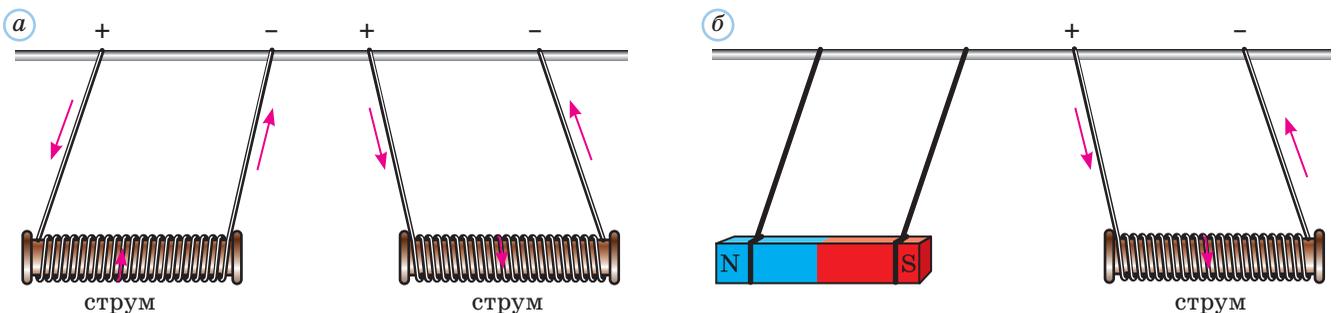
? Визначте магнітні полюси котушок (рис. 2.11), скориставшись правилом свердлика або правилом правої руки. Чи підтверджується ваш висновок характером відхилення котушок?

Так само «працює» й правило правої руки: треба тільки вважати, що напрям струму вказують чотири зігнуті пальці, а напрям магнітних ліній всередині котушки — відігнутий великий палець (рис. 2.10, б). Зверніть увагу, що напрям магнітних ліній поза котушкою суттєво відрізняється від напрямку цих ліній усередині (інакше й бути не може, якщо врахувати замкнутість магнітних ліній).

Спадає на очі схожість магнітних ліній полів котушки зі струмом і звичайного штабового магніту (порівняйте самі рис. 2.9 і 2.2). Така схожість не випадкова (див. наступний параграф). Отже, можна очікувати, що котушки зі струмом взаємодіють між собою аналогічно штабовим магнітам. Це дійсно підтверджується; більше того, взаємодія котушки зі струмом і штабового магніту відбувається аналогічно взаємодії двох штабових магнітів (рис. 2.11).

## 5 Магнітна індукція

Ми підійшли до важливого питання: слід визначити фізичну величину, що характеризуватиме магнітне поле. Перш за все зрозуміло, що така величина не може описувати поле «в цілому», бо магнітне поле в різних точках відрізняється. Отже, нова фізична величина в загальному випадку залежить від положення точки. Очевидно, що ця величина має описувати як інтенсивність поля, так і його



**Рис. 2.11.** Взаємодія котушок зі струмом і постійних магнітів

напрямом. Тому вона має бути *векторною*. Ця фізична величина є певним аналогом напруженості електричного поля (силової характеристики електричного поля).

Відповідну характеристику магнітного поля називають **магнітною індукцією** та позначають  $\vec{B}$ .

**!** За напрям магнітної індукції в кожній точці поля приймають напрям лінії магнітного поля в цій точці.

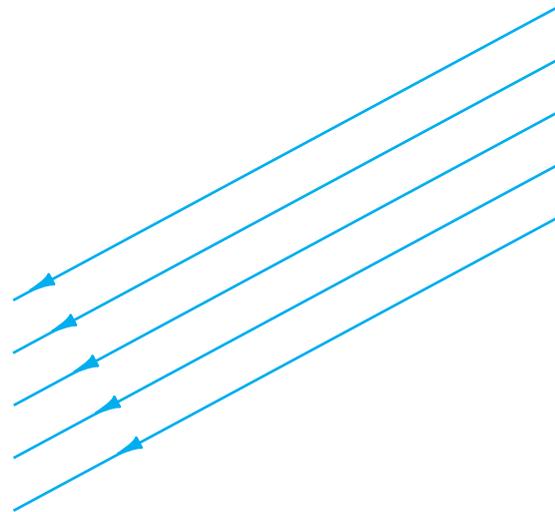
Про точне означення модуля  $B$  магнітної індукції та одиниці цієї фізичної величини ви дізнаєтеся трохи пізніше (див. § 4). Проте ви вже зараз у змозі порівнювати модулі магнітної індукції в різних ділянках поля, якщо маєте картину ліній цього магнітного поля. Що більшим є модуль магнітної індукції, то ближче одна до одної проходять лінії магнітного поля.

Цікавим і важливим випадком магнітного поля є *однорідне магнітне поле*.

**!** Поле в певній ділянці називають **однорідним**, якщо в будь-яких точках цієї ділянки воно однакове за напрямом і модулем.

Магнітні лінії такого поля прямолінійні, відстані між будь-якими сусідніми лініями однакові (рис. 2.12).

Повернувшись до рис. 2.9, зазначимо: поле всередині котушки зі струмом можна вважати однорідним (воно є дуже близьким до однорідного, якщо котушку намотано щільно, виток до витка, і довжина котушки набагато більша за її діаметр).



**Рис. 2.12.** Лінії однорідного магнітного поля



### Підбиваємо підсумки

Магнітне поле зручно зображувати за допомогою магнітних ліній (ліній магнітного поля). Це умовні лінії, уздовж яких у магнітному полі орієнтуються осі маленьких магнітних стрілок. Картину магнітних ліній можна отримати також за допомогою залізних опшурок.

За напрям магнітних ліній приймають напрям, який вказує північний полюс магнітної стрілки. Лінії магнітного поля магніту виходять із північного полюса цього магніту і входять у його південний полюс. Лінії магнітного поля завжди замкнені.

Домовилися зображати лінії магнітного поля так, що їх густина більша там, де магнітне поле сильніше.

Земля — величезний магніт, саме завдяки цьому можлива дія компаса.



Напрямок ліній магнітного поля провідника зі струмом залежить від напрямку струму в провіднику. Зв'язок між цими напрямками встановлює правило свердлика (або, що те ж саме, правило правої руки).

Між провідниками зі струмом існує магнітна взаємодія. Паралельні провідники притягаються, якщо напрями струмів у них однакові, та відштовхуються, якщо напрями струмів протилежні.

Лінії магнітного поля котушки зі струмом (соленоїда) практично не відрізняються від ліній магнітного поля штабового магніту. Магнітна взаємодія котушок зі струмом теж аналогічна взаємодії між штабовими магнітами.

Головною характеристикою магнітного поля в кожній точці є магнітна індукція  $\vec{B}$ . Це векторна величина, за напрям магнітної індукції в кожній точці поля приймають напрям лінії магнітного поля в цій точці.



### Контрольні запитання

1. Що таке лінії магнітного поля? 2. Як можна отримати картину ліній магнітного поля, не застосовуючи магнітні стрілки? 3. Що приймають за напрям ліній магнітного поля? 4. Як за картою ліній магнітного поля визначити ділянку, де поле найсильніше? 5. З якого полюса магніту виходять лінії його магнітного поля? 6. Яка загальна властивість усіх ліній магнітного поля? 7. Де розташовані магнітні

полюси Землі? 8. У чому полягають правила свердлика та правої руки? 9. Як зобразити на рисунку лінії магнітного поля, що напрямлені від нас перпендикулярно до площини рисунка? 10. У якому випадку два паралельних провідники зі струмом відштовхуються? 11. Як визначити напрям магнітної індукції поля в певній точці за картою магнітних ліній цього поля?

### Вправа № 2

1. У якому місці Землі магнітна стрілка компаса зовсім не допоможе визначити сторони світу?

2. На рис. 1 показано напрям струму в прямолінійному провіднику. Зобразіть вигляд магнітних ліній поля цього провідника зі струмом.

3. На рис. 2 показано розташування магнітних стрілок навколо прямолінійного провідника зі струмом, перпендикулярного до площини рисунка. Визначте напрям струму в провіднику, зобразіть цей напрям умовним позначенням. Обґрунтуйте свій вибір.

4. На рис. 3 синім показано магнітні лінії поля струму в коловому витку. Визначте напрям струму. Обґрунтуйте свою відповідь.



Рис. 1

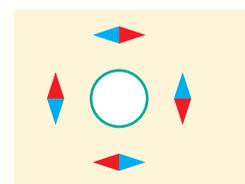


Рис. 2

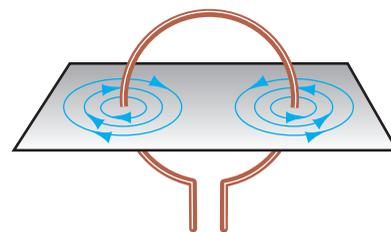


Рис. 3

5. На рис. 4 схематично показано напрям струму в соленоїді (вигляд згори). Зробіть рисунок у зошиті. Покажіть, як орієнтуються магнітні стрілки в точках  $A$ ,  $C$ ,  $D$ .

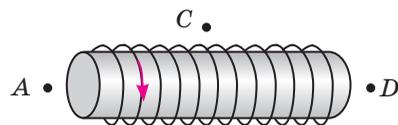


Рис. 4

6. На рис. 5 показано вигляд згори лінії магнітного поля колового витка зі струмом, площина якого вертикальна. Визначте напрям струму у верхній частині витка. Порівняйте модулі магнітної індукції поля в точках  $A$  і  $C$ .

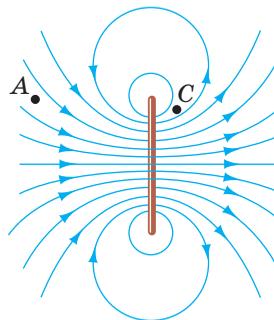


Рис. 5

7. На рис. 6 схематично показано котушку зі струмом і магнітну стрілку біля неї. Визначте, до яких клем котушки приєднано позитивний і негативний полюси джерела струму. Обґрунтуйте свою відповідь.

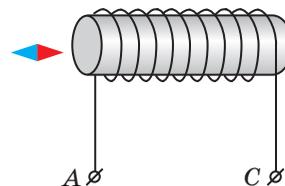


Рис. 6

8. Знайдіть в Інтернеті інформацію про потужні електромагніти з надпровідною обмоткою. Підготуйте коротке повідомлення на цю тему для своїх однокласників.

### Експериментальне завдання

Дослідіть за допомогою залізних ошукрок або компаса лінії магнітного поля магніту (можна, наприклад, взяти магніт, який тримає якусь прикрасу на холодильнику).

## § 3. ГІПОТЕЗА АМПЕРА. МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИН. ЕЛЕКТРОМАГНІТИ



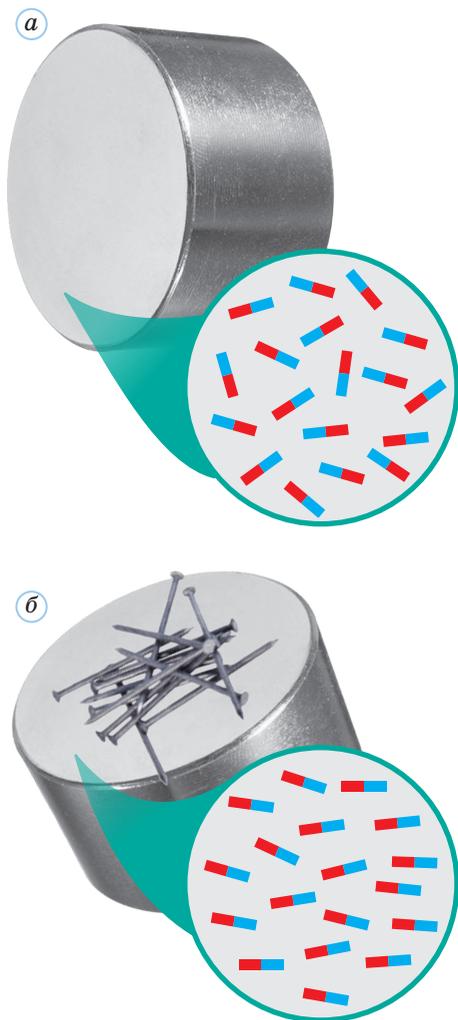
Рис. 3.1. Андре Марі Ампер (1775–1836 рр.) — французький фізик і математик. Відкрив взаємодію між електричними струмами, вивчив взаємодію між магнітами та струмами. Створив основи електродинаміки. Розробив теорію, відповідно до якої магнітні властивості речовини є результатом існування так званих колових молекулярних струмів

### 1 Гіпотеза, яка давно вже не гіпотеза

Ви знаєте, що гіпотеза — це наукове припущення, яке допомагає пояснити якісь явища. Практично всі сучасні наукові теорії починалися з гіпотез. Свого часу твердження, що Земля не є плоскою, теж було всього лише гіпотезою.

Багато які гіпотези, висловлені вченими, згодом не підтверджуються та потроху забуваються. Але є й такі, що назавжди входять в історію науки. Саме таку гіпотезу висловив 1820 року, невдовзі після повідомлення про дослід Г. К. Ерстеда, французький фізик А. М. Ампер (рис. 3.1).

Якщо користуватися сучасною термінологією, то можна сказати, що Ампер зацікавився загальною причиною виникнення магнітного поля. Провідник з током створює магнітне поле; отже, причиною виникнення



**Рис. 3.2.** Ненамагнічене тіло (а) та намагнічене (б) обидва містять «елементарні магнітики» — мікроскопічні замкнені струми. У ненамагніченому тілі північні полюси «елементарних магнітиків» напрямлені хаотично, а в намагніченому — переважно праворуч

магнітного поля можна вважати напрямлений рух заряджених частинок у провіднику. Проте штабовий магніт створює магнітне поле, дуже схоже на магнітне поле соленоїда з током. Чому? Невже в цьому випадку причина виникнення магнітного поля зовсім інша?

Ампер стверджував: причина магнітних явищ в обох випадках та ж сама! Тобто кожний магніт (зокрема Земля) створює магнітне поле через те, що в ньому існують певні електричні струми.

Таким чином, гіпотеза Ампера полягала в тому, що магнітні властивості будь-якого тіла визначаються замкненими електричними струмами всередині нього.

Зрозуміло, що на початку XIX століття Ампер не міг конкретизувати своє твердження та пояснити природу цих загадкових струмів. Дуже довго ідея Ампера залишалася лише гіпотезою, і тільки досягнення фізики XX століття дозволили створити теорію магнітних властивостей речовини на основі цієї гіпотези.

Отже, головна ідея Ампера: усередині *будь-якої* речовини існують мікроскопічні замкнені струми. Кожний такий струм — це «елементарний магнітик». Чому ж тоді речовина в цілому найчастіше не створює магнітного поля? Відповідь проста: безліч «елементарних магнітиків» орієнтовані в просторі хаотично, тому їх магнітні поля просто компенсують одне одне (рис. 3.2, а). Що ж потрібно, щоб виникло магнітне поле? Треба встановити в системі хоч якийсь порядок — орієнтувати «елементарні магнітики» у якомусь певному напрямі (рис. 3.2, б).

Намагнічування тіла пояснюється впорядкованою орієнтацією мікроскопічних замкнених струмів усередині цього тіла.

Виявляється, що за певних умов усі елементарні струми в тілі можуть бути орієнтовані однаково.

## 2 Поглиблюємо уявлення про магнітне поле

Довгий час магнітні явища пов'язували перш за все з магнітами. Головною властивістю магнітного поля тоді слід було б уважати його дію саме на магніти. Проте згодом стало зрозумілим, що *магнітне поле діє й на провідники зі струмом, а всередині кожного магніту знов-таки є замкнені електричні струми.*

Таким чином, на перший план поступово вийшов саме електричний струм. Нагадаємо, що електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок. Отже, магнітне поле можна виявити за його дією на рухомі заряджені частинки. З другого боку, рухомі заряджені частинки й самі створюють магнітне поле. Отже, взаємодія рухомих заряджених частинок відбувається через магнітне поле. Тепер можна сформулювати більш сучасне означення.

! Магнітне поле — це форма матерії, головною ознакою якої є силова дія на рухомі заряджені частинки.

Згадаймо, що головною ознакою електричного поля є силова дія на будь-які заряджені частинки (як рухомі, так і нерухомі). Тут уже можна побачити тісний зв'язок між електричним і магнітним полями. Насправді ці поля нерозривно пов'язані одне з одним; докладніше ви дізнаєтеся про цей зв'язок під час подальшого вивчення фізики. Дізнаєтеся ви і про те, що магнітне поле може виникати не тільки завдяки магніту або електричному струму.

### 3 Природа «елементарних магнітиків»

Природа елементарних струмів, «народжених» інтуїцією Ампера, дуже довго лишалася загадковою. Тільки на початку ХХ століття з'явилася планетарна модель атома, згідно з якою атом складається з ядра та електронів, що обертаються навколо ядра (ви знаєте про будову атома з курсу хімії 8 класу). Здавалося б, усе тепер стало зрозумілим. Адже якщо кожний електрон щосекунди робить багато мільярдів обертів навколо ядра, то це й є той самий елементарний електричний струм! Кожний такий електрон створює своє магнітне поле. А щоб магнітні поля різних електронів не компенсували, а підсилювали одне одне, орбіти електронів мають бути зорієнтовані однаково (рис. 3.3).

Але точні розрахунки показали, що так можуть виникнути лише дуже слабкі магнітні поля, а пояснити таким чином існування сильних магнітів неможливо. Отже, існують ще якісь «елементарні магнітики»? Згодом учені встановили, що це саме так: найсильнішими «елементарними магнітиками» виявилися ті самі електрони, про існування яких уже добре знали. Кожний електрон, навіть нерухомий, створює навколо себе магнітне поле (фізики в такому разі кажуть про спіновий магнітний момент електрона). Найсильніші магнітні властивості речовин завдячують саме власному магнітному полю електронів.

#### Навколо фізики

Якщо створити електричний струм у надпровідній котушці із замкненими кінцями обмотки, то струм існуватиме та створюватиме магнітне поле необмежено довго. Отже, отримаємо певний різновид постійного магніту.

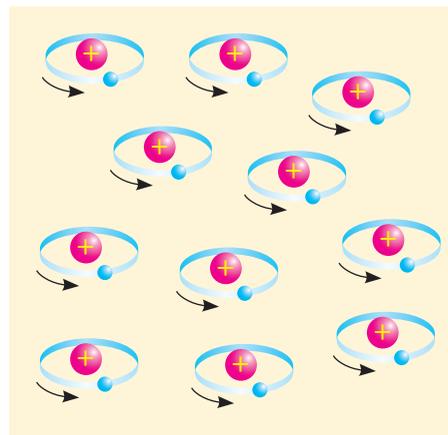
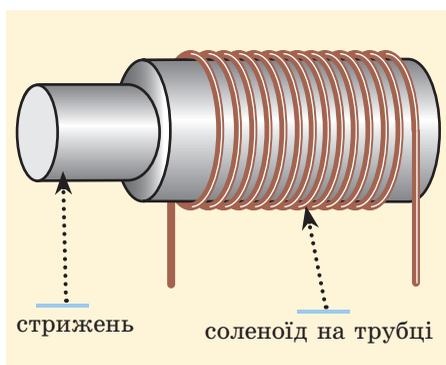


Рис. 3.3. Магнітне поле в речовині може виникати завдяки орбітальному руху електронів в атомі (учені в такому разі кажуть про орбітальний магнітний момент)

Щоб оволодіти сучасною теорією магнітних властивостей речовини, треба глибоко розуміти закони взаємодії частинок у речовині. Проте деякі висновки ви вже можете зробити самі. Наприклад, давно підмітили, що магніт може втрачати свої властивості через нагрівання або тривалу вібрацію. З точки зору гіпотези Ампера саме так і має бути: адже нагрівання та вібрації спричиняють посилення хаотичного руху частинок і утруднюють «підтримання порядку», тобто збереження певної орієнтації «елементарних магнітників».



**Рис. 3.4.** Стрижень, який вставляють усередину соленоїда, впливає на значення магнітної індукції поля цього соленоїда

## 4 Магнітні властивості речовин

Перш за все зазначимо, що не існує речовини, яка б була абсолютно немагнітною. Бувають лише речовини із *сильними* та *слабкими* магнітними властивостями. Це переконливо продемонстрував Нобелівський лауреат з фізики Андрій Гейм. Він умістив звичайнісіньку жабу в сильне магнітне поле — і жаба полетіла!\*

Будь-яка речовина «реагує» на зовнішнє магнітне поле, створюючи власне магнітне поле. Тому магнітне поле в речовині відрізняється від магнітного поля, яке існувало б у вакуумі. Розгляньмо, наприклад, намотаний на трубку провідник (соленоїд). Ми можемо по чергову вставляти всередину трубки стрижні (так звані *осердя*) з різних матеріалів та порівнювати індукцію магнітного поля біля торців цих стрижнів (рис. 3.4).

Таким чином, можна порівняти магнітні властивості різних речовин та розділити їх на кілька груп. Головні з цих груп перелічені в [табл. 3.1](#).

**Таблиця 3.1**

Магнітні властивості речовин			
Група речовин	Назва	Властивості	Приклади
Сильномагнітні	Феромагнетики	Підсилюють магнітне поле в багато разів	Залізо, кобальт, нікель, сплави
Слабомагнітні	Парамагнетики	Трохи підсилюють магнітне поле	Азот, кисень, алюміній, вольфрам
	Діамагнетики	Трохи послаблюють магнітне поле	Вода, мідь, скло, кварц, бісмут

\* Зрозуміло, що вчений отримав Нобелівську премію за інші досягнення, а саме за новаторські експерименти з дослідження двовірного матеріалу графену.

**Феромагнетики** можуть підсилювати магнітне поле в десятки та сотні тисяч разів. Рухомий легкий стрижень із феромагнетику — це добре відома вам магнітна стрілка. Вона орієнтується вздовж магнітних ліній поля, а в неоднорідному магнітному полі втягується в ділянку сильнішого поля (наприклад, притягається до полюса магніту).

**Парамагнетики** зазвичай підсилюють магнітне поле лише на кілька сотисязчних часток. Парамагнітна стрілка, подібно до феромагнітної, орієнтується вздовж магнітних ліній поля та втягується в ділянку сильнішого поля. Проте дія магнітного поля на парамагнітну стрілку значно слабкіша, ніж на феромагнітну.

**Діамагнетики** зазвичай послаблюють магнітне поле на кілька сотисязчних часток. Цікавим винятком є надпровідні матеріали: вони просто не пропускають усередину магнітне поле. Діамагнітну стрілку в магнітному полі легко відрізнити від парамагнітної або феромагнітної: вона орієнтується під прямим кутом до магнітних ліній поля та *виштовхується* з ділянки сильнішого поля.

Щоб спостерігати дію магнітного поля на парамагнетики та діамагнетики, потрібно створити досить сильне магнітне поле. А от феромагнетики «відчувають» навіть слабе магнітне поле.

Найцікавішу властивість феромагнетиків можна спостерігати на постійних магнітах: адже вони *зберігають намагніченість навіть за відсутності зовнішнього магнітного поля*. Намагніченість же парамагнетиків і діамагнетиків зникає разом із зовнішнім магнітним полем.

Магнітні властивості парамагнетиків і феромагнетиків послаблюються внаслідок підвищення температури (ми вже знаємо, з якої причини).

## Навколо фізики

- Протягом багатьох десятиліть триває вдосконалення магнітних пристроїв для зберігання інформації. Якщо 1961 року вперше створено жорсткі диски ємністю 28 Мб, то через півстоліття — 3,5-дюймові диски на 4 Тб. Об'єм інформації на диску збільшився в 140 тисяч разів!

•

! Для кожного феромагнетику існує **температура Кюрі (точка Кюрі)** — це температура, за якої речовина втрачає феромагнітні властивості та перетворюється на парамагнетик.

Наприклад, для заліза температура Кюрі становить 770 °С.

Феромагнетики знайшли безліч застосувань у сучасній техніці: з них виготовляють постійні магніти, осердя електромагнітів, генераторів, трансформаторів тощо. Без феромагнетиків неможливий магнітний запис інформації, широко застосований у комп'ютерній техніці.

## Навколо фізики

- Найсильнішими магнітами у Всесвіті вважають зорі-магнітари (різновид нейтронних зір). Їх магнітне поле перевищує магнітне поле Землі в мільйон мільйонів разів.

•

## 5 Електромагніти

Як ви гадаєте,  
у чому полягає перевага  
електромагнітів порівняно  
з постійними магнітами?



Котушку з феромагнітним осердям називають **електромагнітом**.

Магнітна дія електромагніту тим сильніша, чим більші кількість витків котушки та сила струму в ній. Крім того, магнітна дія залежить від властивостей феромагнітного осердя.

Мабуть, ви вже зрозуміли: дію електромагніту можна регулювати, змінюючи силу струму у витках котушки. Можна й зовсім вимкнути електромагніт, відімкнувши його від джерела струму. Зазвичай осердя електромагніту виготовляють із так званих м'яких феромагнетиків, які практично не зберігають намагніченості після зникнення зовнішнього магнітного поля.

На рис. 3.5 показано розбірний шкільний електромагніт. Цей електромагніт має дещо складнішу форму та дві котушки замість однієї. Коли до осердя приєднане феромагнітне *ярмо*, осердя фактично стає замкненим, що спричиняє значне додаткове посилення магнітного поля.

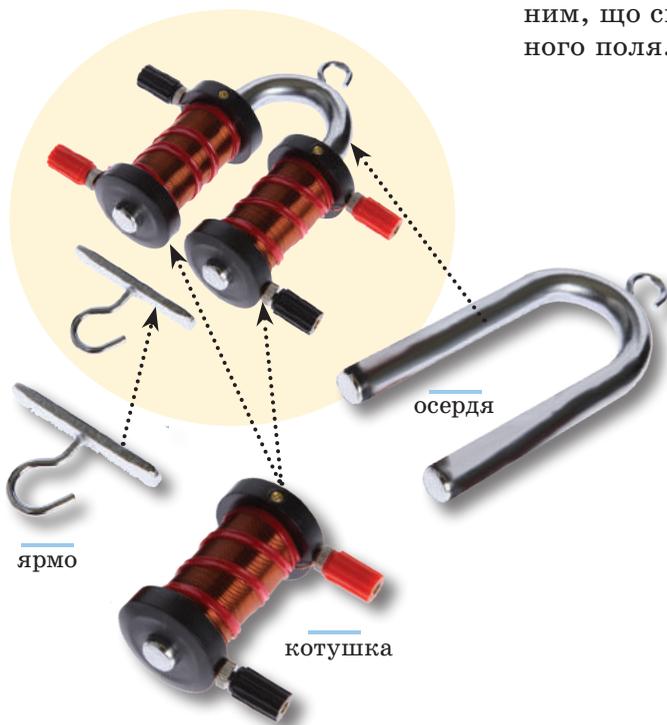


Рис. 3.5. Розбірний електромагніт

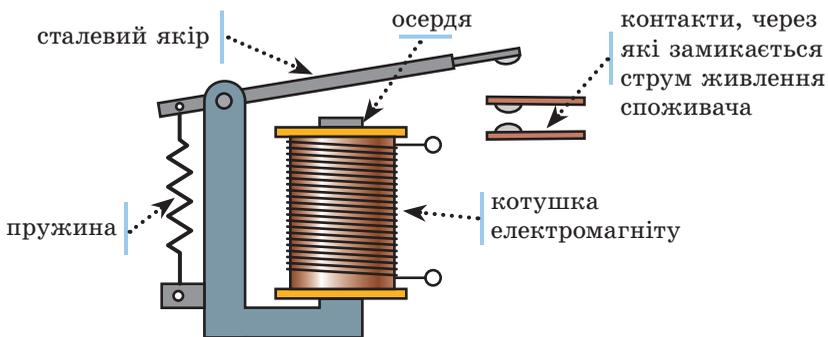


Рис. 3.6. Електромагнітний піднімальний кран

Якщо навіть пропустити струм (наприклад, 1,5 А) тільки по одній котушці такого електромагніту, ярмо притягатиметься до осердя зі значною силою. Відірвати ярмо від осердя зможе не кожний із вас. Такий електромагніт можна розглядати як просту модель *електромагнітного піднімального крана*. Якщо наблизити цей електромагніт до сталевого вантажу та ввімкнути струм, електромагніт притягає вантаж і може його переносити. Після вимикання струму вантаж легко відділяється від електромагніту. Справжній електромагнітний піднімальний кран (рис. 3.6) переміщає багатотонні вантажі (наприклад, допомагає завантажувати та розвантажувати металобрухт).

Такий піднімальний кран — лише один приклад із безлічі застосувань електромагнітів. Електромагніти допомагають відділяти магнітні матеріали від немагнітних (точніше, сильномагнітні від слабомагнітних); електромагнітні замки міцно тримають ворота або двері в під'їзді, захищаючи від небажаних гостей; електромагніти піднімають швидкісний потяг над рейками, дозволяючи йому розігнатися до величезної швидкості, тощо.

Зупинимось докладніше на конструкції *електромагнітного реле* (рис. 3.7). Цей пристрій дозволяє вмикати та вимикати споживачі великої потужності за допомогою невеликого керуючого струму, який тече в котушці електромагніту. Вмикання та вимикання керуючого струму є цілком безпечним, для нього не потрібні товсті провідники, а отже й витрата великої кількості міді. Фактично реле дозволяє в багато разів підсилювати слабкий керуючий сигнал.



**Рис. 3.7.** Конструкція електромагнітного реле. Коли через катушку пропускають струм, осердя притягає ярмір, унаслідок чого замикаються контакти. За відсутності струму в катушці ярмір під дією пружини відривається від контактів і вони розмикаються

### Навколо фізики

- У США відбуваються випробування електромагнітної катушки для запуску літаків з палуби авіаносця. Така катушка витратить менше енергії, ніж парова, та дозволить збільшити кількість вильотів на добу.

### Навколо фізики

- Японські дослідники створили надпотужний електромагніт. Випробування показали, що сила струму в його обмотках може сягати 100 кА! Надпровідна частина обмоток складається з 54 стрічок завтовшки 0,2 мм і завширшки 10 мм. Оболонка конструкції виготовлена з нержавіючої сталі, що забезпечує механічну міцність і підсилює магнітне поле струму в обмотках.



## Підбиваємо підсумки

Відповідно до гіпотези Ампера магнітні властивості будь-якого тіла визначаються мікроскопічними замкненими електричними струмами всередині нього. Кожний такий струм — це «елементарний магнітик». У немагніченому тілі «елементарні магнітики» орієнтовані хаотично, тому їх магнітні поля компенсують одне одне. Намагнічування тіла пояснюється упорядкованою орієнтацією цих «елементарних магнітиків».

Природа «елементарних магнітиків» пов'язана перш за все з власним магнітним полем електронів, а також з орбітальним рухом електронів в атомах.

Магнітне поле — це форма матерії, головною ознакою якої є сила дія на рухомі заряджені частинки.

Речовина може посилювати або послабляти зовнішнє магнітне поле. Магнітне поле посилюється в багато разів у феромагнетиках. Вони можуть також зберігати намагніченість навіть за відсутності зовнішнього магнітного поля (постійні магніти). Магнітні властивості феромагнетиків послаблюються з підвищенням температури, а за температури Кюрі речовина взагалі втрачає феромагнітні властивості (наприклад, постійний магніт розмагнічується).

Котушку з феромагнітним осердям називають електромагнітом. Магнітну дію електромагніту можна регулювати, змінюючи силу струму у витках котушки. Завдяки цьому електромагніти широко застосовують у техніці.



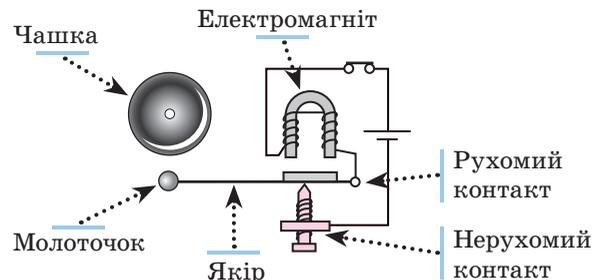
## Контрольні запитання

1. Що називають гіпотезою? 2. У чому полягала гіпотеза Ампера? 3. Чи можна в наш час розглядати твердження Ампера як гіпотезу? 4. Чим пояснюється намагнічування тіла відповідно до гіпотези Ампера? 5. Що називають магнітним полем? 6. Чому магніт втрачає свої властивості внаслідок сильного нагрівання?
7. Що таке діамагнетик? Як поводить діамагнітна стрілка в магнітному полі? 8. Як поведуться феромагнітна або парамагнітна стрілки в магнітному полі? 9. Що відбувається, коли феромагнетик нагрівають до температури Кюрі? 10. Що таке електромагніт?

## Вправа № 3

1. У котушку (див. рис. 3.4) вставляють залізний стрижень. До яких кінців провідника треба приєднати позитивний і негативний полюси джерела струму, щоб в отриманого електромагніту південний магнітний полюс був на лівому кінці?
2. Накресліть схематично лінії магнітного поля розбірного електромагніту (див. рис. 3.5). Як мають бути напрямлені струми в котушках, щоб за допомогою електромагніту можна було підняти вантаж максимальної маси?

3. На рисунку схематично зображено електричний дзвінок. Поясніть принцип його дії.



4. Ані насіння пшениці, ані насіння бур'яну не притягаються до магніту. Запропонуйте схему установки, у якій за допомогою електромагніту та залізних ошурок насіння пшениці очищають від насіння бур'яну. Для цього пригадайте, що ви знаєте з курсу біології про насіння бур'яну.

5. Запропонуйте, як змінити конструкцію електромагнітного реле (див. рис. 3.7), щоб контакти замикалися за відсутності струму в котушці та розмикалися, коли через котушку тече струм.

6. Електромагнітне реле спрацьовує за сили струму в обмотці 450 мА. Загальна довжина мідного дроту обмотки становить 8 м, площа його поперечного перерізу — 0,045 мм<sup>2</sup>. Яку напругу необхідно подати на обмотку реле, щоб воно замкнуло коло живлення споживача? Питомий опір міді дорівнює  $0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

7. Знайдіть в Інтернеті інформацію про доменну структуру феромагнетиків. Підготуйте коротке повідомлення про домени для своїх однокласників.

## Експериментальне завдання

Змішайте соняшникове насіння та кілька десятків маленьких сталевих цвяхів. Спробуйте швидко розділити цю суміш за допомогою

батарейки, великого цвяха та ізольованого мідного дроту.

## Фізика і техніка в Україні

### Публічне акціонерне товариство (ПАТ) «Турбоатом» (Харків)

Харківський турбінний завод (колишня назва «Турбоатома») було побудовано за три з половиною роки та запущено 1934 року. Спеціалізується на випуску парових, гідралічних і газових турбін для атомних, теплових і гідроелектростанцій та іншого енергетичного обладнання. Одне з найбільших у світі турбобудівних підприємств, що здійснює повний цикл виробництва: від проектування та виготовлення до наладки та фірмового сервісу обладнання. Входить до переліку підприємств, що мають стратегічне значення для економіки та безпеки України.

1965 року на заводі виготовили парову турбіну потужністю 500 МВт, на той момент — найпотужнішу у світі. Від 1967 року створюються потужні парові турбіни для АЕС. Уже за 10 років турбіни заводу було встановлено більше ніж на 100 електростанціях СРСР, а також на електростанціях багатьох інших країн світу. У 2000-х роках виготовлено чотири гідрозатвори діаметром 4 м на натиск понад 500 м. Створено унікальний кульовий затвор, що за своїми параметрами не має аналогів у світовій практиці. Здійснено поставку парових турбін для АЕС «Кайга» та



«Раджастан» (Індія), ТЕС «Аксу» (Казахстан), гідралічних турбін для реконструкції ГЕС Дніпровського каскаду, Камської ГЕС (Росія), гідромашин максимальною потужністю 390 МВт для Дністровської гідроакумулюючої електростанції.

2015 року підписано угоду на поставку енергетичного обладнання для реконструкції АЕС у Болгарії. Турбіни виробництва ПАТ «Турбоатом» успішно працюють на електростанціях більше ніж 45 країн Європи, Азії, Америки та Африки. «Турбоатом» поставив 13 % турбін для АЕС від сумарних об'ємів поставок на світовому ринку турбін АЕС і посідає за цим показником четверте місце серед турбобудівних фірм світу.

«Турбоатом» впевнено дивиться в майбутнє, попит на його продукцію зростає.

## Тема

Складання та випробування електромагніту.



## Мета:

навчитися складати найпростіший електромагніт і вивчити його дію.

## Обладнання:

джерело струму, ізолюваний провідник, великі залізні цвяхи, розбірний електромагніт, динамометр, реостат, ключ, амперметр, магнітна стрілка або компас, залізні ошурки, з'єднувальні провідники.

## Теоретичні відомості.

Феромагнітне осердя набагато посилює магнітне поле та, відповідно, магнітну дію котушки. Магнітну дію електромагніту можна оцінити, наприклад, за кількістю залізних ошурок, що налипають на нього. Більш точну оцінку можна отримати, якщо за допомогою динамометра вимірювати силу притягання сталеві пластинки (ярма) до електромагніту.

## Підготовка до експерименту

Перш ніж розпочинати експеримент, пригадайте:

- 1) вимоги з безпеки під час роботи з електрикою;
- 2) як залежить магнітна дія електромагніту від кількості витків і сили струму;
- 3) як визначити магнітні полюси електромагніту за напрямом струму в ньому.

## Експеримент

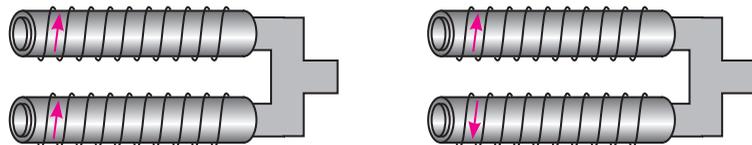
1. Намотайте на цвях 15 витків ізолюваного провідника та приєднайте кінці провідника через реостат, ключ і амперметр до полюсів джерела струму. Замкніть коло та переконайтеся за допомогою залізних ошурок та інших цвяхів, що отриманий вами електромагніт діє.
2. Повторіть дослід, намотавши тепер на цвях 30–35 витків провідника. Змінійте за допомогою реостата силу струму в електромагніті та спостерігайте за зміною дії електромагніту.
3. Визначте за допомогою магнітної стрілки магнітні полюси електромагніту. Змініть полярність приєднання джерела струму та знов визначте магнітні полюси. Перевірте, чи виконується правило, за допомогою якого визначають напрям магнітного поля струму.
4. Приєднайте до полюсів джерела струму одну котушку розбірного електромагніту. Установивши силу струму близько 1 А, виміряйте за допомогою динамометра силу, потрібну для відриву ярма від осердя електромагніту. Повторіть дослід, зменшивши силу струму до 0,7 і 0,3 А. Перевірте, чи притягається помітно ярмо до котушки зі струмом, знятої з осердя.

## Аналіз результатів експерименту

Проаналізуйте експеримент і його результати. Зробіть висновок: як залежить магнітна дія електромагніту від кількості витків, сили струму та наявності феромагнітного осердя.

## Творче завдання

Повторіть дослід, описаний у пункті 4, з'єднавши обидві котушки електромагніту послідовно. Виміряйте силу притягання ярма до осердя у двох випадках, схематично зображених на рисунку, і порівняйте отримані значення сили. Поясніть отриманий результат.



## § 4. СИЛА ЛОРЕНЦА ТА СИЛА АМПЕРА

### 1 Які сили спричиняє магнітне поле.

#### Правило лівої руки

Ви вже знаєте, що головна ознака магнітного поля — це його силова дія на рухомі заряджені частинки та провідники зі струмом. Зрозуміло, що обидва прояви магнітного поля тісно пов'язані один з одним. Проте відповідні сили називають по-різному (на честь двох видатних учених):

- **сила Лоренца** — діє з боку магнітного поля на рухому заряджену частинку;
- **сила Ампера** — діє з боку магнітного поля на провідник зі струмом.

Перш за все розберемося з напрямками цих сил. Почнемо із сили Ампера. Виявляється, що вона залежить від напрямку провідника зі струмом: якщо цей провідник іде вздовж лінії магнітного поля, то сила Ампера взагалі не виникає! В усіх інших випадках *ця сила утворює прямий кут як із провідником, так і з лініями магнітного поля\**. Отже, сила Ампера перпендикулярна до площини, що містить відрізок провідника та лінії магнітного поля. Ця умова майже визначає напрям сили Ампера. Розгляньмо, наприклад, рис. 4.1: сила Ампера перпендикулярна до площини рисунка. Але ж таких напрямів існує два: до нас і від нас (пригадайте відповідні позначення, див. рис. 2.7). Нам залишається зробити правильний вибір одного з двох напрямів. Для цього зручно користуватися **правилом лівої руки**.

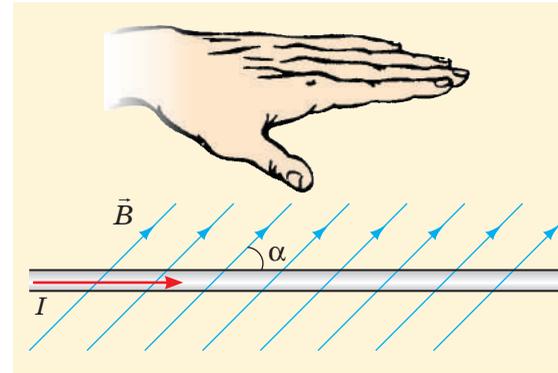


Рис. 4.1. Визначення напрямку сили Ампера (правило лівої руки): сила Ампера напрямлена перпендикулярно до площини рисунка до нас

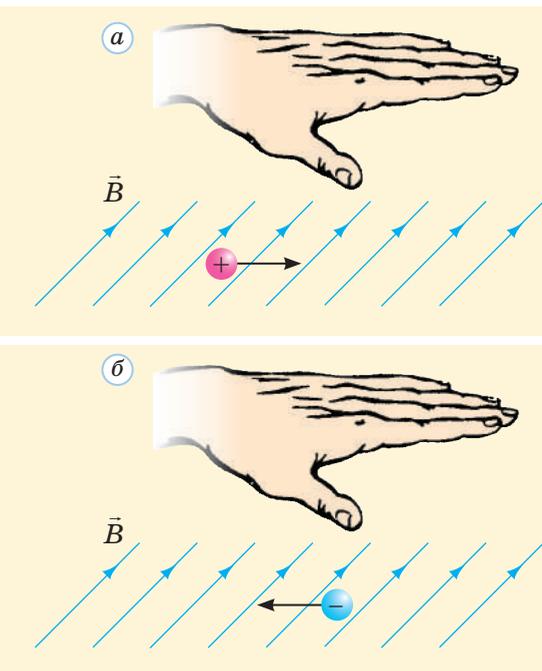
! Якщо розташувати ліву руку так, щоб чотири витягнуті пальці вказували напрям струму, а лінії магнітного поля входили в долоню, то відігнутий великий палець покаже напрям сили Ампера.

Пригадаймо тепер, що за напрям струму приймають напрям руху позитивно заряджених частинок у провіднику. Саме через їх рух і виникає сила Ампера. Таким чином, на кожен позитивно заряджену частинку, що рухається в напрямі струму, діє сила Лоренца, напрям якої збігається із силою Ампера. Робимо висновок: *сила Лоренца утворює прямий кут як із напрямом руху*

? Подумайте, як застосувати правило лівої руки для визначення напрямку сили Лоренца. Обґрунтуйте свій висновок.



\* Далі ми для простоти вважатимемо магнітне поле однорідним, а провідник — прямолінійним (таке наближення завжди можливе для маленького відрізка провідника).



**Рис. 4.2.** Визначення напрямку сили Лоренца (правило лівої руки): сила Лоренца в обох випадках *a*, *б* напрямлена перпендикулярно до площини рисунка до нас

зарядженої частинки, так і з лініями магнітного поля. Водночас доходимо ще одного варіанта правила лівої руки (для сили Лоренца):

**!** Якщо розташувати ліву руку так, щоб чотири витягнуті пальці були напрямлені за рухом позитивно зарядженої частинки (проти руху негативно зарядженої частинки), а лінії магнітного поля входили в долоню, то відігнутий великий палець покаже напрям сили Лоренца.

Текст у дужках нагадує, що за інших однакових умов на позитивні та негативні заряди діють протилежно напрямлені сили. На рис. 4.2 показано застосування правила лівої руки для визначення напрямку сили Лоренца.

Тепер би не переплутати правила лівої та правої руки... А скільки ще доведеться запам'ятати подібних правил? І в чому їх принципова відмінність?



Дійсно, краще не плутати ці правила. Але можемо заспокоїти: цих двох правил цілком достатньо, щоб відповісти на будь-яке запитання щодо напрямів магнітного поля, струму, сили тощо. А от відмінність між зазначеними правилами справді є принциповою: 1) правило правої руки (або свердлика) пов'язує напрями струму і власного магнітного поля цього струму; 2) правило лівої руки пов'язує напрями струму (або руху зарядженої частинки), зовнішнього магнітного поля та сили.

Чи правильно я розумію, що коли на мідний провідник зі струмом діє сила Ампера — то це просто рівнодійна безлічі «маленьких» сил Лоренца, що діють на вільні електрони?



Це абсолютно правильно, якщо йдеться про нерухомий провідник. А от для рухомого провідника справа дещо складніша, тож відкладемо це питання до старших класів.



## 2 Знов про магнітну індукцію. Формули сили Ампера та сили Лоренца

Численні експерименти показали, що модуль сили Ампера найбільший, коли провідник утворює прямий кут із магнітними лініями. Максимальне значення сили Ампера  $F_{\max}$  пропорційне силі струму  $I$  та довжині  $l$  тієї частини провідника, що перебуває в магнітному полі (це так звана активна частина провідника). Якщо ж ми розділимо  $F_{\max}$  на добуток  $Il$ , то отримана величина вже ніяк не залежатиме від характеристик провідника зі струмом. Вона характеризуватиме тільки магнітне поле, що діє на провідник. Саме цю величину приймають за модуль  $B$  магнітної індукції поля (див. § 2, п. 5):

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}.$$

Одиницю магнітної індукції в СІ назвали 1 тесла (1 Тл) на честь видатного винахідника сербського походження Ніколи Тесли, який більшу частину життя працював у США. З наведеної формули випливає, що  $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$ .

За довільного кута  $\alpha$  (рис. 4.1) між провідником і лініями магнітного поля модуль сили Ампера

$$F_A = BIl \cdot \sin \alpha.$$

Отже, ми маємо тепер загальну формулу для модуля сили Ампера та знаємо правило лівої руки, що дозволяє визначити напрям цієї сили.

Можна довести (див. вправу 4, завдання 9), що модуль сили Лоренца визначається за формулою

$$F_L = |q| Bv \cdot \sin \alpha,$$

де  $q$  — заряд частинки;  $v$  — швидкість її руху;  $\alpha$  — кут між напрямом руху частинки та лініями магнітного поля.

Очевидно, що сила Лоренца дорівнює нулю, коли частинка рухається вздовж магнітних ліній. Ця сила максимальна, коли напрям руху частинки перпендикулярний до магнітних ліній.

Цікава особливість сили Лоренца полягає в тому, що вона завжди перпендикулярна до напрямку руху частинки, а тому *ніколи* не виконує механічної роботи (подібно до того як сила тяжіння не виконує роботи під час руху тіла горизонтальною поверхнею). Отже, сила Лоренца не може розганяти або гальмувати рух частинки; ця сила тільки змінює напрям руху частинок, тобто викривляє траєкторію руху. Саме так діє магнітне поле Землі на заряджені

Магнітна індукція 1 Тл — багато це чи мало? Щоб це зрозуміти, наведемо деякі дані.



### Навколо фізики

- На широті  $50^\circ$  магнітна індукція магнітного поля Землі в середньому становить  $50 \text{ мкТл}$ , а на екваторі —  $31 \text{ мкТл}$ .
- Сувенірний магніт на холодильнику створює поле з магнітною індукцією близько  $5 \text{ мТл}$ . Відхиляючі магніти Великого адронного колайдера — від  $0,54$  до  $8,3 \text{ Тл}$ .
- У сонячних плямах індукція магнітного поля сягає  $10 \text{ Тл}$ .
- Рекордні значення постійного магнітного поля, отриманого без руйнування установки, — близько  $100 \text{ Тл}$ .

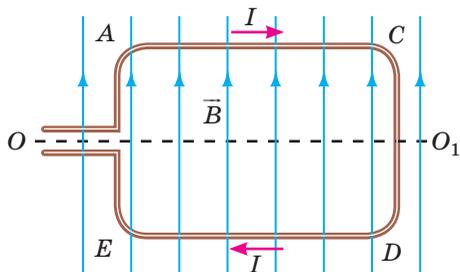


Рис. 4.3. Рамка зі струмом у магнітному полі

### 3 Рамка зі струмом у магнітному полі. Електровимірвальні прилади

Тепер розглянемо жорстку провідну прямокутну рамку  $ACDE$ , що може обертатися навколо горизонтальної осі  $OO_1$ . У рамці тече електричний струм. Що відбуватиметься, якщо вмістити рамку в магнітне поле (рис. 4.3)?

? Чи діятиме сила Ампера на кожну з чотирьох сторін рамки? Визначте напрям відповідних сил Ампера.

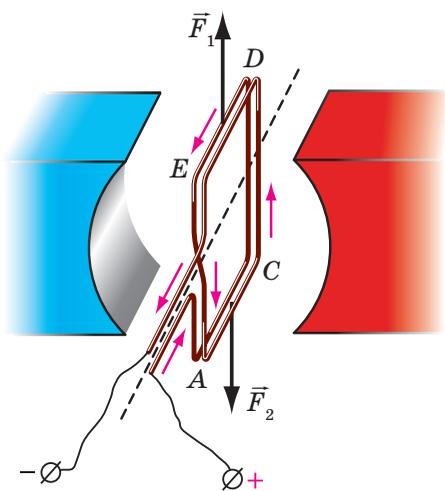


Рис. 4.4. Положення стійкої рівноваги рамки зі струмом у магнітному полі

Очевидно, сила Ампера не діє на сторони рамки  $AE$  і  $CD$ . Застосувавши правило лівої руки, доходимо висновку, що на горизонтальні сторони рамки діють сили Ампера, перпендикулярні до площини рисунка. На сторону  $AC$  сила діє до нас, на сторону  $DE$  — від нас. Отже, виникає момент сил, що обертає рамку навколо осі  $OO_1$ . Під їх дією рамка після кількох коливань установиться в площині, перпендикулярній до ліній магнітного поля (рис. 4.4). Тепер момент сил Ампера дорівнює нулю, ці сили «намагаються» розтягнути рамку. Якщо відхилити її від нового положення, рамка сама повернеться до нього, тобто це є положення стійкої рівноваги. Цікаво, що в цьому положенні власне магнітне поле рамки в її центрі напрямлене так само, як зовнішнє магнітне поле.

Дію магнітного поля на рамку зі струмом застосовують в *електровимірвальних приладах магнітоелектричної системи* (ці прилади призначені для вимірювань у колах постійного струму). На рис. 4.5 схематично зображено вимірвальний механізм такого приладу. Коли струм у рамці відсутній, рамка розташована горизонтально, а зв'язана з нею стрілка вказує на нульову поділку шкали. Коли через рамку тече струм відповідного напрямку, сили Ампера створюють обертальний момент і рамка повертається на певний кут. Вона встановлюється так, щоб момент сил пружності з боку пружин зрівноважив момент сил Ампера. Кут повороту рамки та стрілки залежить від сили струму в рамці. Прилад градуйовано так, що стрілка показує на шкалі значення сили струму.

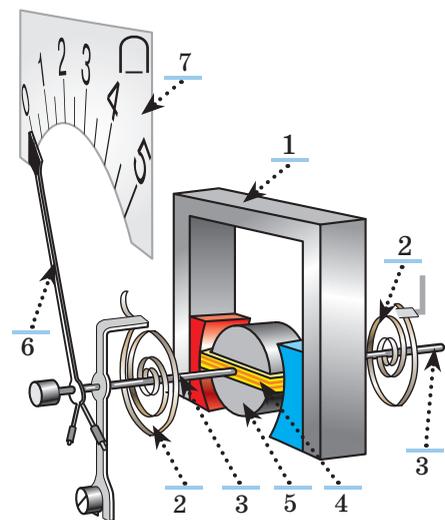


Рис. 4.5. Схематичне зображення вимірвального механізму приладу магнітоелектричної системи: 1 — постійний магніт; 2 — спіральні пружини; 3 — півосі, що жорстко з'єднані з рамкою 4; 5 — нерухоме осердя; 6 — стрілка; 7 — шкала

Прилади магнітоелектричної системи (амперметри та вольтметри) відрізняються високою точністю та чутливістю. Саме такими приладами ви користуєтеся під час виконання лабораторних робіт.

У техніці досить широко застосовують вимірювальні прилади **електромагнітної системи**. На рис. 4.6 схематично зображено вимірювальний механізм такого приладу. Дія цього механізму ґрунтується на тому, що коли через котушку тече струм *будь-якого* напрямку, рухоме сталеве осердя намагнічується та втягується в котушку. Це спричиняє поворот осі та переміщення стрілки по шкалі. За відсутності струму стрілка під дією пружини повертається до нульової поділки шкали.

? Пригадайте, у чому полягає головна відмінність у конструкціях амперметра та вольтметра.



У яких випадках застосовування приладів електромагнітної системи можливе, а приладів магнітоелектричної системи — ні?



Ви, мабуть, уже зрозуміли, що прилади електромагнітної системи, на відміну від приладів магнітоелектричної системи, можуть працювати й у колі змінного струму.

#### 4 Електричні двигуни. Гучномовець

Ви дізналися, як застосовують поворот рамки зі струмом під дією магнітного поля. Але ще важливішим було «навчити» магнітне поле викликати *обертання* рамки. Адже таке обертання можна передати колесам транспортного засобу, лопатям вентилятора, ножу м'ясорубки тощо. Інакше кажучи, ідеться про *електричний двигун* (пристрій, що перетворює електричну енергію на механічну).

То ж як примусити рамку не зупинятися в положенні стійкої рівноваги, а продовжувати обертання? Винахідники знайшли кілька способів. Познайомимося з одним із них, на якому ґрунтується дія **електродвигуна постійного струму**. Для цього звернемо увагу на електричне живлення рамки. Оскільки вона обертається, пропустити через неї струм від нерухомого джерела струму можна тільки через *ковзні контакти*. Виявляється, саме ці ковзні контакти допомагають вирішити проблему. Вони дозволяють змінити напрям струму в рамці на протилежний саме тоді, коли рамка проходить положення стійкої рівноваги. Через це сили Ампера змінюють напрями та штовхають рамку до нового положення стійкої рівноваги (до якого треба зробити ще половину повного оберту). Коли ж рамка

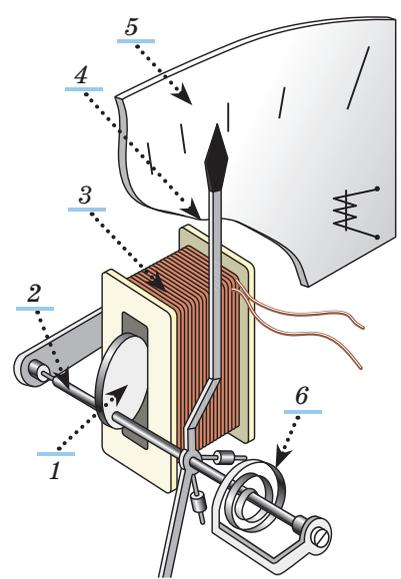


Рис. 4.6. Схематичне зображення вимірювального механізму приладу електромагнітної системи: 1 — рухоме сталеве осердя; 2 — вісь; 3 — котушка; 4 — стрілка; 5 — шкала; 6 — спіральна пружина

наблизиться до цього нового положення рівноваги, струм знов змінить напрям на протилежний. Таким чином, рівновага стає для рамки недосяжною, вона «змушена» обертатися доти, доки в ній тече струм.

! Пристрій, що автоматично змінює напрям струму в рамці, називають **колектором**.

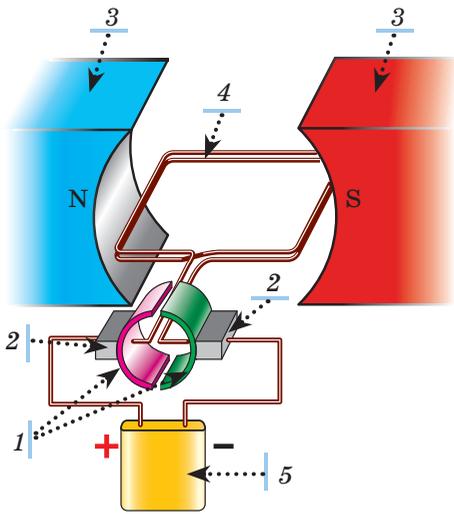


Рис. 4.7. Модель електродвигуна постійного струму: 1 — півкільця; 2 — металеві щітки; 3 — постійний магніт; 4 — рамка, що обертається навколо горизонтальної осі; 5 — джерело струму

Найпростіший колектор показано на рис. 4.7. До кожного з двох кінців рамки приєднано металеве півкільце, півкільця обертаються разом із рамкою. Вони не торкаються одне одного. До кожного з півкільців притискається так звана щітка (металева або графітова). Саме між нерухомими щітками та півкільцями, що обертаються, існують ковзні контакти. Через кожен половину оберту півкільця міняються місцями. Тому кожне півкільце приєднується по чергово через відповідні щітки до позитивного та негативного полюсів джерела струму.

Пристрій, зображений на рис. 4.7, можна розглядати лише як найпростішу модель електродвигуна постійного струму. Рамка в цій моделі обертатиметься нерівномірно, обертальний момент сил Ампера буде малим. У реальному двигуні застосовують багато «рамок» — витків ізоляваного провідника, що вкладені в пази сталевого циліндра-осердя. Таке обертове осердя значно посилює магнітне поле. Циліндр з обмотками утворює **ротор** електродвигуна, тобто його обертову частину. Оскільки різні витки «працюють» по чергово (рис. 4.8), обертання ротора практично рівномірне. Зрозуміло, що для почергового живлення великої кількості витків колектор має складатися не з двох півкільців, а з великої кількості менших дугоподібних пластин.

У сучасних електродвигунах постійного струму магнітне поле зазвичай створює не постійний магніт, а електромагніт. Він разом із корпусом двигуна є частиною **статора** — нерухомої частини електродвигуна.

Електродвигуни постійного струму широко застосовують на електротранспорті: вони працюють у тролейбусах, електровозах, електромобілях тощо. В інших галузях частіше застосовують електродвигуни змінного струму (про них ви дізнаєтеся докладніше, вивчаючи фізику в старших класах). Будь-які електродвигуни мають незаперечні переваги порівняно з тепловими двигунами: дуже високий ККД, відсутність забруднення навколишнього середовища.

Ще одним прикладом застосування сили Ампера може бути **електродинамічний гучномовець (динамік)**. Це пристрій, що перетворює електричний сигнал на звуковий. Звук випромінюють тіла, що коливаються з певною

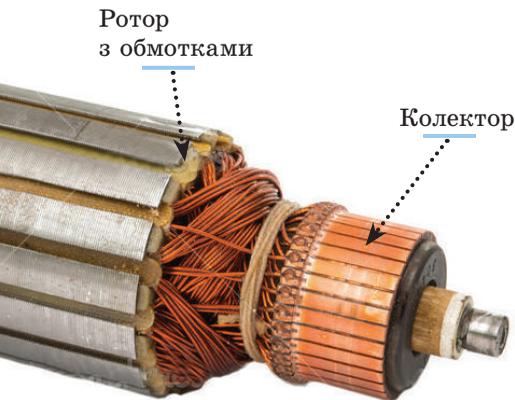


Рис. 4.8. Електродвигун постійного струму

частотою (див. розділ 3). Таким тілом у динаміку є **дифузор**, що коливається «в такт» зі змінами сили струму в котушці динаміка (рис. 4.9). Котушка, прикріплена до дифузора, може вільно переміщатися в зазорі кільцевого магніту. Коливання котушки з дифузором зумовлені тим, що внаслідок зміни сили струму котушка то сильніше, то слабше втягується в зазор кільцевого магніту.

Отже, внаслідок зміни за певним законом сили струму динамік відтворює різноманітні звуки — голос людини, музику, шум вітру тощо.

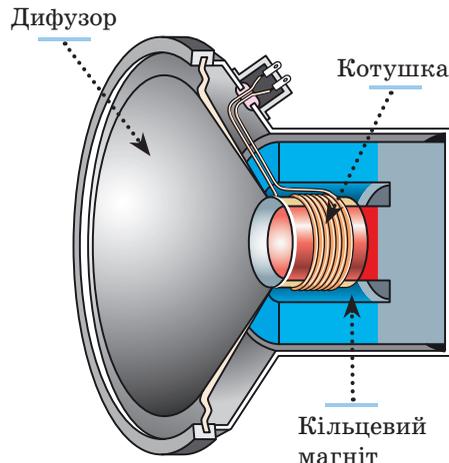


Рис. 4.9. Схематичне зображення динаміка

## 5 Вчимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** Два паралельних провідники відштовхуються, якщо напрями струмів у них протилежні (див. § 2). Доведіть, що це впливає з правил правої та лівої руки.

*Розв'язання.* На кожний із провідників діє сила Ампера з боку магнітного поля іншого провідника зі струмом. Дослідимо напрям магнітного поля провідника 1 та його дію на провідник 2 (рис. 1).

- Визначимо напрям магнітних ліній поля провідника 1 там, де розташований провідник 2 (тобто праворуч від провідника 1). Для цього застосовуємо правило правої руки (рис. 2). Доходимо висновку: магнітні лінії поля провідника 1 поблизу провідника 2 напрямлені перпендикулярно до площини рисунка від нас.

- Тепер, знаючи напрям магнітних ліній поля провідника 1 і напрям струму в провіднику 2, ми можемо застосувати правило лівої руки. Знаходимо напрям сили Ампера, що діє на провідник 2 (рис. 3). Ця сила напрямлена праворуч.

- Отже, провідник 2 дійсно відштовхується від провідника 1. Аналогічно можна показати, що й провідник 1 відштовхується від провідника 2.

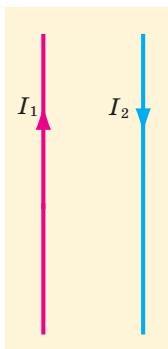


Рис. 1

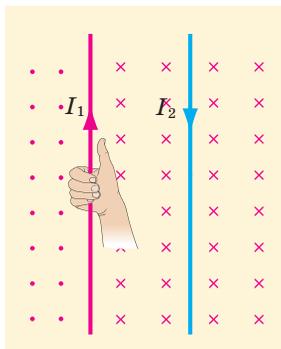


Рис. 2

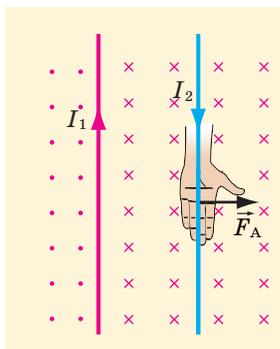


Рис. 3

### Навколо фізики

У Великому адронному колайдері (найбільшому у світі прискорювачі частинок) протони та йони рухаються під дією сили Лоренца кільцевим тунелем завдовжки майже 27 км зі швидкістю, що лише на 3 м/с поступається швидкості світла у вакуумі. Тунель прокладено під землею на території Франції та Швейцарії. Необхідне магнітне поле створюють 1624 надпровідних електромагніти, що працюють за температури 1,9 К (−271 °С).

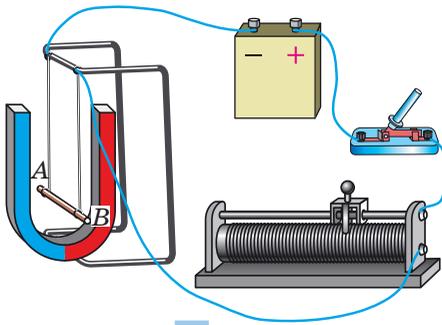


Рис. 4

Дано:  
 $m = 18 \text{ г} = 0,018 \text{ кг}$   
 $U = 36 \text{ В}$   
 $R = 5 \text{ Ом}$   
 $B = 0,2 \text{ Тл}$   
 $l = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$   
 $g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$

$$\frac{F_2}{F_1} = ?$$

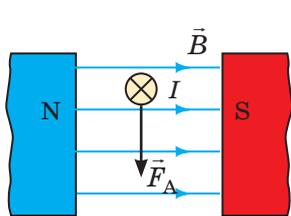


Рис. 5

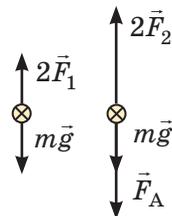


Рис. 6

**Задача 2.** Мідний стрижень  $AB$  масою  $18 \text{ г}$  підвішений за кінці горизонтально між полюсами магніту на легких ізольованих провідниках (рис. 4). У скільки разів зміняться сили  $F$  натягу цих провідників, якщо замкнуті ключ? Напруга на полюсах джерела струму дорівнює  $36 \text{ В}$ , опір реостата  $5 \text{ Ом}$ . Уважайте, що в магнітному полі з індукцією  $0,2 \text{ Тл}$  перебуває відрізок стрижня завдовжки  $5 \text{ см}$ . Електричний опір стрижня та провідників не враховуйте; уважайте, що  $g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$ .

*Розв'язання*

Сили натягу провідників зміняться після замикання ключа через дію на стрижень сили Ампера. Тому перш за все визначимо за правилом лівої руки напрям сили Ампера (рис. 5): вона напрямлена вниз.

У даному випадку кут  $\alpha$  між лініями магнітного поля та провідником дорівнює  $90^\circ$ , тому  $F_A = BIl$ .

За законом Ома  $I = \frac{U}{R}$ , тому  $F_A = \frac{BUl}{R}$ .

Напишемо тепер умови рівноваги стрижня до та після замикання ключа (рис. 6):

$$\begin{cases} 2F_1 = mg, \\ 2F_2 = mg + F_A. \end{cases}$$

Звідси  $\frac{F_2}{F_1} = \frac{mg + F_A}{mg} = 1 + \frac{BUl}{mgR}$ .

Перевіримо одиниці:

$$\left[ \frac{F_2}{F_1} \right] = 1 + \frac{\text{Тл} \cdot \text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{Н} \cdot \text{Ом}} = 1 + \frac{\text{Н} \cdot \text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{кг}}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{Н} \cdot \text{Ом}} = 1.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$\frac{F_2}{F_1} = 1 + \frac{0,2 \cdot 36 \cdot 0,05}{0,018 \cdot 10 \cdot 5} = 1,4.$$

**Відповідь:** сили натягу провідників збільшаться в 1,4 разу.



**Підбиваємо підсумки**

Сила Лоренца — це сила, що діє з боку магнітного поля на рухому заряджену частинку. Сила Ампера діє з боку магнітного поля на провідник зі струмом.

Напрями обох цих сил можна визначити за допомогою правила лівої руки; модуль сили Ампера — за формулою  $F_A = BIl \cdot \sin \alpha$ , а модуль сили Лоренца — за формулою  $F_L = |q|Bv \cdot \sin \alpha$ . Тут  $I$  — сила струму в провіднику;  $l$  — довжина провідника;  $q$  — заряд частинки;  $v$  — її швидкість;  $\alpha$  — кут між лініями магнітного поля та напрямом струму або руху частинки. Модуль  $B$  магнітної індукції визначається через максимальне значення сили Ампера  $F_{\text{max}}$  (для провідника зі струмом, перпендикулярного до ліній магнітного поля):  $B = \frac{F_{\text{max}}}{Il}$ .

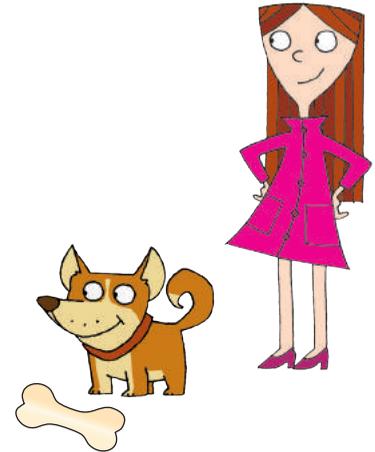
Одиниця магнітної індукції в СІ — 1 тесла  $\left(1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}\right)$ .

Сила Лоренца не виконує механічної роботи. Ця сила не може розганяти або гальмувати рух частинки, а може тільки змінювати напрям її руху.

Рамка зі струмом у магнітному полі орієнтується так, що її площина перпендикулярна до ліній магнітного поля. У положенні стійкої рівноваги сили Ампера намагаються розтягнути рамку.

Дію магнітного поля на рамку зі струмом застосовують в електровимірювальних приладах магнітоелектричної системи і в електродвигунах постійного струму. Щоб ротор електродвигуна не зупинявся в положенні стійкої рівноваги, напрям струму в обмотках ротора автоматично змінюють в міру його обертання. Такі зміни відбуваються завдяки дії колектора.

Силу Ампера застосовують також в електродинамічних гучномовцях (динаміках).



## Контрольні запитання

1. За яким правилом можна визначити напрями сили Ампера та сили Лоренца? 2. Яким може бути кут між напрямками сил Ампера і Лоренца та магнітними лініями поля? 3. Від чого залежить модуль сили Ампера? сили Лоренца? 4. У якому випадку на провідник зі струмом не діє в магнітному полі сила Ампера? 5. Як поводить ся рамка зі струмом

у магнітному полі? 6. Яке призначення нерухомого циліндричного осердя в приладах магнітоелектричної системи? 7. Яке призначення колектора в електродвигуні постійного струму? 8. Що називають ротором і статором електродвигуна? 9. Яким чином приводять до руху дифузори динаміка?

## Вправа № 4

1. На рис. 1 показано провідники зі струмом у магнітному полі. Визначте напрями сил Ампера, що діють на провідники *a*, *c*, і напрями струмів у провідниках *b*, *d*.

2. Визначте, у якому напрямі пропускають струм через рамку 4 електровимірювального приладу (див. рис. 4.5), щоб прилад давав правильні покази. Зробіть схематичний рисунок.

3. Як зміниться напрям обертання рамки, якщо поміняти місцями полюси магніту? полюси джерела струму? якщо здійснити обидві зміни?

4. На рис. 2 показано (вигляд згори) мідний стрижень, що лежить на металевих рейках у вертикальному магнітному полі. Якщо приєднати до рейок полюси джерела струму, стрижень покотиться. До якої рейки слід приєднати позитивний полюс джерела струму, щоб стрижень покотився праворуч?

5. М'яка легка металева пружина висить, занурена нижнім кінцем у солону воду на невелику глибину (рис. 3). Що відбудеться після замикання ключа?

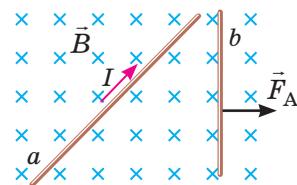


Рис. 1

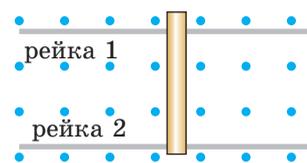
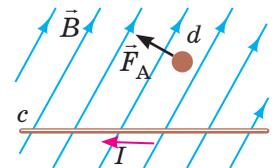


Рис. 2

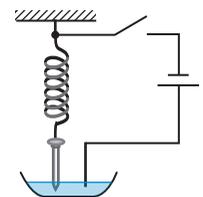


Рис. 3

6. Металевий стрижень завдовжки 10 см масою 9 г лежить на горизонтальній поверхні між полюсами електромагніту. Лінії однорідного магнітного поля напрямлені горизонтально та перпендикулярні до стрижня, індукція магнітного поля дорівнює 0,6 Тл. За якої сили струму в стрижні він перестає тиснути на поверхню?

7. Електрон рухається в горизонтальному напрямі в магнітному полі з індукцією 1,2 Тл. Лінії магнітного поля вертикальні, швидкість електрона дорівнює 500 км/с. Визначте силу

Лоренца, що діє на електрон. Елементарний електричний заряд дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

8<sup>R</sup>. Які існують вимоги до власних опорів амперметра та вольтметра? Обґрунтуйте ці вимоги.

9. Виведіть із формули сили Ампера формулу сили Лоренца. Уважайте, що всі вільні заряджені частинки в провіднику рухаються з однаковою швидкістю  $v$  (тоді всі такі частинки, що містяться в провіднику завдовжки  $l$ , покинуть його за час  $t = \frac{l}{v}$ ).

## Експериментальне завдання

Приєднайте електродвигун від старої дитячої іграшки до джерела струму через ключ, реостат і амперметр. Намотайте на ротор електродвигуна довгу нитку, перекиньте її через блок та прикріпіть до її вільного кінця невеликий

тягарець. Замкнувши коло, виміряйте час піднімання тягарця на певну висоту та обчисліть корисну потужність електродвигуна. Визначте експериментально залежність цієї потужності від сили струму в двигуні.

## § 5. ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

### 1 Відкриття електромагнітної індукції



Рис. 5.1. Майкл Фарадей (1791–1867 рр.) — англійський фізик і хімік. Засновник учення про електромагнітне поле. Відкрив явище електромагнітної індукції, закони електролізу. Невтомний популяризатор науки

Дослід Г. К. Ерстеда (1820 рік) довів існування магнітної дії електричного струму (якщо користуватися сучасною термінологією — існування магнітного поля струму). А вже 1822 року англійський учений М. Фарадей (рис. 5.1) у своєму записі поставив мету «перетворити магнетизм на електрику». Інакше кажучи, він намагався створити електричний струм за допомогою магнітного поля. Над цим працювали й інші вчені, проте успіх чекав саме на М. Фарадея. Відкриття було зроблено 1831 року після тривалих і наполегливих пошуків.

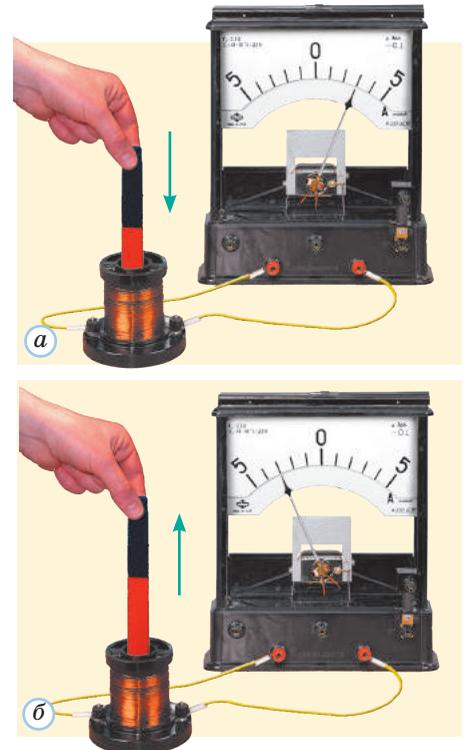
Технічно досліді Фарадея вже тоді були нескладними (а нині їх може відтворити кожний). Чому ж від початку пошуків до успіху минуло так багато часу? Річ у тім, що успіх чекав на дослідника не зовсім там, де його спочатку шукали. Навіть дуже сильне магнітне поле здатне спричинити появу електричного струму тільки за певних умов. Надамо слово самому Фарадею: «Двісті три фути\* мідного дроту було намотано на великий дерев'яний барабан; інші

\* Один фут дорівнює приблизно 0,3 м.

двісті три фути такого самого дроту було прокладено у вигляді спіралі між витками першої обмотки, причому металевий контакт всюди було усунено за допомогою шнурка. Одну з цих спіралей було з'єднано з гальванометром, а іншу — з добре зарядженою батареєю зі ста пар пластин... Під час замкнення контакту спостерігалася раптова, проте дуже слабка дія на гальванометр, і подібна ж слабка дія мала місце під час розмикання контакту з батареєю. Під час же протікання струму в одній спіралі не вдалося помітити відхилення гальванометра або іншої дії на другу спіраль... хоч потужність батареї була явно великою».

У цьому досліді одна «спіраль» (котушка 1) перебувала в магнітному полі іншої (котушки 2). Постійне магнітне поле, навіть сильне, не спричиняло жодного струму в котушці 1. А от під час збільшення і зменшення магнітного поля струму гальванометр показував наявність струму в котушці 1. Отже, причиною появи струму є не наявність магнітного поля, а його зміна! У подальших дослідіх Фарадей змінював магнітне поле іншими способами. На рис. 5.2 показано відтворення одного із цих дослідів за допомогою обладнання сучасного шкільного кабінету фізики.

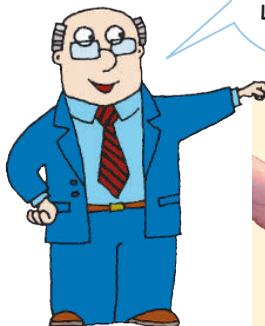
Відкрите Фарадеєм явище назвали **електромагнітною індукцією**, а виникаючий струм — **індукційним**.



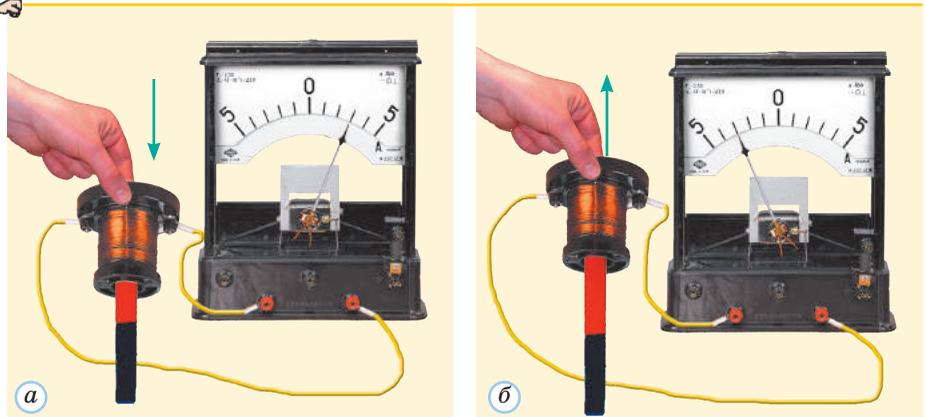
**Рис. 5.2.** Виникнення індукційного струму внаслідок зміни магнітного поля: якщо вводити магніт у котушку, стрілка гальванометра відхиляється праворуч (а), а якщо виводити — стрілка відхиляється ліворуч (б)



А чи не можна викликати струм інакше: рухати не магніт, а з'єднану з гальванометром котушку? Адже в обох випадках є відносний рух магніту й котушки.



Досліди підтвердили, що це правильно. Подивіться, наприклад, на рис. 5.3.

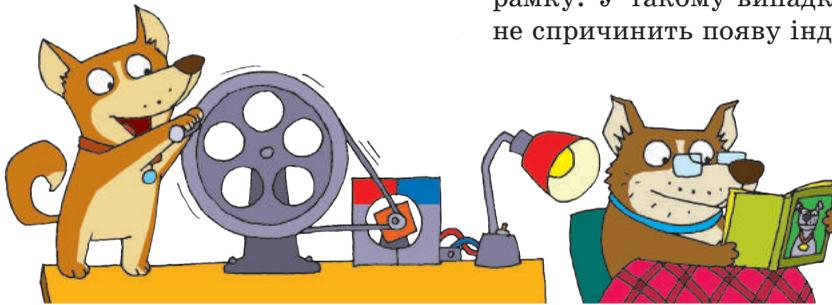


**Рис. 5.3.** Виникнення індукційного струму внаслідок руху котушки в магнітному полі

Спираючись на результати численних дослідів, Фарадей сформулював загальну умову виникнення індукційного струму:

! У замкненому провідному контурі виникає струм унаслідок зміни кількості ліній магнітного поля, які пронизують цей контур.

Отже, не будь-яка зміна магнітного поля та не будь-який рух провідного контуру викликають індукційний струм. Обов'язково має виконуватися зазначена умова. Наприклад, якщо площина рамки паралельна лініям однорідного магнітного поля, то вони взагалі не пронизують рамку. У такому випадку зміна індукції магнітного поля не спричинить появу індукційного струму.



## 2 Напря́м індукційного струму

Фарадей помітив, що напря́м індукційного струму був різним під час замкнення і розімкнення контактів, наближення і віддалення магніту тощо. У його записах є докладна інформація про напря́м індукційного струму в кожному з випадків. Проте Фарадей не зміг дати «рецепта», як можна заздалегідь передбачити напря́м індукційного струму для будь-якого випадку. Таке правило було встановлено трохи пізніше петербурзьким фізиком Е. Х. Ленцем, який зумів узагальнити результати відомих йому дослідів.

{ Встановлене Е. Х. Ленцем правило (**правило Ленца**) ви вивчатимете в старших класах. Проте ми покажемо на прикладі, що ви можете передбачити напря́м індукційного струму краще за самого Фарадея!

На рис. 5.4 зображено простий пристрій — перекладину, що може вільно обертатися на вертикальній осі. На перекладині закріплено два алюмінієвих кільця (одне з них із розрізом). Цей пристрій часто називають «кільцями Ленца».

Якщо швидко піднести штабовий магніт до суцільного кільця, перекладина повернеться. Якщо ж піднести магніт до кільця з розрізом, перекладина залишиться

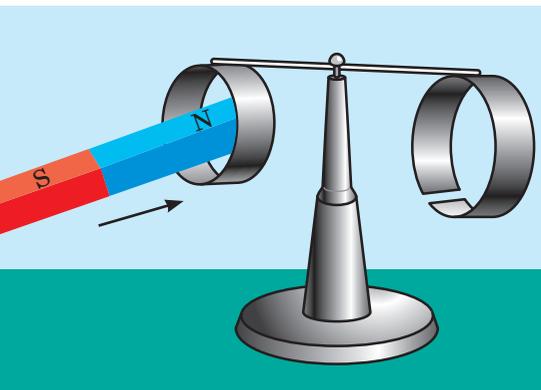


Рис. 5.4. «Кільця Ленца»: взаємодія рухомого магніту з індукційним струмом

нерухомою. Отже, рух спричиняється не дією повітряних потоків. Його причина інша: під час руху магніту в суцільному кільці виникає індукційний струм, на який діє магнітне поле магніту (у кільці з розрізом індукційний струм не виникає). Можна переконалися, що під час наближення магніту до кільця *будь-яким полюсом* кільце відштовхується від магніту, а під час віддалення — притягається.

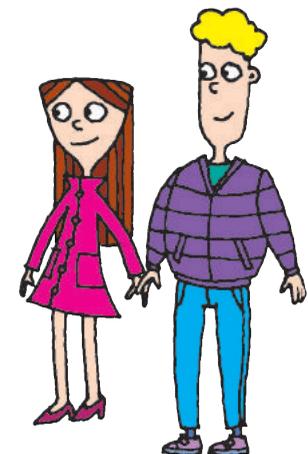
Проаналізуємо результати досліду та покажемо, що їх можна було передбачити. Під час наближення магніту до кільця між ними діють сили відштовхування (адже кільце зі струмом тимчасово «перетворюється» на магніт). Отже, треба прикладати до штабового магніту певну силу та виконувати роботу (витрачати якусь енергію). Саме за рахунок цієї витраченої енергії кільце й набуває кінетичної енергії. Якщо ж уявити, що під час наближення магніту до кільця між ними діятимуть сили притягання, то отримаємо хибний висновок: треба лише трохи підштовхнути штабовий магніт у напрямі до кільця і далі обидва тіла розганятимуться самі, ніякої роботи виконувати не потрібно! Але це суперечить закону збереження енергії, бо звідки ж тоді береться кінетична енергія обох тіл? Отже, закон збереження енергії дозволяє передбачити результат описаного досліду.

? Визначте напрям індукційного струму в суцільному кільці (рис. 5.4).

Чому ж ані Фарадей, ані Ленц не змогли дійти такого висновку (Ленц отримав свої висновки, узагальнивши результати численних експериментів)? З дуже поважної причини: за часів Фарадея та Ленца не тільки не було встановлено закон збереження енергії, але й не була відома така фізична величина, як енергія. Нам легше робити висновки: як казав Ньютон, ми стоїмо на плечах гігантів...

## Навколо фізики

- Коли поїзд їде зтяжним спуском, потрібно здійснювати постійне гальмування, щоб поїзд не розігнався до небезпечної швидкості. У випадку електропоїздів застосовують рекуперативне гальмування: мотори електровоза переводять у режим генераторів. Генератори виробляють і віддають у мережу електроенергію, гальмуючи при цьому рух поїзда. Таким чином, під час спуску потенціальна енергія поїзда перетворюється не на кінетичну, а на електричну.



### 3 Про що свідчить явище електромагнітної індукції

Електричний струм, навіть короткочасний, свідчить про дію якихось сил на вільні заряджені частинки в провіднику. Яка ж причина виникнення цих сил, коли спостерігається індукційний струм?

Розгляньмо спочатку випадок, коли *провідник рухається в магнітному полі* (див. [рис. 5.3](#)). Очевидно, на вільні заряджені частинки всередині цього провідника діє з боку магнітного поля сила Лоренца, яка впливає на їх рух. Саме ця сила спричиняє виникнення індукційного струму в замкненому провідному контурі.

Звернемося до іншого випадку, тобто до виникнення індукційного струму *в нерухомому провідному контурі* (див. [рис. 5.2](#)). У постійному магнітному полі індукційний струм не виникає. Що ж відбувається, коли магнітне поле змінюється? Які сили викликають напрямлений рух вільних заряджених частинок? Такі сили не можуть діяти з боку магнітного поля — це поле не може зробити *хаотичний* рух заряджених частинок напрямленим. А от електричне поле може це зробити. Британський фізик Дж. Максвелл ([рис. 5.5](#)) дійшов висновку:



**Рис. 5.5.** Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879 рр.) — британський фізик і математик, шотландець за походженням. Створив теорію електромагнітного поля, передбачив існування електромагнітних хвиль, установив електромагнітну природу світла. Один із творців кінетичної теорії газів

! магнітне поле, яке змінюється з часом, породжує електричне поле.

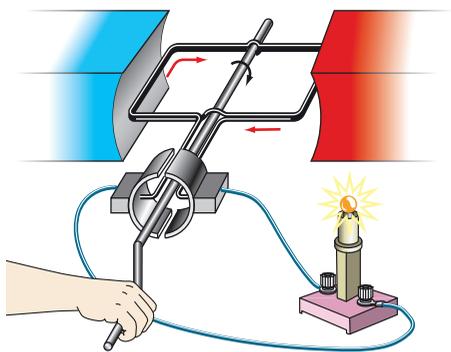
Це дуже важливий висновок: адже породження електричного поля змінним магнітним полем відбувається навіть там, де нема провідного контуру й не виникає електричний струм! Як бачимо, магнітне поле може не тільки передавати магнітні взаємодії, але й спричиняти появу іншої форми матерії — електричного поля.

Ми ще повернемося до питання про зв'язок між електричним і магнітним полями (див. розділ 3).

### 4 Індукційний генератор електричного струму

Відкриття М. Фарадея не тільки поглибило наше розуміння електромагнітних явищ, а й проклало шлях до широкого застосування електрики в техніці та побуті. Адже нині близько 99 % електроенергії у світі виробляють на електростанціях за допомогою *індукційних генераторів*. Їх дія ґрунтується на застосуванні явища електромагнітної індукції.

Розгляньмо найпростішу модель індукційного генератора струму ([рис. 5.6](#)). Перш за все зверніть увагу, що це практично та сама установка, що й електродвигун на [рис. 4.7](#). Тільки тепер ми не приєднуємо рамку до джерела струму — вона сама стала джерелом струму через те, що її «примусово» обертають у магнітному полі!



**Рис. 5.6.** Модель індукційного генератора постійного струму

Індукційний струм виникає через те, що кількість ліній магнітного поля, які пронизують рамку, безперервно змінюється під час її обертання. Завдяки системі з півкільць і щіток напрям струму в зовнішній частині кола (на рисунку це лампочка) не змінюється.

Отже, показаний на рис. 4.7 і 5.6 пристрій (його називають *машиною постійного струму*) є оборотним. Він може працювати як електродвигун (перетворюючи енергію електричного струму на механічну) або як генератор (перетворюючи механічну енергію на електричну).

На сучасних електростанціях зазвичай застосовують генератори змінного струму, проте принцип їх дії такий самий. Генератор отримує механічну енергію від турбіни, що має спільну з ним вісь, та віддає в електричну мережу електричну енергію. Турбіну ж може обертати вода (на гідроелектростанціях) або гаряча пара (на теплових і атомних електростанціях). На рис. 5.7 наведено фотографію генераторів, що встановлені на Дніпрогесі (Запоріжжя).

Електричну мережу автомобіля, судна або літака живить генератор, якому надає обертання тепловий двигун.

У разі потреби вироблений генератором змінний струм можна перетворити на постійний (таке перетворення називають *випрямленням змінного струму*). У великих масштабах це здійснюють для живлення двигунів постійного струму, встановлених на електротранспорті. Що ж до малих масштабів, це здійснюється в блоці живлення будь-якого комп'ютера або мобільного телефону.

Зрозуміло, що промисловий індукційний генератор нагадує зображену на рис. 5.6 модель не більше, ніж «справжній» електродвигун (див. рис. 4.8) відповідну просту модель (див. рис. 4.7). Проте принцип дії промислового зразка та моделі той самий. З кожним роком усе ширше застосовують для обертання генератора енергію вітру.



Рис. 5.7. Генератори в машинній залі Дніпрогесу



### Підбиваємо підсумки

Явище електромагнітної індукції полягає в тому, що в замкненому провідному контурі виникає струм унаслідок зміни кількості ліній магнітного поля, які пронизують цей контур. Це явище спостерігається під час змін магнітного поля або руху провідників контуру в магнітному полі. Напрямок індукційного струму можна визначити, застосовуючи закон збереження енергії.

Явище електромагнітної індукції свідчить про тісний зв'язок між електричним і магнітним полями: магнітне поле, яке змінюється з часом, породжує електричне поле.

На явищі електромагнітної індукції ґрунтується дія індукційних генераторів струму, які живлять сучасні електричні мережі. Найпростішою моделлю такого генератора є рамка, що обертається в магнітному полі.



## Контрольні запитання

1. Опишіть досліди, що дозволяють спостерігати явище електромагнітної індукції. 2. За якої умови в замкненому провідному контурі виникає індукційний струм? 3. Від чого залежить напрям індукційного струму? 4. За якої умови магнітне поле може спричинити появу електричного поля? 5. У яких дослідах

причиною виникнення індукційного струму є дія сили Лоренца на вільні заряджені частинки? 6. У яких дослідах машина постійного струму працює як генератор? як електродвигун? 7. Яке перетворення енергії відбувається в індукційному генераторі струму? 8. Наведіть приклади випрямлення змінного струму.

## Вправа № 5

1. Як зміниться напрям індукційного струму в кожному з дослідів (див. рис. 5.2, 5.3), якщо в штабових магнітів знизу буде не північний, а південний магнітний полюс?

2. Чому в досліді з «кільцями Ленца» (див. рис. 5.4) не можна застосовувати кільця та перекладину, виготовлені зі сталі?

3. На рис. 1 показано полюси електромагніту, між якими існує однорідне постійне магнітне поле; магнітні лінії вертикальні. Дротяне кільце розташоване горизонтально. Під час якого руху (у межах однорідного магнітного поля) у кільці виникне індукційний струм: а) переміщення в горизонтальному напрямі; б) переміщення у вертикальному напрямі; в) поворот навколо горизонтальної осі; г) поворот навколо вертикальної осі?

4. Усередині довгого вертикального соленоїда зі струмом уздовж його осі падає соленоїд трохи меншого діаметра, кінці обмотки якого замкнені. На яких етапах руху в цьому меншому соленоїді протікатиме індукційний струм?

5. На котушці А з осердям лежить легке металеве кільце В (рис. 2). Що спостерігатиметься після замикання ключа в колі живлення котушки? Чи залежить відповідь від напрямку струму в котушці?

6. У досліді з «кільцями Ленца» (див. рис. 5.4) експериментатор, рухаючи магніт, виконав механічну роботу. У яку форму кінцею кінцем перетворилася витрачена ним енергія?

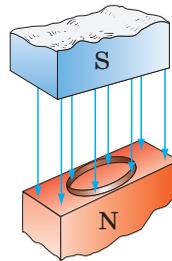


Рис. 1

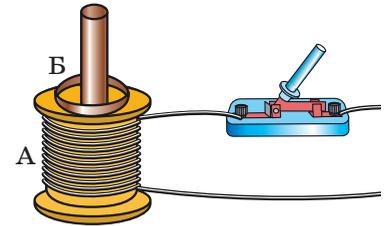


Рис. 2

## Експериментальне завдання

Візьміть мідну та пластмасову трубки однакових діаметрів завдовжки приблизно 1 м, розташуйте трубки вертикально. Спостерігайте по чергово падіння маленького сильного

магніту всередині обох трубок, виміряйте час падіння в кожному випадку. Порівняйте отримані результати. Спробуйте пояснити відмінність між ними.

**Інститут магнетизму Національної академії  
наук України та Міністерства освіти  
і науки України (Київ)**

Інститут магнетизму — один із наукових закладів, що створені вже за незалежної України (1995 року). Інститут мав поєднати функції науково-дослідної установи та вищого навчального закладу для вирішення актуальних проблем у галузі магнетизму, екології та підготовки наукових кадрів. Очолює інститут член-кореспондент Національної академії педагогічних наук *Ю. І. Горобець*, почесним директором є видатний український фізик *В. Г. Бар'яхтар*.

За роки існування інституту було здійснено дослідження різних типів хвиль (магнітонів, солітонів) у магнітних середовищах. Вивчено ефекти взаємодії між різними хвилями, розглянуто й інші проблеми сучасної фізики твердого тіла та математичної фізики. Розроблено принципи отримання магнітних носіїв з надвисокою щільністю запису інформації. Вивчено багаточастотну магнетизму, тонкі магнітні плівки та гетероструктури. Розроблено матеріали



з ефектом магнітної пам'яті форми для акустичних перетворювачів нового покоління.

Розроблено засоби для 3D-математичного моделювання, що ґрунтуються на принципах самоорганізації. Це, наприклад, 3D-модель розподілу радіоактивного забруднення місцевості з урахуванням різної вірогідності отриманих даних. Така модель може бути інструментом для більш глибокого вивчення процесів, що відбуваються, та прогнозування їх розвитку. Це дозволить приймати правильні рішення під час ліквідації наслідків глобальних катастроф, таких як Чорнобиль, що спричиняють забруднення довкілля.

**Інститут фізики конденсованих систем  
Національної академії наук України (Львів)**

Інститут створений у 1990 році на базі Львівського відділення статистичної фізики Інституту теоретичної фізики АН УРСР, хоча фактичний літопис інституту розпочався ще 1969 року. Він став першим академічним інститутом з фундаментальних досліджень із фізики на Західній Україні. З часу заснування і до травня 2006 року незмінним директором інституту був академік Ігор Рафаїлович Юхновський. Нині інститут очолює його учень — член-кореспондент НАН України Ігор Мирославович Мриглюд.

Поступово у Львові сформувалася наукова школа, основні здобутки якої — це низка нових ефективних методів статистичної фізики. Серед них метод колективних змінних і статистична теорія йонно-молекулярних систем. Розроблено оригінальні методи нерівноважної статистичної фізики, мікроскопічну теорію металів і сплавів.



Від середини 90-х років ХХ століття в інституті активно розвивають новий напрям у статистичній фізиці — комп'ютерне моделювання рівноважних та динамічних властивостей рідин, полідисперсних систем кристалів і стекол, біологічних систем.

Інститут здійснює й прикладні дослідження. Серед них — вивчення фізико-хімічних властивостей паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС, процесів гетерогенного каталізу. Ведеться розвиток і застосування сучасних інформаційних і комп'ютерних технологій.

## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ 1 «ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА»

- 1** Ви дізналися, що постійні магніти мають два типи магнітних полюсів: північний N і південний S. Між однойменними полюсами існує відштовхування, між різнойменними — притягання. Магніту лише з одним полюсом не існує.

Є багато різновидів постійних магнітів — від маленької магнітної стрілки до такого величезного магніту, як Земля. Південний магнітний полюс Землі розташований поблизу північного географічного полюса, а північний магнітний полюс — поблизу південного географічного полюса.

Між провідниками зі струмом теж існує магнітна взаємодія. Паралельні провідники притягаються, якщо напрями струмів у них однакові, та відштовхуються, якщо напрями струмів протилежні.

- 2** Ви дізналися, що магнітна взаємодія передається через магнітне поле. Магнітне поле — це форма матерії, головною ознакою якої є силова дія на рухомі заряджені частинки (а через це й на провідники зі струмом та намагнічені тіла).

Магнітне поле зручно зображувати за допомогою магнітних ліній (ліній магнітного поля). Це умовні лінії, уздовж яких у магнітному полі орієнтуються осі маленьких магнітних стрілок або залізні ошурки.

За напрям магнітних ліній приймають напрям, який вказує північний полюс магнітної стрілки. Лінії магнітного поля магніту виходять із північного полюса цього магніту і входять у південний. Лінії магнітного поля завжди замкнені.

Магнітні властивості котушки зі струмом (соленоїда) практично не відрізняються від магнітних властивостей штабового магніту.

- 3** Ви дізналися, що головною характеристикою магнітного поля в кожній точці є магнітна індукція  $\vec{B}$ . Це векторна величина, за напрям магнітної індукції в кожній точці поля приймають напрям лінії магнітного поля в цій точці. Що більшим є модуль магнітної індукції, то ближче одна до одної проходять лінії магнітного поля.

Одиниця магнітної індукції в СІ — 1 тесла  $\left(1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}\right)$ .

Напрямок ліній магнітного поля провідника зі струмом залежить від напрямку струму в провіднику. Зв'язок між цими напрямками встановлює правило свердлика (або, що те ж саме, правило правої руки).

- 4** Ви переконалися, що з боку магнітного поля можуть виникати сили.

## Магнітне поле

На провідник зі струмом діє сила Ампера	На рухому заряджену частинку діє сила Лоренца
Напрямок сили визначаємо за правилом лівої руки	Напрямок сили визначаємо за правилом лівої руки
Формула сили $F_A = BIl \cdot \sin \alpha$	Формула сили $F_L =  q  Bv \cdot \sin \alpha$
Орієнтує рамку зі струмом у магнітному полі	Не виконує механічної роботи, змінює тільки напрям руху частинок
Застосовують у електродвигунах, електровимірвальних приладах	Застосовують у кільцевих прискорювачах заряджених частинок

**5** Ви познайомилися з гіпотезою Ампера: магнітні властивості будь-якого тіла визначаються мікроскопічними замкненими електричними струмами всередині нього. Кожний такий струм — це «елементарний магнітик». У немагніченому тілі «елементарні магнітики» орієнтовані хаотично, тому їх магнітні поля компенсують одне одне. Намагнічування тіла пояснюється упорядкованою орієнтацією цих «елементарних магнітиків».

Речовина може посилювати або послабляти зовнішнє магнітне поле. Магнітне поле посилюється у феромагнетиках (у багато разів) і в парамагнетиках (майже непомітно). Магнітне поле послаблюється в діамагнетиках.

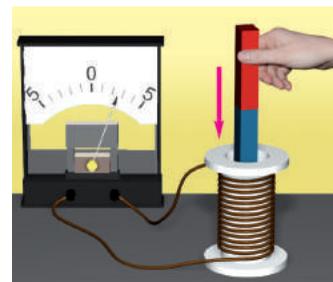
Феромагнетики можуть зберігати намагніченість навіть за відсутності зовнішнього магнітного поля (тоді це постійні магніти). Магнітні властивості феромагнетиків послаблюються з підвищенням температури. За температури Кюрі речовина взагалі втрачає феромагнітні властивості (наприклад, постійний магніт розмагнічується).

Котушку з феромагнітним осердям називають електромагнітом. Магнітну дію електромагніту можна регулювати, змінюючи силу струму у витках котушки. Завдяки цьому електромагніти широко застосовують у техніці.

**6** Ви дізналися про явище електромагнітної індукції: у замкненому провідному контурі виникає струм унаслідок зміни кількості ліній магнітного поля, які пронизують цей контур.

Явище електромагнітної індукції спостерігається під час змін магнітного поля або руху провідників контуру в магнітному полі. Це явище свідчить про тісний зв'язок між електричним і магнітним полями: магнітне поле, яке змінюється з часом, породжує електричне.

На явищі електромагнітної індукції ґрунтується дія індукційних генераторів струму, які забезпечують людство електроенергією. Найпростішою моделлю такого генератора є рамка, що обертається в магнітному полі.



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ 1 «ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА»

- 1** (1 бал) Кількість магнітних полюсів магніту може дорівнювати:

**а)** тільки 1;                      **в)** не менше ніж 2;  
**б)** тільки 2;                      **г)** не більше ніж 2.
- 2** (1 бал) Однорідне магнітне поле існує:

**а)** навколо штабового магніту;  
**б)** усередині довгої котушки зі струмом;  
**в)** навколо прямого провідника зі струмом;  
**г)** навколо дугоподібного магніту.
- 3** (1 бал) Результати досліду Ерстеда свідчать, що:

**а)** лінії магнітного поля замкнені;  
**б)** магніт діє на провідник зі струмом;  
**в)** магнітне поле є формою матерії;  
**г)** провідник зі струмом створює магнітне поле.
- 4** (1 бал) Правило правої руки дозволяє визначити напрям:

**а)** магнітних ліній поля провідника зі струмом;  
**б)** сили Ампера, що діє на провідник зі струмом;  
**в)** індукційного струму в замкненому контурі;  
**г)** сили Лоренца, що діє на рухому заряджену частинку.
- 5** (2 бали) Сила струму в прямолінійному провіднику завдовжки 50 см дорівнює 1,5 А. Провідник перебуває в магнітному полі з магнітною індукцією 0,2 Тл. Максимальна сила Ампера, що може діяти на цей провідник, дорівнює:

**а)** 0,15 Н;                      **б)** 0,6 Н;                      **в)** 3,75 Н;                      **г)** 15 Н.
- 6** (2 бали) Частинка із зарядом  $4,8 \cdot 10^{-19}$  Кл рухається в магнітному полі з індукцією 0,5 Тл під прямим кутом до ліній магнітного поля зі швидкістю 2000 км/с. Сила Лоренца, що діє на частинку, дорівнює:

**а)**  $1,2 \cdot 10^{-14}$  Н;    **б)**  $4,8 \cdot 10^{-14}$  Н;    **в)**  $1,2 \cdot 10^{-13}$  Н;    **г)**  $4,8 \cdot 10^{-13}$  Н.
- 7** (2 бали) Магнітне поле електромагніту посилиться, якщо:

**а)** нагріти його осердя;  
**б)** зменшити силу струму в котушці;  
**в)** збільшити кількість витків у котушці;  
**г)** видалити осердя з котушки.
- 8** (2 бали) Індукційний струм у котушці із замкненими кінцями тече, коли:

**а)** усередині котушки перебуває магніт;  
**б)** котушка перебуває в постійному зовнішньому магнітному полі;  
**в)** з котушки витягають магніт;  
**г)** котушка перебуває в постійному зовнішньому електричному полі.
- 9** (3 бали) Визначте напрям сили Ампера, що діє на провідник зі струмом (рис. 1).

- 10** (3 бали) На рис. 2 показано траєкторію руху електрона в однорідному магнітному полі та напрям його руху. Визначте напрям магнітної індукції поля.

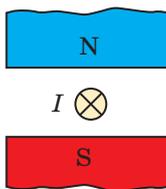


Рис. 1



Рис. 2

- 11** (4 бали) Між двома паралельними провідниками тролейбусної лінії існує магнітна взаємодія. Який характер має ця взаємодія — притягання чи відштовхування? Обґрунтуйте свою відповідь.

- 12** (4 бали) На рис. 3 показано положення стійкої рівноваги рамки зі струмом у магнітному полі. Визначте, які магнітні полюси розташовані праворуч і ліворуч від рамки. Обґрунтуйте свою відповідь.

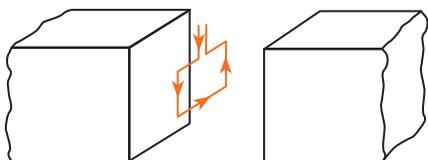


Рис. 3

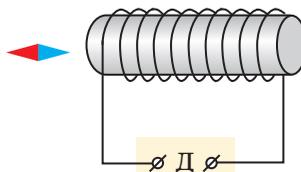


Рис. 4

- 14** (5 балів) Електромагніт  $E$  живиться від джерела струму  $D$ , напруга на полюсах якого є сталю. За якого положення перемикача (рис. 5) електромагніт зможе утримувати сталевий тягарець максимальної маси?

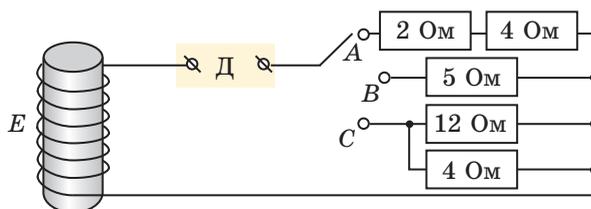


Рис. 5

**!** Звірте ваші відповіді з наведеними в кінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму поділіть на три. Одержаний результат відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



Тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою ви знайдете на електронному освітньому ресурсі «Інтерактивне навчання».

Дослідження істориків свідчать, що людство було знайоме з постійними магнітами вже у V–VI століттях до нашої ери. Історії про магніти можна знайти в працях Піфагора, Арістотеля, Гіппократа, Платона... Нині ж людина має справу із сучасними магнітними технологіями починаючи з раннього дитинства. Адже в нібито простих іграшках і дитячих конструкторах (на перший погляд це можуть бути звичайнісінькі кульки) зазвичай застосовують маленькі та дуже сильні неодимові магніти (вони виготовлені зі сплаву неодиму, бору та заліза). А які чудові конструкції виходять із цих магнітів!

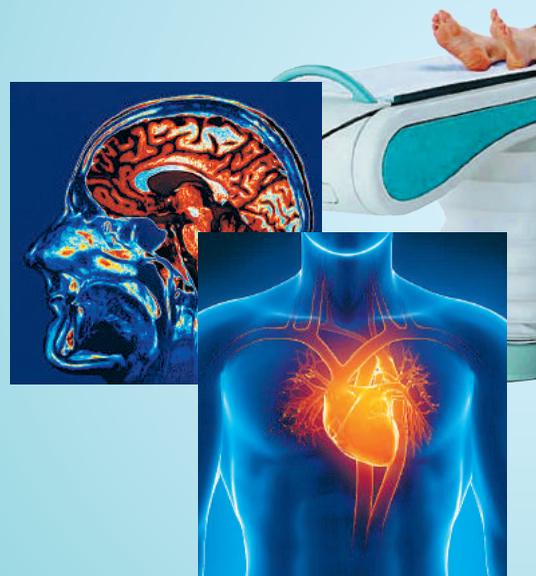


Неодимові магніти були створені в Японії 1982 року. Зрозуміло, що їх застосування не обмежується дитячими іграшками. Такі магніти широко застосовують і в «дорослих» виробках — у комп'ютерах, динаміках, магнітно-резонансних томографах.



Неодимові магніти дуже стійкі та надійні: протягом 10 років вони втрачають лише 1–2 % своєї намагніченості, тому термін їх служби може бути й 100 років. Слід лише враховувати, що температура Кюрі для таких магнітів становить від 300 до 380 °C (за такої температури магніт повністю розмагнічується), максимальна ж робоча температура коливається від 80 до 220 °C (залежно від марки магнітного матеріалу).

З магнітними технологіями пов'язані багато які з досягнень медицини, а ще більше — сподівання на швидкий прогрес методів діагностики та лікування захворювань. Розповімо про магнітно-резонансну томографію (МРТ) — це метод дослідження внутрішніх органів і тканин людини. У ньому застосовують явище ядерного магнітного резонансу, відкрите 1938 року.



Магнітне поле може допомогти й у лікуванні. Розповімо лише про одне із застосувань магнітних наночастинок (тобто дуже малих магнітних частинок, один із розмірів яких лежить в інтервалі від 1 до 100 нм). Нагадаємо, що 1 нанометр (1 нм) становить мільярдну частку метра і лише в кілька разів перевищує характерний розмір атома. Клітини живого організму мають типовий розмір 10 мкм, тобто 10 000 нм. Наночастинки ж близькі за розмірами до внутрішньоклітинних об'єктів і вірусів (від 20 до 450 нм). Наночастинки за розмірами та масою є проміжними між окремими молекулами та живими клітинами. За таких розмірів у речовини проявляються нові властивості. Наприклад, практично немагнітне зазвичай золото стає магнітним.

Важлива перевага магнітних наночастинок — можливість безконтактного керування їх рухом всередині організму за допомогою зовнішнього магнітного поля. Крім того, магнітні наночастинки зі спеціальним покриттям можна міцно зв'язати з червоними кров'яними тільцями, бактеріями,

капсулами з ліками. Тому можна забезпечити, наприклад, адресне транспортування ліків. Магнітні наночастинки можуть точно доставити капсулу, вміст якої вбиває ракові клітини, або атоми радіонукліда до пухлини. Тим самим значно зменшується токсична дія ліків на інші органи.

Магнітні наночастинки можуть бути дуже ефективним «транспортним засобом» для ліків. Адже навіть якщо загальна маса наночастинок дорівнює масі краплі води, вони можуть мати загальну площу поверхні, що перевищує площу спортивної зали.



Цей метод, на відміну від рентгівського, є безпечним для людини. МРТ ґрунтується на різному резонансному поглинанні електромагнітного випромінювання різними тканинами в сильному магнітному полі. Відмінності в поглинанні випромінювання дозволяють після комп'ютерної обробки створювати на екрані візуальну картину тіла пацієнта. МРТ дозволяє отримати зображення патологічного процесу в різних площинах. Цей метод краще за інші візуалізує структури головного мозку, дозволяє діагностувати онкологічні захворювання, вивчити стан і порушення кровообігу, зокрема через тканини мозку та печінки.

Відкриття ядерного магнітного резонансу та винайдення методу МРТ були відзначені Нобелівськими преміями (відповідно Нобелівська премія з фізики 1944 року та Нобелівська премія з фізіології та медицини 2003 року).

## ОРІЄНТОВНІ ТЕМИ ПРОЕКТІВ

1. Магнітні матеріали та їх використання.
2. Магнітний запис інформації.
3. Застосування магнітного поля для діагностики та лікування захворювань.
4. Магнітне поле Землі та магнітні аномалії.
5. Швидкісні поїзди на магнітному підвісі.

## ТЕМИ РЕФЕРАТІВ І ПОВІДОМЛЕНЬ

1. Вплив магнітного поля на здоров'я та самопочуття людини.
2. Діамагнітні властивості надпровідників.
3. Електромагнітні гармати: проекти та їх реалізація.
4. Пошуки магнітного монополя.
5. Надсильні магнітні поля на Землі та у Всесвіті.

## ТЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Вивчення взаємодії магнітних поплавків на воді.
2. Конструювання магнітного підвісу.
3. Вивчення залежності сили взаємодії між електромагнітами від відстані.
4. Дослідження загасання коливань провідного кільця в магнітному полі.
5. Відновлення постійних магнітів.

*Перед початком роботи над проектом, рефератом, проведенням експериментального дослідження уважно ознайомтеся з порадами на с. 278–279 підручника.*