

І. М. Гельфгат

ФІЗИКА

ПРОФІЛЬНИЙ РІВЕНЬ

ЗА НАВЧАЛЬНОЮ ПРОГРАМОЮ
АВТОРСЬКОГО КОЛЕКТИВУ
ПІД КЕРІВНИЦТВОМ ЛОКТЕВА В. М.

ПІДРУЧНИК ДЛЯ 11 КЛАСУ
ЗАКЛАДІВ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ

ХАРКІВ
ВИДАВНИЦТВО «РАНОК»
2019

УДК [53:37.016] (075.3)
Г32

Ілюстрації художника *Володимира Хорошенка*

Гельфгат І. М.
Г32 Фізика (профільний рівень, за навчальною програмою авторського колек-
тиву під керівництвом Локтева В. М.) : підруч. для 11 кл. закл. загал. серед.
освіти / І. М. Гельфгат. — Харків : Вид-во «Ранок», 2019. : іл., фот.

ISBN

УДК [53:37.016] (075.3)



Інтернет-підтримка
Електронні матеріали
до підручника розміщено на сайті
interactive.ranok.com.ua

ISBN

© Гельфгат І. М., 2019
© Хорошенко В. Д., ілюстрації, 2019
© Нестеренко І. І., обкладинка, 2019
© ТОВ Видавництво «Ранок», 2019

ЗМІСТ

Розділ 1. Електродинаміка

§ 1. Електричний струм. Робота та потужність струму.	8
§ 2. Закон Ома для повного кола. Правила Кірхгофа	21
§ 3. Електричний струм у різних середовищах	29
§ 4. Електричний струм у вакуумі та напівпровідниках. Термоелектричні явища	38
§ 5. Магнітне поле.	50
§ 6. Заряджена частинка та рамка зі струмом у магнітному полі	
§ 7. Магнітні властивості речовини.	
§ 8. Електромагнітна індукція. Електромагнітне поле	
Підбиваємо підсумки розділу 1.	
Завдання для самоперевірки до розділу 1	
Енциклопедична сторінка	
Орієнтовні теми проектів.	
Теми рефератів і повідомлень	
Теми експериментальних досліджень	

Розділ 2. Електромагнітні коливання та хвилі

§ 9. Вільні електромагнітні коливання.	
§ 10. Змінний струм. Автоколивальні системи	
§ 11. Виробництво та передача змінного струму	
§ 12. Електромагнітні хвилі.	
§ 13. Радіохвилі та їх застосування	
Підбиваємо підсумки розділу 2.	
Завдання для самоперевірки до розділу 2	
Енциклопедична сторінка	
Орієнтовні теми проектів.	
Теми рефератів і повідомлень	
Теми експериментальних досліджень	

Розділ 3. Оптика

§ 14. Світлові хвилі та геометрична оптика	
§ 15. Отримання зображень. Лінзи та оптичні системи	
§ 16. Інтерференція світла та її застосування	
§ 17. Дифракція світла	
§ 18. Спектроскоп. Поляризація світла	
§ 19. Світлові кванти	
§ 20. Фотон. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла	
§ 21. Шкала електромагнітних хвиль	
Підбиваємо підсумки розділу 3.	
Завдання для самоперевірки до розділу 3	
Енциклопедична сторінка	
Орієнтовні теми проектів.	
Теми рефератів і повідомлень	
Теми експериментальних досліджень	

Розділ 4. Атомна та ядерна фізика

§ 22. Ядерна модель атома. Квантові постулати Бора. Лінійчасті спектри	
§ 23. Люмінесценція. Лазери та мазери	
§ 24. Гіпотеза де Бройля. Принцип невизначеності	
§ 25. Принцип Паулі та будова атомів. Рентгенівські спектри	
§ 26. Будова ядра. Радіоактивність	
§ 27. Ядерні реакції. Ядерний реактор	
§ 28. Елементарні частинки	
Підбиваємо підсумки розділу 4.	
Завдання для самоперевірки до розділу 4	
Енциклопедична сторінка	
Орієнтовні теми проектів.	
Теми рефератів і повідомлень	
Теми експериментальних досліджень	
Відповіді до вправ і завдань для самоперевірки	
Алфавітний покажчик	

Дорогі друзі!

На вас чекає ще один, тепер уже останній, рік шкільного навчання. Сподіваємося, що найцікавішим для вас буде курс фізики на профільному рівні.

Вивчаючи його, ви поглибите свої знання щодо постійного струму, дізнаєтеся про магнітні явища, змінний струм, хвильові та квантові властивості світла. На вас чекає знайомство з основами квантової теорії будови атома та ядра, принципом дії лазерів.

Хотілося б поділитися з вами захопленням досягненнями фізичної науки. Шлях до них торували геніальні вчені та рядові науковці, 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.

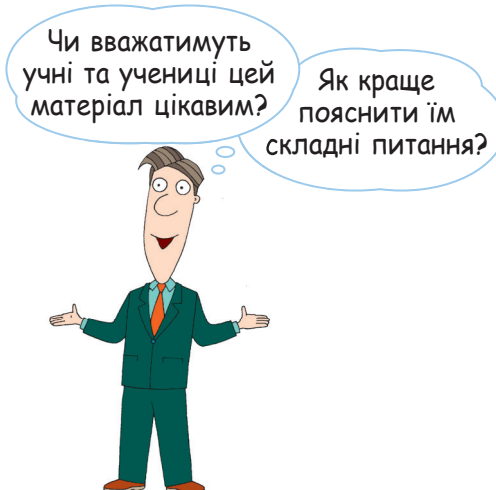
Рубрика «*Вправа*» зробить вашу подорож у дивовижний світ фізики ще цікавішою, адже ви зможете застосувати отримані знання на практиці. Завдання цієї рубрики диференційовані за рівнями складності — від доволі простих, що потребують лише уважності, до творчих, розв'язуючи які, слід виявити кмітливість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

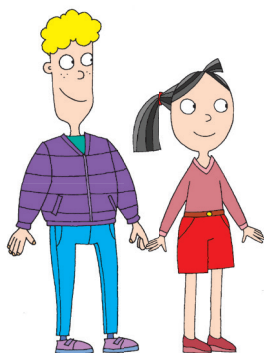
Серед завдань є такі, що слугують для повторення матеріалу, який ви вже вивчали в курсах природознавства, математики або на попередніх уроках фізики.

Профільний курс фізики 11 класу об'ємний і змістовний. Тому під час написання кожного рядка цього підручника автор подумки вів діалог з усіма вами.

Природа проста
і не розкошує
зайвими
причинами
речей.

І. Ньютон





От таким чином на сторінках підручника з'явилися ваші ровесники і ровесниці. Вони ставлять запитання, висловлюють сумніви, задоволення або незадоволення... Проте головна оцінка — за вами.

Фізика — наука насамперед експериментальна, тому в підручнику на вас очікують *експериментальні завдання*. Виконуйте їх — і ви будете краще розуміти 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.

Для тих, хто хоче знати більше про розвиток фізичної науки й техніки в Україні та світі, знайдеться чимало цікавого й корисного в рубриках «*Навколо фізики*», «*Фізика і техніка в Україні*», «*Енциклопедична сторінка*». Найскладнішу частину тексту, яку призначено для найбільш зацікавленого фізикою читацького кола, подано під рубриками «*Дізнаємося більше*» і «*Розберемося глибше*».

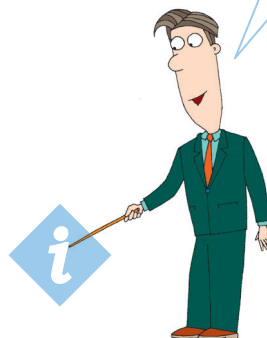
У підручнику використано позначки, які допоможуть вам орієнтуватися в навчальному матеріалі.

Зверніть особливу увагу на посилання , що рекомендує скористатися інтернет-підтримкою. На електронному освітньому ресурсі «*Інтерактивне навчання*» (interactive.ranok.com.ua) ви знайдете матеріали, що є невід'ємною частиною підручника, але з технічних причин не ввійшли до «паперової» версії. Крім того, тут розміщено відеоролики, що показують у дії той чи інший фізичний дослід або процес; інформацію, яка допоможе вам у виконанні завдань; тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою; корисні поради, що стануть вам у пригоді під час створення і презентації навчальних проектів.

Завдання
на повторення



Інтернет-підтримка

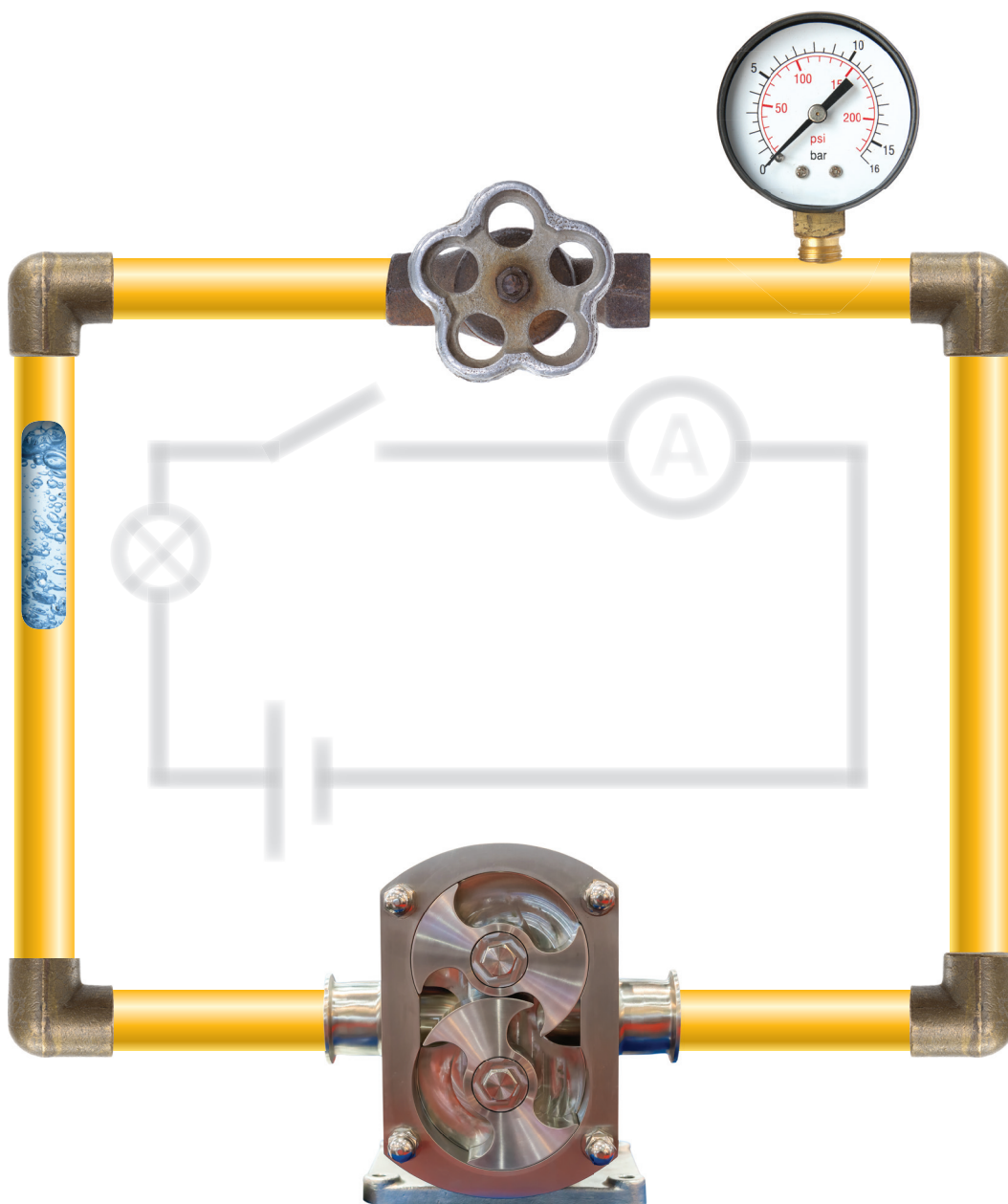


Цікавої подорожі
світом фізики,
нехай вам щастить!



Розділ 1

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА



§ 1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. РОБОТА ТА ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ

Електричним струмом називають упорядкований (напрямлений) рух заряджених частинок.



Рис. 1.1. Дії електричного струму

1 Електричний струм. Джерела струму. Електричне коло

З курсу фізики 8 класу ви вже дізналися про електричний струм. Нагадаємо коротко про основні поняття та відомі вам закономірності.

Вільні заряджені частинки в провідниках безупинно й хаотично рухаються. Такий рух не спричиняє якогось перенесення заряду: якщо подумки провести поперечний переріз металевго дроту, то електрони рухатимуться крізь цей переріз однаково часто в обидва боки. Якщо ж вільним зарядженим частинкам надати ще й упорядкованого руху, то через будь-який поперечний переріз провідника переноситиметься заряд.

Електричний струм неможливий без *вільних* заряджених частинок. Тому електричне коло має бути *замкненим* (будь-який розрив кола — це ділянка, заповнена повітрям або іншим діелектриком, у яких вільні заряджені частинки практично відсутні).

Електричному струму приписують певний напрям: *за напрям струму приймають напрям руху позитивно заряджених частинок*.

Про існування електричного струму можна дізнатися, спостерігаючи *дії електричного струму*. Найчастіше називають три такі дії (рис. 1.1).

Теплова дія струму. Провідник, у якому тече струм, нагрівається. Цю дію струму використовують в електричних чайниках, бойлерах, електричних обігрівачах тощо.

Хімічна дія струму. Струм може спричинити хімічні перетворення речовини. Наприклад, з розчину мідного купоросу під дією струму виділяється чиста мідь.

Магнітна дія струму. Коли в провіднику виникає електричний струм, розташована поблизу магнітна стрілка повертається в певному напрямі (це знаменитий досвід Ерстеда), а на розташований поблизу інший провідник зі струмом діє певна сила. Саме на цій дії струму ґрунтується дія будь-якого електричного двигуна та електромагніту, а також багатьох електровимірювальних приладів.

Можна згадати також про *світлову дію* електричного струму. Ідеться не про світіння лампи розжарення, яке виникає через нагрівання її волоска. Світіння може виникати й без суттєвого нагрівання провідника. Нагадаємо хоча б про світлодіоди, які зараз дедалі ширше замінюють традиційні джерела світла.

Чи завжди можна одночасно спостерігати всі перелічені дії електричного струму? Звісно, що ні. Теплова дія струму спостерігається майже в усіх провідниках (за винятком *надпровідників*, відкритих на початку ХХ століття). Хімічна дія світла зовсім не спостерігається в металах (металевий провідник не зазнає хімічних змін навіть після кількох десятиліть використання). Лише магнітна дія струму спостерігається в будь-якому провіднику, тобто саме вона може бути надійною ознакою існування струму.

Головною кількісною характеристикою електричного струму є *сила струму*.

Коротко кажучи, сила струму — це заряд, який переносить струм за одиницю часу.

Одиницею сили струму в СІ є *ампер* (1 А). Ампер є однією з основних одиниць СІ (у листопаді 2018 року Міжнародний комітет мір і ваг прийняв уточнені означення кількох одиниць СІ, у тому числі й ампера). Кулон же згідно з означенням дорівнює заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за 1 с, якщо сила струму дорівнює 1 А (тобто $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$).

Напрявлений рух вільних заряджених частинок не може виникнути «безпричинно». Має існувати сила, яка «штовхатиме» всі ці частинки в одному напрямі (якщо вони мають заряди одного знаку). Зазвичай таку силу створює електричне поле. Ви знаєте, що електричне поле створюють електричні заряди. Які ж саме заряди?

Уявіть, що ви зарядили дві металеві кулі зарядами протилежних знаків ($+q$ і $-q$). Ці заряди створюють навколо себе електричне поле. Якщо з'єднати кулі металевим провідником, то в ньому під дією електричного поля виникне напрямлений рух вільних електронів, тобто електричний струм (рис. 1.2).

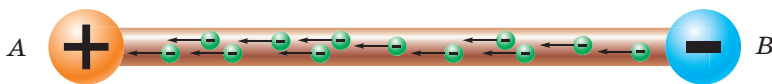
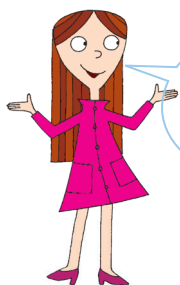


Рис. 1.2. Електричне поле спричиняє короточасний струм

Завдяки цьому кулі швидко розрядяться, електричне поле зникне, а разом із ним зникне й електричний струм. Щоб струм був постійним, треба безперервно поновлювати заряди куль.



От якщо хтось щосекунди «транспортуватиме» мільярди мільярдів електронів з кулі А на кулю В, як на рис. 1.3...

Зверніть увагу!

- Оскільки електрони мають негативний електричний заряд, у металах напрям упорядкованого руху вільних електронів і напрям струму протилежні. Це не дуже зручно, але хто ж міг у ХVІІІ столітті знати про існування електронів? А термінологію з тих часів не змінювали.

Сила струму I дорівнює відношенню електричного заряду q , перенесеного через поперечний переріз провідника за проміжок часу t , до цього проміжку часу: $I = \frac{q}{t}$. Якщо сила струму з часом не змінюється, струм називають *постійним*.

Навколо фізики

- Цікаво порівняти швидкості хаотичного та направленого руху вільних електронів в електричній мережі вашої квартири. Виявляється, середній модуль швидкості хаотичного руху електронів у мідному провіднику перевищує 1000 км/с. А коли ви ввімкнули світло в кімнаті, до цього хаотичного руху «додається» напрямлений рух, швидкість якого менша від 0,1 мм/с. Але саме ця нібито «крихітна» зміна характеру руху вільних електронів спричиняє такі важливі для нас наслідки.



Цей «хтось» здійснюватиме розділення зарядів (позитивних і негативних). От тоді струм дійсно буде постійним. Саме таку роль відіграє в електричному колі **джерело струму**.

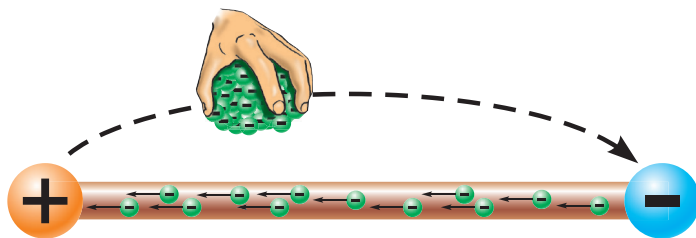


Рис. 1.3. Щоб підтримувати постійний струм, потрібне розділення зарядів

Джерело струму здійснює розділення позитивних і негативних зарядів. Заряди накопичуються відповідно на позитивному та негативному полюсах джерела струму. У зовнішньому колі (поза джерелом струму) струм тече від позитивного полюса джерела струму до негативного.

Отже, є дві умови існування електричного струму:

- наявність вільних заряджених частинок;
- існування сили, що спричиняє їх напрямлений рух (така сила виникає завдяки джерелу струму).

У будь-якому джерелі струму відбувається перетворення енергії якогось типу (механічної, світлової, внутрішньої) на енергію електричного струму. З курсу фізики 8 і 9 класів ви вже знайомі з хімічними джерелами струму та принципом дії генераторів електричного струму на електростанціях.

Якщо постійний струм у ділянці кола зумовлений тільки дією постійного (стаціонарного) електричного поля, то таку ділянку кола називають **однорідною**. Між кінцями такої ділянки кола має існувати різниця потенціалів (напруга) U . Очевидно, що між значеннями сили струму та напруги існує зв'язок. Який саме — це вже залежить від провідників, з яких складається ділянка кола.

Залежність сили струму від напруги $I(U)$ для певного провідника називають **вольт-амперною характеристикою** цього провідника. Ви знаєте, що найпростіший вигляд ця залежність має для металевих провідників і електролітів (рис. 1.4): сила струму змінюється прямо пропорційно напрузі (це твердження називають **законом Ома для однорідної ділянки кола**).

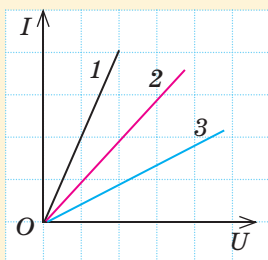


Рис. 1.4. Приклади вольт-амперних характеристик провідників

Формула залежності $I(U)$ має вигляд $I = \frac{U}{R}$.

Величину R називають **електричним опором** провідника (часто для стислості — просто **опором**). Чим більший опір, тим менша сила струму за тієї самої напруги. Отже, повертаючись до рис. 1.4, ми можемо стверджувати, що $R_1 < R_2 < R_3$.

Одиницею електричного опору в СІ є ом (1 Ом). 1 Ом — це опір провідника, у якому тече струм 1 А за напруги 1 В

$$\left(1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}} \right).$$

Опір провідника прямо пропорційний його довжині l та обернено пропорційний площі S його поперечного перерізу (ми розглядатимемо тільки провідники циліндричної форми). Залежність електричного опору від розмірів провідника має вигляд $R = \rho \frac{l}{S}$, де ρ — **питомий опір матеріалу провідника** (див., наприклад, табл. 1.1).

У СІ одиниця питомого опору $[\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Це опір провідника завдовжки 1 м площею поперечного перерізу 1 м². Навряд чи хто бачив провідник таких розмірів... Застосовуючи цю одиницю, потрібно не забути виразити площу поперечного перерізу провідника у квадратних метрах.

Таблиця 1.1

Питомий опір ρ провідників за температури 20 °С

Речовина	ρ , $10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Алюміній	2,8
Вольфрам	5,5
Вугілля	4000
Константан	50
Мідь	1,7
Нікелін	42
Ніхром	110



Оце так! Метали та сплави за питомим опором можуть відрізнятися значно більше, ніж за густиною — ніхром і мідь відрізняються у 65 разів! Не кажучи вже про вугілля...

Рис. 1.5 допоможе вам пригадати часто вживані в електричних схемах позначення.

Зверніть увагу!

- Опір провідника є сталим лише за незмінних умов, у яких перебуває провідник. Опір (як і інші фізичні характеристики матеріалу) залежить від температури, тиску тощо. Найбільш помітною є залежність опору від температури. Опір металів збільшується з підвищенням температури — наприклад, опір волоска лампи розжарення за робочої температури більш ніж у 10 разів перевищує опір того самого волоска за кімнатної температури. А от опір електролітів із підвищенням температури зменшується.

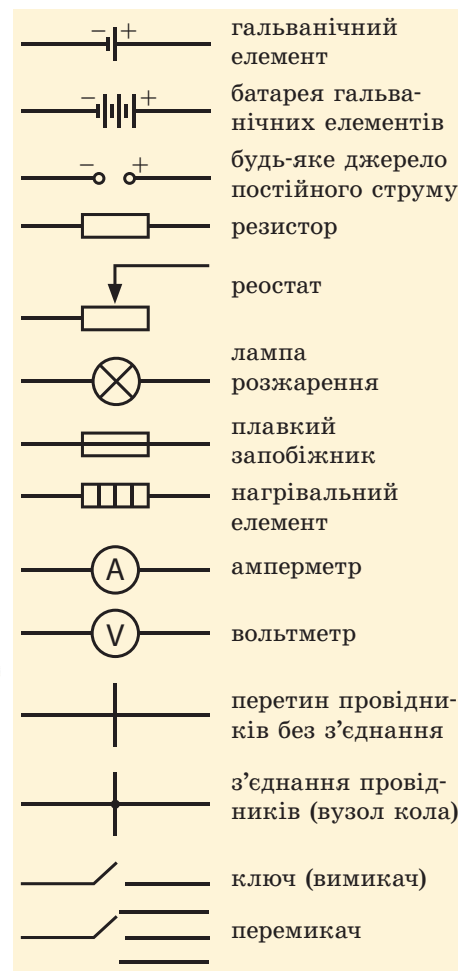


Рис. 1.5. Позначення в електричних схемах

Зверніть увагу!

- Нагадаємо, що тіло людини є провідником — саме тому електричний струм небезпечний для нас. Опір тіла людини залежить від багатьох чинників (він є найбільшим, коли шкіра суха та чиста). У практичних розрахунках з електробезпеки, розглядаючи найбільш несприятливі умови, опір тіла людини вважають рівним 1 кОм; проте цей опір може й набагато перевищувати 100 кОм.



2 Різні типи з'єднань провідників

Нагадаємо спочатку про найпростіші з'єднання — *по-слідкове* та *паралельне*.

Послідовне з'єднання

Ідеться про ділянку кола без розгалужень (рис. 1.6).

У цьому випадку *сила струму в усіх поперечних перерізах кола* однакова (це випливає із закону збереження електричного заряду: з кожної ділянки кола щосекунди має витікати саме такий заряд, який до неї втікає). Тут є аналогія з рухом води по трубі: якщо труба не має розгалужень (та отворів), крізь кожний її поперечний переріз щосекунди проходить одна й та сама кількість води. Отже, для послідовного з'єднання сила струму в усіх провідниках однакова: $I_1 = I_2 = \dots = I_n$.

Що ж до напруги, то нагадаємо: вона чисельно дорівнює роботі електричного поля з перенесення одиничного позитивного заряду відповідною ділянкою кола. Якщо заряд *попередньо* проходить крізь резистори 1, 2, ..., n , то загальна робота дорівнює сумі робіт на кожному відрізку шляху. Отже, $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$.

Послідовно з'єднані провідники можна подумки замінити одним «еквівалентним» провідником, опір якого

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + U_2 + \dots + U_n}{I} = \frac{U_1}{I_1} + \frac{U_2}{I_2} + \dots + \frac{U_n}{I_n} = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

Загальний опір послідовної ділянки кола завжди більший, ніж опір будь-якого окремого провідника. Із закону

Ома випливає також співвідношення $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$, тобто на-

пруга «розподіляється» між ділянками кола прямо пропорційно опорів цих ділянок.

Послідовне з'єднання має істотні недоліки: якщо виходить з ладу один із провідників, то коло розривається й струм припиняється в усьому колі. Крім того, напруга на елементах кола різна й залежить від того, які ще елементи входять до цього кола.

Тому в техніці й побуті значно ширше використовують інше з'єднання.

Паралельне з'єднання

Для такого з'єднання (рис. 1.7) напруга на будь-якому провіднику дорівнює різниці потенціалів між точками A і B . Отже, напруга на всіх провідниках однакова: $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$. А от сила струму, як випливає із закону збереження заряду, дорівнює сумі сил струму в усіх провідниках: $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$. Щоб знайти загальний опір R такого кола, підставимо в цю формулу співвідношен-

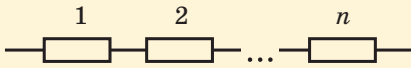


Рис. 1.6. Послідовне з'єднання провідників

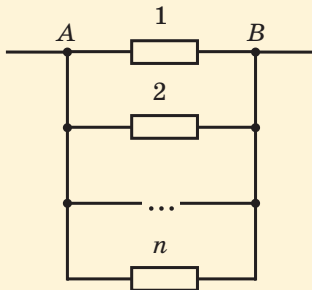


Рис. 1.7. Паралельне з'єднання провідників

ня $I = \frac{U}{R}$, $I_1 = \frac{U}{R_1}$ тощо. Отримаємо $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ (для двох провідників $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$). Зазначимо, що загаль-

ний опір паралельного кола менший від опору будь-якого провідника. Це й зрозуміло: приєднавши якийсь провідник паралельно, ми не зменшуємо силу струму через інші ділянки, а створюємо *новий* «шлях» для струму.

Із закону Ома випливає, що $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ (сила струму «розподіляється» між ділянками кола обернено пропорційно опору цих ділянок).

Споживачі струму у вашій квартирі* з'єднані саме паралельно. Таке з'єднання має багато переваг: вихід із ладу одного з приладів не заважає працювати іншим; крім того, на всіх приладах одна й та сама стандартна напруга (в Україні це 220 В).

Під час вимірювання сили струму й напруги ми теж використовуємо розглянуті вище з'єднання. Так, для вимірювання сили струму в резисторі сила струму в амперметрі має бути такою самою, як у резисторі. Отже, амперметр слід приєднувати послідовно до резистора (рис. 1.8).

Приєднання амперметра для вимірювання сили струму не повинно суттєво змінювати цю силу струму. Отже, опір ділянки кола після приєднання амперметра ($R + R_A$) має бути дуже близьким до опору R резистора, а задля цього опір амперметра має бути набагато меншим від опору резистора: $R_A \ll R$. Такий малий опір робить амперметр дуже «вразливим»: амперметр не можна приєднувати до джерела струму «безпосередньо», без якихось споживачів струму, без «навантаження», бо через малий опір сила струму в колі буде занадто великою (скоріше за все, вийде з ладу саме амперметр).

Під час вимірювання напруги на резисторі за допомогою вольтметра напруга на вольтметрі має бути такою самою, як на резисторі. Тому вольтметр слід приєднувати до резистора паралельно (рис. 1.9).

Загальний опір ділянки кола $R_{\text{дл}}$ і в цьому випадку не має суттєво відрізнятися від опору резистора. Зі співвідношення $\frac{1}{R_{\text{дл}}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_V}$ випливає, що $R_V \gg R$. Отже, опір вольтметра має бути дуже великим. Тому його можна приєднувати безпосередньо до джерела струму (зрозуміло, за відповідної напруги).

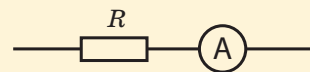


Рис. 1.8. Приєднання амперметра до резистора

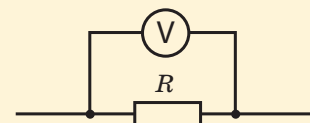


Рис. 1.9. Приєднання вольтметра до резистора

* У техніці та побуті використовують не постійний струм, а змінний. Проте наші висновки лишаються справедливими й для змінного струму.



Рис. 1.10. Цифрові мультиметри

Навколо фізики

Нині для електричних вимірювань у техніці та побуті дедалі ширше застосовують універсальні електронні прилади, зокрема цифрові мультиметри (рис. 1.10). Залежно від положення перемикача такий прилад миттєво «перетворюється» на амперметр, вольтметр або інший електровимірювальний прилад з потрібною межею вимірювань. Результати вимірювань не треба визначати за якоюсь шкалою, вони з'являються на табло у вигляді «готового» числа.

Найпростішими з розгалужених електричних кіл є комбіновані — такі, що зводяться до певних комбінацій послідовних і паралельних кіл. Нижче в цьому параграфі ми розглянемо приклади розрахунків комбінованих кіл.

3 Розширення меж вимірювання амперметра або вольтметра

Чи можна виміряти за допомогою шкільного амперметра з межею вимірювань 2 А силу струму, яка може сягати, наприклад, 3 А? Виявляється, можна. Якщо приєднати паралельно до амперметра додатковий провідник (його називають **шунтом**, а відповідну процедуру — **шунтуванням**), то через амперметр протікатиме лише частина загальної сили струму (рис. 1.11, а).

Якщо, наприклад, опір шунта $R_{\text{ш}}$ дорівнюватиме опорі амперметра R_A , то це буде половина. Отже, для визначення загальної сили струму потрібно буде подвоїти показання амперметра. У загальному випадку $\frac{I_{\text{ш}}}{I_A} = \frac{R_A}{R_{\text{ш}}}$, тому загальна сила струму $I = I_A + I_{\text{ш}}$ перевищує силу струму через амперметр у $n_A = \frac{R_A}{R_{\text{ш}}} + 1$ разів. Саме цей коефіцієнт

шунтування показує, у скільки разів розширено межу вимірювань амперметра.

Для розширення межі вимірювань вольтметра до нього треба послідовно приєднати так званий додатковий опір R_d (рис. 1.11, б). Доведіть самостійно, що при цьому межа вимірювань вольтметра розширюється в $n_V = \frac{R_d}{R_V} + 1$ разів.

Розширюючи межі вимірювань приладів, ми в стільки ж разів збільшуємо ціну поділки їх шкал.

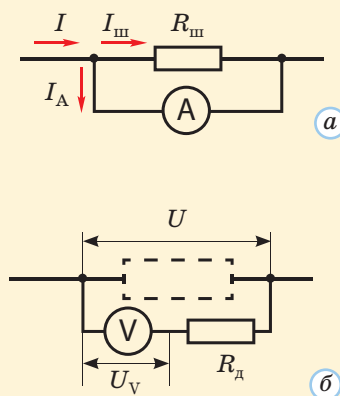


Рис. 1.11. Розширення меж вимірювання амперметра (а) та вольтметра (б)

4 Робота та потужність електричного струму

Під час упорядкованого руху заряджених частинок у провіднику електричне поле виконує роботу (її називають роботою струму). Згідно з означенням напруги ця робота $A = qU$, а згідно з означенням сили струму $q = It$. Отже, робота струму $A = UIt$.

В однорідній ділянці кола (у резисторі, електронагрівальному приладі тощо) відбувається перетворення енергії *лише* на внутрішню. Тому виділяється кількість теплоти, яка дорівнює роботі струму. Отже, у цьому випадку $Q = A = UIt$.

Застосовуючи закон Ома для однорідної ділянки кола, отримаємо три різні (еквівалентні) формули для кількості теплоти, яка виділяється в провіднику зі струмом:

$$Q = A = UIt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

Одне з цих співвідношень ($Q = I^2 R t$) було отримано на основі дослідів ще до відкриття закону збереження енергії англійським ученим Д. Джоулем і російським ученим Е. Ленцем. Це співвідношення називають **законом Джоуля — Ленца**.

Потужність струму чисельно дорівнює його роботі за одиницю часу, тобто $P = \frac{A}{t}$. Отже, для потужності, як і для роботи, і для кількості теплоти, є три еквівалентні формули: $P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$. Якими з цих формул зручніше користуватися — залежить від конкретної задачі.

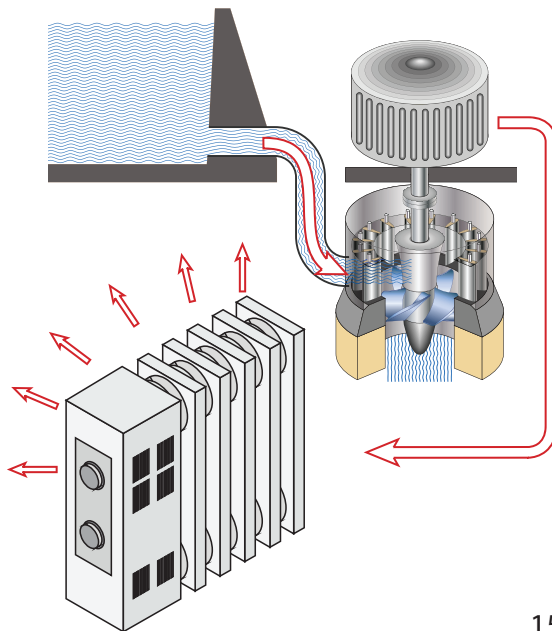
Теплову дію струму використовують в електронагрівальних приладах, плавких запобіжниках тощо.

Скоро ви дізнаєтеся, що для довільної ділянки кола наведені формули для роботи та кількості теплоти не можна вважати еквівалентними.



Навколо фізики

Можна простежити ланцюжок перетворень енергії, наприклад, під час використання електричного нагрівника. У джерелі струму (генераторі на гідроелектростанції) механічна енергія води, що падає з греблі, перетворюється на енергію електричного струму, пов'язану з напрямленим рухом електронів у колі. Унаслідок електричного опору напрямлений рух електронів послаблюється, зате посилюється хаотичний рух частинок у нагрівнику (і у з'єднувальних провідниках). Отже, урешті-решт енергія перетворюється на внутрішню енергію.



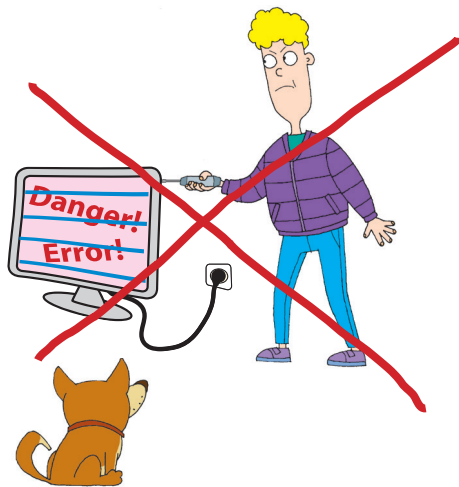


Рис. 1.12. Так «ремонтувати» електроприлади не можна! Життя таке чудове!



Рис. 1.13. Уважно читайте паспорт незнайомого електроприладу



Рис. 1.14. Приєднувати нові й нові електроприлади у такий спосіб не можна!

5 Міри безпеки під час роботи з електричними пристроями

Більшості з вас напевно здається, що не може статися нічого поганого через неправильне користування електричними пристроями — адже ви звикли до цих пристроїв ще з раннього дитинства. Проте існує сумна статистика жертв електрики, тому уважно прочитайте цей невеликий розділ.

Перш за все, ніколи не беріться за роботу, яку може виконувати тільки спеціаліст! Це стосується ремонту квартирної електромережі, побутових приладів, дрелів тощо.

Якщо вам все ж таки потрібно зняти кришку з приладу, обов'язково вимкніть цей прилад з електромережі (рис. 1.12).

Перш ніж увімкнути новий електроприлад у мережу, уважно ознайомтеся з інструкцією до цього приладу. Переконайтеся, що прилад розраховано саме на ту напругу, яка є в електромережі (рис. 1.13).

Запобігайте потраплянню води всередину розеток електромережі або електроприладів: вода спричиняє *коротке замикання*, що може призвести до пожежі. Не торкайтесь електроприладів мокрими руками. Ніколи не користуйтесь приладами з пошкодженими вилками або шнурами.

Досить часто кількість розеток у вашій квартирі менша від кількості електроприладів. Тоді в нагоді стають трійники та подовжувачі. Проте слід знати міру, коли користуєтесь цими пристроями. Адже всі прилади, приєднані через них до електромережі, фактично з'єднані паралельно. Тому сила струму в нерозгалуженій частині кола (тобто в провідниках, які підводять струм до розетки) дорівнює сумі сил струмів у всіх споживачах. З кожним новим потужним споживачем (рис. 1.14) загальна сила струму збільшується, ізоляція «захованих» у стінах провідників нагрівається щодалі більше...

Виникає *перевантаження мережі*, яке може призвести до пожежі. Тому запобіжники або автоматичні вимикачі спрацьовують (розмикають коло) не тільки у випадку короткого замикання, а й унаслідок такого перевантаження.

Якщо запобіжник спрацював, треба встановити причину та усунути її, а після цього замкнути коло (натиснути кнопку автоматичної пробки, перевести тумблер автоматичного вимикача у верхнє положення або замінити плавкий запобіжник).

Якщо ви відчули запах диму або побачили полум'я, перш за все знеструмте приміщення та телефонуйте операторам екстрених служб. Якщо зайнявся якийсь електроприлад, у жодному разі не гасіть його водою та не застосовуйте пінний вогнегасник.

! Пам'ятайте: електромережа та будь-який найкращий і найсучасніший електроприлад небезпечні в разі неправильного користування! Сучасну техніку розраховано на сучасну людину з певними культурою, знаннями та навичками.

6 Вчимося розв'язувати задачі

Задача 1. У старій ялинковій гірлянді, яка працює від мережі з напругою $U = 220$ В, усі 50 ламп з'єднано послідовно. Одна лампа вийшла з ладу, замінити її нема чим. Ви вирішили «закоротити» цю лампу, щоб світила решта. На скільки зміниться внаслідок цього напруга на кожній з решти ламп? Чи безпечно торкатися патрона несправної лампи, коли гірлянду приєднано до мережі?

Розв'язання. Коли ламп було 50, на кожну з них припадала напруга $\frac{U}{50} = 4,4$ В. Коли ламп залишиться 49, на кожну з них припадатиме напруга $\frac{U}{49} \approx 4,49$ В. Отже, напруга на кожній з решти ламп збільшиться лише на 0,09 В, таке збільшення припустиме.

А от друге запитання серйозніше. Зверніть увагу: на перший погляд може здатися, що гірлянду не обов'язково вимикати з мережі. Адже на кожну з ламп припадає менше від 5 В, що є безпечним. Проте зважте, що ваш палець може на якусь мить стати частиною послідовної ділянки кола, а його опір у багато разів перевищує опір решти ділянок кола. Оскільки напруга на ділянці кола прямо пропорційна опорі цієї ділянки, на ваш палець припадуть майже всі 220 В! Тобто ви з таким самим «успіхом» могли б устроїти пальці просто до розетки. Тому гірлянду треба обов'язково від'єднати від мережі. Це загальне правило (див. також п. 4 цього параграфа).

Задача 2. Визначте опір R зображеного на рис. 1 кола. Опори резисторів $R_1 = R_2 = 60$ Ом, $R_3 = R_4 = 120$ Ом.

Розв'язання. Резистори 2 і 3 з'єднано паралельно, тому опір відповідної ділянки кола $R_{2-3} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 40$ Ом. Ре-

зистори 1 і 4 приєднано до ділянки кола 2–3 послідовно, тому $R = R_1 + R_{2-3} + R_4 = 220$ Ом.

Задача 3. Визначте силу струму в кожному з однакових резисторів (рис. 2) опором по 60 Ом, якщо напруга джерела струму $U = 18$ В.

Розв'язання. Насамперед визначимо, які типи з'єднань резисторів у цьому колі. Для цього накреслимо вихідну схему інакше. Подумки замінімо провідники пружними «нитками» і розтягнемо коло, «взявшись» за полюси джерела струму; під час цього перетворення ми не розриваємо

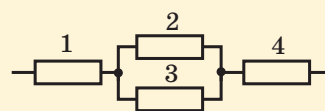
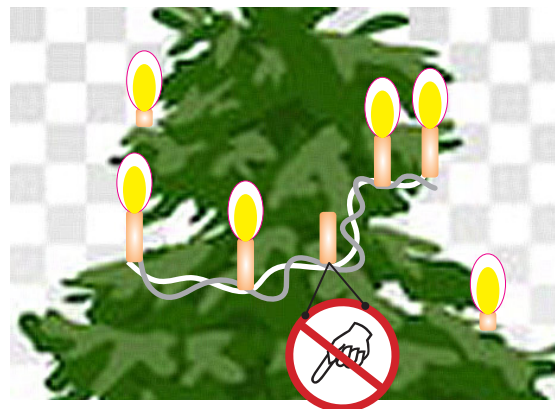


Рис. 1

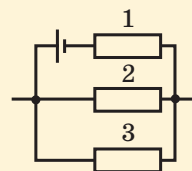


Рис. 2

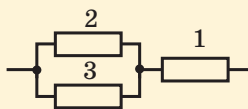


Рис. 3

провідники зі струмом і не з'єднуємо їх у нових вузлах. Отримаємо еквівалентну схему (рис. 3).

З отриманої еквівалентної схеми видно, що резистори 2 і 3 з'єднані паралельно, а резистор 1 з'єднаний з цією ділянкою кола послідовно. Опір кола $R = R_1 + R_{2-3} = 90$ Ом. Отже, $I_1 = I = \frac{U}{R} = 0,2$ А; $I_2 = I_3 = \frac{I}{2} = 0,1$ А.

Задача 4. Напруга на ділянці кола (рис. 4) $U = 12$ В. Опори резисторів $R_1 = R_2 = 40$ Ом, $R_3 = 30$ Ом, $R_4 = 60$ Ом. Визначте потужність струму в кожному з резисторів.

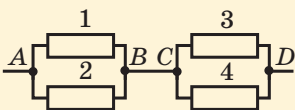


Рис. 4

Розв'язання. Наведену ділянку кола можна розглядати як послідовне з'єднання ділянок AB і CD . Опори цих ділянок $R_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 20$ Ом і $R_{CD} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = 20$ Ом. Оскільки ці опори однакові, напруга розподіляється між ділянками AB і CD порівну. Отже, напруга на кожному з резисторів дорівнює $\frac{U}{2}$. З формули $P = \frac{U^2}{R}$ випливає, що потужність струму в резисторах $P_1 = P_2 = \frac{U^2}{4R_1}$, $P_3 = \frac{U^2}{4R_3}$, $P_4 = \frac{U^2}{4R_4}$. Перевіривши одиниці величин і підставивши числові значення, отримуємо $P_1 = P_2 = 0,9$ Вт, $P_3 = 1,2$ Вт і $P_4 = 0,6$ Вт.

Задача 5. На двох лампах зазначено «220 В, 60 Вт» і «220 В, 40 Вт». У якій з них потужність струму буде меншою, якщо обидві лампи ввімкнути в мережу послідовно?

Розв'язання. Відповідно до формули $P = \frac{U^2}{R}$ менший опір має лампа, розрахована на більшу потужність, тобто на 60 Вт. Застосовувати цю формулу для порівняння потужностей за послідовного з'єднання ламп нецільно: адже напруги на них у цьому випадку різні. За послідовного з'єднання однакою є сила струму в обох лампах, тому краще скористатися формулою $P = I^2 R$, з якої випливає: менша потужність струму за послідовного з'єднання буде в тій лампі, опір якої менший (тобто в розрахованій на потужність 60 Вт).

Задача 6. У показаному на рис. 5 колі $R_1 = 45$ Ом, $R_2 = 20$ Ом. Напруга джерела струму є сталою. Визначте опір резистора 3, якщо потужність струму на ділянці AB однакова за обох положень перемикача.

Розв'язання. Позначимо напругу джерела струму U . Коли перемикач стоїть у верхній позиції, загальний опір кола $R_1 + R_3$, сила струму $I = \frac{U}{R_1 + R_3}$,

а потужність струму на ділянці AB (тобто в резисторі 1) $P_1 = I^2 R_1 = \frac{U^2 R_1}{(R_1 + R_3)^2}$.

Коли ж перемикач стоїть у нижній позиції, аналогічно отримуємо $P_2 = \frac{U^2 R_2}{(R_2 + R_3)^2}$. Згідно з умовою $P_1 = P_2$. Звідси випливають співвідношення

$\sqrt{R_1} (R_2 + R_3) = \sqrt{R_2} (R_1 + R_3)$ і $R_3 = \sqrt{R_1 R_2}$. Перевіривши одиниці величин і підставивши числові значення, отримуємо $R_3 = 30$ Ом.



Підбиваємо підсумки

Електричним струмом називають упорядкований (направлений) рух заряджених частинок. За напрям струму приймають напрям руху позитивно заряджених частинок.

Дії електричного струму: тепла, хімічна, магнітна, світлова.

Сила струму $I = \frac{q}{t}$, одиниця сили струму в СІ — ампер (1 А).

Джерело струму здійснює розділення позитивних і негативних зарядів. Заряди накопичуються на полюсах джерела струму та створюють електричне поле, яке спричиняє електричний струм у провідниках кола.

Залежність $I(U)$ сили струму від напруги для певного провідника називають вольт-амперною характеристикою цього провідника. Закон Ома для однорідної ділянки кола: $I = \frac{U}{R}$, де електричний опір провідника $R = \rho \frac{l}{S}$.

Одиниця електричного опору R — ом (1 Ом), одиниця питомого опору ρ — 1 Ом · м.

Послідовне з'єднання

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Паралельне з'єднання

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

В однорідній ділянці кола виділяється кількість теплоти, що дорівнює роботі струму:

$$Q = A = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

Потужність електричного струму в однорідній ділянці кола:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Під час застосування будь-яких електричних приладів потрібно неухильно дотримуватися правил безпеки.

Контрольні запитання

1. Що таке електричний струм? сила струму?
2. За яких умов існує постійний струм?
3. Яка роль джерела струму в електричному колі?
4. Сформулюйте закон Ома для однорідної ділянки кола. Чи для всіх провідників виконується цей закон?
5. Запишіть формули

загального опору кола в разі послідовного та паралельного з'єднань. 6. Накресліть схеми приєднання приладів для вимірювання сили струму в лампі та напруги на ній. 7. Запишіть формулу, яка виражає закон Джоуля — Ленца.

Вправа № 1

1. Скільки електронів проходить через поперечний переріз кола протягом 30 с за сили струму 8 А? Елементарний електричний заряд дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

2. Неізолюваний мідний провідник опором 40 Ом розрізали на чотири рівні частини й усі ці частини скрутили разом. Визначте електричний опір отриманого джгута.

3. Резистори опорами 10, 20 і 30 Ом з'єднано послідовно і приєднано до джерела постійної напруги 36 В. Визначте потужність струму в резисторі опором 20 Ом.

4. Визначте напругу, прикладену до кола (рис. 1), якщо амперметр показує силу струму 1 А. Опори резисторів $R_1 = 6$ Ом, $R_2 = 12$ Ом, $R_3 = 5$ Ом.

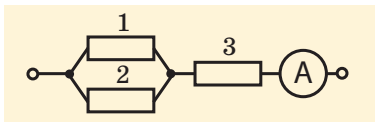


Рис. 1

5. Після приєднання до амперметра шунта опором 0,06 Ом ціна поділки приладу збільшилась у 8 разів. Визначте опір амперметра.

6. Яким має бути додатковий опір, щоб ціна поділки шкільного вольтметра з опором 6 кОм збільшилася в 15 разів?

7. На рис. 2 наведено вольт-амперні характеристики двох провідників. Провідники приєднують до джерела струму з напругою 4,8 В. Визначте силу струму в колі для випадків послідовного та паралельного з'єднання провідників.

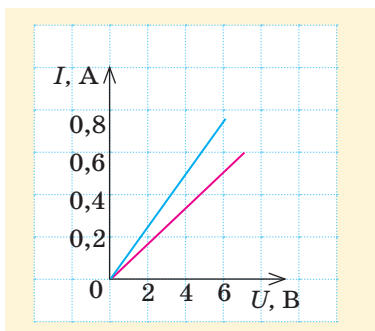


Рис. 2

Експериментальні завдання

1. Виготовте найпростіше хімічне джерело струму. Для цього встроміть у яблуко дві пластинки з різних металів (наприклад, монети вартістю 5 і 25 копійок, які й будуть полюсами джерела струму). Приєднавши до полюсів вольтметр, визначте напругу між ними. Дослідіть, від яких чинників залежить ця напруга.

8. Обчисліть опір кола (рис. 3), якщо $R = 5$ Ом.

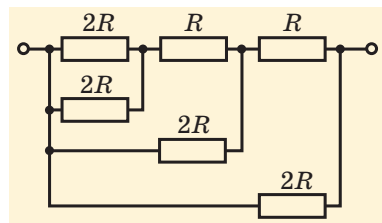


Рис. 3

9. Яка мінімальна кількість резисторів опором по 18 кОм знадобиться, щоб замінити один резистор опором 24 кОм?

10. Провідники з міді та ніхрому мають однакові розміри. У якому з них потужність струму буде більшою у випадку послідовного з'єднання? паралельного з'єднання?

11. Електричні лампи, на яких написано «220 В, 60 Вт» і «220 В, 40 Вт», з'єднали послідовно та приєднали до мережі з напругою 220 В. Визначте загальну потужність струму в лампах. Залежність опорів ламп від розжарення не враховуйте.

12. У показаній на рис. 4 ділянці кола $R_1 = R_2 = 60$ Ом, $R_3 = 30$ Ом і $R_4 = 20$ Ом. Напруга на цій ділянці кола 42 В. Визначте потужність струму в кожному з резисторів.

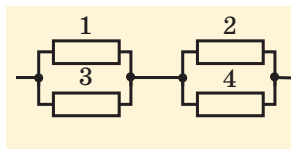


Рис. 4

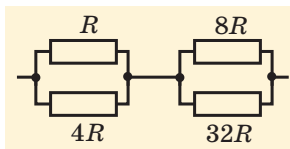


Рис. 5

13. У показаній на рис. 5 ділянці кола визначте резистор, потужність струму в якому найбільша; найменша.

2. Знайдіть дві лампи розжарення, на яких написано «24 В; 1,2 Вт» і «24 В; 12 Вт». З'єднайте ці лампи послідовно та приєднайте до джерела струму з напругою 24 В. Поясніть результат досліду.

§ 2. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА. ПРАВИЛА КІРХГОФА

1 Сторонні сили та електрорушійна сила

Постійний електричний струм у провідниках, тобто впорядкований рух вільних заряджених частинок, спричинений дією електричного (кулонівського) поля. Проте чи можуть *тільки* кулонівські сили підтримувати електричний струм? Виявляється, ні: адже заряджені частинки в колі переміщуються замкненими траєкторіями, а на *замкнених траєкторіях робота кулонівських сил дорівнює нулю*. Ми ж добре знаємо, що робота струму в реальному електричному колі відмінна від нуля: нагріваються провідники, працюють електродвигуни... Отже, мають бути якісь *іще* сили! Саме їх робота має «збагачувати» електричне коло енергією (зрозуміло, унаслідок витрати енергії якогось іншого типу). Ці «додаткові» сили (тобто всі, крім кулонівських) називають *сторонніми*. Зрозуміло, що робота цих сил на замкненій траєкторії може бути відмінною від нуля; іншими словами, ці сили мають бути непотенціальними.

Звідки ж вони беруться і в якій саме частині кола вони діють? На перше запитання відповімо трохи далі. А от щоб відповісти на друге, згадаймо про роль джерела струму: саме в ньому відбувається *розділення позитивних і негативних зарядів* (рис. 2.1).



Але ж кулонівські сили заважають такому розділенню, бо протилежні за знаком заряди притягаються!

Тепер причини руху вільних заряджених частинок зрозумілі: усередині джерела струму вони рухаються під дією сторонніх сил («усупереч» кулонівським), а поза джерелом струму — під дією кулонівських сил.

Зазначимо, що в деяких випадках сторонні сили діють і поза джерелами струму (наприклад, в електродвигунах), проте ми зараз не розглядатимемо такі випадки.

Як відомо, електростатичне (кулонівське) поле на ділянці кола має енергетичну характеристику — різницю потенціалів. Так само сторонні сили мають свою

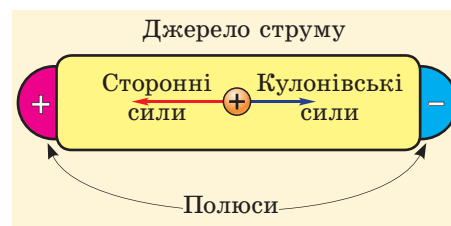


Рис. 2.1. Сторонні сили спричиняють розділення зарядів у джерелі струму



Отже, щоб джерело струму працювало, в ньому мають діяти сторонні сили, які більші за кулонівські й напрямлені протилежно їм.

Зверніть увагу!

- Сторонні сили можуть мати хімічну природу (у гальванічних елементах вони зумовлені різни-ми швидкостями переходу йонів різних металів до розчину електроліту), можуть бути зумовлені дією змінного магнітного поля або рухом провідника в магнітному полі (такий принцип дії генераторів на електростанціях).
- Сторонні сили можуть виникати й унаслідок дії світла (у сонячних батареях) або внаслідок різни-ці температур у різних частинах кола.

енергетичну характеристику — *електрорушійну силу (ЕРС)*, яку позначають $\mathcal{E}$.

Електрорушійною силою на ділянці кола називають відношення роботи сторонніх сил під час переміщення заряду цієї ділянкою до значення q цього заряду:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}. \quad (2.1)$$

Інакше кажучи, *ЕРС чисельно дорівнює роботі сторонніх сил з переміщення одиничного позитивного заряду*.

ЕРС, як і різницю потенціалів, вимірюють у вольтах ($1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$). На відміну від різниці потенціалів, ЕРС залежить не тільки від положення початкової та кінцевої точок траєкторії переміщення зарядів, а й від форми цієї траєкторії (адже сторонні сили не є потенціальними).

Якщо переміщати заряд через джерело струму від негативного полюса до позитивного, отримаємо саме ЕРС джерела струму. Якщо ж переміщати заряд через однорідні ділянки зовнішнього кола (електронагрівальні прилади, з'єднувальні провідники), де сторонні сили відсутні, отримаємо $A_{\text{стор}} = 0$ і, відповідно, ЕРС теж дорівнює нулю.

Зазвичай на джерелі струму зазначено саме значення його ЕРС (ми скоро побачимо, що напруга на полюсах не обов'язково збігається з цим значенням). Ще однією важливою характеристикою джерела струму є його *внутрішній опір* r . Для генератора це опір провідників його обмотки, для гальванічного джерела струму — опір електроліту всередині тощо. У загальному випадку існування внутрішнього опору просто свідчить, що джерело струму нагрівається під час протікання струму (згадаймо закон Джоуля — Ленца).

2 Закон Ома для неоднорідної ділянки кола та повного кола

Закон Ома для постійного струму в однорідній ділянці кола можна переписати у вигляді $IR = U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{\text{кул}}}{q}$,

де $A_{\text{кул}}$ — робота кулонівських сил під час переміщення ділянкою кола заряду q ; $\varphi_1 - \varphi_2$ — різниця потенціалів між кінцями ділянки. Нагадаємо, що в однорідній ділянці кола напрямлений рух заряджених частинок відбувається тільки під дією кулонівських сил.

Якщо в ділянці кола діють також сторонні сили, то таку ділянку називають **неоднорідною**. У такому випадку вираз для сили струму містить замість $A_{\text{кул}}$ сумарну роботу всіх сил, тобто $A_{\text{кул}} + A_{\text{стор}}$.

Отримуємо

$$IR = \frac{A_{\text{кул}} + A_{\text{стор}}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}. \quad (2.2)$$

Це співвідношення називають **законом Ома для неоднорідної ділянки кола**, а добуток IR — **спадом напруги**. Отриманий результат дозволяє розглядати ділянки кола, що містять джерела струму, працюючі електродвигуни тощо. Зазначимо, що закон Ома для однорідної ділянки кола є окремим випадком формули (2.2).

Прикладом такої «ділянки кола» є й замкнене (повне) коло (рис. 2.2), що містить джерело струму та споживачі, в яких не діють сторонні сили (тобто енергія перетворюється тільки на внутрішню). У такому випадку можна вважати, що точки 1 і 2 (початок і кінець ділянки) збігаються, а повний опір ділянки складається із зовнішнього R і внутрішнього r . Отримуємо $I(R+r) = \mathcal{E}$, або

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}. \quad (2.3)$$

Це співвідношення називають **законом Ома для повного кола**.

Його можна отримати й безпосередньо із закону збереження енергії. Якщо сила струму в колі I , цим колом за час t пройшов електричний заряд $q = It$, а сторонні сили в джерелі струму виконали роботу $A_{\text{стор}} = q\mathcal{E} = \mathcal{E}It$. У джерелі струму та зовнішньому колі виділилася кількість теплоти $Q = I^2Rt + I^2rt$. Згідно із законом збереження енергії $A_{\text{стор}} = Q$, звідки $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$.

Наслідки

1. Скориставшись законом Ома для повного кола та законом Ома для ділянки кола, отримаємо співвідношення $U = \mathcal{E} - Ir$, яке пов'язує напругу U на полюсах джерела струму та силу струму в колі. Це дуже корисне співвідношення дозволяє полегшити розв'язання багатьох задач. З нього видно, що *зі збільшенням сили струму (збільшенням навантаження в колі) напруга джерела струму зменшується*. Ви могли це помітити за послабленням світіння ламп, коли взимку хтось умикав потужний електронагрівальний прилад. Зміна напруги не спостерігається лише за умови дуже малого внутрішнього опору джерела струму (тобто для так званого **ідеального джерела струму**).

2. *Режим розімкненого кола* відповідає умові $R \gg r$ (або, що те ж саме, $R \rightarrow \infty$). У цьому випадку $I \rightarrow 0$, $U \rightarrow \mathcal{E}$. Це реалізується, наприклад, коли до полюсів джерела струму приєднано тільки вольтметр з дуже великим опором. Саме в цьому випадку можна вважати, що вольтметр показує ЕРС джерела струму. Будь-яке зменшення опору

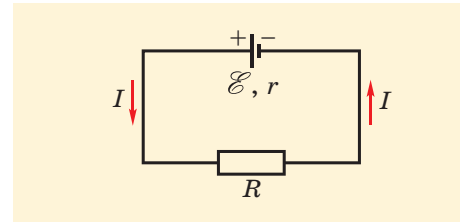
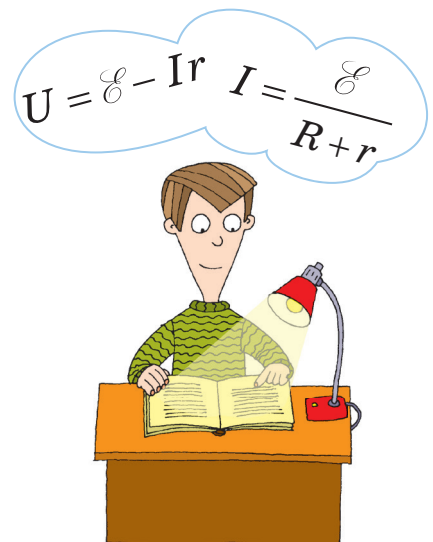


Рис. 2.2. Виводимо закон Ома для повного кола



зовнішнього кола означає збільшення навантаження в колі (збільшення сили струму).

3. Режим короткого замикання відповідає умові $R \ll r$ (або, що те ж саме, $R \rightarrow 0$). У цьому випадку сила струму набуває максимально можливого значення — сили струму короткого замикання $I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r}$, а напруга на полюсах джерела струму практично зникає ($U \rightarrow 0$). У такому режимі вся кількість теплоти виділяється всередині джерела струму. Такий режим можна створити, випадково з'єднавши металевим провідником полюси джерела струму або пошкодивши ізоляцію провідників.



О! І що ж чекає на джерело струму в разі короткого замикання? Чи витримає воно такий режим роботи?

Це залежить перш за все від значення $I_{к.з}$ цього джерела струму.



Гальванічний елемент або батарейка ($r \approx 1$ Ом) можуть витримати коротке замикання приблизно протягом хвилини. А от у випадку автомобільного акумулятора ($r \approx 0,01$ Ом) струм короткого замикання дуже великий і виводить акумулятор з ладу за частки секунди.

3 Розгалужені електричні кола та правила Кірхгофа

Якщо закон Ома застосовний для всіх елементів електричного кола, то можна знайти силу струму та інші фізичні величини для будь-якої ділянки кола. Проте це може виявитися достатньо складною задачею: адже з'єднання елементів кола бувають дуже «заплутаними». Навіть за відносно невеликої кількості елементів розгалужене електричне коло буває неможливо розглядати як певну комбінацію послідовних і паралельних з'єднань. На рис. 2.3 наведено приклад кола, що не містить жодного послідовного та жодного паралельного з'єднання (переконайтеся в цьому самостійно). Таку схему з'єднання називають «мостовою».

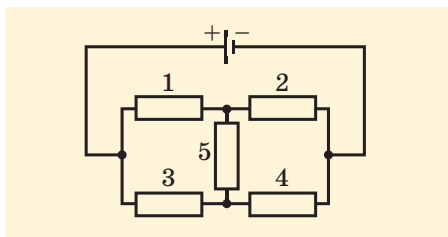


Рис. 2.3. Схема «моста» з п'яти резисторів

Для розрахунків розгалужених кіл розроблено численні методи. Усі вони ґрунтуються на вже відомих вам фізичних законах. Познайомимось з **правилами Кірхгофа**, які дозволяють здійснити розрахунки будь-якого кола, для всіх елементів якого виконується закон Ома.

Перше правило Кірхгофа (правило вузлів). Нагадаємо, що вузлом називають точку, де сходяться не менш ніж три провідники. По кожному з них струм тече в напрямі вузла або витікає з цього вузла (рис. 2.4). Оскільки за постійного струму електричний заряд не може «накопичуватися» у вузлі, щосекунди з нього «виходить» такий самий заряд, який «входить» (це наслідок закону збереження електричного заряду). Якщо вважати струми, що «входять» у вузол, додатними, а такі, що «виходять», від'ємними, то можна записати перше правило Кірхгофа у вигляді

$$\sum_k I_k = 0. \quad (2.4)$$

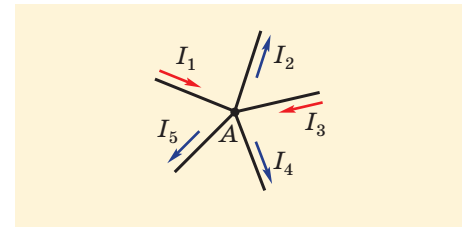


Рис. 2.4. Струми, що «входять» до вузла A (червоні) та «виходять» із нього (сині). Алгебраїчна сума цих струмів дорівнює нулю

Отже, алгебраїчна сума струмів у будь-якому вузлі кола дорівнює нулю.

Друге правило Кірхгофа (правило контурів). Виберемо в розгалуженому колі довільний замкнений контур (на рис. 2.5 різними кольорами показано різні контури). Контур може бути «маленьким» або «великим», що містить усередині інші контури, — це несуттєво. Будь-який контур містить вузли (надаємо їм номери $1, 2, \dots, N$, що відповідають певному порядку обходу контура) та ділянки між вузлами. Кожній ділянці надаємо номер, що відповідає номеру вузла, з якого починається обхід цієї ділянки. Ділянка з номером i має опір R_i ; на ній можуть діяти сторонні сили, що характеризуються електрорушійною силою $\mathcal{E}_i$.

Розглянемо як приклад «червоний» контур на рис. 2.5. Напишемо закон Ома для кожної з чотирьох ділянок цього контура:

$$I_1 R_1 = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_1, \quad I_2 R_2 = \varphi_2 - \varphi_3 + \mathcal{E}_2,$$

$$I_3 R_3 = \varphi_3 - \varphi_4 + \mathcal{E}_3, \quad I_4 R_4 = \varphi_4 - \varphi_1 + \mathcal{E}_4.$$

Додавши всі рівняння одне до одного, отримаємо $\sum_{k=1}^4 I_k R_k = \sum_{k=1}^4 \mathcal{E}_k$. Усі потенціали скорочуються (оскільки потенціальні сили не виконують роботи на замкненій траєкторії). Очевидно, що для довільної кількості ділянок у контурі результат буде аналогічним.

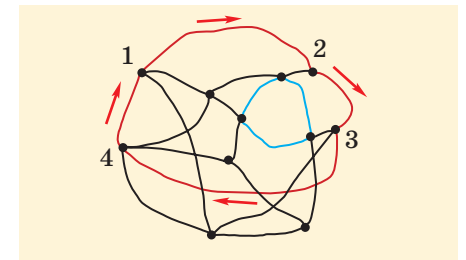


Рис. 2.5. Приклади контурів, про які йдеться у другому правилі Кірхгофа (виділено «червоний» і «синій» контури). Зображення схематичне, без конкретних елементів кола. Для «червоного» контура показано вибраний напрям обходу

Зверніть увагу!

- Під час застосування другого правила Кірхгофа додатними вважають ті струми, напрямі яких відповідають вибраному напрямку обходу (тобто тут струм, який вважався додатним з точки зору правила вузлів, може «виявитися» від'ємним). ЕРС вважають додатною на тих ділянках, де сторонні сили виконують додатну роботу під час переміщення позитивного заряду в напрямі обходу.

Алгебраїчна сума спадів напруги на окремих ділянках будь-якого замкненого контура електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС у цьому контурі.

Правильне застосування правил Кірхгофа дозволяє отримати систему лінійних рівнянь, розв'язання якої дає значення сили струму в кожному з елементів кола.



А що таке
«неправильне»
застосування
правил
Кірхгофа?



Є й таке...
Буває, що всі записані
рівняння правильні,
а от знайти з них
нічого не можна.

Річ у тім, що визначення N невідомих сил струму потребує такої самої кількості *незалежних* лінійних рівнянь (тобто жодне з цих рівнянь не має бути наслідком інших). Якщо ви не бажаєте після всіх обчислень отримати тотожність типу «нуль дорівнює нулю», то візьміть за правило: кожний новий вибраний контур має містити хоча б одну ділянку, яка не входила до складу «попередніх» контурів. Не треба також застосовувати перше правило Кірхгофа для всіх вузлів кола.

І ще одна порада: якщо ви можете розв'язати задачу без правил Кірхгофа, то й не треба їх застосовувати. Нехай це буде ваш «останній засіб».

4. Вчимося розв'язувати задачі

Задача 1. Визначте напругу на полюсах джерела струму (рис. 1) і сили струму в резисторах. Опори резисторів $R_1 = 8 \text{ Ом}$ і $R_2 = 24 \text{ Ом}$. ЕРС джерела струму $\mathcal{E} = 80 \text{ В}$, його внутрішній опір $r = 2 \text{ Ом}$.

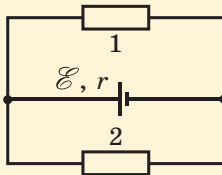


Рис. 1

Розв'язання. Резистори з'єднані паралельно, тому опір зовнішнього кола $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 6 \text{ Ом}$. Сила струму в колі

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = 10 \text{ А. Напруга на полюсах джерела струму}$$

$$U = IR = 60 \text{ В, така сама напруга й на кожному резисторі.}$$

$$\text{Отже, знаходимо } I_1 = \frac{U}{R_1} = 7,5 \text{ А і } I_2 = \frac{U}{R_2} = 2,5 \text{ А.}$$

Задача 2. Коли змінюють опір зовнішнього кола, змінюються сила струму I в колі та напруга U на джерелі струму. Визначте ЕРС $\mathcal{E}$ джерела струму і його внутрішній опір r за наведеним на рис. 2 графіком залежності $U(I)$.

Розв'язання. Як показано вище, напруга на джерелі струму пов'язана із силою струму формулою $U = \mathcal{E} - Ir$. Ця

лінійна залежність повністю відповідає наведеній на рисунку прямій. Згідно з цією формулою за умови $I = 0$ маємо $U = \mathcal{E}$, а зменшення напруги до нуля відбувається за умови $I = I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r}$. Отже, потрібно подовжити графік до перетину з осями координат. Перетин з віссю ординат відповідає значенню $\mathcal{E} = 6$ В, а перетин з віссю абсцис — значенню $I_{к.з} = 6$ А. Звідси отримуємо внутрішній опір джерела струму $r = \frac{\mathcal{E}}{I_{к.з}} = 1$ Ом.

Задача 3. Знайдіть силу струму в резисторі опором $R = 2$ Ом (рис. 3), якщо джерела струму мають ЕРС $\mathcal{E}_1 = 4$ В і $\mathcal{E}_2 = 8$ В, а їх внутрішні опори $r_1 = 1$ Ом і $r_2 = 2$ Ом.

Розв'язання 1. Скористаємося правилами Кірхгофа. Для цього виберемо «очікувані» напрями струмів і напрями обходів двох контурів, як показано на рис. 4.

Перше правило Кірхгофа для вузла А: $I_1 + I_2 - I = 0$.

Друге правило Кірхгофа для «червоного» та «синього» контурів:

$$-I_1 r_1 + I_2 r_2 = -\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2, \quad I_1 r_1 + IR = \mathcal{E}_1.$$

Виключивши з цих рівнянь I_1 і I_2 , отримуємо

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 r_2 + \mathcal{E}_2 r_1}{r_1 r_2 + R r_1 + R r_2}.$$

Перевіривши одиниці та підставивши числові значення величин, дістанемо $I = 2$ А.

Розв'язання 2. Покажемо, як можна обійтися й без правил Кірхгофа. Очевидно, сила струму в резисторі лінійно залежить від ЕРС обох джерел струму. Це означає, що виконується своєрідний «принцип суперпозиції»: шукана сила струму є сумою сил струму, зумовлених $\mathcal{E}_1$ і $\mathcal{E}_2$ (зазначимо, що обидва доданки мають однакові знаки). Щоб знайти перший доданок, уявімо, що друге джерело струму «втратило» ЕРС (зберігши опір), тобто перетворилось на резистор з опором r_2 . Тоді сила струму в колі становить $\frac{\mathcal{E}_1}{r_1 + \frac{R r_2}{R + r_2}}$, а через резистор тече лише частка цієї

сили струму, що визначається відношенням $\frac{r_2}{R + r_2}$. Отже, перший доданок у виразі для сили струму дорівнює $\frac{\mathcal{E}_1 r_2}{r_1 r_2 + R r_1 + R r_2}$. Щоб знайти другий доданок, треба просто

поміняти місцями індекси 1 і 2 (знаменник отриманого виразу при цьому не зміниться). Сума обох доданків дає той самий вираз, що в розв'язанні 1.

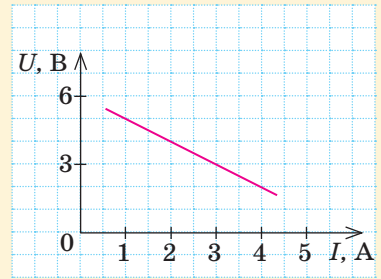


Рис. 2

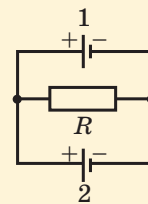


Рис. 3.

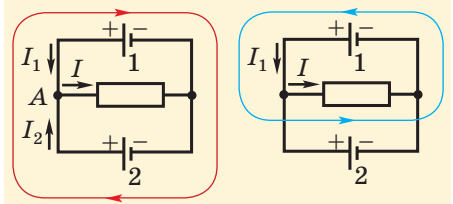


Рис. 4



Підбиваємо підсумки

Струм у колі не може протікати за відсутності сторонніх сил (так називають усі сили, які діють на заряджені частинки, крім кулонівських). Сторонні сили є непотенціальними: навіть на замкненій траєкторії їх робота може бути відмінною від нуля. Розділення позитивних і негативних зарядів у джерелах струму відбувається саме під дією сторонніх сил («усупереч» дії кулонівських сил).

Електрорушійною силою (ЕРС) на ділянці кола називають відношення роботи сторонніх сил під час переміщення заряду цієї ділянкою до самого заряду: $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$.

Закон Ома для неоднорідної ділянки кола (у якій можуть діяти й сторонні сили): $IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}$.

Закон Ома для повного кола: $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$. Напруга на полюсах джерела струму

$U = \mathcal{E} - Ir$. Вона максимальна у випадку розімкнутого кола ($R \rightarrow \infty$) і дорівнює нулю в режимі короткого замикання ($R = r$).

Два правила Кірхгофа для розрахунків розгалужених електричних кіл:

1. Алгебраїчна сума струмів у будь-якому вузлі кола дорівнює нулю.
2. Алгебраїчна сума спадів напруги на окремих ділянках будь-якого замкненого контура електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС у цьому контурі.

Контрольні запитання

1. Які сили називають сторонніми? У яких ділянках кола діють ці сили? 2. Запишіть закон Ома для неоднорідної ділянки кола. 3. Запишіть закон Ома для повного кола. 4. За якого режиму роботи кола сягає найбільшого зна-

чення сила струму через джерело струму? напруга на полюсах джерела струму? 5. Запишіть два правила Кірхгофа. 6. На якому законі природи ґрунтується перше правило Кірхгофа?

Вправа № 2

1. До джерела струму з ЕРС 4,5 В і внутрішнім опором 1 Ом приєднали резистор опором 14 Ом. Визначте силу струму в колі.

2. До джерела струму з ЕРС 18 В і внутрішнім опором 2 Ом приєднали резистор опором 4 Ом. Визначте напругу на резисторі.

3. Напруга на полюсах джерела струму становить 80 % від ЕРС цього джерела. Визначте співвідношення між внутрішнім опором джерела струму і опором зовнішнього кола.

4. До джерела струму з внутрішнім опором 3 Ом приєднано резистор опором 9 Ом. Сила струму в колі 3 А. Визначте силу струму короткого замикання для цього джерела струму.

5. До батарейки приєднано лампу. Як зміниться напруга на полюсах батарейки, якщо приєднати ще одну таку саму лампу: а) паралельно; б) послідовно?

6. ЕРС джерела струму дорівнює 12 В. Коли до джерела приєднали резистор, напруга в зовнішньому колі виявилася рівною 6 В. Якою стане ця напруга, якщо приєднати ще один такий самий резистор послідовно до першого? паралельно?

7. Коли сила струму в колі збільшилася від 1 до 1,5 А, напруга на полюсах джерела струму зменшилася від 3,5 до 3 В. Визначте ЕРС і внутрішній опір джерела струму.

8. Два різних джерела струму з'єднали паралельно. Спираючись на результати розв'язання задачі 3 в тексті параграфа, отримайте вирази для ЕРС і внутрішнього опору отриманого джерела струму.

9. Визначте опір «моста» (рис. 2.3), якщо $R_1 = R_4 = R_5 = 3 \text{ кОм}$, $R_2 = R_3 = 9 \text{ кОм}$.

Експериментальне завдання

За допомогою вольтметра або мультиметра виміряйте напругу на полюсах гальванічного елемента. Приєднайте до полюсів лампочку

від ліхтарика та повторіть вимірювання. Поясніть результат цього досліду. Визначте за результатами вимірювань ЕРС гальванічного елемента та його внутрішній опір.

§ 3. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

1 Порівнюємо деякі середовища, які проводять струм

З курсу фізики 8 класу ви знаєте, що електричний струм може протікати не тільки в металах. Ви вивчали також струм в електролітах і газах. Напевно ви щось знаєте й про струм у напівпровідниках. Давайте пригадаємо властивості деяких середовищ і встановимо, що вони мають спільного та чим відрізняються.

Провідність речовини залежить від кількості вільних заряджених частинок в одиниці об'єму, тобто від їх концентрації. Провідність залежить також від того, наскільки ці частинки «рухомі». Характеристики ж речовини залежать від фізичних умов, перш за все температури (див. табл. 3.1).



Одна спільна риса очевидна — усі ці речовини мають містити вільні заряджені частинки, бо без них струм неможливий.

Чи однакові ці частинки в різних середовищах? І від чого залежить їх кількість?



Таблиця 3.1

Порівняльні характеристики деяких речовин, у яких можливий струм

Тип речовини	Вільні заряджені частинки	Залежність питомого опору від температури	Додаткова інформація (обговорюється нижче)
Метали	<i>Вільні електрони.</i> Утворюються разом із позитивними йонами, з яких складаються кристалічні ґратки	Збільшується під час нагрівання через посилення коливань йонів кристалічних ґраток	Існування надпровідності
Електроліти (розчини та розплави)	<i>Позитивні та негативні йони.</i> Утворюються внаслідок електролітичної дисоціації, що зумовлена тепловим рухом і послабленням зв'язків між йонами завдяки дії розчинника	Зменшується під час нагрівання через збільшення концентрації йонів	Електроліз і його застосування, закони електролізу
Гази	<i>Йони (переважно позитивні) та електрони.</i> Утворюються внаслідок дії зовнішнього йонізатора або йонізації електронними ударами	Зменшується під час нагрівання через збільшення концентрації йонів і електронів	Несамостійний і самостійний розряди, типи самостійного розряду. Плазма



Явище надпровідності Х. Камерлінг-Оннес відкрив 1911 року. Класична теорія не дозволяла пояснити це явище. Проте навіть після створення квантової теорії надпровідність довго залишалася «занадто міцним горішком» для теоретиків. Тільки 1957 року американські вчені Дж. Бардін, Л. Купер, Дж. Шріффер і незалежно від них радянський учений М. М. Боголюбов запропонували мікроскопічну теорію надпровідності. Цікаво, що за 7 років до цього радянські фізики-теоретики В. Л. Гінзбург і Л. Д. Ландау створили теорію, яка дозволила правильно передбачити поведінку надпровідника в магнітному полі навіть без знання мікроскопічного механізму явища.

2 Провідність металів і надпровідність

Опір металу характеризує перетворення енергії струму (пов'язаної з напрямленим рухом заряджених частинок) в енергію хаотичного руху йонів кристалічних ґраток, тобто у внутрішню енергію провідника. На початку XX століття було доведено, що електричний струм у металах переносять вільні електрони. Було створено елементарну електронну теорію, яка пояснювала опір зіткненнями електронів з йонами. Проте багато які з висновків цієї теорії не відповідали експериментальним даним.

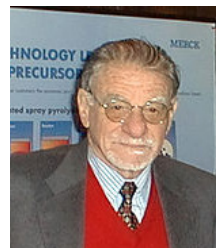
Згодом з'ясувалося, що пояснення струму в металах можливе тільки з позицій квантової теорії. Виявилось, що вільні електрони поведуться подібно до хвиль. Їх руху заважає не існування кристалічних ґраток, а їх *неідеальність*, тобто будь-яке відхилення від строгої періодичності. Такі відхилення виникають, наприклад, через неоднаковість йонів. Тому питомий опір сплавів набагато перевищує питомий опір чистих металів. Теплові коливання йонів також порушують ідеальний порядок — адже в будь-який момент переважна більшість йонів зміщені від положень рівноваги. Саме через це питомий опір металів збільшується внаслідок нагрівання та зменшується внаслідок охолодження.

Зазначимо, що на початку XX століття було відкрито явище *надпровідності*, властиве деяким металам, сплавам і керамікам. Першим відкритим надпровідником була ртуть: коли її температура опускалася до $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$, електричний опір цього металу зменшувався до нуля! Нульовий опір означає, що енергія струму не витрачається на нагрівання надпровідника. Отже, для *підтримання* струму в надпровіднику не потрібне електричне поле (можна обійтися навіть без джерела струму).

Практичне застосування надпровідників утруднюється тим, що потрібне їх глибоке охолодження. Проте зараз відома й високотемпературна надпровідність у багатьох матеріалах (їх треба охолоджувати «усього» приблизно до $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Надпровідність може бути дуже корисною — уявімо хоча б передачу електроенергії без втрат або надпотужні електромагніти. Проте протягом 75 років температуру надпровідного переходу не вдалося збільшити навіть до 30 K! А оптимісти все ж сподівалися підняти цю температуру вище 77 K, тобто отримати ВТНП — високотемпературну надпровідність. Це дозволило б застосовувати замість гелієвого охолодження азотне, яке набагато дешевше. Таких оптимістів з роками залишалося все менше. Але

1986 року з'явилося повідомлення про успіх співробітників наукового підрозділу корпорації IBM К. А. Мюллера та Й. Г. Беднорца. Вони отримали речовину (кераміку), яка ставала надпровідником «лише» за температури 35 К. Уже наступного року вчених було відзначено Нобелівською премією. Перспективний напрям пошуку було знайдено, успіхи пішли один за одним. Незважаючи на багато труднощів, надпровідникові технології завойовують місце в арсеналі сучасної техніки.



К. Мюллер



Й. Беднорц

3 Електроліти та електроліз. Закони електролізу

Електричний струм в електролітах (а це солі, луги, кислоти), на відміну від струму в металах, дає можливість спостерігати хімічну дію струму.

Розглянемо, наприклад, процес розчинення кухонної солі NaCl у воді. Молекулу NaCl можна розглядати як таку, що складається з позитивного йона Na^+ та негативного йона Cl^- . Між цими йонами діють сили електричного притягання, які й поєднують йони в молекулу. Молекули води можна вважати диполями, тому вода спричиняє суттєве послаблення сил електричної взаємодії. Отже, молекули солі можуть тепер розпадатися на йони (рис. 3.1). Безпосередньою причиною розпаду можуть бути, наприклад, зіткнення, зумовлені тепловим рухом молекул. Такий розпад молекул на йони називають **електролітичною дисоціацією**. У деяких речовинах розпад на йони відбувається навіть без розчинення, просто внаслідок нагрівання. Існує й протилежний процес: позитивний і негативний йони можуть випадково зустрітися та утворити нейтральну молекулу. За незмінних умов між обома «зустрічними» процесами встановлюється динамічна рівновага. При цьому ступінь дисоціації (частка «зруйнованих» молекул) лишається незмінним.

Позитивні та негативні йони в розчині або розплаві електроліту є вільними зарядженими частинками. За відсутності електричного поля вони рухаються хаотично. Але якщо створити в електроліті електричне поле, то рух йонів стає напрямленим (рис. 3.2), тобто виникає електричний струм. Йони різних знаків рухатимуться в протилежних напрямках, проте перенесення заряду відбувається в один і той самий бік.

Щоб створити в рідині електричне поле, в неї занурюють два металевих або вугільних електроди, з'єднані з полюсами джерела струму. Електрод, з'єднаний з позитивним полюсом джерела струму, називають **анодом**, а електрод, з'єднаний з негативним полюсом, — **катодом**.

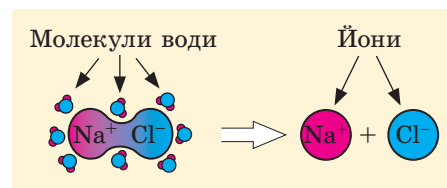


Рис. 3.1. Схематичне зображення процесу електролітичної дисоціації

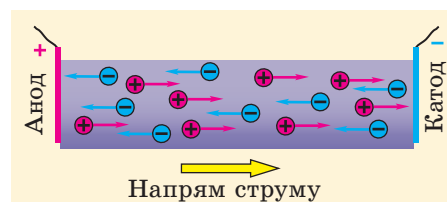
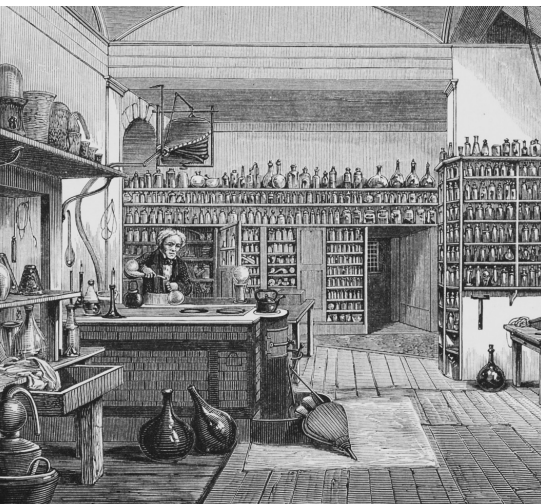


Рис. 3.2. Електричний струм в електроліті

Очевидно, позитивні йони рухаються до катода, а негативні — до анода.

Саме напрямлений рух йонів спричиняє певні хімічні перетворення. Наприклад, якщо струм протікає через розчин солі CuCl_2 , то позитивні йони Cu^{2+} доходять до катода й там отримують електрони, яких їм «бракує». Після цього йони перетворюються на нейтральні атоми, які можуть осісти на поверхні катода (на поверхні катода утворюється шар міді). Йони ж Cl^- доходять до анода, де втрачають «зайві» електрони. Отже, з солі CuCl_2 утворилися чиста мідь і чистий хлор. *Процес виділення речовин на електродах під час протікання струму через електроліт називають електролізом.*

Закони електролізу встановив М. Фарадей.



Перший закон Фарадея. Маса m речовини, що виділилася під час електролізу, пропорційна силі струму I та часу t його протікання:

$$m = kIt. \quad (3.1)$$

Коефіцієнт пропорційності k називають **електрохімічним еквівалентом** речовини. Він чисельно дорівнює масі даної речовини, що виділяється на електроді протягом 1 с за сили струму 1 А (тобто коли через електроліт проходить заряд 1 Кл). Наприклад, електрохімічний еквівалент натрію дорівнює 0,24 мг/Кл. Це означає, що коли через розчин (наприклад, розчин солі NaCl) проходить заряд 1 Кл, на катоді виділяється натрій масою 0,24 мг.

Другий закон Фарадея. Електрохімічний еквівалент речовини прямо пропорційний її молярній масі M та обернено пропорційний валентності z відповідних йонів.

Закони Фарадея мають простий фізичний зміст. Ураховуємо, що кожний йон має заряд q_0 , модуль якого дорівнює ze , і масу $m_0 = \frac{M}{N_A}$. Тут e і N_A — відповідно елементарний електричний заряд і стала Авогадро. Кількість йонів, що пройшли крізь електроліт, можна записати як

через масу, так і через заряд: $N = \frac{m}{m_0} = \frac{q}{q_0}$. Оскільки за

постійного струму перенесений заряд $q = It$, отримуємо

$m = \frac{m_0}{q_0} It$. Порівнявши це співвідношення з формулою (3.1), бачимо: електрохімічний еквівалент речовини

дорівнює відношенню маси йону до його заряду. Тепер ми можемо об'єднати обидва закони Фарадея в одну формулу:

$$m = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{z} \cdot It. \quad (3.2)$$

Електроліти широко застосовують у сучасній техніці. Зазначимо, що електроліт є складовою частиною всіх акумуляторів.

За допомогою електролізу отримують з природних хімічних сполук багато які кольорові метали. Це, зокрема, алюміній, з якого виготовляють легкі та міцні сплави. До початку застосування електролізу алюміній коштував дорожче, ніж золото; нині ж кожного року отримують десятки мільйонів тон алюмінію. Електроліз також дозволяє очистити метал від домішок. Саме так отримують достатньо чисту (рафіновану) мідь для виготовлення електричних проводів.

Щоб захистити метал від корозії або надати йому привабливого зовнішнього вигляду, на нього часто наносять шар іншого металу (срібла, золота, нікелю, хрому тощо). Найкращий шлях для отримання тонкого шару покриття, яке міцно зв'язане з поверхнею, — це знов-таки застосування електролізу. Відповідний процес називають **гальваностегією**. Наприклад, для нікелювання виробу його занурюють у ванну з розчином солі Ніколу та приєднують до негативного полюса джерела струму (тобто застосовують як катод); анод зазвичай є пластинкою з нікелю. Під час електролізу анод потроху розчиняється, а на катоді осідає шар нікелю.

За допомогою електролізу можна також отримувати точні копії рельєфних виробів — зокрема, скульптур. Такий процес називають **гальванопластикою**. М'який матеріал (наприклад, віск) щільно притискають до виробу та отримують його зліпок. Щоб поверхня цього зліпка проходила струм, її вкривають тонким шаром графіту. Після цього зліпок занурюють у розчин електроліту та застосовують як катод. Отримавши на катоді достатньо товстий шар металу, цей шар відділяють від зліпка та отримують форму для виготовлення точних копій виробу.



Навколо фізики

Виявляється, електроліти можуть бути й твердими. Йдеться про кристали з йонною природою хімічного зв'язку, в яких йони одного типу можуть досить легко переміщатися. Такі речовини називають суперйонними провідниками. Вони поєднують механічну жорсткість кристалів і електричну

провідність, характерну для рідких електролітів. Провідність твердих електролітів помітно зростає з підвищенням температури. Особливо великою є провідність твердих розчинів і кристалів з певними порушеннями порядку розташування йонів.

3 Самостійний і несамостійний розряди в газах. Плазма

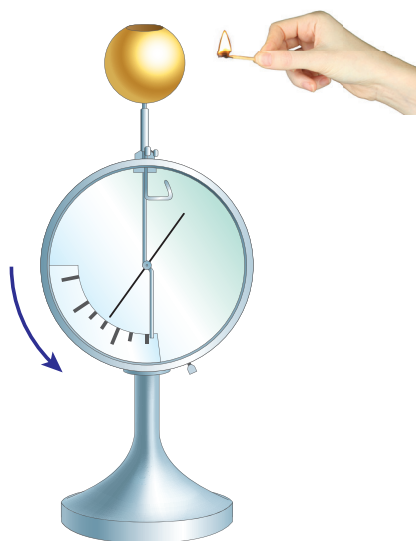


Рис. 3.3. Несамостійний розряд, спричинений нагріванням газу

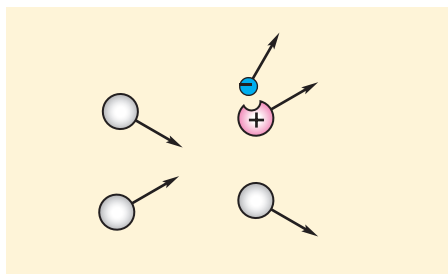


Рис. 3.4. Механізм йонізації під час зіткнення молекул

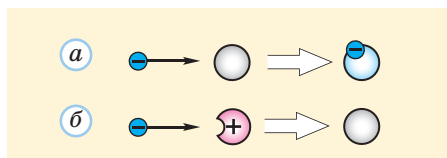


Рис. 3.5. Утворення негативного йону (а) та рекомбінація (б)

Зазвичай гази можна розглядати як діелектрики (наприклад, повітря забезпечує ізоляцію провідників у повітряних лініях електропередачі). Проте можна переконатися, що за певних умов повітря проводить струм.

Якщо зарядити електрометр, його стрілка тривалий час лишатиметься відхиленою від вертикалі. Якщо ж неподалік від кулі електрометра запалити сірник, стрілка швидко опуститься (рис. 3.3). Це свідчить про втрату електричного заряду. Отже, нагріте повітря проводить струм. Інакше кажучи, у повітрі з'явилися вільні заряджені частинки. Звідки ж вони взялися?

Нагрівання газу спричиняє збільшення середньої швидкості хаотичного руху його молекул. Тепер під час деяких зіткнень від молекул або атомів відриваються електрони. Таким чином у газі з'являються вільні заряджені частинки — електрони та позитивні йони (рис. 3.4).

Якщо вільний електрон наблизиться до нейтральної молекули (або атома), він може «прилипнути» до неї, утворивши негативний йон (рис. 3.5, а).

Як бачимо, газ стає провідним за умови йонізації. Якщо в йонізованому газі створити електричне поле, рух електронів і йонів стане напрямленим, тобто виникне електричний струм.



Струм у газах називають **газовим розрядом**.

Йонізувати газ можна не тільки за допомогою нагрівання. Нейтральні молекули та атоми газу можуть перетворюватися на йони під впливом різних випромінювань. Чинники, що викликають йонізацію газу, називають **йонізаторами**.

Повернемося до наведеного вище прикладу (див. рис. 3.3). Якщо загасити сірник, то стрілка електрометра практично миттєво зупиниться в новому положенні. Це свідчить про припинення газового розряду. Такий газовий розряд, що існує тільки за наявності зовнішнього йонізатора, називають **несамостійним**. Після припинення дії зовнішнього йонізатора кількість вільних заряджених частинок у газі швидко зменшується. Деякі з них потрапляють на електроди, з'єднані з полюсами джерела струму, та втрачають свій заряд. Інші ж зазнають **рекомбінації**: вільний електрон і позитивний йон зустрічаються (рис. 3.5, б) та утворюють нейтральну молекулу (атом).

За певних умов струм у газах може протікати навіть за відсутності зовнішнього йонізатора. У цьому випадку говорять про **самостійний газовий розряд**. Він виникає за умови, що електричне поле розганяє вільні електрони достатньо сильно. Тоді зіткнення електрона з нейтральним атомом або молекулою може спричинити їх йонізацію. Отже, кількість вільних електронів буде збільшуватися. «Нові» вільні електрони теж набуватимуть великої швидкості під дією електричного поля, тому вони можуть йонізувати нові атоми або молекули на своєму шляху. Кількість вільних заряджених частинок різко зростає — виникає **електронна лавина** (рис. 3.6).

Вільні електрони, утворені в лавині, швидко доходять до анода та поглинаються ним. Отже, для підтримання струму біля катода мають з'являтися нові вільні електрони, щоб започаткувати нові електронні лавини. Такі «початкові» електрони можуть вилітати з самого катода внаслідок «бомбардування» катода позитивними йонами або внаслідок «випаровування» електронів з розігрітого катода (**термоелектронної емісії**).

Умови для достатнього розгону електронів можуть створюватися за рахунок різних чинників. Це не тільки сильне електричне поле, а й розрідженість газу (в розрідженому газі електрони зазнають менше зіткнень та менше втрачають енергії) тощо. Відповідно розрізняють різні види самостійного газового розряду (рис. 3.7).

Тліючий розряд відбувається за низького тиску газу (в тисячі разів менше від атмосферного тиску). Цей розряд застосовують у люмінесцентних лампах, газових лазерах і трубках для реклами (колір світіння залежить від того, який саме газ міститься в трубці).

Іскровий розряд знайомий кожному — прикладом такого розряду є блискавка. Для іскрового розряду характерне виникнення на дуже короткий час світних ниток у формі зигзагів. Дуже швидко нагрівання газу в каналі розряду спричиняє різке розширення цього газу, що супроводжується виникненням звуку (потріскування в шкільних дослідах або удару грому під час народження блискавки). Іскровий розряд може виникати у вимикачах під час розімкнення кола; цей розряд застосовують для обробки міцних металів, для підпалювання пальної суміші у двигунах внутрішнього згоряння.

Коронний розряд виникає, наприклад, у грозову або передгрозову погоду поблизу загострених країв металевих предметів. Його можна спостерігати за світінням, що нагадує корону навколо предмета. Таке світіння на гострих кінцях корабельних щогл і рей моряки називали «вогнями святого Ельма». У зовнішньому електричному полі

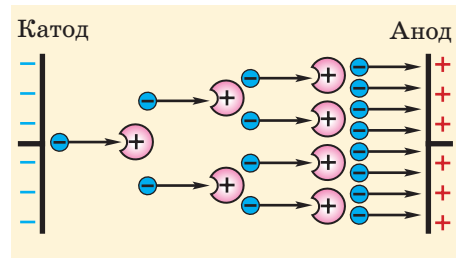
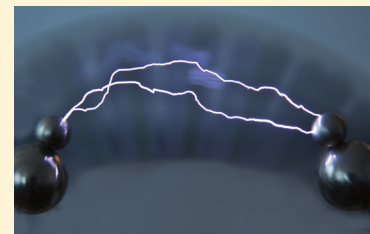


Рис. 3.6. Електронна лавина під час самостійного розряду



Тліючий



Іскровий



Коронний



Дуговий

Рис. 3.7. Різні види самостійного розряду



на поверхні предметів накопичується електричний заряд, що створює власне електричне поле. Це поле є найсильнішим саме поблизу загострених країв предмета. Воно й викликає йонізацію повітря та коронний розряд. Коронний розряд застосовують в електрофільтрах для очищення повітря.

Дуговий розряд можна спостерігати, якщо взяти два вугільних електроди, на які подано напругу в кілька десятків вольтів, торкнутися електродами один одного та розвести їх на невелику відстань. Між електродами виникне яскраве світіння, на яке просто боляче (та й не слід) дивитися незахищеним оком. Температура під час дугового розряду сягає температури поверхні Сонця (близько 6000 °C). Струм так сильно розігріває місце контакту електродів, що з катода безперервно «випаровуються» електрони, підтримуючи самостійний розряд. Висока ж температура підтримується через бомбардування електродів електронами та йонами, що розганяються електричним полем. Дуговий розряд застосовується дуже широко: для електричного зварювання металів, у потужних дугових лампах (для прожекторів, маяків, кінопроекційних апаратів), у дугових електропечах для виплавлення металів.



Розглядаючи газові розряди, ми вже фактично ознайомилися з новим для вас станом речовини — *плазмою*. Адже газ, у якому тече струм, — це вже не зовсім «звичайний» газ, який складається тільки з нейтральних атомів або молекул.

! **Плазмою** називають йонізований газ, у цілому електрично нейтральний.

Навколо фізики

Якщо розігріти речовину до температур у сотні тисяч і мільйони градусів (за таких температур уже байдуже, визначати температуру за Кельвіном чи Цельсієм), то нейтральних атомів, а тим більше молекул практично не залишиться. За таких високих температур зіткнення атомів настільки сильні, що з великою ймовірністю відбувається йонізація. Утворюється суміш негативно заряджених електронів і позитивно

заряджених йонів (це можуть бути навіть атомні ядра). Властивості речовини у такому стані суттєво відрізняються від властивостей газів: якщо молекули в газі взаємодіють лише під час зіткнень, то кожна заряджена частинка плазми взаємодіє з великою кількістю інших заряджених частинок. Тому в плазмі можливі дуже складні процеси, у яких досі намагаються розібратися вчені.

У газорозрядній трубці та газосвітній лампі, у комірках деяких сучасних плоских телевізорів ми маємо справу саме з плазмою. Ця плазма газового розряду є слабоіонізованою — більшість атомів і молекул лишаються «неушкодженими» та нейтральними. А от у каналі блискавки та в розряді під час електрозварювання йонізація вже помітніша (рис. 3.8).

У земних умовах плазма зустрічається не так і часто. Тому її назвали четвертим станом речовини (після твердого, рідкого та газоподібного). Однак у масштабах Всесвіту саме плазма поза конкуренцією як перший (найбільш поширений) стан речовини! Саме в такому стані перебуває більшість зір і речовина в міжзоряному просторі.

На Землі ж саме з плазмою пов'язані головні надії на створення термоядерних реакторів, які відкриють для людства практично невичерпні джерела енергії. Докладніше про це ви дізнаєтеся пізніше (див. § 27).



Рис. 3.8. Плазма в природі та техніці

4 Вчимося розв'язувати задачі

Задача. За допомогою електролізу нікелювали пластинку площею $S = 200 \text{ см}^2$. Електроліз проводили за сили струму $I = 2 \text{ А}$, товщина шару нікелю $h = 20 \text{ мкм}$. Протягом якого часу t відбувався електроліз? Густина нікелю $\rho = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, його електрохімічний еквівалент

$$k = 3 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}.$$

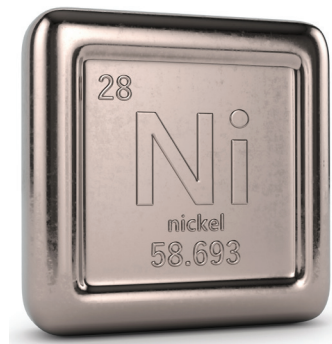
Розв'язання. Масу шару нікелю, отриманого за час t , визначимо із закону електролізу: $m = kIt$. З другого боку, цю ж масу можна записати у вигляді $m = \rho Sh$, де $S = 0,02 \text{ м}^2$ і $h = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Прирівнявши обидва вирази для маси, одержуємо $t = \frac{\rho Sh}{kI}$.

$$\text{Перевіримо одиниці величин: } [t] = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot \text{А}} = \frac{\text{Кл}}{\text{А}} = \text{с}.$$

Підставимо числові значення величин:

$$t = \frac{8900 \cdot 0,02 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-7} \cdot 2} \approx 5900 \text{ (с)}.$$

Відповідь: приблизно 1 год 40 хв.





Підбиваємо підсумки

Електричний струм можуть переносити не тільки вільні електрони (як у металах), важливу роль у перенесенні заряду в електролітах і газах відіграють йони. Процес виділення речовин на електродах під час протікання струму через електроліт називають електролізом. Згідно з першим законом Фарадея маса речовини, що виділилася під час електролізу, $m = kIt$. Якщо виразити електрохімічний еквівалент k через інші характеристики речовини, отримуємо $m = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{z} \cdot It$. Електроліз широко застосовують у сучасній техніці.

Електричний струм у газі називають газовим розрядом. Розрізняють несамостійний і самостійний газові розряди. Йонізований газ, у цілому електрично нейтральний, називають плазмою. Плазма є найбільш поширеним станом речовини у Всесвіті.

Контрольні запитання

1. Які вільні заряджені частинки є в металі? у розчині електроліту?
2. У чому полягає явище надпровідності?
3. Чому питомий опір електроліту зменшується під час нагрівання?
4. Запишіть формулу першого закону Фарадея для електролізу.
5. Чим відрізняється самостійний газовий розряд від несамостійного?
6. Що таке плазма?

Вправа № 3

1. Через електролізну ванну з розчином солі CuCl пройшов заряд 1800 Кл. Визначте масу отриманої міді. Електрохімічний еквівалент міді (Cu^+) дорівнює 0,66 мг/Кл.
2. Виконуючи лабораторну роботу з визначення електрохімічного еквівалента міді, учень протягом 27 хв пропускав електричний струм 5 А через розчин солі CuSO_4 . За час досліду маса катода збільшилася від 37,2 до 39,6 г. Яке значення електрохімічного еквівалента отримав учень?
3. Під час хромування деталі електроліз тривав 2,5 год за сили струму 8 А. Визначте товщину отриманого шару хрому, якщо площа поверхні деталі 500 cm^2 . Електрохімічний еквівалент хрому дорівнює 0,18 мг/Кл, його густина 7200 kg/m^3 .
4. Скільки електроенергії (у кіловат-годинах) витрачають для отримання кожної тонни алюмінію? Електроліз здійснюють за напруги 850 В. Втрати енергії не враховуйте. Електрохімічний еквівалент алюмінію дорівнює 0,09 мг/Кл.

§ 4. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ВАКУУМІ ТА НАПІВПРОВІДНИКАХ. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА

1 Електричний струм у вакуумі. Електронні пучки

Перш за все слід уточнити, що будемо називати **вакуумом** (у різних галузях науки та техніки цьому терміну надають різний зміст). Досить часто вважають, що у вакуумі взагалі мають бути відсутні будь-які частинки. Проте *такого* вакууму в природі просто не існує! Навіть у далекому міжзоряному просторі концентрація частинок відмінна

від нуля. Тому підійдемо з іншого боку: будемо відкачувати газ із посудини. Зрозуміло, що тим самим ми *наближаємо* стан речовини до вакууму. Коли ж буде досягнуто стан вакууму?

Зазвичай молекула газу набагато частіше зазнає зіткнень з іншими молекулами, ніж зі стінками посудини. Коли концентрація молекул зменшується, зіткнення між ними щодалі рідшають. І за якоїсь концентрації зіткнення молекули зі стінками посудини відбуваються частіше, ніж зіткнення з іншими молекулами. От тоді й кажуть, що досягнуто стану вакууму (іноді такий вакуум називають технічним).

Здавалося б, який може бути електричний струм у вакуумі? Адже для цього потрібні вільні заряджені частинки, а звідки вони візьмуться у вакуумі... Проте зважимо на інше: якщо б якісь заряджені частинки рухались у вакуумі, то ніщо б не заважало їх упорядкованому рухові. Тому такий «провідник», як вакуум, мав би перевагу над іншими. Залишається лише одне питання: звідки брати вільні заряджені частинки (носії заряду)?

Виявляється, їх можна «імпортувати» до вакууму! Якщо розмістити у вакуумі металевий провідник і розжарювати його електричним струмом, з поверхні провідника вилітатимуть електрони (це багато в чому схоже на випаровування рідини).

Ми вже згадували про це явище (термоелектронну емісію) у попередньому параграфі. Рухом електронів у вакуумі легко керувати за допомогою електричного (а згодом ви дізнаєтесь, що й магнітного) поля.

Провідник, з поверхні якого вилітають електрони, — *катод*. Якщо електрони прямують від катода до іншого електрода (*анода*), то коло замикається.

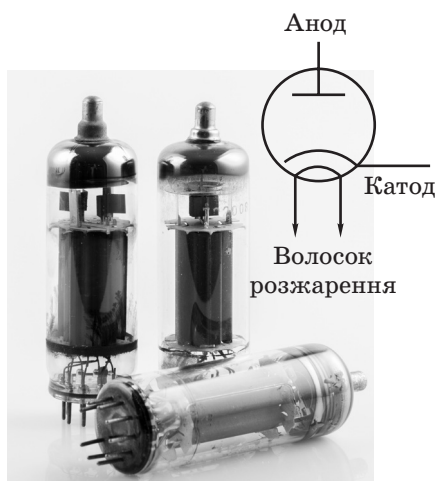
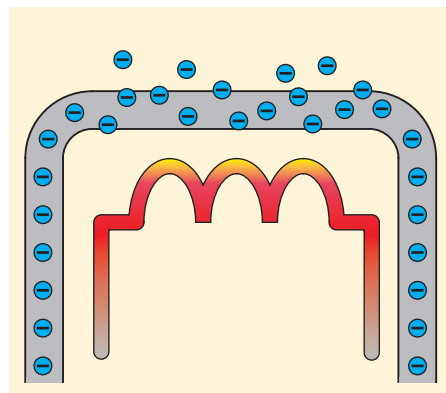


Рис. 4.1. Вакуумні діоди та схемне позначення вакуумного діода з прямим розжаренням катода

! Електричний струм у вакуумі переносять електрони.

Щоб вилетіти з поверхні, електрон має виконати певну роботу проти сил притягання (витратити певну енергію). Цю роботу називають **роботою виходу**. Чим менша ця робота, тим легше електрону покинути катод і тим більша кількість електронів, що вилітають. Сучасні катоди вкривають шаром спеціально підібраної речовини (наприклад, оксидів деяких металів), що зменшує роботу виходу та збільшує силу струму у вакуумі.

Першим важливим прикладом застосування електричного струму у вакуумі є **вакуумний діод** — двохелектродна електронна лампа (рис. 4.1). Це був перший пристрій, який проводив струм тільки в один бік.

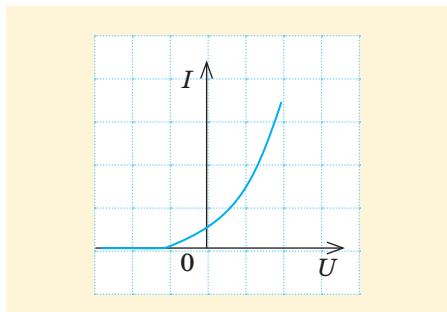


Рис. 4.2. Вольт-амперна характеристика вакуумного діода

Зверніть увагу!

- Сила струму відмінна від нуля,
- коли $U = 0$, і навіть за деяких від'ємних значень U . Річ у тім, що електрони вилітають із катода з певними швидкостями. Тому деякі з них можуть долітати до анода (тобто підтримувати електричний струм) за відсутності електричного поля або навіть долаючи «зустрічну» силу з боку цього поля.

Однобічна провідність вакуумного діода зумовлена тим, що внаслідок нагрівання з поверхні катода вилітають електрони, анод же лишається холодним. Тому електрони можуть рухатися через діод тільки від катода до анода (отже, електричний *струм* може протікати тільки у зворотному напрямі, від анода до катода). На [рис. 4.2](#) наведено вольт-амперну характеристику вакуумного діода (від'ємні значення напруги відповідають випадку, коли потенціал катода вищий за потенціал анода, тобто електричне поле «намагається» повернути електрони назад на катод).

Не менш важливим застосуванням електричного струму у вакуумі є **електронно-променева трубка (ЕПТ)**. На [рис. 4.3](#) спрощено показано конструкцію ЕПТ.

Електронна «гармата» у горловині трубки — катод, який випромінює інтенсивний пучок електронів. Спеціальна система (циліндри з отворами) фокусує цей пучок, робить його вузьким. Змінюючи напругу на циліндрах, можна й змінювати інтенсивність пучка (кількість електронів, які щосекунди досягають екрана). Коли електрони досягають екрана, який з внутрішнього боку вкрито шаром люмінофору, екран починає світитися. Інтенсивність світіння залежить від інтенсивності електронного пучка. Якби пучком не можна було керувати, ми отримали б тільки яскраву світну точку в центрі екрана. Проте пучком можна керувати!

На рисунку схематично показано **електростатичне керування**: коли електрон пролітає між двома зарядженими вертикальними пластинами, їх електричне поле надає йому горизонтального імпульсу, а електричне поле двох горизонтальних пластин — вертикального імпульсу. Отже, залежно від електричних напруг на цих двох системах пластин електрон відхиляється в горизонтальному та вертикальному напрямках і може потрапити в будь-яку точку екрана. За таким принципом діяв, наприклад, **електронний осцилограф**. Протягом тривалого часу в усіх телевізорах теж застосовували ЕПТ.

Електронам у вакуумі можна надати великої енергії. Електронні пучки можна застосовувати навіть для плавлення металів (так одержують дуже чисті метали).

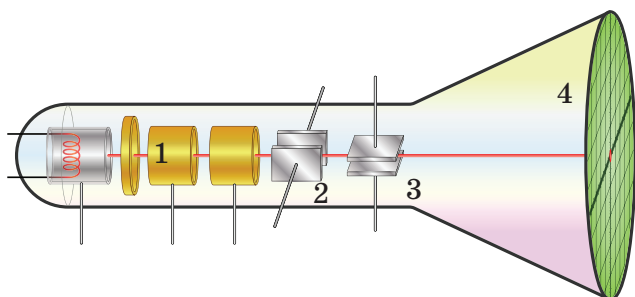


Рис. 4.3. Електронно-променева трубка: 1 — циліндричні електроди з отворами; 2 — вертикальні пластини; 3 — горизонтальні пластини; 4 — екран із шаром люмінофору

Вакуумні діоди дозволяють випрямлювати змінний струм (тобто перетворювати його на постійний). Якщо помістити між катодом і анодом ще один електрод (сітку), то навіть невелика зміна напруги між сіткою та катодом суттєво впливатиме на анодний струм. Така електронна лампа (*триод*) та інші багатоелектродні електронні лампи дозволяють підсилювати слабкі електричні

сигнали, і тому певний час були основними елементами електронних пристроїв. Так, на електронних вакуумних лампах було побудовано перші ЕОМ. Вони споживали дуже багато електроенергії для розжарення катодів цих ламп та займали багато місця; крім того, були ненадійними, бо дуже часто якась із ламп виходила з ладу.

2 Провідність напівпровідників

Від середини XX століття найбільші успіхи електроніки пов'язані з використанням напівпровідників. Комп'ютери, мобільні телефони, системи навігації, цифрові фотоапарати та відеокамери, сучасні джерела світла, плоскі екрани... Цей перелік можна було б значно подовжити. І всі ці чудеса сучасної техніки (які, правда, для вас складають звичне «середовище») ґрунтуються на застосуванні напівпровідникових приладів.



Що ж це за матеріали — напівпровідники — та чому вони надають такі величезні можливості? І яку саме «половину» струму вони проводять?

Достатньо глибоке розуміння будови та властивостей напівпровідників потребує знання квантової теорії. Проте спробуємо щось зрозуміти й без неї...



Напівпровідники можуть складатися з чистих елементів (Силіцію, Германію, Селену, Телуру тощо) або численних хімічних сполук. Напівпровідники зустрічаються на Землі нерідко — досить сказати, що Силіцій становить близько 30 % земної кори.

За значенням питомого електричного опору напівпровідники перебувають «посередині» між провідниками та діелектриками. Проте це не головне. Важливою відмінністю напівпровідників від інших речовин є залежність питомого опору від температури.

Питомий опір напівпровідників (на відміну від металів) дуже швидко зменшується внаслідок нагрівання (рис. 4.4). За низьких температур напівпровідники поведуться практично як діелектрики (зазначимо, що поки ми обговорюємо властивості чистих напівпровідників).

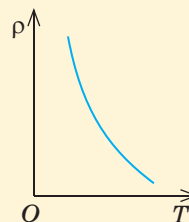
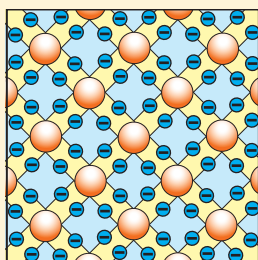


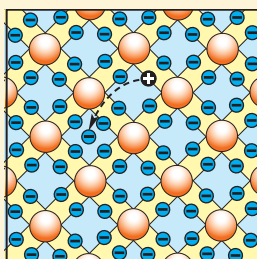
Рис. 4.4. Схематичний графік залежності питомого опору напівпровідника від температури



Низька температура

- атоми Германію
- електрони на ковалентних зв'язках

Рис. 4.5. Ковалентні зв'язки між атомами Германію



Кімнатна температура

- вільний електрон
- ⊕ дірка

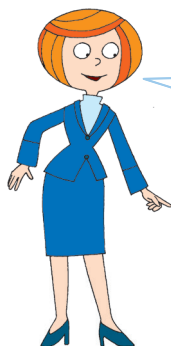
Рис. 4.6. Утворення вільного електрона та дірки

Це свідчить, що в напівпровідниках концентрація вільних заряджених частинок не лишається сталою (як у металах), а збільшується з підвищенням температури. Розглянемо на якісному рівні механізм цього явища, обравши для прикладу Германій (Ge). Для інших напівпровідників механізм є аналогічним.

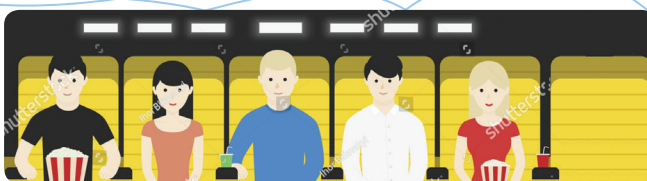
Атоми Германію мають по чотири слабкозв'язані (валентні) електрони в зовнішній оболонці. У кристалічній ґратці кожний атом має саме чотири найближчих сусіди (тому наведені нижче рисунки досить точно відтворюють цю ситуацію, хоч вони й двомірні). Зв'язок між атомами в кристалі є ковалентним (тобто його забезпечують пари валентних електронів, кожний із яких «належить» двом атомам). Зв'язок валентних електронів з атомами Германію є досить міцним, щоб не руйнуватися за низьких температур; отже, за таких температур практично всі валентні електрони «зайняті» в ковалентних зв'язках і вільних електронів практично немає (рис. 4.5).

Але вже приблизно за кімнатних температур, коли хаотичний рух атомів посилюється, певна частина зв'язків не витримує і, отже, деякі електрони стають вільними (рис. 4.6). Кількість таких електронів дуже мала, порівняно з кількістю вільних електронів у металах, тому питомий опір напівпровідників набагато перевищує питомий опір металів. Проте у діелектриків зв'язки електронів з атомами міцніші, і навіть за кімнатних температур вільні електрони не з'являються, питомий опір лишається величезним.

Разом із вільними електронами утворюються так звані дірки. Під цією назвою «ховається» нестача електрона на якомусь зв'язку між атомами. Електрон з якогось із сусідніх зв'язків може зайняти це місце, тоді дірка переміститься.



Дійсно: уявіть, що в якомусь ряду крісел у кінотеатрі вільне лише крайнє ліве місце. Куди переміститься це місце, якщо кожен глядач пересяде на одне крісло ліворуч?



Напрямок переміщення дірки протилежний напрямку переміщення електронів?



У певному сенсі дірку розглядають як частинку; значимо, що тоді *дірку можна розглядати як позитивно заряджену частинку* (наприклад, під дією електричного поля дірка та електрон рухатимуться в протилежних напрямках).

У чистому напівпровіднику вільні електрони та дірки утворюються завжди парами, тому їх кількості однакові. За відсутності електричного поля дірки та електрони рухаються хаотично, електричний струм відсутній. За певної температури щосекунди виникає певна кількість електронно-діркових пар. Зрозуміло, це не означає, що кількість вільних електронів і дірок безупинно збільшується. Відбувається й зворотний процес (рекомбінація) — унаслідок зустрічі вільного електрона з діркою вони зникають, тобто вільний електрон «заповнює» дірку і перестає бути вільним. За незмінних умов дуже швидко встановлюється динамічна рівновага: щосекунди виникає саме стільки електронно-діркових пар, скільки зникає внаслідок рекомбінації. Отже, за незмінних умов концентрація вільних електронів і дірок є сталою. Ця концентрація збільшується внаслідок підвищення температури. Ще однією причиною виникнення електронно-діркових пар може бути опромінення напівпровідника видимим світлом або іншим електромагнітним випромінюванням.

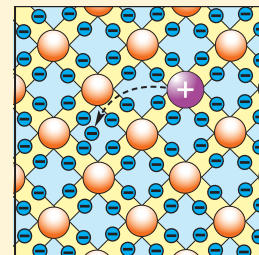
Отже, *провідність напівпровідників має електронно-діркову природу*.

Описаний вище тип провідності називають **власною провідністю напівпровідників**.

Під дією електричного поля рух вільних електронів і дірок стає напрямленим. Напрями їх руху протилежні, але спричинені цими рухами струми $I_{\text{електр}}$ і $I_{\text{дір}}$ напрямлені однаково (це нагадує рух позитивних і негативних йонів в електроліті). «Внески» електронів і дірок до загальної сили струму можуть суттєво відрізнятись, хоча їх кількості однакові, через різні швидкості напрямленого руху.

Електричні властивості напівпровідників дуже чутливі до наявності навіть малої кількості домішок. Розберемося з причинами такої чутливості знов-таки на прикладі Германію. Розглянемо кристалічні ґратки Германію, у яких є домішка заміщення — атом Арсену (As). Це означає, що атом As зайняв у кристалі місце замість атома Ge. Атом домішки має не чотири валентні електрони, як атом Ge, а п'ять. Чотири з них «працюють», забезпечуючи ковалентні зв'язки із сусідніми атомами, а от п'ятий є «зайвим». Він слабо зв'язаний з «рідним» атомом As і, найімовірніше, відірветься від нього та почне подорожувати кристалом — стане вільним (рис. 4.7). Зазначимо, що цей

Залежність опору напівпровідника від температури використовують у *терморезисторах (термісторах)*, опір яких швидко зменшується під час нагрівання. Залежність опору напівпровідника від освітленості використовують у *фоторезисторах*, їх опір зменшується внаслідок освітлення. Термо- та фоторезистори застосовують для вимірювання температури та освітленості, у системах сигналізації та автоматики



● Ge
● As

Рис. 4.7. Донорна домішка в напівпровіднику

вільний електрон утворюється без «пари» — без дірки (атом As перетворюється на позитивний йон, але ж цей йон не є вільним — він міцно зв'язаний з кристалічними ґратками). Оскільки концентрація вільних електронів і дірок у чистому напівпровіднику дуже мала, наявність навіть 0,001 % атомів домішки може принципово змінити ситуацію: тепер кількість вільних електронів перевищуватиме кількість дірок щонайменше в тисячі разів.

Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю домішок, називають **домішковою**.

Ми розглянули так звану **донорну домішку**, валентність якої більша за валентність чистої речовини. Донорна домішка спричиняє електронну провідність, або провідність *n*-типу (*n* — negative — негативний, що нагадує про знак заряду основних носіїв — електронів). Зазначимо, що кількість неосновних носіїв (дірок) набагато менша, ніж кількість основних носіїв (дірки виникають так само, як у чистому германії; їх кількість навіть зменшується через підвищений «ризик» зустрічі з вільним електроном і рекомбінації).

Якщо ж домішка заміщення матиме валентність 3 — це може бути, наприклад, Індій (In), — то валентні електрони атома домішки можуть забезпечити зв'язок лише з трьома із чотирьох сусідів. Ще один потрібний електрон атом In може захопити з якогось із сусідніх ковалентних зв'язків між атомами Германію. Атом In у цьому випадку перетвориться на негативний йон, але важливіше те, що поруч із ним утворюється дірка (рис. 4.8). Тепер кількість дірок набагато перевищує кількість вільних електронів, тобто дірки є основними носіями заряду, а вільні електрони — неосновними.

Таку домішку, валентність якої менша від валентності чистої речовини, називають акцепторною. **Акцепторна домішка** спричиняє діркову провідність, або провідність *p*-типу (*p* — positive — позитивний, що нагадує про знак заряду основних носіїв — дірок).

Зазначимо, що зрештою діркова провідність теж пояснюється переміщенням електронів, але не вільних, а тих, що забезпечують ковалентні зв'язки.

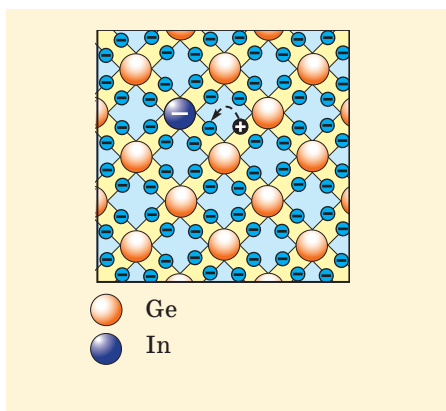


Рис. 4.8. Акцепторна домішка в напівпровіднику

3 Електронно-дірковий перехід. Напівпровідникові пристрої

Електронно-дірковий перехід (скорочено *n—p*-перехід або *p—n*-перехід) є головним елементом більшості

напівпровідникових приладів. Він утворюється в напівпровідниковому кристалі на межі двох зон: з електронною та дірковою провідністю. Щоб отримати такий перехід, можна, наприклад, вплавити до кристала Германію з електронною провідністю (за рахунок природних домішок) трохи Індію та нагріванням викликати прискорену дифузію Індію в Германії. Таким чином, отримаємо зону з дірковою провідністю і відповідно електронно-дірковий перехід.

За відсутності електричного поля вільні електрони й дірки хаотично рухаються в кристалі. Унаслідок такого руху відбувається дифузія електронів у p -зону і дірок — у n -зону. Оскільки ці частинки є зарядженими, їх дифузія спричиняє розділення зарядів у кристалі: утворюється так званий подвійний електричний шар (*запірний шар*) саме на електронно-дірковому переході (рис. 4.9).

Цей шар утворює електричне поле, яке протидіє подальшій дифузії носіїв заряду. На p — n -переході виникає різниця потенціалів (зазвичай кілька десятків вольт). Усередині запірного шару концентрація вільних заряджених частинок різко зменшується внаслідок рекомбінації між вільними електронами та дірками.

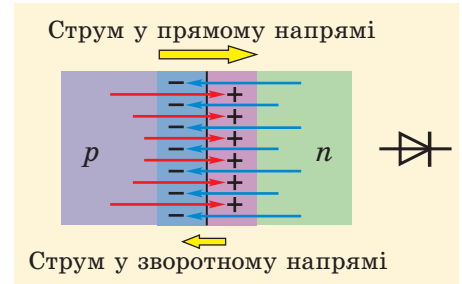


Рис. 4.9. Утворення подвійного електричного шару на електронно-дірковому переході та позначення напівпровідникового діода

Електронно-дірковий перехід має практично однобічну провідність: він пропускає помітний струм від p - до n -зони і лише дуже малий струм у зворотному напрямі.

Якщо підключити p — n -перехід у *прямому напрямі*, тобто приєднати позитивний полюс джерела струму до p -зони, а негативний — до n -зони, то заряд через p — n -перехід переноситимуть *основні носії* заряду (дірки з p -зони та електрони з n -зони). При цьому запірний шар звужується.

Якщо ж підключити p — n -перехід у *зворотному напрямі*, тобто приєднати позитивний полюс джерела струму до n -зони, а негативний — до p -зони, то заряд через p — n -перехід переноситимуть *неосновні носії* заряду (електрони з p -зони та дірки з n -зони). При цьому запірний шар стає більш широким.

Напівпровідниковий діод використовує саме однобічну провідність p — n -переходу. Вольт-амперну характеристику такого діода схематично показано на рис. 4.10 (від’ємні значення напруги та сили струму відповідають зворотному напрямі струму).

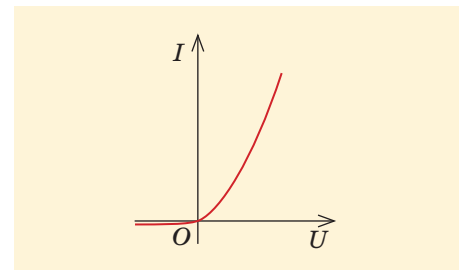


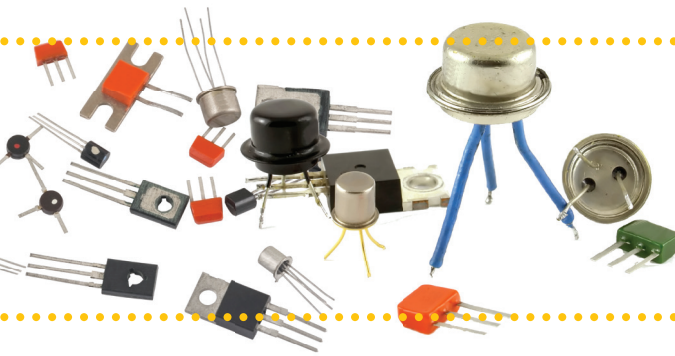
Рис. 4.10. Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода

Зверніть увагу!

- Часто кажуть, що діод має малий електричний опір у прямому напрямі та дуже великий опір — у зворотному. Проте слід розуміти, що це не зовсім точне твердження: строго кажучи, для напівпровідників узагалі та особливо для електронно-діркових переходів не виконується закон Ома. Тому якогось сталого опору в таких провідників немає.

Напівпровідникові діоди найчастіше використовують для випрямлення змінного струму. На їх базі створено й багато пристроїв іншого призначення.

Проте найбільш важливі наслідки мало винайдення транзистора.



Транзистор — електронний пристрій з напівпровідникового матеріалу, зазвичай з трьома виводами, який дозволяє керувати за допомогою слабкого вхідного сигналу струмом в електричному колі. Транзистори застосовують для підсилення, генерування та перетворення електричних сигналів.

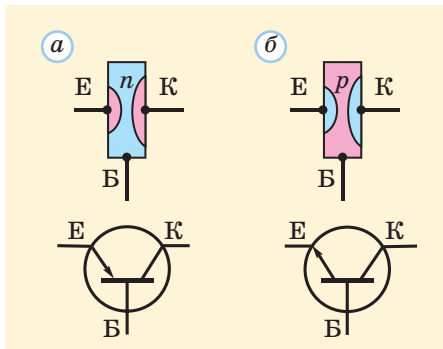


Рис. 4.11. Будова та позначення біполярних транзисторів типу $p-n-p$ (а) і $n-p-n$ (б). Голубим зафарбовано зони з провідністю n -типу, рожевим — p -типу

Зверніть увагу!

- На рисунках показано три основні зони транзистора: E — емітер, B — база, K — колектор. Зазначимо, що товщина бази має бути дуже малою. Тільки за цієї умови транзистор може, наприклад, ефективно підсилювати слабкі електричні сигнали.

Познайомимося спочатку з будовою **біполярного транзистора** (саме його було винайдено першим). Він містить два електронно-діркових переходи. Відповідно існують два типи таких транзисторів: $p-n-p$ і $n-p-n$ (рис. 4.11).

Якщо потенціал бази $p-n-p$ -транзистора вищий за потенціал емітера, то струм не протікає через транзистор (лівий $p-n$ -перехід закритий). Отже, транзистор може працювати як електронний ключ. Якщо ж потенціал бази нижчий від потенціалу емітера, то навіть невеликі зміни сили струму в колі емітера спричиняють такі самі зміни струму в колі колектора та значні зміни напруги на резисторі з великим опором (рис. 4.12). Таким чином, вхідний електричний сигнал підсилюється за напругою і, відповідно, за потужністю. Це лише одна з можливих схем застосування транзистора для підсилення сигналів.

У сучасній електроніці замість біполярних зазвичай застосовують так звані **польові транзистори**. У них керування електричним опором каналу проходження струму здійснюється за допомогою поперечного електричного поля. Розглянемо як приклад польовий транзистор з керуючим $p-n$ -переходом і каналом n -типу (такий транзистор містить не два $p-n$ -переходи, а лише один). Це пластина з провідністю p -типу, що має на протилежних кінцях електроди (витік і стік), за допомогою яких вона

включена в кероване коло. Між цими електродами, через які відповідно входять і виходять носії заряду, створено канал з провідністю n -типу (рис. 4.13). Керуюче коло підключається до третього електрода (затвора). У це коло входять джерело постійної напруги, що подає зворотну напругу на p — n -перехід, і джерело вхідного сигналу. Залежно від вхідної напруги змінюється товщина запірного шару, збідненого носіями заряду. Відповідно змінюються й ефективна площа поперечного перерізу каналу, і його опір.

Цей опір можна зменшити до кількох сотих або навіть тисячних часток ома, тому навіть за великої сили струму в польовому транзисторі виділяється невелика теплова потужність. Це дозволяє зменшити розміри пристроїв і обійтися без громіздких радіаторів для охолодження. Польові транзистори мають і інші переваги перед біполярними. Завдяки їх застосуванню наручні електронні годинники та пульти дистанційного керування побутовими приладами працюють до кількох років від одного мініатюрного джерела живлення — адже витрати енергії мізерно малі.

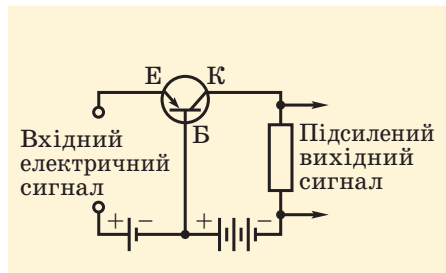


Рис. 4.12. Підсилення електричного сигналу за допомогою транзистора (схема зі спільною базою)

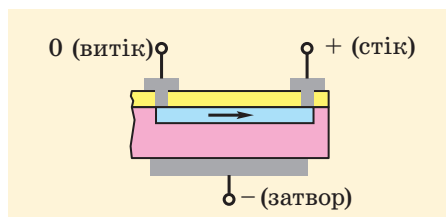


Рис. 4.13. Спрощене схематичне зображення одного з типів польових транзисторів. Голубим зафарбовано n -канал, рожевим — пластинку силіцію з провідністю p -типу, жовтим — шар діелектрика (SiO_2), сірим — алюмінієві електроди. Стрілка показує напрям руху носіїв заряду

4 Термоелектричні явища

Ви знаєте, що між електричними та тепловими явищами існують певні зв'язки — наприклад, електричний струм у провіднику відповідно до закону Джоуля — Ленца спричиняє виділення певної кількості теплоти. Проте існують також інші **термоелектричні явища**, відомі ще з XIX століття. Ми коротко опишемо два з них.

Ефект Зеебека. Складемо електричне коло з двох провідників із різних матеріалів. Таке коло містить два контакти цих матеріалів (рис. 4.14). Якщо температури цих контактів відрізняються, то в колі виникає ЕРС (так звана **термоЕРС**) і виникає термоелектричний струм. Якщо розірвати коло в певному перерізі, то в місці розриву виникає різниця потенціалів, що дорівнює термоЕРС. Таке коло — приклад **термопари**.

Якщо йдеться про відносно невеликий температурний інтервал, то значення термоЕРС пропорційне різниці

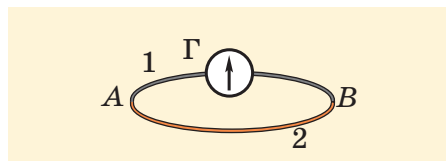
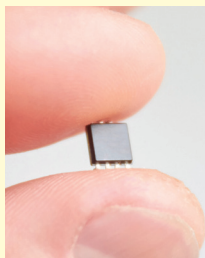


Рис. 4.14. Ефект Зеебека: термоелектричний струм виникає, якщо температури контактів A і B між провідниками 1 і 2 відрізняються. Гальванометр Γ фіксує виникнення струму. Напрямок струму залежить від того, який контакт має вищу температуру

• Навколо фізики

Сучасні технології дозволили зменшити розміри транзисторів до десятків нанометрів і виготовляти не окремі транзистори, а так звані чипи, які на площі $1\text{--}2\text{ см}^2$ містять мільярди



транзисторів, з'єднаних у певну систему (наприклад, процесор комп'ютера). Мініатюризація та підвищення ступеня інтеграції напівпровідникових елементів тривають.



температур контактів $\Delta T = T_A - T_B$ та залежить від природи обох провідників. У загальному ж випадку термоЕРС може навіть змінювати знак під час переходу до іншого температурного інтервалу. Зазвичай для металів термоЕРС становить кілька десятків мікр вольт на кожен градус різниці температур. Для напівпровідників, у яких концентрація носіїв заряду набагато менша, термоЕРС більша в сотні разів.

Ефект Зеебека застосовують для вимірювання температур і для безпосереднього перетворення внутрішньої енергії в електричну (тобто для створення джерел струму).

Ефект Пельтьє (зворотний до ефекту Зеебека) полягає в поглинанні або виділенні тепла під час протікання електричного струму через контакт (спай) двох різних провідників. Знак ефекту залежить від напрямку струму. Свого часу Е. Х. Ленц продемонстрував, що за великої сили струму можна або заморозити, або довести до кипіння краплю води, що перебуває на спай. Виділення або поглинання тепла під час цього явища не впливає на «звичайне» джоулеве тепло, обидва ефекти просто «додаються» один до одного.

Фізика і техніка в Україні

З історії вивчення напівпровідників



В. Є. Лашкар'ов (1903–1974) — видатний український науковець, першовідкривач фізичних ефектів, які були покладені в основу напівпровідникових технологій і мікроелектроніки

1956 року в Стокгольмі три американських учені Д. Бардін, В. Шоклі та У. Браттейн отримали Нобелівську премію з фізики «за дослідження напівпровідників і відкриття транзисторного ефекту». Їх роботи відкрили величезні перспективи подальшого розвитку фізики та техніки, імена цих учених увійшли до історії науки.

Але ще за 15 років до зазначеної події молодий тоді український фізик В. Є. Лашкар'ов експериментально виявив і описав

у статті фізичне явище, яке пізніше отримало назву «електронно-дірковий перехід». Він описав і механізм інжекції — явища, на якому ґрунтується дія напівпровідникових діодів і транзисторів.

Події Другої світової війни, а потім — «холодна війна» та ізоляція СРСР від західного світу відіграли головну роль у тому, що роботи українського фізика не здобули належного світового визнання. Але він продовжував і розширював свої дослідження. Під керівництвом В. Є. Лашкар'ова в роки війни були створені перші в СРСР напівпровідникові (купроксні) діоди, а пізніше — і «напівпровідникові тріоди», тобто транзистори. Купроксні діоди застосовували в армійських радіостанціях.

В. Є. Лашкар'ов сформував видатну наукову школу в галузі фізики напівпровідників. У 1960 році він очолив новостворений Інститут напівпровідників АН УРСР (нині цей інститут носить його ім'я).

Кількість теплоти в ефекті Пельтьє пропорційна силі струму та тривалості явища, вона також залежить від природи обох провідників. Цей ефект, як і попередній, значно помітніший для напівпровідників, ніж для металів.

Ефект Пельтьє «працює» в термоелектричних холодильниках. Їх переваги перед звичними компресійними холодильниками — відсутність рухомих деталей, надійність, безшумність, компактність.

Усі термоелектричні явища зумовлені порушенням теплової рівноваги в потоці носіїв заряду. Їх повне мікроскопічне пояснення можливе тільки на основі квантової теорії.



Підбиваємо підсумки

Якщо газ настільки розріджений, що зіткнення молекули зі стінками посудини відбуваються частіше, ніж зіткнення з іншими молекулами, такий стан речовини називають вакуумом. У вакуумі носіями заряду є електрони. Зазвичай вони вилітають з поверхні розжареного катода (це явище називають термоелектронною емісією). Вакуумний діод (двохелектродна електронна лампа) проводить струм тільки в один бік. Електронно-променева трубка (ЕПТ) дозволяє керувати рухом електронів. Свого часу саме ЕПТ зробили можливим створення телебачення.

Провідність напівпровідників має електронно-діркову природу. Дірку можна розглядати як позитивно заряджену частинку. Питомий опір напівпровідників зменшується внаслідок нагрівання або освітлення через збільшення концентрації електронів і дірок. Ці ефекти використовують у термо- і фоторезисторах.

У чистому напівпровіднику (з власною провідністю) вільні електрони та дірки утворюються завжди парами, тому їх кількості однакові.

Домішкова провідність напівпровідника зумовлена наявністю донорної або акцепторної домішки, які спричиняють відповідно електронну (n -типу) та діркову (p -типу) провідності. Електронно-дірковий перехід має практично однобічну провідність: він пропускає помітний струм тільки від p - до n -зони. На властивостях p — n -переходів ґрунтується дія напівпровідникових діодів і транзисторів.

Ефект Зеебека спостерігається в колах, які містять провідники різної природи: за існування різниці температур між двома контактами цих провідників у колі виникає термоЕРС. Зворотним є ефект Пельтьє: якщо в такому колі існує електричний струм, то на одному з контактів тепло виділяється, а на іншому — поглинається.

Контрольні запитання

1. Завдяки якому явищу можна створити електричний струм у вакуумі? 2. Чому вакуумний діод проводить струм тільки в один бік? 3. Що таке дірки? Чому їх розглядають як позитивно заряджені частинки? 4. Як виникає елек-

тронна провідність напівпровідника? діркова провідність? 5. Чим зумовлена практично однобічна провідність електронно-діркового переходу? 6. У чому полягають ефекти Зеемана та Пельтьє?

Вправа № 4

Елементарний електричний заряд дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, маса електрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

1. Якими мають бути знаки зарядів керуючих пластин (див. рис. 4.3), щоб електронний пучок створив світну точку в правому верхньому куті екрана? у лівому верхньому куті?

2. Скориставшись періодичною системою елементів, визначте елементи, які можна використовувати як акцепторні домішки в силіції.

3. За якої напруги між анодом і катодом вакуумного діода електрони підлітають до анода зі швидкістю 10 000 км/с? Уважайте, що електрони вилітають з поверхні катода з малою швидкістю.

4. За якої анодної напруги час руху електрона від катода до анода вакуумного діода дорівнює 10 нс? Відстань між катодом і анодом дорівнює 1,5 см; електричне поле вважайте однорідним.

5. Як зміниться опір пластини силіцію з домішкою атомів Фосфору, якщо ввести в неї домішку атомів Галію? Концентрації атомів Фосфору і Галію однакові.

6. Визначте силу струму в ділянці кола (рис. 1), якщо напруга між точками A і B дорівнює 18 В, а опори резисторів $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 50$ Ом,

$R_3 = 40$ Ом. Якою стане сила струму, якщо змінити полярність напруги? Діоди вважайте ідеальними.

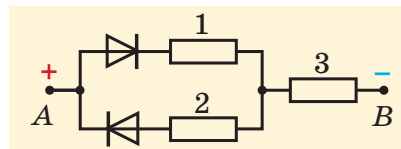


Рис. 1

7. Визначте силу струму в колі (рис. 2), якщо напруга між точками A і B дорівнює 18 В, а опір кожного з резисторів 60 Ом. Якою стане сила струму, якщо змінити полярність напруги? Діод вважайте ідеальним.

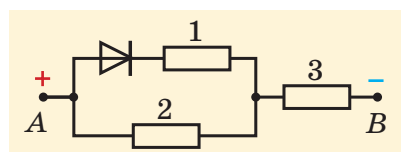


Рис. 2

8. Пучок електронів, розігнаних напругою 5 кВ, влітає в плоский конденсатор посередині між пластинами паралельно ним. Довжина конденсатора 10 см, відстань між пластинами 10 мм. За якої найменшої напруги на конденсаторі електрони не вилітатимуть з нього?

§ 5. МАГНІТНЕ ПОЛЕ

1 Взаємодія провідників зі струмом. Магнітне поле

З курсу фізики попередніх класів ви вже знаєте, що електрична взаємодія між зарядженими частинками передається через електричне поле. Проте коли заряджені частинки рухаються, до електричної взаємодії додається ще одна — магнітна. У XIX столітті після відкриттів Ерстеда, Ампера, Фарадея та Максвелла стало зрозуміло: взаємодія між магнітами та між провідниками зі струмом має однакову фізичну природу. Ця взаємодія, так само як електрична, здійснюється через поле. Відповідне поле називають магнітним.

Магнітне поле має багато спільного з електричним, проте є й принципові відмінності. Якщо електричне поле можна виявити за його дією на будь-яку заряджену частинку, то магнітне поле діє лише на рухомі заряджені частинки.

Магнітне поле — це форма матерії, головною властивістю якої є силова дія на рухомі тіла, що мають електричний заряд.

Нагадаємо, що паралельні провідники, по яких струми течуть в одному напрямі, притягаються; якщо ж струми течуть у протилежних напрямках, провідники відштовхуються (рис. 5.1). Ця взаємодія є наслідком того, що кожний провідник зі струмом створює навколо себе магнітне поле, яке й діє на інший провідник зі струмом. Можна спостерігати також дію магнітного поля провідника зі струмом на магніт (магнітну стрілку) та магнітного поля магніту на провідник зі струмом (рис. 5.2, 5.3).

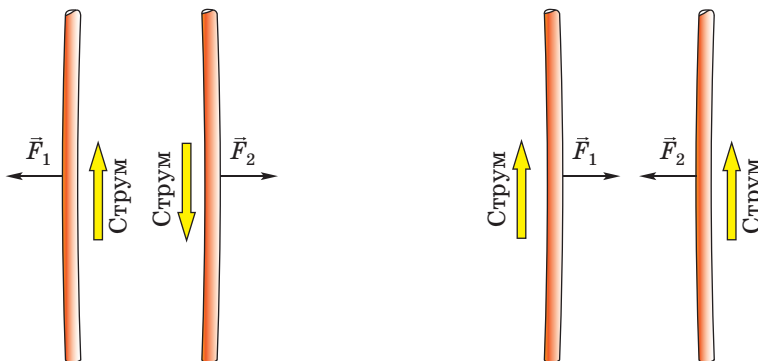


Рис. 5.1. Взаємодія паралельних провідників зі струмом

Трохи пізніше ми переконаємося, що такому означенню не суперечить, наприклад, дія магнітного поля на магнітну стрілку.



Зверніть увагу!

- Взаємодія провідників зі струмом є результатом взаємодій багатьох «пар» рухомих заряджених частинок, які належать різним провідникам. За відсутності струму вільні електрони в металі теж рухаються й створюють магнітне поле. Проте через хаотичність руху цих частинок їх магнітні поля практично компенсують одне одного. Тільки *направлений* рух заряджених частинок (електричний струм) спричиняє магнітне поле, яке проявляє себе на макроскопічному рівні. (Із § 8 ви дізнаєтесь, що магнітне поле може виникати і з інших причин.)

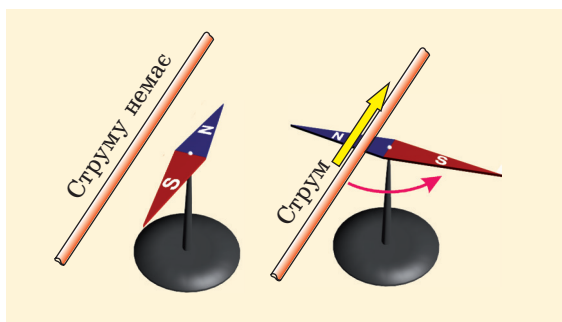


Рис. 5.2. Дія магнітного поля струму на магнітну стрілку

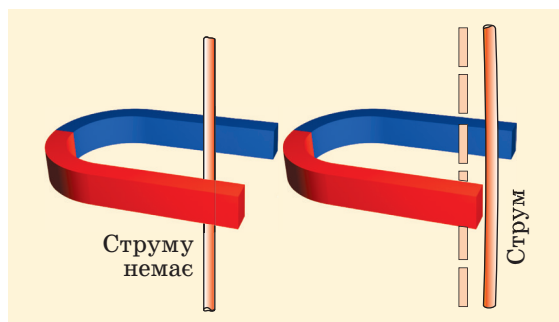


Рис. 5.3. Дія магнітного поля магніту на провідник зі струмом

З курсу фізики 9 класу ви знаєте, що магнітне поле зручно досліджувати за допомогою маленьких магнітів

(магнітних стрілок) або залізних ошурок, які в магнітному полі намагнічуються й теж стають крихітними магнітами. Якщо «допомогти» цим крихітним магнітам подолати силу тертя (наприклад, постукувати по опорі, на якій їх розсипано), то вони «шикуватимуться» уздовж певних ліній, утворюючи наочне зображення магнітного поля. Відповідні лінії називають **лініями магнітного поля** або **лініями магнітної індукції**. Маленькі магнітні стрілки теж орієнтуються вздовж цих ліній, що дає можливість приписати лініям певний напрям.

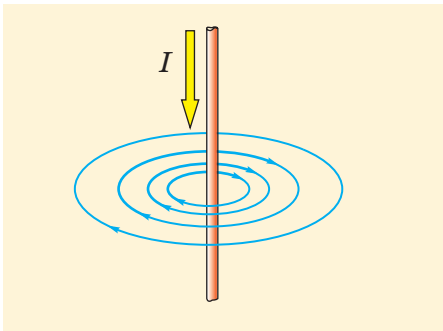


Рис. 5.4. Лінії магнітного поля прямого провідника зі струмом

Напрямок лінії магнітного поля в даній точці збігається з напрямом, який вказує північний полюс маленької магнітної стрілки, що перебуває в цій точці.

На рис. 5.4–5.6 показано лінії магнітного поля прямого провідника зі струмом (кожна лінія має форму кола, оскільки магнітні стрілки орієнтуються перпендикулярно до провідника), колового витка зі струмом і **соленоїда** — котушки, рівномірно намотаної на циліндричну поверхню. Зазначимо, що коли довжина соленоїда набагато більша за його діаметр, магнітне поле всередині соленоїда є **однорідним** (лінії магнітного поля паралельні осі соленоїда, відстані між сусідніми лініями однакові). На рис. 5.7 показано лінії магнітного поля штабового магніту.

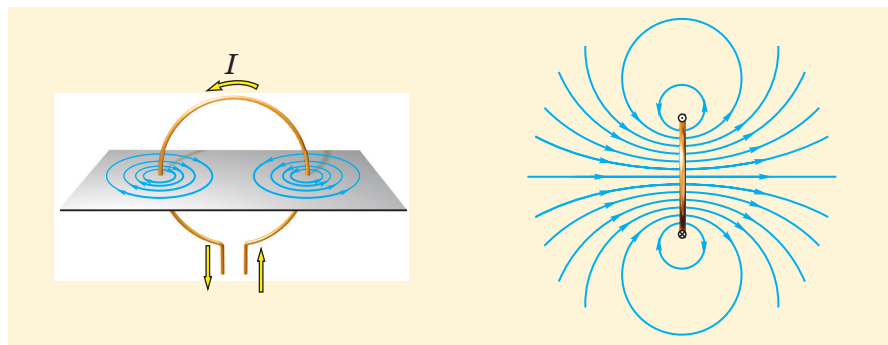


Рис. 5.5. Лінії магнітного поля колового витка зі струмом

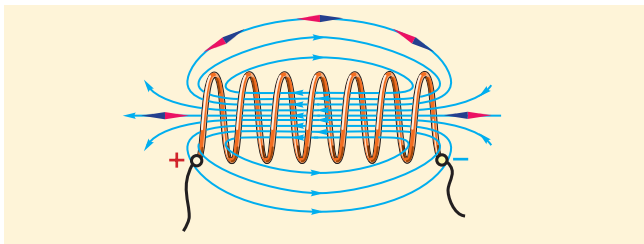


Рис. 5.6. Лінії магнітного поля котушки зі струмом

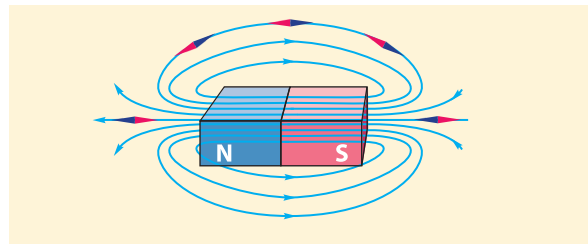


Рис. 5.7. Лінії магнітного поля штабового магніту

Лінії магнітної індукції завжди є замкненими. На відміну від силових ліній електричного поля, вони ніде не починаються та не закінчуються. Поля з такими лініями називають **вихровими**. Отже, магнітне поле є вихровим.

Як визначити напрям ліній магнітної індукції? Якщо йдеться про магнітне поле магніту, то лінії виходять з північного полюса та входять у південний полюс цього магніту (рис. 5.7); усередині ж магніту лінії магнітного поля йдуть від південного до північного полюса.

Якщо ж магнітне поле створюється провідником зі струмом, слід скористатися **правилом свердлика**. Напрямок обертання ручки свердлика (гвинта із правою нарізкою, рис. 5.8) пов'язаний з напрямом поступального руху свердлика так само, як напрям струму — з напрямом ліній магнітного поля цього струму. Правило свердлика «працює» як для прямого провідника зі струмом, так і для витка або котушки.

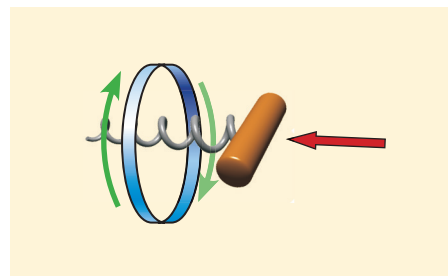


Рис. 5.8. Правило свердлика для колового витка зі струмом: якщо зелені стрілки показують напрям струму, який тече у витку, то червона стрілка відповідає напрямку ліній магнітного поля всередині витка

Зверніть увагу!

- Виявляється, лінії магнітної індукції можуть бути й незамкненими, хоч вони дійсно ніде не починаються та не закінчуються. Саме такими є лінії магнітного поля токамаків (тороїдальних камер з магнітними котушками). Ці лінії багато разів закручуються навколо тора, утворюючи так звані «магнітні поверхні». Проте всі наведені в тексті висновки щодо магнітного поля справедливі й у таких випадках.

Якщо напрям поступального руху свердлика збігається з напрямом струму в прямому провіднику, то напрям обертання ручки свердлика збігається з напрямом магнітних ліній поля цього струму.

Якщо напрям обертання ручки свердлика збігається з напрямом струму в котушці або витку, то напрям поступального переміщення свердлика збігається з напрямом магнітних ліній поля цього струму в центрі витка або всередині котушки.

Отже, рис. 5.8 правильно ілюструє правило свердлика для всіх описаних вище випадків: якщо червона стрілка відповідає напрямку струму, то зелені — напрямку магнітних ліній, а якщо червона відповідає напрямку магнітних ліній, то зелені — напрямку струму.



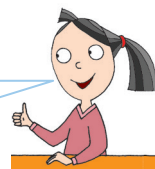
2 Сила Лоренца. Індукція магнітного поля

На початку вивчення електричного поля ми ввели його силову характеристику — напруженість $\vec{E}$. Ви вже знаєте, що головну характеристику магнітного поля назвали *індукцією магнітного поля* (магнітною індукцією). Це теж векторна величина, її позначають $\vec{B}$. Давайте повернемося ще раз до фізичного змісту цієї величини.

Щоб дати означення індукції магнітного поля, можна скористатися різними проявами цього поля: дією на рухомі заряджені частинки, на провідники зі струмом, на рамку зі струмом або магнітну стрілку. Ми візьмемо за основу дію магнітного поля на рухомі заряджені частинки*.

Нагадаємо, що означенням напруженості *електричного* поля є проста формула: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Силу, з якою магнітне поле діє на рухомі заряджені частинки, називають **силою Лоренца**. Її позначають $\vec{F}_L$.

То, може, не мудруватимемо?
Дамо означення $\vec{B}$ за аналогією з напруженістю електричного поля?
Тобто напишемо $\vec{B} = \frac{\vec{F}_L}{q}$ — і все?



На жаль, не вийде. Потрібно врахувати, що сила Лоренца залежить не тільки від магнітного поля та заряду частинки.



Ця сила точно залежить ще й від швидкості руху частинки (адже на нерухому частинку сила Лоренца взагалі не діє). Отже, звернімося до результатів дослідів (вони, на жаль, занадто складні для шкільного кабінету фізики, проте нескладні для сучасної фізичної лабораторії). Якщо пропускати через певну точку магнітного поля різні заряджені частинки в різних напрямках і з різними швидкостями, то виявляється таке:

- на частинку, яка рухається вздовж лінії магнітної індукції, сила Лоренца не діє;
- якщо задати модуль швидкості частинки, то модуль сили Лоренца буде найбільшим ($F_{L \max}$) під час руху перпендикулярно до лінії магнітної індукції;
- максимальний модуль сили Лоренца прямо пропорційний модулям заряду частинки та швидкості її руху ($F_{L \max} \propto |q|v$).

Тепер нам слід отримати величину, яка б не залежала ані від заряду частинки, ані від швидкості її руху. Цю величину й можна буде вважати силовою характеристикою магнітного поля.

Я бачу таку можливість: якщо розділити $F_{L \max}$ на добуток $|q|v$, то отримаємо саме таку величину, як треба!



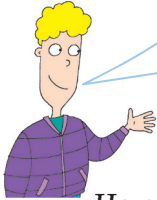
Це цілком справедливо. Модуль магнітної індукції можна визначити за формулою $B = \frac{F_{L \max}}{|q|v}$.



* У більшості підручників за традицією наведено інше (еквівалентне) означення індукції магнітного поля.

Одиницю магнітної індукції називають тесла (1 Тл) на честь знаменитого вченого та винахідника Н. Тесла. 1 Тл — це індукція магнітного поля, яке діє із силою 1 Н на тіло із зарядом 1 Кл, що рухається зі швидкістю 1 м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції. З означення

$$\text{випливає: } 1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ Кл} \cdot 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$



Але ж магнітна індукція — це векторна величина! Який напрям треба приписати вектору $\vec{B}$? Може, скористатися для цього лініями магнітної індукції?

Це означає, що *магнітна індукція в кожній точці напрямлена по дотичній до лінії магнітної індукції*. Такий самий зв'язок існує між напруженістю електричного поля та його силовими лініями. Модуль магнітної індукції більший там, де відстань між лініями менша.

Щоб отримати тепер загальну формулу для сили Лоренца, потрібно зробити ще один крок: розглянути заряджену частинку, яка рухається під довільним кутом α до ліній магнітної індукції. Швидкість $\vec{v}$ такої частинки (рис. 5.9) можна записати як суму: $\vec{v} = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}$, де $\vec{v}_{\parallel}$ і $\vec{v}_{\perp}$ напрямлені відповідно вздовж лінії магнітної індукції та перпендикулярно до неї. Рух зі швидкістю $\vec{v}_{\parallel}$ не спричиняє появи сили Лоренца; отже, цю силу можна виразити тільки через $\vec{v}_{\perp}$. Отримаємо

$$F_{\text{Л}} = |q| B v_{\perp} = |q| B v \sin \alpha, \quad (5.1)$$

де α — кут між швидкістю частинки та магнітною індукцією (або напрямом лінії магнітної індукції).

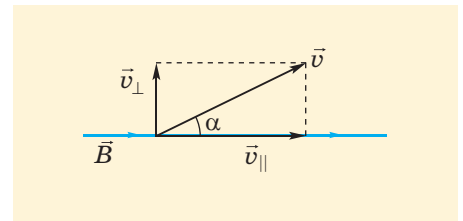


Рис. 5.9. Дві складові швидкості частинки в магнітному полі

Отже, ми навчилися визначати силу Лоренца і тепер готові аналізувати всі пов'язані з нею питання?

Не зовсім! Ми ще нічого не сказали про напрям сили Лоренца. А це дуже важливе та цікаве питання.

Сила Лоренца завжди перпендикулярна до напрямку швидкості $\vec{v}$ руху частинки та напрямку магнітної індукції $\vec{B}$.



Це треба добре уявляти: якщо на рисунку показано напрями $\vec{v}$ і $\vec{B}$, то напрям сили Лоренца $\vec{F}_{\text{Л}}$ перпендикулярний до площини рисунка! Вектори $\vec{v}$, $\vec{B}$ і $\vec{F}_{\text{Л}}$ ніколи

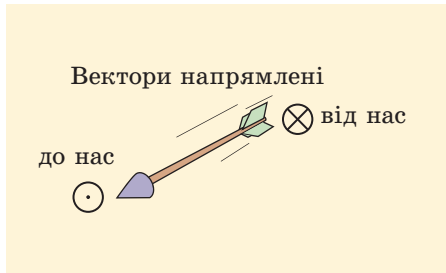


Рис. 5.10. Позначення векторів, перпендикулярних до площини рисунка

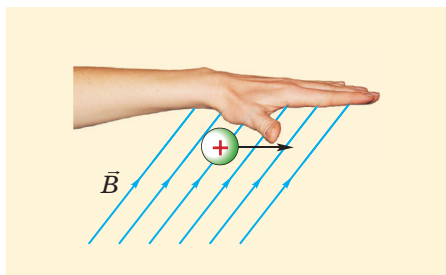


Рис. 5.11. Правило лівої руки для руху позитивно зарядженої частинки в магнітному полі

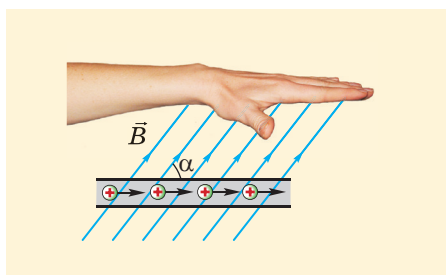


Рис. 5.12. Правило лівої руки для провідника зі струмом у магнітному полі

не належать одній площині. Для зручності зображення векторів, які напрямлені перпендикулярно до площини рисунка, застосовують показані на [рис. 5.10](#) позначення. Їх легко запам'ятати: уявіть, що точка — це вістря стріли, яка наближається до вас, а хрестик — оперення стріли, яка віддаляється від вас.

Сила Лоренца не виконує механічної роботи, оскільки вона завжди перпендикулярна до швидкості частинки (ця сила не може розганяти або «гальмувати» частинку, вона тільки змінює напрям руху). Тому ніякої енергетичної характеристики магнітного поля (аналогічної потенціалу електростатичного поля) не вводять.

Лишається ще одне важливе питання. Якщо ми знайшли пряму, перпендикулярну і до $\vec{v}$, і до $\vec{B}$, то сила Лоренца напрямлена вздовж цієї прямої. Але в який бік? Треба вибрати правильний напрям із двох можливих. Для цього застосовують **правило лівої руки** ([рис. 5.11](#)):

Якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітного поля входили в розкриту долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрям руху позитивно зарядженої частинки, то відігнутий на 90° великий палець покаже напрям сили Лоренца. Для негативно зарядженої частинки напрям сили Лоренца є протилежним.

3 Сила Ампера

Тепер ми можемо розглянути силу, яка діє з боку магнітного поля на провідник зі струмом. Цю силу називають силою Ампера на честь видатного французького вченого XIX століття. Для *нерухомого* провідника сила Ампера — це просто сума сил Лоренца, які діють на всі заряджені частинки в провіднику. Уважатимемо магнітне поле однорідним, позначимо модуль його магнітної індукції B ; у магнітному полі перебуває ділянка провідника завдовжки l , яка утворює кут α з напрямом магнітних ліній. Позначимо кількість вільних заряджених частинок у цій ділянці провідника N , уважатимемо заряд q_0 кожної з цих частинок позитивним. Уважатимемо для простоти, що всі ці частинки рухаються в один бік (у напрямі струму) з однаковою швидкістю* v ([рис. 5.12](#)). Напрямок сили Ампера $\vec{F}_A$ перпендикулярний до провідника та магнітних ліній.

* Фактично це середня швидкість напрямленого руху заряджених частинок.

Для сили Ампера правило лівої руки формулюється так: якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітного поля входили в розкриту долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрям струму, то відігнутий на 90° великий палець покаже напрям сили Ампера. Якщо ж заряд частинок негативний, вони рухаються в напрямі, протилежному до струму, а напрям сили Ампера так само пов'язаний із напрямом струму.

Що ж до модуля сили Ампера, то його можна виразити через модуль сили Лоренца $\vec{F}_L$, яка діє на кожен заряджений елементарний заряд: $F_A = NF_L = Nq_0 B v \sin \alpha$.

Виразимо F_A через силу струму в провіднику. За час t через поперечний переріз провідника проходять усі вільні заряджені частинки, які містяться у відрізку провідника завдовжки vt . Кількість цих частинок $\frac{N}{l} \cdot vt$, їх загальний заряд $q = q_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot vt$. Отже, сила струму в провіднику $I = \frac{q}{t} = \frac{Nq_0 v}{l}$. Замінивши в формулі сили Ампера $Nq_0 v$ на Il , отримаємо

$$F_A = BIl \sin \alpha. \quad (5.2)$$

Як і слід було чекати, сила Ампера не діє за умови $\alpha = 0$ або $\alpha = 180^\circ$; модуль сили Ампера максимальний за умови $\alpha = 90^\circ$.

4 Закон Біо — Савара — Лапласа й теорема про циркуляцію магнітної індукції

Вивчаючи в 10 класі електростатичне поле, ви спочатку навчилися знаходити напруженість поля нерухомого точкового заряду (спираючись на закон Кулона), а потім і системи точкових зарядів (спираючись на принцип суперпозиції). Напруженість поля в певній точці дорівнює векторній сумі напруженостей полів кожного з точкових зарядів: $\vec{E} = \sum_k \vec{E}_k$. Подумки ж можна будь-який розподіл зарядів розглядати як сукупність точкових зарядів.

Чи зможемо ми пройти аналогічним шляхом у випадку магнітного поля? Є всі підстави сподіватися, що й для магнітного поля теж виконується принцип суперпозиції (і експерименти підтверджують це). А от що треба розглядати замість нерухомих точкових зарядів? Що в нас буде «елементарним джерелом» магнітного поля?

Магнітне поле створюють рухомі заряджені частинки або електричний струм... Може, розглядатимемо магнітне поле окремих рухомих електронів або йонів?



Це принципово правильний підхід. Але якщо йдеться про магнітне поле струму, зручніше подумки розбити тонкий провідник зі струмом на малі ділянки (елементи струму).



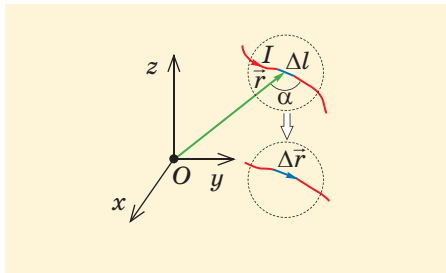
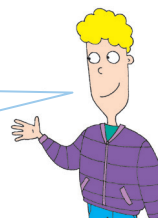


Рис. 5.13. Схематичне (поза масштабом) зображення елемента струму, що створює магнітне поле в початку координат O



У тому-то й була складність. В експериментах завжди маємо справу з «цілим» замкненим колом.

Я розумію, як досліджували поле одного «окремого» точкового заряду. Але як можна виміряти поле «окремого» елемента струму? Хіба можна позбавитись усіх інших?



1820 року французькі вчені Ж. Біо та Ф. Савар дослідили магнітні поля прямолінійного та колового струмів, котушки зі струмом тощо. Отримати з експериментальних результатів загальний закон, що дозволяв би визначати магнітне поле будь-якого контуру зі струмом, вони не змогли. Тому звернулися до видатного французького математика, фізика та астронома П. Лапласа. Саме він зробив висновок про справедливість принципу суперпозиції та з'ясував, чому дорівнює $\Delta \vec{B}$.

Виявилося, що індукція $\Delta \vec{B}$ напрямлена перпендикулярно до площини, що містить точку O і вектор $\Delta \vec{r}$. Щоб остаточно визначити напрям $\Delta \vec{B}$, треба скористатися правилом свердлика. Модуль індукції поля $|\Delta \vec{B}|$ пропорційний, як було вже сказано, добутку $I\Delta l$, а ще синусу кута α (рис. 5.13); значення $|\Delta \vec{B}|$ обернено пропорційне r^2 (квадрату відстані між точкою O та елементом струму). Коефіцієнт пропорційності у формулі для $|\Delta \vec{B}|$ зараз прийнято записувати як $\frac{\mu_0}{4\pi}$, де μ_0 — одна з універсальних сталих (магнітна стала).

Поєднуючи все сказане, отримуємо формулу закону Біо — Савара — Лапласа:

$$|\Delta \vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I\Delta l \sin \alpha}{r^2}. \quad (5.3)$$

Щоб знайти магнітну індукцію поля довільного контуру L зі струмом, треба подумки розбити його на малі елементи струму, визначити внесок кожного з них, а потім знайти суму (або, що те ж саме, інтеграл): $\vec{B} = \sum_k \vec{B}_k$ (або $\vec{B} = \int_L d\vec{B}$).

Можна сказати, що в теорії постійного магнітного поля закон Біо — Савара — Лапласа відіграє таку саму роль, як закон Кулона в електростатиці.

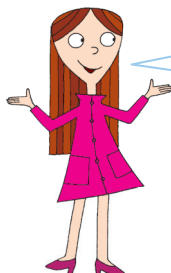


Переконайтеся самостійно, що одиницю магнітної сталої можна записати як Н/А². Скорі ви дізнаєтеся, що цю одиницю зазвичай записують як Гн/м. Магнітна стала — одна з фізичних сталих, відомих точно. Її значення $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Розберемося глибше

Ті з вас, хто знайомий з векторним добутком, можуть користуватися більш компактним і часто зручнішим записом закону Біо — Савара — Лапласа. Для нескінченно малого елемента струму $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{[\vec{r} \times d\vec{r}]}{r^3}$. Цей вираз правильно задає як мо-

дуль, так і напрям $d\vec{B}$. Для довільного контуру L зі струмом $\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{[\vec{r} \times d\vec{r}]}{r^3}$.



Виходить, що під час розгляду реальних ситуацій без інтегрування не обійтися...

У задачах електростатики нас іноді виручала теорема Гауса!



Так, вона допомагала за умови симетричного розподілу зарядів.



Але з індукцією магнітного поля теорема Гауса так не «спрацює»: адже лінії магнітної індукції завжди замкнені. Тому в об'єм, обмежений якоюсь поверхнею, вони обов'язково і «входять», і «виходять».

Потік вектора магнітної індукції через будь-яку замкнену поверхню дорівнює нулю.

У випадку магнітного поля можна застосувати іншу характеристику векторного поля — **циркуляцію** по замкненому контуру. У нашому випадку, щоб визначити циркуляцію вектора $\vec{B}$ по замкненому контуру L , треба подумки розбити цей контур на нескінченно малі ділянки довжиною по Δl . Для кожної ділянки беремо вектор $\Delta \vec{r}$ у напрямі обходу та проекцію B_l вектора $\vec{B}$ на напрям $\Delta \vec{r}$. Внесок такої ділянки в циркуляцію Γ дорівнює $B_l \Delta l$, тому $\Gamma = \sum_{(L)} B_l \Delta l$ (або, що те ж саме, $\Gamma = \int_L B_l dl$).

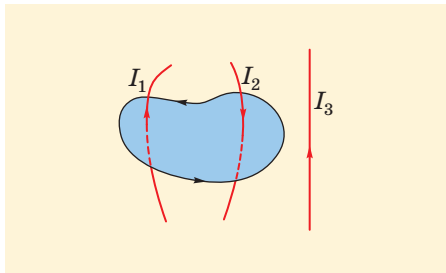


Рис. 5.14. До застосування закону повного струму

- Для наочності ми «натягли» на замкнений контур L уявну блакитну плівку. Звернімо увагу: струми I_1 і I_2 пронизують контур, при цьому напрям струму I_1 узгоджений із вибраним напрямом обходу контуру правилом свердлика, а струм I_2 напрямлений протилежно. Тому у формулі (5.4) струм I_1 слід уважати додатним, а струм I_2 — від'ємним.
- Що ж до струму I_3 , то він не дає жодного внеску до циркуляції вектора $\vec{B}$, хоч і впливає на магнітне поле поблизу контуру L .
- Отже, $\Gamma = \mu_0 (I_1 - |I_2|)$.

Із закону Біо — Савара — Лапласа випливає **теорема про циркуляцію індукції магнітного поля**, коротше її називають **законом повного струму** (рис. 5.14 ілюструє цей закон).

Циркуляція вектора $\vec{B}$ по замкненому контуру у вакуумі пропорційна сумі всіх струмів, що пронизують цей контур:

$$\sum_{(L)} B_l \Delta l = \mu_0 \sum_k I_k. \quad (5.4)$$

Закон повного струму найкраще «працює» у випадку симетричних форм контурів зі струмом. Розглянемо як приклад магнітне поле довгого (безкінечного) прямого провідника зі струмом I , розташованого у вакуумі. Найзручніше вибрати замкнений контур у формі кола радіуса r , що збігається з однією з ліній магнітної індукції. Виберемо напрям обходу за напрямом лінії поля, тоді проекція B_l збігається з модулем B індукції поля. Із симетрії системи випливає, що в усіх точках контуру значення B однакове. Отже, $\Gamma = B \cdot 2\pi r = \mu_0 I$ звідки $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. Цей результат можна отримати й безпосередньо із закону Біо — Савара — Лапласа, але при цьому довелося би обчислювати інтеграл.

5 Вчимося розв'язувати задачі

Задача 1. Визначте індукцію магнітного поля в центрі колового витка зі струмом, розташованого у вакуумі. Радіус витка $R = 1$ см, сила струму в ньому $I = 10$ А.

Розв'язання. Скористаємося законом Біо — Савара — Лапласа. Кожний елемент струму створює в центрі витка магнітне поле з індукцією

$$|\Delta \vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \Delta l}{R^2} \quad (\text{оскільки } \alpha = 90^\circ).$$

Поле кожного з елементів струму напрямлене перпендикулярно до площини витка. Отже, усі поля $\Delta \vec{B}$ напрямлені

$$\text{однаково. Тому } B = \sum |\Delta \vec{B}| = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \sum \Delta l = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \cdot 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Перевіримо одиниці величин: $[B] = \frac{\text{Н} \cdot \text{А}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} = \text{Тл}$. Підста-

$$\text{вимо числові значення: } B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2 \cdot 10^{-2}} \approx 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ (Тл)}.$$

Відповідь: $B \approx 0,63$ мТл.

Задача 2. Визначте індукцію магнітного поля в соленоїді завдовжки $l = 0,5$ м з радіусом $R = 0,01$ м, сила струму в якому $I = 2$ А. Кількість витків у соленоїді $N = 1000$.