

ФІЗИКА

11

РІВЕНЬ СТАНДАРТУ

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

ПІДРУЧНИК ДЛЯ 11 КЛАСУ
ЗАКЛАДІВ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ

ЗА РЕДАКЦІЄЮ В. Г. БАР'ЯХТАРА, С. О. ДОВГОГО

ХАРКІВ
ВИДАВНИЦТВО «РАНОК»
2019

УДК [37.016:53](075.3)
Ф50

Підручник створено авторським колективом у складі:
В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова, О. О. Кірюхіна

Автори й видавництво висловлюють щиру подяку:
М. М. Кірюхіну, президенту Співки наукових і інженерних об'єднань України,
кандидату фізико-математичних наук,
за слушні зауваження й конструктивні поради;

І. С. Чернецькому, завідувачу відділу створення навчально-тематичних систем знань
Національного центру «Мала академія наук України», кандидату педагогічних наук,
за створення відеороликів демонстраційних і фронтальних експериментів

*Методичний апарат підручника успішно пройшов експериментальну перевірку
в Національному центрі «Мала академія наук України»*

Ілюстрації художника *Володимира Хорошенка*

Ф50 **Фізика** (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.) : підруч. для 11 кл. закл. загал. серед. освіти / [В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова, О. О. Кірюхіна] ; за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. — Харків : Вид-во «Ранок», 2019. : іл., фот.

ISBN

УДК [37.016:53](075.3)



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

© Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я.,
Кірюхіна О. О., 2019
© Хорошенко В. Д., ілюстрації, 2019
© ТОВ Видавництво «Ранок», 2019

ISBN

ЗМІСТ

Передмова	5
---------------------	---

Розділ I. Електродинаміка

Частина 1. Електричний струм

§ 1. Електричний струм	6
§ 2. Послідовне і паралельне з'єднання провідників. Шунти і додаткові опори	11
§ 3. Робота і потужність електричного струму, тепла дія струму. Закон Джоуля — Ленца	16
§ 4. Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола	20
§ 5. Електричний струм у металах	25
§ 6. Електричний струм в електролітах. Електроліз.	30
§ 7. Електричний струм у газах.	34
§ 8. Електричний струм у вакуумі. Електровакуумні прилади.	39
§ 9. Електричний струм у напівпровідниках.	45
<i>Експериментальна робота № 1</i>	51
<i>Експериментальна робота № 2</i>	52
<i>Експериментальна робота № 3</i>	54
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 1	56
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 1	57

Частина 2. Електромагнетизм

§ 10. Магнітне поле	58
§ 11. Сила Ампера	
§ 12. Сила Лоренца	
§ 13. Досліди М. Фарадея. Закон електромагнітної індукції	
§ 14. Самоіндукція. Індуктивність. Енергія магнітного поля	
§ 15. Магнітні властивості речовини. Діа-, пара- і феромагнетики	
§ 16. Електромагнітне поле	
Підбиваємо підсумки розділу I. Частина 2	
Завдання для самоперевірки до розділу I. Частина 2	

Розділ II. Електромагнітні коливання і хвилі

§ 17. Коливання. Види коливань. Фізичні величини, що характеризують коливання.	
§ 18. Вільні електромагнітні коливання в ідеальному коливальному контурі. Формула Томсона	
§ 19. Змінний струм. Генератори змінного струму.	
§ 20. Активний, ємнісний та індуктивний опори в колі змінного струму	
§ 21. Виробництво, передача та використання енергії змінного струму. Трансформатор.	
§ 22. Електромагнітні хвилі. Властивості електромагнітних хвиль. Досліди Г. Герца	
§ 23. Принципи радіотелефонного зв'язку. Радіомовлення і телебачення.	
<i>Експериментальна робота № 4</i>	
Підбиваємо підсумки розділу II	
Завдання для самоперевірки до розділу II	
Енциклопедична сторінка.	

Розділ III. Оптика

§ 24. Розвиток уявлень про природу світла	
§ 25. Відбивання світла. Закони відбивання світла	
§ 26. Заломлення світла. Закони заломлення світла. Повне відбивання світла	
§ 27. Лінзи. Побудова зображень у лінзах. Формула тонкої лінзи	
§ 28. Оптичні системи. Кут зору	
§ 29. Дисперсія світла. Спектроскоп	
§ 30. Інтерференція світла	
§ 31. Дифракція світла	
§ 32. Формула Планка. Світлові кванти	
§ 33. Фотоефект. Закони фотоефекту	
§ 34. Шкала електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі в природі і техніці	
<i>Експериментальна робота № 5</i>	
<i>Експериментальна робота № 6</i>	
<i>Експериментальна робота № 7</i>	
Підбиваємо підсумки розділу III	
Завдання для самоперевірки до розділу III	

Розділ IV. Атомна та ядерна фізика

§ 35. Дослід Е. Резерфорда. Постулати Н. Бора. Енергетичні рівні атома	
§ 36. Види спектрів. Основи спектрального аналізу	
§ 37. Квантово-оптичні генератори (лазери)	
§ 38. Протонно-нейтронна модель атомного ядра. Ядерні сили. Енергія зв'язку	
§ 39. Радіоактивність. Основний закон радіоактивного розпаду	
§ 40. Отримання та застосування радіонуклідів. Методи реєстрації іонізуючого випромінювання	
§ 41. Ланцюгова ядерна реакція поділу ядер Урану. Термоядерні реакції	
§ 42. Елементарні частинки	
<i>Експериментальна робота № 8</i>	
<i>Експериментальна робота № 9</i>	
Підбиваємо підсумки розділу IV	
Завдання для самоперевірки до розділу IV	

<i>Додаток 1</i>	
Таблиця 1. Питомий опір і температурні коефіцієнти опору деяких металів і сплавів	
Таблиця 2. Електрохімічні еквіваленти	
Таблиця 3. Робота виходу електронів	
Таблиця 4. Маса елементарних частинок	
Таблиця 5. Маса деяких нуклідів	
Таблиця 6. Питомий заряд деяких частинок	
<i>Додаток 2. Похибки вимірювань</i>	
1. Випадкові і систематичні похибки	
2. Визначення абсолютної та відносної похибок прямих вимірювань	
3. Як правильно записати результати вимірювання	
4. Графічний метод опрацювання результатів	

Орієнтовні теми проектів, рефератів і повідомлень,
експериментальних досліджень

Відповіді до вправ і завдань для самоперевірки
Алфавітний покажчик

Дорогі друзі!

У цьому році ви закінчуєте шкільний курс фізики. Сподіваємося, ви зуміли належно оцінити цю дивовижну науку про природу і більше того — намагаєтесь, використовуючи набуті знання, усвідомлювати й пояснювати явища та процеси, що відбуваються навколо. І знову з вами ваш помічник — підручник фізики. Нагадаємо його особливості.

Усі параграфи підручника завершуються рубриками: «*Підбиваємо підсумки*», «*Контрольні запитання*», «*Вправа*».



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



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



Виявити свою компетентність і застосувати набуті знання на практиці допоможе матеріал рубрики «*Вправа*». 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 свій 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.



Фізика — наука насамперед експериментальна, тому в підручнику наявні *експериментальні завдання*. Обов'язково виконуйте експериментальні завдання та *експериментальні роботи* — і ви будете краще розуміти фізику.



Чимало цікавого та корисного ви дізнаєтесь завдяки *інтернет-підтримці*. Це відеоролики, що показують у дії той чи інший фізичний дослід або процес; інформація, яка допоможе вам у виконанні завдань; тренувальні тестові завдання з комп'ютерною перевіркою; приклади розв'язування задач.

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

Рубрика «*Фізика в цифрах*» слугує містком, що пов'язує досягнення техніки з навчальним матеріалом параграфів.

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

Для тих, хто замислюється над вибором майбутньої професії та прагне знати більше про перспективи розвитку ринку праці, призначена рубрика «*Професії майбутнього*».

Цікавої подорожі світом фізики, нехай вам щастить!

РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

ЧАСТИНА 1. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

§ 1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ



«Рух нематеріальної рідини» — напевно так назвав би електричний струм творець першої теорії про електрику американський фізик і політичний діяч *Бенджамін Франклін* (1706–1790). Зараз ви добре знаєте, що електричний струм являє собою рух саме матеріальних частинок, а от порівняння з рідиною залишається слушним. Про те, що таке електричний струм, за яких умов він виникає та які фізичні величини його характеризують, згадаємо в цьому параграфі.

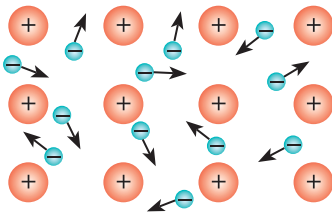


Рис. 1.1. За відсутності електричного поля електрони в металевому провіднику рухаються хаотично

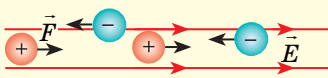
Нагадуємо

■ *Електричне поле* — форма матерії, яка виявляється в дії на заряджені частинки та тіла, що перебувають у цьому полі.

■ Силовую характеристику електричного поля в даній точці є *вектор напруженості*:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

■ Якщо $q > 0$, то $\vec{F} \uparrow \uparrow \vec{E}$; якщо $q < 0$, то $\vec{F} \downarrow \downarrow \vec{E}$ (\vec{F} — сила, з якою електричне поле діє на заряд q ; \vec{E} — вектор напруженості електричного поля).



1 Умови існування електричного струму

Розглянемо металевий провідник. Метали — це полікристалічні речовини, у вузлах кристалічних ґраток яких розташовані позитивні йони; між йонами «мандрують» вільні електрони, здійснюючи рух, подібний до руху молекул газу (рис. 1.1). Якщо в металевому провіднику створити електричне поле, то вільні електрони, не припиняючи свого хаотичного руху, починають зміщуватись у бік, протилежний вектору напруженості електричного поля, тобто рух електронів стає напрямленим, — у провіднику виникає *електричний струм*.

■ **Електричний струм** — це напрямлений (упорядкований) рух частинок, які мають електричний заряд.

Зрозуміло, що створювати електричний струм можуть не тільки електрони. Так, в електродіодах унаслідок дії електричного поля зміщуються позитивні й негативні йони, а в газах — електрони та позитивні й негативні йони.

❓ Чому позитивні йони зміщуються в напрямку напруженості електричного поля, а негативні — в протилежному напрямку?

Для виникнення та існування електричного струму є необхідними дві умови:

1) наявність вільних заряджених частинок — носіїв струму;

2) наявність електричного поля, дія якого створює та підтримує напрямлений рух вільних заряджених частинок.

За створення електричного поля «відповідають» **джерела струму** — пристрої, які перетворюють різні види енергії на електричну енергію. У джерелах струму виконується робота з розділення різномісних електричних зарядів, у результаті чого один полюс джерела набуває позитивного заряду, а другий — негативного; у такий спосіб створюється електричне поле.

Найпоширенішими джерелами струму є електромеханічні генератори, в яких механічна енергія перетворюється на електричну. Останнім часом широко застосовують сонячні батареї — джерела струму, в яких на електричну енергію перетворюється енергія світла.

? Які ще джерела електричного струму ви знаєте? Які перетворення енергії в них відбуваються?

2 Що таке електричне коло

Найпростіше електричне коло являє собою з'єднані провідниками в певному порядку джерело струму, споживач електричної енергії, замикальний (розмикальний) пристрій.

Креслення, на якому умовними позначеннями (див. таблицю) показано, з яких елементів складається електричне коло та в якій послідовності вони з'єднані між собою, називають **електричною схемою**.

Зверніть увагу:

- за напрямком струму в колі прийнято напрямок, у якому рухалися б по колу позитивно заряджені частинки, тобто напрямок від позитивного полюса джерела струму до негативного;

- в умовному позначенні гальванічного елемента довга риска позначає позитивний полюс джерела, а коротка — негативний.

3 Закон Ома для ділянки кола

Для кількісного опису струму в провіднику застосовують три фізичні величини: *силу струму* (характеризує власне електричний струм), *напругу* (характеризує поле, яке створює струм), *опір* (характеризує провідник). Згадаємо їх.

Умовні позначення деяких елементів електричного кола

Елемент електричного кола	Умовне позначення
Гальванічний елемент або акумулятор	
Батарея гальванічних елементів або акумуляторів	
Резистор	
Реостат	
Штепсельне з'єднання	
З'єднання проводів	
Перетин проводів (без з'єднання)	
Затискачі для під'єднання ділянки кола	
Ключ	
Нагрівальний елемент	
Запобіжник	
Лампа розжарювання	
Світлодіод	
Напівпровідниковий діод	
Конденсатор	
Котушка індуктивності; соленоїд	
Електромагніт	
Гучномовець	
Амперметр	
Вольтметр	
Гальванометр	

Сила струму I	Напруга U	Опір R
<p>Сила струму в провіднику — фізична величина, яка характеризує електричний струм і чисельно дорівнює заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:</p> $I = \frac{q}{t}$ <ul style="list-style-type: none"> • Одиниця сили струму в СІ — ампер: $[I] = 1 \text{ А (А)}^*$. Це основна одиниця СІ. • 1 А дорівнює силі струму, який, проходячи в двох паралельних провідниках нескінченної довжини та нехтовно малої площі перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликав би на кожній ділянці провідників завдовжки 1 м силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$. • Прилад для вимірювання сили струму — амперметр. Амперметр вмикають в коло послідовно зі споживачем, в якому вимірюють силу струму. 	<p>Електрична напруга на ділянці кола — фізична величина, яка характеризує електричне поле на ділянці кола і чисельно дорівнює роботі електричного поля з переміщення по цій ділянці одиничного позитивного заряду:</p> $U = \frac{A}{q}$ <ul style="list-style-type: none"> • Одиниця напруги в СІ — вольт: $[U] = 1 \text{ В (В)}$. • 1 В — це така напруга на ділянці кола, за якої електричне поле виконує роботу 1 Дж, переміщуючи по цій ділянці заряд 1 Кл: • Прилад для вимірювання напруги — вольтметр. Вольтметр приєднують до електричного кола паралельно ділянці, на якій вимірюють напругу. 	<p>Електричний опір — фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти електричному струму.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Одиниця опору в СІ — ом: $[R] = 1 \text{ Ом (}\Omega\text{)}$. • 1 Ом — це опір такого провідника, в якому тече струм силою 1 А за напруги на кінцях провідника 1 В: $1 \text{ Ом} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}}; \left(1 \Omega = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} \right).$ <ul style="list-style-type: none"> • Опір циліндричного провідника дорівнює: $R = \rho \frac{l}{S},$ <p>де ρ — питомий опір речовини, з якої виготовлений провідник; l — довжина провідника; S — площа поперечного перерізу провідника. <ul style="list-style-type: none"> • Питомий опір речовини — фізична величина, яка характеризує електричні властивості речовини та чисельно дорівнює опору виготовленого з неї провідника довжиною 1 м і з площею поперечного перерізу 1 м^2. Одиниця питомого опору в СІ — ом-метр: $[\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м (}\Omega \cdot \text{м)}$. Питомий опір істотно залежить від температури. </p>
<p>Закон Ома для ділянки кола</p> <p>Сила струму в ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях ділянки та обернено пропорційна опору цієї ділянки:</p> $I = \frac{U}{R}$	 <p>Вольт-амперна характеристика (ВАХ) провідників незмінного опору</p>	

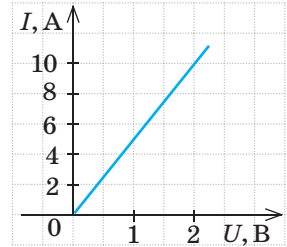
* Тут і далі в дужках наведено міжнародні позначення одиниць СІ.

4 Учимся розв'язувати задачі

Задача. На рисунку подано вольт-амперну характеристику циліндричного провідника, який має довжину 250 м і площу поперечного перерізу $3,5 \text{ мм}^2$. Із якого металу виготовлений провідник?

Аналіз фізичної проблеми. Дізнатися, з якого металу виготовлений провідник, можна, якщо визначити його питомий опір і скористатися відповідною таблицею (див. Додаток 1).

Питомий опір металу знайдемо з формули для визначення опору циліндричного провідника. Опір обчислимо, скориставшись законом Ома та графіком залежності $I(U)$. Відповідно до графіка за напруги, наприклад, 2 В сила струму в провіднику становить 10 А.



Дано:

$$l = 250 \text{ м}$$

$$S = 3,5 \text{ мм}^2 = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$U = 2 \text{ В}$$

$$I = 10 \text{ А}$$

ρ — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання. За законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \frac{U}{I}. \text{ Оскільки } R = \rho \frac{l}{S}, \text{ маємо: } \frac{U}{I} = \frac{\rho l}{S}. \text{ Отже, } \rho = \frac{US}{Il}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[\rho] = \frac{\text{В} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} \cdot \text{м} = \text{Ом} \cdot \text{м}; \quad \rho = \frac{2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 250} = 0,028 \cdot 10^{-6} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}.$$

За таблицею (див. Додаток 1) визначаємо, що провідник виготовлений з алюмінію.

Відповідь: провідник виготовлений з алюмінію.

ПРОФЕСІЯ МАЙБУТНЬОГО

Безумовно, ви вже розумієте, що наш світ змінюється і багато професій, які є популярними зараз, зникнуть у майбутньому. Тож яку професію обрати, щоб не помилитися? Чи потрібен шкільний курс фізики для оволодіння навичками майбутньої професії? Стислі відомості про деякі перспективні професії ви знайдете на сторінках підручника.



Фахівець з ремонту та обслуговування роботів

Навіть малюкам відомо про наближення ери роботів. Але роботи, як і інші механізми, потребують обслуговування: налаштування, заміни зіпсованих частин тощо. Для такої роботи треба бути фахівцем з електрики та електроніки, знавцем у програмуванні.

Кількість роботів буде зростати, відповідно зростатиме попит на їх обслуговування. Тож фахівці з ремонту та обслуговування роботів — одна із професій майбутнього.



Підбиваємо підсумки

- Електричний струм — це напрямлений (упорядкований) рух частинок, які мають електричний заряд. Для виникнення та існування електричного струму необхідна наявність вільних заряджених частинок (носіїв струму) та електричного поля. За напрямком струму в колі прийнято напрямком, у якому рухалися б по колу позитивно заряджені частинки (напрямок від позитивного полюса джерела струму до негативного).

- Для кількісного опису струму в ділянці кола застосовують такі фізичні величини: сила струму ($I = \frac{q}{t}$); напруга на ділянці ($U = \frac{A}{q}$); опір провідника (опір ділянки).
- Опір циліндричного провідника визначають за формулою: $R = \rho \frac{l}{S}$.
- Сила струму в ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях ділянки і обернено пропорційна опорю цієї ділянки: $I = \frac{U}{R}$ — закон Ома для ділянки електричного кола.



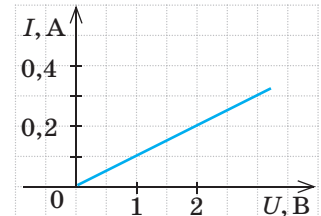
Контрольні запитання

1. Що таке електричний струм? Якими є умови його виникнення та існування?
2. Які пристрої називають джерелами електричного струму? Наведіть приклади.
3. Відтворіть, як позначають на електричних схемах гальванічний елемент; резистор; реостат; амперметр; вольтметр; ключ. Для чого призначені ці пристрої?
4. Що прийнято за напрямок струму в колі?
5. Дайте характеристики фізичних величин: сила струму в колі; напруга на ділянці кола; опір провідника; питомий опір.
6. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.



Вправа № 1

1. Наведіть приклади споживачів електричного струму. Які перетворення енергії в них відбуваються?
2. Нагрівальним елементом праски, до кінців якого прикладено напругу 220 В, за 0,5 хв пройшов заряд 300 Кл. Визначте силу струму в нагрівальному елементі та опір елемента.
3. На рисунку подано вольт-амперну характеристику ніхромового дроту із площею поперечного перерізу $0,2 \text{ мм}^2$. Визначте довжину дроту.
4. Що, на вашу думку, спільне в плину рідини та електричному струмі? Які фізичні величини, що характеризують рух рідини, є аналогічними силі струму; напрузі; опорю; заряду?
5. Чому одиниці сили струму, напруги та опорю пишуть із великих літер? На честь кого вони названі? Які відкриття зробили ці вчені?



Фізика і техніка в Україні



Борис Євгенович Патон (народ. 1918 р.) — український учений, світову славу якому принесли дослідження в галузі електродугового зварювання. У 1953 р. Борис Євгенович став директором Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона (Київ). Учений очолив дослідження, у результаті яких було створено електрошлаковий процес для підвищення якості іржостійких сталей. За ініціативи Б. Є. Патона започатковано зварювання в космосі. Він втілює у практику зварювання тканин людини під час хірургічних операцій. Ця методика зберегла життя тисячам хворих і зараз використовується в усьому світі.

Із 1962 р. Б. Є. Патон є незмінним президентом Національної академії наук України.

У 2018 р. вчений відзначив свій 100-річний ювілей. З нагоди цієї події він був нагороджений ЮНЕСКО Золотою медаллю Аристотеля, а також державними нагородами багатьох країн.

§ 2. ПОСЛІДОВНЕ І ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ. ШУНТИ І ДОДАТКОВІ ОПОРИ



Згадайте: якщо в ялинковій гірлянді псується одна з ламп, то всі лампи, розташовані у цій вітці, перестають світитися, при цьому інші вітки працюють. Чому так? А чому лампи в гірлянді, які розраховані на напругу 10 В, не виходять з ладу незважаючи на те, що напруга в мережі 220 В?

Сподіваємося, що ви пам'ятаєте курс фізики 8-го класу і розумієте, що річ у з'єднанні ламп. Згадаємо види з'єднання провідників та основні властивості цих з'єднань.

1 Послідовне з'єднання провідників

З'єднання провідників називають **послідовним**, якщо воно не містить розгалужень, тобто провідники розташовані послідовно один за одним (рис. 2.1). Зрозуміло, що таким чином можна з'єднати будь-яку кількість провідників.

Як приклад розглянемо ділянку кола, яка містить два послідовно з'єднані резистори, а потім узагальнимо отримані співвідношення для будь-якої кількості послідовно з'єднаних провідників.

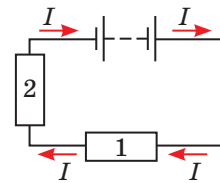


Рис. 2.1. Схема електричного кола, яке містить послідовно з'єднані провідники

Сила струму I	Напруга U	Опір R
<p>Сила струму в двох послідовно з'єднаних провідниках однакова і дорівнює загальній силі струму в ділянці кола:</p> $I_1 = I_2 = I$ <p>Дійсно, коло з послідовним з'єднанням провідників не містить розгалужень, тому заряд, який проходить через поперечний переріз будь-якого провідника за деякий час t, буде однаковим: $q_1 = q_2 = q$. Поділивши цю рівність на t, отримаємо:</p> $\frac{q_1}{t} = \frac{q_2}{t} = \frac{q}{t}$ <p>За означенням сили струму: $q/t = I$. Отже, маємо: $I_1 = I_2 = I$.</p>	<p>Загальна напруга на двох послідовно з'єднаних провідниках дорівнює сумі напруг на цих провідниках:</p> $U = U_1 + U_2$ <p>Справді, якщо, переміщуючи деякий заряд q, електричне поле виконує роботу A_1 в першому провіднику і A_2 — у другому, то зрозуміло, що для переміщення цього заряду через обидва провідники має бути виконана робота: $A = A_1 + A_2$. Поділивши обидві частини рівності на значення заряду та скориставшись означенням напруги ($U = A/q$), маємо: $U = U_1 + U_2$.</p>	<p>Загальний опір двох послідовно з'єднаних провідників дорівнює сумі опорів цих провідників:</p> $R = R_1 + R_2$ <p>Дійсно, для послідовного з'єднання справджується рівність $U = U_1 + U_2$, тобто відповідно до закону Ома: $IR = I_1R_1 + I_2R_2$. Оскільки $I_1 = I_2 = I$, отримуємо: $IR = IR_1 + IR_2$. Після скорочення на I маємо: $R = R_1 + R_2$.</p>
Узагальнимо наведені співвідношення для n послідовно з'єднаних провідників:		
$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

Зверніть увагу:

- загальний опір провідників, з'єднаних послідовно, більший за опір кожного із цих провідників;
- загальний опір послідовно з'єднаних провідників опором R_0 кожен дорівнює: $R = nR_0$, де n — кількість провідників.

? Поясніть, чому лампи в ялинковій гірлянді, які розраховані на напругу 10 В, не виходять із ладу незважаючи на те, що напруга в мережі 220 В.

2 Паралельне з'єднання провідників

З'єднання провідників називають **паралельним**, якщо для проходження струму є два чи більше шляхів — віток, а всі ці вітки мають одну пару спільних точок — вузлів (рис. 2.2). У вузлах (вузлових точках) відбувається розгалуження кола (у кожному вузлі з'єднуються не менш ніж три проводи). Отже, розгалуження є характерною ознакою кола з паралельним з'єднанням провідників.

Розглянемо ділянку кола, яка містить два паралельно з'єднані резистори.

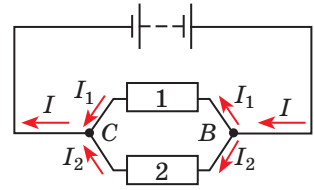


Рис. 2.2. Схема електричного кола, яке містить паралельно з'єднані провідники. В і С — вузлові точки (вузли)

Сила струму I	Напруга U	Опір R
<p>У разі паралельного з'єднання двох провідників сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів у відгалуженнях (окремих вітках):</p> $I = I_1 + I_2$ <p>Дійсно, у вузловій точці струм розтікається по двох вітках. Заряд у вузловій точці не накопичується, тому заряд q, який надійшов у вузол за деякий час t, дорівнює сумі зарядів, які вийшли із цього вузла за той самий час: $q = q_1 + q_2$. Поділимо обидві частини рівності на t і візьмемо до уваги, що $q/t = I$. Маємо:</p> $\frac{q}{t} = \frac{q_1}{t} + \frac{q_2}{t}, \text{ або } I = I_1 + I_2.$	<p>Загальна напруга на ділянці кола та напруга на кожному із двох паралельно з'єднаних провідників є однаковою:</p> $U = U_1 = U_2$ <p>Якщо ділянка кола не містить джерела струму, то напруга на ділянці дорівнює різниці потенціалів на кінцях цієї ділянки. Тобто і для ділянки 1,2, і для ділянки 1, і для ділянки 2 маємо:</p> $U_{1,2} = \varphi_B - \varphi_C;$ $U_1 = \varphi_B - \varphi_C;$ $U_2 = \varphi_B - \varphi_C.$ <p>Отже: $U = U_1 = U_2$.</p>	<p>Величина, обернена до загального опору розгалуженої ділянки кола, дорівнює сумі величин, кожна з яких обернена до опору відповідної вітки цього розгалуження:</p> $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ <p>Оскільки $I = I_1 + I_2$, то за законом Ома:</p> $\frac{U}{R} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}.$ <p>Для паралельного з'єднання $U_1 = U_2 = U$, тому</p> $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}.$ <p>Після скорочення на U отримаємо: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.</p>
Узагальнимо наведені співвідношення для n паралельно з'єднаних провідників:		
$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$

Зверніть увагу:

- загальний опір паралельно з'єднаних провідників менший від опору кожного із цих провідників;

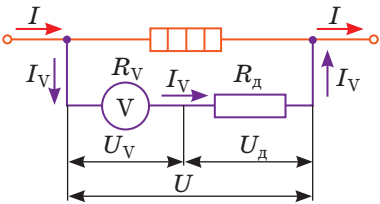
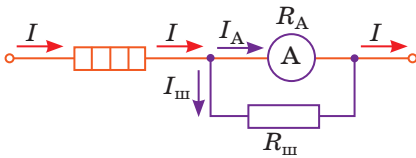
- загальний опір паралельно з'єднаних провідників опором R_0 кожний дорівнює: $R = \frac{R_0}{n}$, де n — кількість провідників;

- опір двох паралельно з'єднаних провідників можна знайти за формулою: $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

? Доведіть останні два твердження, скориставшись співвідношеннями для паралельно з'єднаних провідників.

3 Для чого потрібні шунти і додаткові опори

Як і будь-які прилади, амперметр і вольтметр мають *верхню межу вимірювання* — найбільше значення фізичної величини, яку можна виміряти даним приладом. Але якщо до амперметра чи вольтметра приєднати резистор певного опору, то межі вимірювання цих приладів можна збільшити.

Додатковий опір	Шунт
<p>Додатковий опір — резистор, який послідовно приєднують до вольтметра з метою збільшити верхню межу вимірювання вольтметра.</p> 	<p>Шунт — резистор, який паралельно приєднують до амперметра з метою збільшити верхню межу вимірювання амперметра.</p> 
<p>У разі застосування додаткового опору напруга розподілиться між вольтметром і додатковим опором: $U = U_V + U_d$. Дізнаймося, який додатковий опір необхідно приєднати послідовно з вольтметром, щоб збільшити верхню межу вимірювання вольтметра в n разів:</p> $U = nU_V.$ <p>Оскільки $U = U_V + U_d$, то $nU_V = U_V + U_d$, або $U_d = U_V(n - 1)$. Сила струму в резисторі і вольтметрі однакова, тому відповідно до закону Ома маємо: $I_V R_d = I_V R_V(n - 1)$. Отже, необхідний додатковий опір обчислюють за формулою:</p> $R_d = R_V(n - 1)$	<p>У разі застосування шунта струм, який тече в колі, розділяється на дві частини: одна частина йде на амперметр, друга — на шунт: $I = I_A + I_{ш}$. Дізнаймося, який шунт необхідно приєднати паралельно амперметру, щоб збільшити верхню межу вимірювання амперметра в n разів: $I = nI_A$. Оскільки $I = I_A + I_{ш}$, то $nI_A = I_A + I_{ш}$, або $I_{ш} = I_A(n - 1)$. Напруга на шунті й амперметрі однакова, тому відповідно до закону Ома маємо: $\frac{U}{R_{ш}} = \frac{U}{R_A}(n - 1) \Rightarrow \frac{1}{R_{ш}} = \frac{n - 1}{R_A}$. Отже, необхідний опір шунта обчислюють за формулою:</p> $R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}$

Зверніть увагу! У скільки разів зростає верхня межа вимірювання приладу, у стільки разів зростає ціна поділки його шкали.

4 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Ділянка кола складається з однакових резисторів, з'єднаних так, як показано на схемі 1. Опір кожного резистора — 8 Ом. На ділянку подано напругу 31,2 В. Визначте загальний опір ділянки, напругу на резисторі 2, силу струму в резисторах 1 і 6.

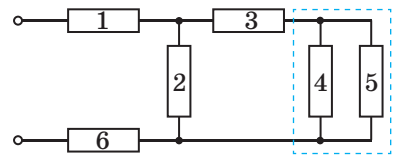


Схема 1

Аналіз фізичної проблеми. Електричне коло містить змішане з'єднання провідників. Тому будемо покроково спрощувати подану схему 1 і, користуючись законом Ома та співвідношеннями для послідовного і для паралельного з'єднань провідників, знаходити значення шуканих величин.

Дано:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = \\ &= R_3 = R_4 = \\ &= R_5 = R_6 = \\ &= R_0 = 8 \text{ Ом} \\ U &= 31,2 \text{ В} \end{aligned}$$

R — ?

U_2 — ?

I_1 — ?

I_6 — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання.

Резистори 4 і 5 однакові та з'єднані паралельно, тому: $R_{4,5} = \frac{R_0}{2} = \frac{8 \text{ Ом}}{2} = 4 \text{ Ом}$. Отже, у схемі 1 можемо замінити резистори 4 і 5 одним резистором, опір якого $R_{4,5} = 4 \text{ Ом}$. Тоді вихідна схема набуде вигляду схеми 2.

У схемі 2 послідовно з'єднані резистори 3 і 4,5 замінимо резистором 3,4,5 опором $R_{3,4,5} = R_3 + R_{4,5} = 8 + 4 = 12 \text{ (Ом)}$ і отримаємо схему 3, в якій резистори 2 і 3,4,5 з'єднані паралельно.

У схемі 3 паралельно з'єднані резистори 2 і 3,4,5 замінимо резистором опором $R_{2,3,4,5} = \frac{R_2 \cdot R_{3,4,5}}{R_2 + R_{3,4,5}} = \frac{8 \cdot 12}{8 + 12} = 4,8 \text{ (Ом)}$ і отримуємо схему 4.

Загальний опір ділянки:

$$R = R_1 + R_{2,3,4,5} + R_6 = 8 + 4,8 + 8 = 20,8 \text{ (Ом)}.$$

Відповідно до закону Ома: $I = \frac{U}{R} = \frac{31,2}{20,8} = 1,5 \text{ (А)}$.

Проаналізувавши схеми 3 і 4, доходимо висновків:

$$I_1 = I_{2,3,4,5} = I_6 = I = 1,5 \text{ А}; \quad U_2 = U_{2,3,4,5} = I \cdot R_{2,3,4,5} = 1,5 \cdot 4,8 = 7,2 \text{ (В)}.$$

Відповідь: $R = 20,8 \text{ Ом}; U_2 = 7,2 \text{ В}; I_1 = 1,5 \text{ А}; I_6 = 1,5 \text{ А}$.

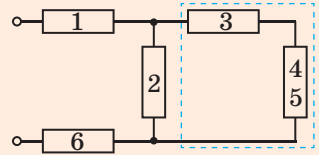


Схема 2

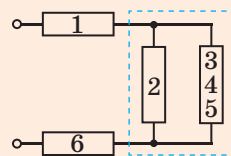


Схема 3

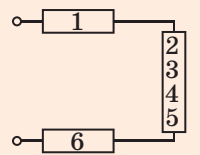


Схема 4



Підбиваємо підсумки

- Якщо ділянка кола містить n послідовно з'єднаних провідників:

— сила струму в усіх провідниках є однаковою і дорівнює загальній силі струму в ділянці: $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$;

— напруга на ділянці дорівнює сумі напруг на окремих провідниках:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n;$$

— опір ділянки дорівнює сумі опорів окремих провідників:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

- Якщо ділянка кола містить n паралельно з'єднаних провідників:
 - напруга на всіх провідниках є однаковою і дорівнює напрузі на ділянці: $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$;
 - загальна сила струму в ділянці дорівнює сумі сил струмів в окремих провідниках: $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$;
 - опір ділянки можна визначити з формули: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$.
- Для збільшення верхньої межі вимірювання до вольтметра послідовно приєднують додатковий опір, а до амперметра паралельно приєднують шунт.



Контрольні запитання

1. Яке з'єднання провідників називають послідовним? 2. Які співвідношення справджуються для послідовного з'єднання провідників? Доведіть їх. 3. Яке з'єднання провідників називають паралельним? 4. Які співвідношення справджуються для паралельного з'єднання провідників? Доведіть їх. 5. Як можна збільшити верхню межу вимірювання вольтметра? 6. У якому випадку і як шунтують амперметри?



Вправа № 2

1. Розгляньте рис. 1 і визначте: які прилади зображено; для вимірювання якої фізичної величини призначений кожен прилад; якою є верхня межа вимірювання кожного приладу.
2. Як, на вашу думку, з'єднані лампи в одній вітці ялинкової гірлянди? з'єднані різні вітки гірлянди? Для чого в гірляндах застосовують кілька віток ламп?
3. Чому споживачі електричного струму, якими ми користуємося в побуті, зазвичай розраховані на однакову напругу (220 В)?
4. Два резистори опороми 2 і 3 Ом приєднали до джерела струму, напруга на виході якого 12 В. Визначте силу струму в кожному резисторі та загальну силу струму в колі, якщо резистори з'єднані: а) послідовно; б) паралельно.
5. Визначте загальний опір R ділянки кола (рис. 2), якщо $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 3$ Ом, $R_3 = 20$ Ом, $R_4 = 24$ Ом. Чому дорівнює сила струму в кожному резисторі, якщо до ділянки кола прикладена напруга 36 В?
6. До ділянки кола, яка містить два резистори, подано напругу 24 В. Коли резистори з'єднані послідовно, сила струму в ділянці дорівнює 0,6 А, а коли паралельно — 3,2 А. Визначте опір кожного резистора.
7. Коли в ділянці кола (рис. 3) ключ замкнено, сила струму, який проходить через амперметр, дорівнює 0,45 А. Якої сили струм пройдётиме через амперметр, якщо ключ розімкнути? Опори резисторів 1 і 3 та 2 і 4 попарно однакові й дорівнюють R і $2R$ відповідно. Напруга на клеммах є незмінною. Амперметр вважайте ідеальним (тобто опір амперметра $R_A = 0$).

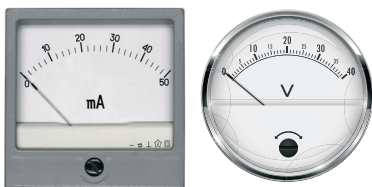


Рис. 1

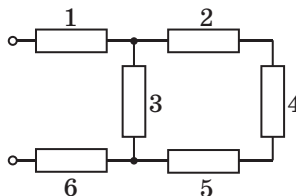


Рис. 2

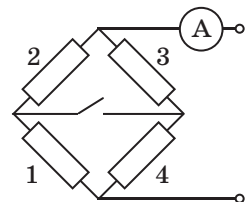
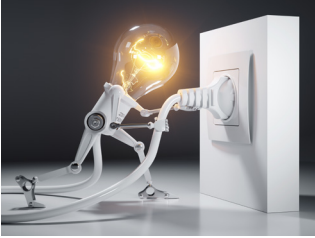


Рис. 3

§ 3. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА



Зараз електричний струм використовується практично всюди. Різноманітні побутові електроприлади, електричне обладнання автомобілів, хімічна промисловість, медицина, засоби зв'язку... Кожен із вас може навести кілька десятків пристроїв, дія яких ґрунтується на використанні електричної енергії, яка в цих пристроях перетворюється на інші види енергії. Електричне поле при цьому виконує роботу, яку називають *роботою струму*. Згадаємо, як її визначити.

1 Як визначити роботу і потужність електричного струму

Розглянемо ділянку кола, на яку подано напругу U і в якій тече постійний електричний струм силою I . Це може бути будь-який провідник: обмотка електродвигуна, стовп йонізованого газу в лампі денного світла, спіраль нагрівального елемента праски тощо. Якщо за деякий час t через поперечний переріз провідника проходить заряд q , то електричне поле виконує роботу $A = qU$.

Подавши заряд q через силу струму I і час t ($q = It$), отримаємо *формулу для розрахунку роботи електричного струму на даній ділянці кола*:

$$A = UIt$$

Одиниця роботи струму в СІ — **джоуль**:

$$[A] = 1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \quad (1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}).$$

В електротехніці використовують *позасистемну* одиницю роботи струму — **кіловат-годину**: $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ ($1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$). Саме в таких одиницях подає роботу струму *лічильник електричної енергії* (рис. 3.1).

На електролічильнику наявні значення ще трьох фізичних величин. Одна з них показує, до кола з якою напругою слід приєднувати електролічильник, друга — максимально допустиму силу струму в приладі, третя — частоту змінного струму в мережі (див. § 19). За значеннями перших двох величин визначають максимально допустиму *потужність* споживачів, які можна підключити через електролічильник.

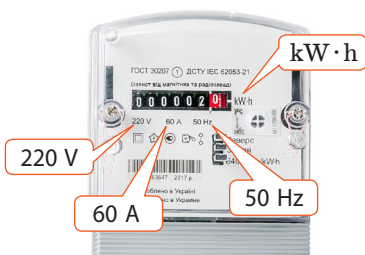


Рис. 3.1. Лічильник електричної енергії — прилад для прямого вимірювання роботи струму

Потужність струму P — фізична величина, яка чисельно дорівнює роботі струму за одиницю часу:

$$P = \frac{A}{t},$$

де A — робота, виконана струмом за час t .
Урахувавши, що $A = UIt$, маємо:

$$P = UI,$$

де U — напруга на ділянці кола, на якій визначають потужність струму; I — сила струму в ділянці.

Одиниця потужності струму в СІ — ват:

$$[P] = 1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ А} \cdot \text{В} \left(1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{с}} = 1 \text{ А} \cdot \text{В} \right).$$

? На яку максимальну потужність розрахований електрорічильник, зображений на рис. 3.1?

2 Закон Джоуля — Ленца

Будь-який провідник під час проходження струму нагрівається (рис. 3.2). Це відбувається тому, що вільні заряджені частинки в провіднику розганяються електричним полем і, зіштовхуючись з іншими частинками, передають їм частину своєї кінетичної енергії. Унаслідок цього внутрішня енергія провідника збільшується — провідник нагрівається.

Зрозуміло, що температура провідника зі струмом не може збільшуватися нескінченно, адже шляхом теплопередачі він віддає частину отриманої енергії навколишнім тілам. Щоб вища температура провідника, то більше енергії він віддає. Із часом кількість теплоти, що виділяється в провіднику внаслідок проходження струму, дорівнюватиме кількості теплоти, яка віддається докільню, і провідник припинить нагріватися.

Закон, що визначає кількість теплоти, яка виділяється в провіднику зі струмом і яку він віддає докільню, незалежно один від одного експериментально встановили англійський фізик Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889) і російський фізик Емільй Християнович Ленц (Герріх Ленц) (1804–1865). Згодом цей закон отримав назву **закон Джоуля — Ленца**:

Кількість теплоти Q , яка виділяється в провіднику зі струмом, прямо пропорційна квадрату сили струму I , опору R провідника та часу t проходження струму:

$$Q = I^2 R t$$

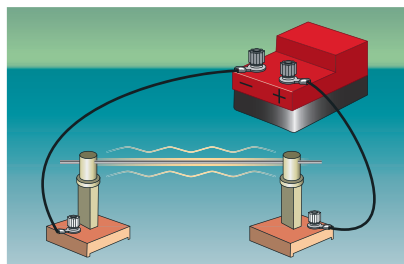


Рис. 3.2. Якщо в металевому дроті пропускати електричний струм, дріт нагріється

Зверніть увагу!

■ **Роботу струму** завжди можна визначити за формулою:

$$A = U I t.$$

■ **Кількість теплоти**, яка виділяється в провіднику, завжди можна визначити за формулою:

$$Q = I^2 R t.$$

■ Якщо ділянка кола містить тільки споживачі, в яких вся електрична енергія витрачається лише на нагрівання (резистори, нагрівальні елементи тощо), робота струму дорівнює кількості теплоти. У цьому випадку і роботу струму, і кількість теплоти можна визначити за будь-якою з таких формул:

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

а **потужність струму** — за будь-якою з таких формул:

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

Формули $A = I^2 R t = Q$, $P = I^2 R$ зручно використовувати, якщо провідники з'єднані *послідовно* (сила струму в провідниках однакова).

Формули $A = \frac{U^2}{R} t = Q$, $P = \frac{U^2}{R}$ зручно використовувати, якщо провідники з'єднані *паралельно* (напруга на провідниках однакова).



Рис. 3.3. Основна частина будь-якого нагрівального пристрою — нагрівальний елемент — являє собою виготовлений із тугоплавкого матеріалу провідник, який нагрівається внаслідок проходження струму

Проаналізувавши закон Джоуля — Ленца, доходимо висновку: якщо в різних ділянках кола сила струму однакова, то в ділянці, що має більший опір, виділяється більша кількість теплоти. Отже, збільшивши опір певної ділянки кола, можна досягти того, що майже вся теплота буде виділятися саме тут. Так працюють електронагрівальні пристрої (рис. 3.3), нагрівальний елемент яких має невелику площу поперечного перерізу і виготовлений із матеріалу з великим питомим опором (ніхром, константан). А от підвідні проводи, навпаки, мають порівняно велику площу поперечного перерізу й виготовлені із матеріалу з малим питомим опором (мідь, алюміній, сталь). Унаслідок цього опір підвідних проводів набагато менший, ніж опір нагрівального елемента, і тому вони майже не нагріваються.



Чому можна стверджувати, що сила струму в проводах під'єднувального шнура електронагрівального пристрою дорівнює силі струму в нагрівальному елементі?

3 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Електродвигун дитячого електромобіля живиться від батареї акумуляторів, напруга на виході якої є незмінною і становить 12 В. Сила струму в обмотці двигуна — 6 А. Визначте опір обмотки, якщо ККД двигуна 80 %. Втратами енергії на тертя знехтуйте.

Аналіз фізичної проблеми. Для розв'язання задачі скористаємося формулою для визначення ККД. Втратами енергії на тертя нехтуємо, тому електрична енергія (вона дорівнює роботі струму) витрачається на корисну (механічну) роботу та нагрівання обмотки двигуна внаслідок проходження струму: $A_{\text{повна}} = A_{\text{кор}} + Q$.

Дано:

$$U = 12 \text{ В}$$

$$I = 6 \text{ А}$$

$$\eta = 80 \% = 0,08$$

R — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання.

За означенням ККД: $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}}$.

Оскільки $A_{\text{повна}} = UIt$, а $A_{\text{кор}} = A_{\text{повна}} - Q$, де $Q = I^2Rt$ за законом

Джоуля — Ленца, то $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}} = \frac{UIt - I^2Rt}{UIt}$. Після скорочення на

It маємо: $\eta = \frac{U - IR}{U}$. Звідси отримаємо формулу для визначення

$$\text{опору обмотки: } R = \frac{U(1 - \eta)}{I}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[R] = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}; \quad R = \frac{12 \cdot (1 - 0,8)}{6} = 0,4 \text{ (Ом)}.$$

Відповідь: $R = 0,4 \text{ Ом}$.



Підбиваємо підсумки

- Робота струму на ділянці кола дорівнює добутку напруги на ділянці, сили струму в ділянці та часу, за який визначається робота: $A = UIt$.
- Потужність струму чисельно дорівнює роботі струму за одиницю часу:

$$P = \frac{A}{t} = UI.$$

- Кількість теплоти Q , яка виділяється в провіднику зі струмом, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника та часу проходження струму: $Q = I^2Rt$.



Контрольні запитання

1. За якою формулою обчислюють роботу струму? У яких одиницях її подають?
2. Доведіть, що $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.
3. Сформулюйте закон Джоуля — Ленца. Чому він має таку назву?
4. Які формули для розрахунку кількості теплоти, що виділяється в провіднику під час проходження струму, ви знаєте? Чи завжди можна ними користуватися?
5. Дайте характеристику потужності струму як фізичної величини.



Вправа № 3

1. Дві лампи з'єднані паралельно і підключені до джерела струму, напруга на виході якого становить 220 В. Фактична потужність ламп — 6 і 10 Вт. Визначте: а) опір кожної лампи; б) силу струму в лампах; в) енергію, яку разом споживають лампи за 2 години.
2. Як зміниться яскравість світіння лампи розжарювання, якщо повзунок реостата пересунути ліворуч (рис. 1)? Обґрунтуйте свою відповідь.
3. За даними рис. 2 визначте: а) опір нагрівального елемента бойлера; б) силу струму в нагрівальному елементі; в) час, за який бойлер нагріває 10 л води від 20 до 70 °С. ККД бойлера — 90 %; питома теплоємність води — 4200 Дж/(кг·°С).
4. Яка сила струму в обмотці двигуна електричного підйомника, якщо платформу з вантажем загальною масою 240 кг він підіймає на висоту 6 м за 50 с? ККД підйомника — 60 %, напруга на клеммах — 48 В.
5. Дві електроплити, спіралі яких мають однакові опори, спочатку ввімкнули в мережу послідовно, а потім паралельно. У якому випадку електроплити споживали більшу потужність і в скільки разів?
6. Дізнайтеся про будову одного із сучасних нагрівників води. Які особливості його конструкції дозволяють швидко нагрівати воду, зберігати її теплою, своєчасно вмикати і вимикати струм? Складіть 2–3 завдання про цей пристрій і виконайте їх.

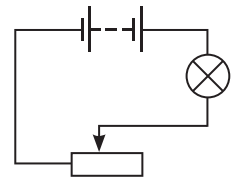


Рис. 1



Рис. 2



Експериментальне завдання

Визначте ККД електричного чайника, яким користуєтеся ви або ваші знайомі.

§ 4. ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА



Кожен із вас, напевно, не раз купував батарейки або акумулятори. На найпоширеніших із них написано: 1,5 В. А чи знаєте ви, що це означає? Не кваптеся з відповіддю, доки не прочитаєте цей параграф!

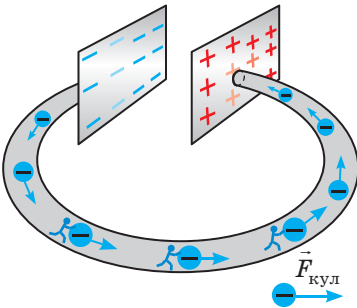


Рис. 4.1. Електрони рухаються в провіднику від негативно зарядженої пластини до позитивно зарядженої, внаслідок чого пластини втрачають заряд (стають електрично нейтральними)

1 Які сили називають сторонніми

Якщо на кінцях металевого дроту створити різницю потенціалів, наприклад приєднати кінці дроту до пластин зарядженого конденсатора, то під дією кулонівських сил $\vec{F}_{\text{кул}}$ електрони всередині провідника почнуть рухатися напрямлено і в провіднику виникне електричний струм. Але такий струм швидко припиниться (рис. 4.1).

Щоб струм існував тривалий час, необхідно якимось чином безперервно «перетягувати» електрони на негативно заряджену пластину. Таке «перетягування» не може відбуватися під дією кулонівських сил, які, навпаки, заважають рухові електронів, адже однойменні заряди відштовхуються. Слід використати сили іншого — не електростатичного (не кулонівського) — походження. Саме такі сили «працюють» усередині джерела струму, і їх називають *сторонніми силами* (рис. 4.2).

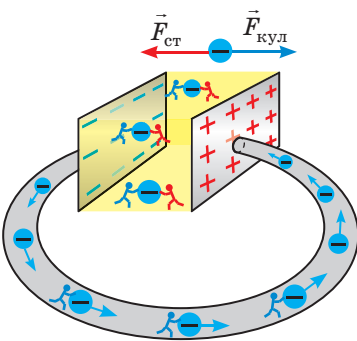


Рис. 4.2. Усередині джерела струму завдяки дії сторонніх сил $\vec{F}_{\text{ст}}$ негативні заряди переміщуються від позитивного полюса до негативного, тобто в напрямку, протилежному напрямку кулонівських сил, які також діють усередині джерела

Будь-які сили, що діють на електрично заряджені частинки і не є кулонівськими, називають **сторонніми силами**.

Природа сторонніх сил може бути різною: вони можуть виникати внаслідок хімічних реакцій (у гальванічних елементах і акумуляторах), під час змінення магнітного поля (в електромагнітних генераторах), завдяки дії світла (у фотоелементах) тощо.

Якщо приєднати споживач до джерела струму, отримаємо *повне електричне коло* (рис. 4.3). *На внутрішній ділянці* цього кола «працюють» *сторонні сили*, які підтримують постійну різницю потенціалів на виході джерела. *На зовнішній ділянці кулонівські сили* створюють напрямлений рух вільних заряджених частинок — у споживачі та в з'єднувальних проводах тече постійний електричний струм.

Дія сторонніх сил подібна до дії помпи, яка змушує воду рухатися в напрямку, протилежному силі тяжіння, і підніматися на певну висоту. А от униз вода рухається під дією сили тяжіння, подібно до того як під дією кулонівських сил рухаються вільні електрони в зовнішній ділянці електричного кола (рис. 4.4).

? Розгляньте рис. 4.4. Визначте, що є механічним аналогом джерела струму; з'єднувальних проводів; споживача струму.

2 Електрорушійна сила

Перетягуючи заряди всередині джерела струму, сторонні сили виконують деяку роботу. Роботу сторонніх сил характеризує *електрорушійна сила (ЕРС)**, яка є основною характеристикою джерела струму.

Електрорушійна сила \mathcal{E} джерела струму — скалярна фізична величина, яка характеризує енергетичні властивості джерела струму і дорівнює відношенню роботи сторонніх сил $A_{\text{ст}}$ із переміщення позитивного заряду q всередині джерела до значення цього заряду:

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

Одиниця ЕРС у СІ — вольт: $[\mathcal{E}] = 1 \text{ В (V)}$.

ЕРС джерела струму дорівнює 1 В, якщо сторонні сили всередині джерела виконують роботу 1 Дж, переміщуючи заряд +1 Кл від негативного полюса цього джерела до позитивного.

? Яку роботу виконали сторонні сили всередині джерела, зображеного на рис. 4.5, якщо під час телефонної розмови по колу перемістився заряд +5 Кл?

3 Закон Ома для повного кола

Розглянемо найпростіше повне (замкнене) електричне коло (рис. 4.6). Зовнішня ділянка цього кола (з'єднувальні проводи і нагрівач) має опір R . Внутрішня ділянка кола (джерело

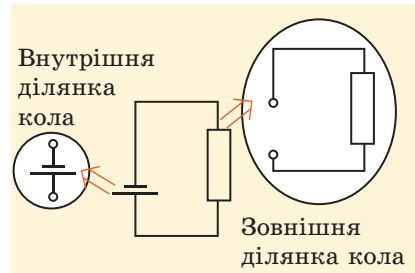


Рис. 4.3. Повне коло складається із двох ділянок — внутрішньої (джерело струму) і зовнішньої (споживач + з'єднувальні проводи)

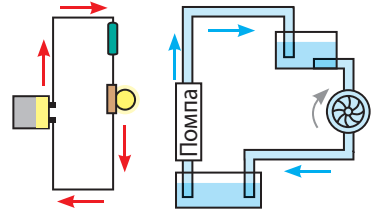


Рис. 4.4. Аналогія між електричним струмом і плином рідини



Рис. 4.5. Літій-йонна акумуляторна батарея телефона. ЕРС батареї зазначено на її поверхні

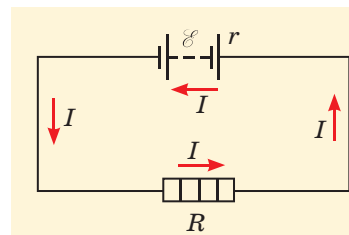


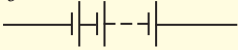
Рис. 4.6. Споживач і джерело струму з'єднані послідовно, тому сила струму в них є однаковою

* Зазначимо, що назва цієї фізичної величини дещо невдала: електрорушійна сила є роботою, а не силою у звичайному, «механічному», розумінні. Проте цей термін усталився.

Зверніть увагу!

Для вирішення різноманітних електротехнічних завдань джерела струму з'єднують у батареї.

■ Для збільшення загальної ЕРС використовують батарею послідовно з'єднаних джерел струму:

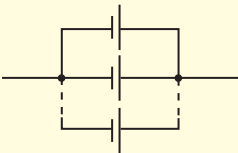


У разі послідовного з'єднання n однакових джерел струму, кожне з яких має ЕРС \mathcal{E}_0 і внутрішній опір r_0 , загальна ЕРС батареї збільшується:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n = n\mathcal{E}_0.$$

Разом із тим збільшується і внутрішній опір батареї: $r = nr_0$, тому послідовне з'єднання застосовують, коли внутрішній опір джерел набагато менший від зовнішнього опору кола.

■ Якщо внутрішній опір джерела порівнянний або більший за зовнішній опір кола, то загальний внутрішній опір можна зменшити, якщо використати батарею паралельно з'єднаних джерел струму:



У разі паралельного з'єднання n однакових джерел струму, кожне з яких має ЕРС \mathcal{E}_0 і внутрішній опір r_0 , ЕРС батареї не змінюється: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0$, а внутрішній опір зменшується в n разів: $r = \frac{r_0}{n}$.

❓ Як з'єднати джерела струму, якщо необхідно одночасно збільшити ЕРС і зменшити внутрішній опір? До речі, так побудовані «джерела струму» в «батареї» електричного ската.

струму) має ЕРС і опір r (опір електроліту й електродів). Опір джерела струму називають **внутрішнім опором джерела**.

Якщо сила струму в колі дорівнює I , відповідно до закону Джоуля — Ленца за час t на зовнішній і внутрішній ділянках кола разом виділиться певна кількість теплоти: $Q = I^2Rt + I^2rt$. З'ясуємо, звідки береться ця енергія.

У колі одночасно «працюють» і кулонівські, і сторонні сили: $A = A_{\text{кул}} + A_{\text{ст}}$. Проте кулонівські сили є потенціальними — їхня робота на замкненому контурі дорівнює нулю: $A_{\text{кул}} = 0$ (на зовнішній ділянці кола кулонівські сили здійснюють додатну роботу, на внутрішній ділянці — від'ємну). Отже, енергія виділяється тільки завдяки роботі сторонніх сил: $Q = A_{\text{ст}}$.

Оскільки $A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q$, а $q = It$, отримаємо: $\mathcal{E}It = I^2Rt + I^2rt$. Після скорочення на It отримаємо: $\mathcal{E} = I(R+r)$, де $R+r$ — повний опір кола. З останньої рівності маємо закон Ома для повного кола:

■ Сила струму в повному електричному колі дорівнює відношенню ЕРС джерела струму до повного опору кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

4 Що таке коротке замикання

Щороку в Україні виникає понад 40 тис. пожеж, і дуже часто їхньою причиною є *коротке замикання*.

■ **Коротким замиканням** називають з'єднання ділянки кола, що перебуває під напругою, провідником, опір якого дуже малий порівняно з опором цієї ділянки.

Коротке замикання може відбутися внаслідок порушення ізоляції, якщо два оголені проводи, приєднані до споживача, торкнуться один одного, або під час ремонту елементів кола, які перебувають під напругою (*нагадуємо: це смертельно небезпечно!*).

Під час короткого замикання сила струму в колі збільшується в кілька разів, що згідно із законом Джоуля — Ленца призводить до значного нагріву проводів і як наслідок — до пожежі. Саме тому *електрична проводка повинна обов'язково містити запобіжники*.

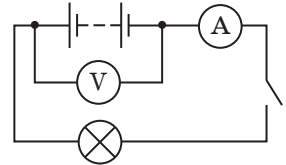
Підключення до джерела струму провідника з дуже малим опором ($R \rightarrow 0$) теж спричиняє коротке замикання. *Сила струму короткого замикання* є максимальною для даного джерела та визначається за формулою:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

де \mathcal{E} — ЕРС джерела струму; r — внутрішній опір джерела.

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача. До батареї гальванічних елементів приєднали лампу розжарювання, ключ, амперметр і вольтметр (див. рисунок). Спочатку ключ був розімкнений, а показ вольтметра — 5,6 В. Після того як ключ замкнули, показ вольтметра став 4,8 В, а амперметра — 0,8 А. Визначте ЕРС і внутрішній опір джерела струму, а також ККД джерела при цьому навантаженні. Прилади вважайте ідеальними.



Дано:

$$U_1 = 5,6 \text{ В}$$

$$U_2 = 4,8 \text{ В}$$

$$I_2 = 0,8 \text{ А}$$

$$\mathcal{E} \text{ — ?}$$

$$r \text{ — ?}$$

$$\eta \text{ — ?}$$

Пошук математичної моделі, розв'язання.

Запишемо закон Ома для повного кола ($I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$) у вигляді:
 $\mathcal{E} = I(R+r) = IR + Ir$. Оскільки $IR = U$, отримаємо:

$$\mathcal{E} = U + Ir. \quad (*)$$

1) Якщо ключ розімкнений, а вольтметр ідеальний ($R_V \rightarrow \infty$), сила струму в колі дорівнює нулю ($I = 0$) і формула (*) набуває вигляду:
 $\mathcal{E} = U$.

Отже, $\mathcal{E} = U_1 = 5,6 \text{ В}$.

2) ЕРС і внутрішній опір джерела не залежать від навантаження, тому, знаючи ЕРС, напругу і силу струму в колі при замкненому ключі та скориставшись формулою (*), визначимо внутрішній опір джерела:

$$\mathcal{E} = U + Ir \Rightarrow r = \frac{\mathcal{E} - U}{I}; \quad r = \frac{\mathcal{E} - U_2}{I_2} = \frac{5,6 \text{ В} - 4,8 \text{ В}}{0,8 \text{ А}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ (Ом)}.$$

3) За означенням ККД: $\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}}$, де $A_{\text{повна}} = \mathcal{E}It$ — робота сторонніх сил у середині джерела струму; $A_{\text{кор}} = UIt$ — робота струму на зовнішній ділянці кола.

Остаточно маємо: $\eta = \frac{UIt}{\mathcal{E}It} = \frac{U}{\mathcal{E}}; \quad \eta = \frac{U_2}{\mathcal{E}} = \frac{4,8}{5,6} = \frac{6}{7} \approx 0,86$.

Аналіз результатів. Бачимо, що *ККД джерела струму залежить від навантаження*. І це дійсно так: зі зменшенням зовнішнього опору збільшується сила струму в колі, а отже, збільшується й кількість теплоти, що виділяється в джерелі, тобто витрачається марно.

Відповідь: $\mathcal{E} = 5,6 \text{ В}; r = 1 \text{ Ом}; \eta = 86 \%$.



Підбиваємо підсумки

- Будь-які сили, що діють на електрично заряджені частинки і не є кулонівськими, називають сторонніми силами. Саме сторонні сили, «працюючи» всередині джерела струму, підтримують напругу на його полюсах.
- Основна енергетична характеристика джерела струму — електрорушійна сила (ЕРС) — скалярна фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи сторонніх сил $A_{\text{ст}}$ з переміщення позитивного заряду q всередині джерела до значення цього заряду: $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$.
- Сила струму в повному колі дорівнює відношенню ЕРС джерела струму до повного опору кола: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, де R і r — опір зовнішньої і внутрішньої ділянок кола відповідно. Це твердження є законом Ома для повного кола.



Контрольні запитання

1. Що називають сторонніми силами? 2. Охарактеризуйте ЕРС як фізичну величину. 3. Skorиставшись законом збереження енергії, законом Джоуля — Ленца та означеннями ЕРС і сили струму, отримайте закон Ома для повного кола. Сформулюйте цей закон. 4. Що називають коротким замиканням? Наведіть приклади. 5. Як розрахувати силу струму короткого замикання? 6. Як і чому ККД джерела струму залежить від навантаження?



Вправа № 4

Якщо не зазначено інше, опором з'єднувальних проводів нехтуйте.

1. До джерела струму з ЕРС 6 В і внутрішнім опором 2 Ом підключено резистор опором 10 Ом. Визначте: а) силу струму в колі; б) напругу на полюсах джерела струму.
2. До полюсів джерела струму з ЕРС 4 В підключили лампу опором 8 Ом, у результаті чого в колі встановилася сила струму 0,4 А. Визначте внутрішній опір джерела.
3. Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму склали електричне коло (рис. 1). Коли обидва ключі замкнули, показ амперметра був 1,8 А. Після того як один ключ розімкнули, показ амперметра став 1 А. Які результати було отримано?
4. Визначте потужність, яку споживає кожен із трьох резисторів (рис. 2), і ККД джерела струму при цьому навантаженні, якщо ЕРС джерела 12 В, а його внутрішній опір — 6 Ом.
5. Дізнайтеся, як побудований електричний орган електричного ската (рис. 3) або електричного вугра, яку ЕРС він створює, якими є потужність його електричного розряду, сила струму та напруга під час розряду. Використавши отримані дані, складіть 2–3 задачі та розв'яжіть їх.

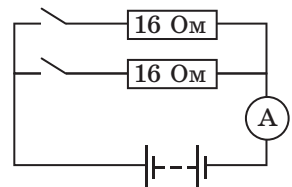


Рис. 1

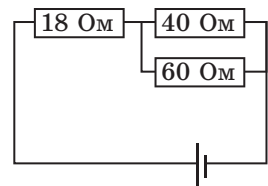


Рис. 2



Рис. 3



Вольфрамова нитка лампи розжарювання поступово тоншає через випаровування металу; врешті-решт у найтоншому місці нитка перегоріє. А чому лампа найчастіше перегоріє в той момент, коли її вмикають? Якщо ви не можете зараз відповісти на це запитання, поверніться до нього після опрацювання матеріалу параграфа.

1 Як рухаються електрони в металевому провіднику

У 1900 р., через три роки після відкриття електрона, німецький фізик *Пауль Друде* (1863–1906) запропонував *електронну теорію провідності металів*, відповідно до якої електрони в металах поводяться подібно до молекул ідеального газу. Зараз ця теорія носить назву **класична електронна теорія**.

Згідно із класичною електронною теорією внутрішня будова металу являє собою утворену позитивно зарядженими йонами кристалічну ґратку, яка перебуває в «газі» вільних електронів. Якщо в металевому провіднику створити електричне поле, то на хаотичний рух електронів накладатиметься дрейф електронів у напрямку сили, що діє на електрони з боку електричного поля. Цей дрейф електронів і є *електричним струмом*.

Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

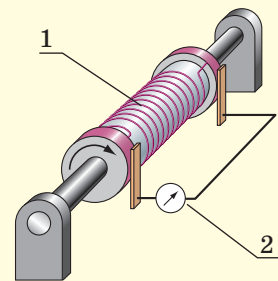
Уявімо модель руху електрона в металі, в якому створено електричне поле. Відповідно до класичної теорії електрон досить короткий час розганяється електричним полем, потім зупиняється, зіткнувшись із позитивним йоном, потім знову прискорюється і знову зупиняється... Під час зіткнень електрон передає йону всю енергію, здобуту під час розгону. Саме такі зіткнення — їх називають *ефективними зіткненнями* — «відповідальні» за опір металу.

Визначимо *середню швидкість \bar{v} напрямленої руху електронів*. За інтервал часу t через переріз площею S провідника проходить N електронів: $N = nS\bar{v}t$, де n — концентрація

Дослід

Стюарта — Толмена

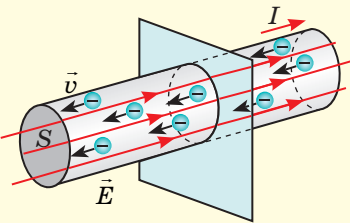
Якщо металевому провіднику (1) надати швидкого обертання, а потім різко зупинити, то вільні заряджені частинки рухатимуться за інерцією — в провіднику виникне короточасний електричний струм. За відхиленням стрілки гальванометра (2) можна виявити, заряди якого знаку створюють цей струм, а знаючи опір провідника, силу струму та лінійну швидкість обертання, дізнатися, які саме частинки створюють струм.



Такий дослід у 1916 р. здійснили американські вчені *Річард Толмен* (1881–1948) і *Томас Стюарт* (1890–1958). Вони експериментально довели, що електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

Як швидко рухаються електрони

Середня швидкість хаотичного руху вільних електронів величезна — близько 300 км/с. Разом із тим середня швидкість їхнього напрямленого руху надзвичайно мала — кілька міліметрів за секунду. Чому ж, щойно ми натискаємо вмикач лампи, вона відразу спалахує? Річ у тім, що електричне поле поширюється в провіднику зі швидкістю 300 000 км/с. Завдяки дії поля вільні електрони, розташовані в будь-якій точці провідника, майже миттєво втягуються в напрямлений рух.



Оцініть, через який інтервал часу після вмикання плеєра ви почули б музику в навушниках, якби електричне поле поширювалось зі швидкістю напрямленого руху електронів.

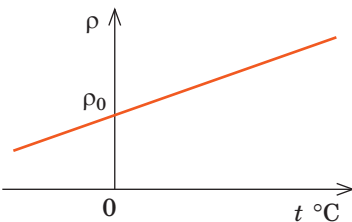


Рис. 5.1. Графік залежності питомого опору провідника від температури (лінійна ділянка). Зі збільшенням температури питомий опір провідника збільшується

вільних електронів у провіднику. При цьому переноситься заряд $q = N|e|$. За означенням:

$$I = \frac{q}{t}. \text{ Отже, маємо:}$$

$$I = n|e|\bar{v}S \Rightarrow \bar{v} = \frac{I}{n|e|S}$$

Визначте середню швидкість напрямленого руху електронів у мідному проводі з перерізом 1 мм^2 за сили струму 1 А , якщо концентрація вільних електронів у міді $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

2 Як опір металів залежить від температури

Опір металевого провідника залежить не тільки від його геометричних розмірів і речовини, з якої він виготовлений, а й від температури (останнє обґрунтовано в квантовій теорії електропровідності металів). Досліди свідчать: якщо температура t металу є не надто низькою і не надто високою ($t < t_{\text{плавл}}$), питомий опір металу та опір виготовленого з нього провідника лінійно залежать від температури (рис. 5.1):

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad R = R_0(1 + \alpha t),$$

де ρ_0 , R_0 — відповідно питомий опір і опір провідника за температури $0 \text{ }^\circ\text{C}$; ρ , R — відповідно питомий опір і опір провідника за температури t ; α — температурний коефіцієнт електричного опору.

Температурний коефіцієнт електричного опору — це фізична величина, яка характеризує залежність питомого опору речовини від температури.

Одиниця температурного коефіцієнту в СІ — обернений кельвін (кельвін у мінус першому степені): $[\alpha] = \text{K}^{-1} (\text{K}^{-1})$.

Для всіх металів $\alpha > 0$. Наприклад, температурний коефіцієнт електричного опору алюмінію становить $0,0038 \text{ K}^{-1}$ (див. Додаток 1).

Якщо температура металу зменшується, наближаючись до абсолютного нуля (0 К , $-273 \text{ }^\circ\text{C}$), або збільшується, наближаючись до температури плавлення, то залежність $\rho(t)$ вже не буде лінійною (рис. 5.2).

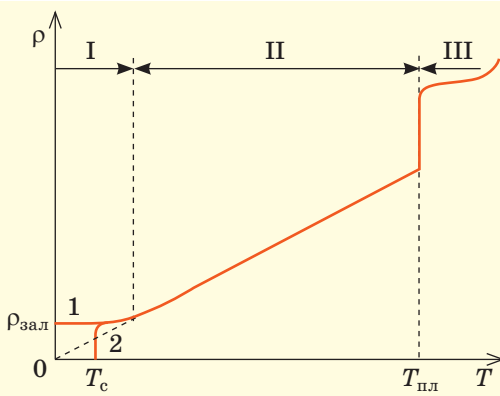


Рис. 5.2. Графік зміни питомого опору металу в широкому діапазоні температур

Ділянка I. Температура наближається до 0 К:

- у деяких металів питомий опір перестає залежати від температури і стає незмінним (вітка 1); $\rho_{\text{зал}}$ — залишковий питомий опір;
- питомий опір деяких металів стрибком падає до нуля (вітка 2) — стан надпровідності; T_c — критична температура (температура переходу в надпровідний стан).

Ділянка II. Лінійна ділянка: питомий опір лінійно залежить від температури.

Ділянка III. При досягненні температури плавлення питомий опір збільшується стрибком.

3 Знайомимося з явищем надпровідності

У 1911 р. нідерландський учений *Гейке Камерлінг-Оннес* (1853–1926), досліджуючи, як поводить ся ртуть за температур, близьких до абсолютного нуля, помітив дивне явище: у разі зниження температури ртуті до 4,1 К її питомий опір стрибком падав до нуля.

Аналогічне явище спостерігалось з оловом, свинцем і низкою інших металів (рис. 5.3). Це явище назвали **надпровідністю**. Зараз відомо багато речовин і матеріалів, які за відповідної температури переходять у надпровідний стан.

Якщо в замкненому провіднику, який перебуває в надпровідному стані, створити електричний струм, то струм існуватиме в провіднику без підтримки джерела необмежений час. Ця та інші властивості надпровідників відкривають широкі можливості їх застосування в техніці й промисловості. Тільки створення надпровідних ліній електропередачі дозволяє зекономити 10–15 % електроенергії.

Труднощі широкого застосування надпровідників пов'язані з необхідністю охолодження матеріалів

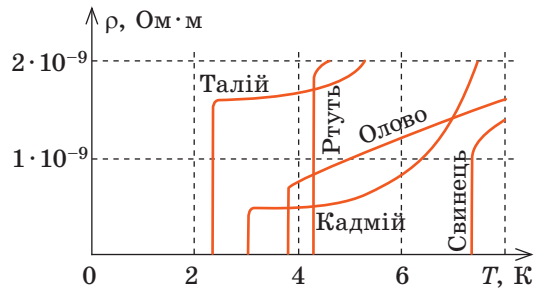
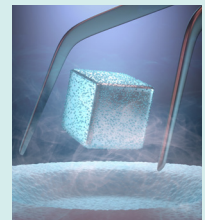


Рис. 5.3. Графіки зміни питомого опору деяких металів за температур, близьких до абсолютного нуля

«Труна Магомета»

Нульовий опір — це не єдина унікальна властивість матеріалів у надпровідному стані. У 1933 р. німецькі вчені *Вальтер Мейснер* (1882–1974) і *Роберт Оксенфельд* (1901–1993) установили, що під час переходу в надпровідний стан магнітне поле повністю витісняється із провідника (*ефект Мейснера*).

Якщо помістити магніт над провідником і, охолоджуючи, перевести провідник у надпровідний стан, магніт буде левітувати над надпровідником. Дослід, який демонструє ефект Мейснера, назвали «труна Магомета» — вважається, що труна з тілом пророка Магомета левітувала в повітрі без жодної підтримки.



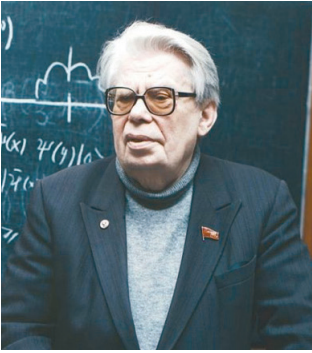


Рис. 5.4. Микола Миколайович Боголюбов (1909–1992) — видатний радянський фізик-теоретик і математик, засновник наукових шкіл у галузях нелінійної механіки, статистичної фізики і квантової теорії поля. У 1934–1959 рр. працював у Київському університеті, у 1965–1973 рр. — директор Інституту теоретичної фізики АН України (зараз цей інститут носить ім'я вченого)

до низьких температур — це досить дорого коштує. Зараз знайдено матеріали, які переходять у надпровідний стан за температури близько 100 К ($-173\text{ }^\circ\text{C}$) і нижче. Останній рекорд високотемпературної надпровідності був «установлений» у 2015 р.: при величезному тиску (1 млн атм.) сірководень (H_2S) був переведений у надпровідний стан за температури $-70\text{ }^\circ\text{C}$.

Надпровідність неможливо пояснити з точки зору класичної теорії електропровідності металів. У 1957 р. група американських учених: *Джон Бардін* (1908–1991), *Леон Купер* (народ. 1930), *Джон Шріффер* (народ. 1931) — і незалежно від них радянський вчений *Микола Миколайович Боголюбов* (рис. 5.4) розробили квантову теорію надпровідності.

4

Учимося розв'язувати задачі

Задача. Електричне коло складається із джерела струму, міліамперметра опором 20 Ом і реостата, виготовленого зі сталевого дроту. За температури $0\text{ }^\circ\text{C}$ показ міліамперметра 30 мА, а опір реостата — 200 Ом. Яким буде показ міліамперметра, якщо реостат нагріється до $50\text{ }^\circ\text{C}$? Внутрішнім опором джерела та опором з'єднувальних проводів знехтувати.

Аналіз фізичної проблеми. Реостат нагрівається, і його опір збільшується, що спричиняє збільшення повного опору кола. Відповідно до закону Ома сила струму в колі зменшується. Реостат і міліамперметр з'єднані послідовно, внутрішній опір джерела дорівнює нулю, тому загальний опір кола становить $R + R_A$, де R — опір реостата за $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$. Температурний коефіцієнт опору сталі знайдемо в таблиці (див. Додаток 1).

Дано:

$$R_A = 20\text{ Ом}$$

$$t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_0 = 30\text{ мА} = 0,03\text{ А}$$

$$R_0 = 200\text{ Ом}$$

$$t = 50\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 0,006\text{ К}^{-1}$$

I — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання. Запишемо закон Ома для повного кола для двох теплових станів реостата.

До нагрівання:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R_0 + R_A} \Rightarrow \mathcal{E} = I_0(R_0 + R_A).$$

Після нагрівання:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_A}, \text{ де } R = R_0(1 + \alpha t).$$

Після підстановки \mathcal{E} і R одержуємо:
$$I = \frac{I_0(R_0 + R_A)}{R_0(1 + \alpha t) + R_A}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[I] = \frac{\text{А} \cdot \text{Ом}}{\text{Ом}} \cdot \text{А}; \quad I = \frac{0,03 \cdot (200 + 20)}{200 \cdot (1 + 0,006 \cdot 50) + 20} \approx 24 \cdot 10^{-3}\text{ (А)}.$$

Аналіз результату. Сила струму зменшилася — це реальний результат.

Відповідь: $I \approx 24\text{ мА}$.



Підбиваємо підсумки

- Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.
- За відсутності електричного поля вільні електрони в металах рухаються хаотично. Якщо в металевому провіднику існує електричне поле, то вільні електрони, не припиняючи свого хаотичного руху, рухаються напрямлено.
- Залежність опору металевих провідників від температури передається формулою $R = R_0(1 + \alpha t)$, де R_0 , R — опори провідника відповідно за температури $0\text{ }^\circ\text{C}$ і за даної температури t ; α — температурний коефіцієнт опору.
- У випадку зменшення температури деяких металів до температур, близьких до абсолютного нуля, їхній опір стрибком падає до нуля. Це явище називають надпровідністю.



Контрольні запитання

1. Що являє собою електричний струм у металах?
2. Опишіть суть досліду Стюарта — Толмена щодо виявлення природи електричного струму в металах.
3. Як рухаються електрони в металевому провіднику з точки зору класичної фізики, якщо в провіднику створено електричне поле?
4. У чому причина опору металів?
5. Чи залежить опір металів від температури? Якщо залежить, то як?
6. У чому полягає явище надпровідності?



Вправа № 5

1. На рис. 1 подано дослід. З якою метою здійснюється цей дослід? Назвіть використане обладнання. Як ви вважаєте, як і чому буде змінюватися показ вимірювального приладу під час нагрівання?
2. Чи виділяється теплота під час проходження струму в провіднику, який перебуває в надпровідному стані?
3. На рис. 2 подано графік залежності опору металевого провідника від температури. Який температурний коефіцієнт опору цього металу? Яка сила струму в провіднику за температури $150\text{ }^\circ\text{C}$, якщо напруга на кінцях провідника 5 В ?
4. Опір нікелінової обмотки електричної печі за температури $20\text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює 60 Ом . Яким буде опір обмотки, якщо температура сягне $700\text{ }^\circ\text{C}$?
5. Яку довжину має вольфрамова нитка лампи розжарювання, розрахованої на напругу 220 В і потужність 220 Вт ? Температура розжареної нитки становить 2700 К , її діаметр — $0,03\text{ мм}$.
6. На залежності опору металів від температури ґрунтується дія *термометрів опору* — *термоперетворювачів* (рис. 3). Дізнайтесь, як побудовані такі термометри, де їх застосовують, які метали використовують для виготовлення їхнього термометричного тіла.

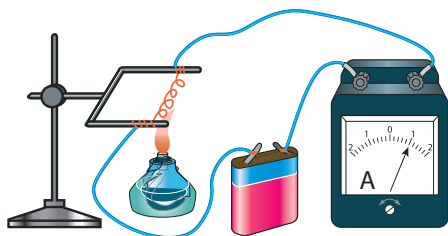


Рис. 1

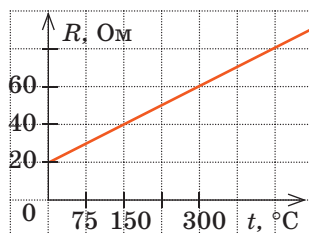


Рис. 2

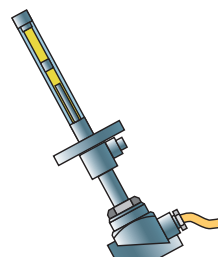


Рис. 3

§ 6. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ. ЕЛЕКТРОЛІЗ

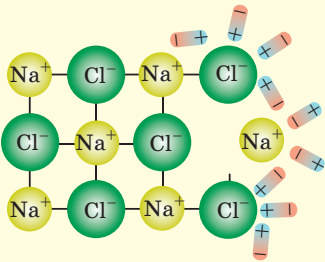


Насправді прикраса на малюнку не є золотою — вона виготовлена зі срібла, а тонкий шар золота (6 мікронів) нанесено на прикрасу електрохімічним способом — способом *електролізу*. Автомобільний диск виготовлений зі сплаву алюмінію, а блиску йому надає тонкий шар хрому. І вироблення алюмінію, і рівномірне нанесення хрому на поверхню деталі — це теж електроліз. Про електроліз та його застосування згадаємо в цьому параграфі.

Нагадуємо

Електролітична дисоціація (від латин. *dissociatio* — розділення) — це *розпад речовин на йони внаслідок дії полярних молекул розчинника*.

Так, коли кристалик кухонної солі потрапляє у воду, полярні молекули води оточують йони Натрію та йони Хлору і відокремлюють їх від кристалика.



У результаті в розчині з'являються вільні заряджені частинки — позитивні й негативні йони.

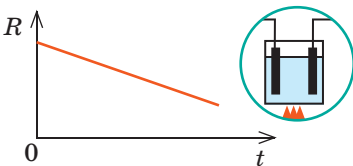
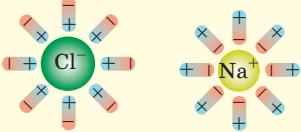


Рис. 6.1. Приблизний графік залежності опору електроліту від температури

1 Що являє собою електричний струм в електролітах

Електроліти — тверді або рідкі речовини, що мають йонну провідність.

Механізм йонної провідності твердих речовин є досить складним, тому розглянемо йонну провідність лише рідких електролітів.

Солі, кислоти або луги під час розчинення можуть розпастися на окремі йони. Це явище називають *електролітичною дисоціацією*, а розчини відповідних речовин — *електролітами*.

Розпад речовин на йони може бути спричинений не тільки розчинником. Деякі солі та оксиди металів розпадаються на йони внаслідок значного збільшення температури. Розплави цих речовин теж є електролітами.

За відсутності електричного поля йони перебувають у хаотичному тепловому русі. А от якщо в розчин або розплав помістити електроди, приєднані до різнойменних полюсів джерела струму, то, як і вільні електрони в металах, йони дрейфуватимуть у певному напрямку: позитивні йони (катіони) — до негативного електрода (катода); негативні йони (аніони) — до позитивного електрода (анода). Тобто в розчині виникне *електричний струм*.

Електричний струм у розчинах і розплавах електролітів являє собою напрямлений рух вільних йонів.

Зазначимо, що зі збільшенням *температури* кількість йонів в електроліті значно збільшується, тому, незважаючи на збільшення кількості ефективних зіткнень, *опір електроліту зменшується* (рис. 6.1).

2 Що таке електроліз

Під час проходження електричного струму через електроліт відбувається перенесення хімічних складових електроліту й ті виділяються на електродах — осідають у вигляді твердого шару або виділяються в газоподібному стані.

Так, якщо через водний розчин купрум(II) хлориду пропускати струм, то поверхню катода вкриє тонкий шар міді, а біля анода виділиться хлор. Це відбувається тому, що під дією електричного поля вільні позитивні йони Купруму (Cu^{2+}) прямують до катода, а вільні негативні йони Хлору (Cl^-) — до анода (рис. 6.2).

Досягши катода, катіони Купруму «захоплюють» з його поверхні електрони, яких їм «бракує», — відбувається *хімічна реакція відновлення*: катіони Купруму перетворюються на нейтральні атоми, і на поверхні катода осідає мідь. Водночас аніони Хлору, досягши поверхні анода, «віддають» йому «надлишкові» електрони — відбувається *хімічна реакція окиснення*: аніони Хлору перетворюються на нейтральні атоми, і на аноді виділяється хлор.

Процес виділення речовин на електродах, пов'язаний з окисно-відновними реакціями, які відбуваються на електродах під час проходження струму, називають **електролізом**.

3 Закони Фарадея для електролізу

Уперше явище електролізу докладно вивчив англійський фізик *Майкл Фарадей* (1791–1867). Точно вимірюючи маси речовин, які виділялися на електродах під час електролізу, вчений сформулював два *закони електролізу*.

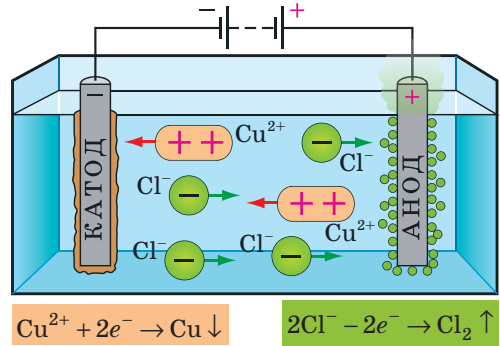


Рис. 6.2. Електроліз розчину CuCl_2 . У ванну з розчином занурені катод і анод. Після замикання кола позитивні йони (катіони) рухаються до катода, негативні йони (аніони) — до анода

Закони Фарадея для електролізу

Перший закон електролізу

Маса речовини, яка виділяється на електроді під час електролізу, прямо пропорційна силі струму I та часу t його проходження через електроліт:

$$m = kIt, \text{ або } m = kq,$$

де q — заряд, що пройшов через електроліт; k — коефіцієнт пропорційності, який називають **електрохімічний еквівалент**:

$$[k] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \left(\frac{\text{кг}}{\text{С}} \right).$$

Електрохімічні еквіваленти визначають експериментальним шляхом і заносять у таблиці (див. Додаток 1).

Другий закон електролізу

Електрохімічний еквівалент k прямо пропорційний відношенню молярної маси M елемента до валентності n цього елемента в даній хімічній сполуці:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n},$$

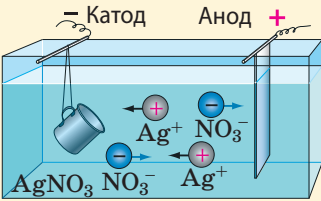
де F — **стала Фарадея**, яка визначається як добуток модуля заряду електрона на сталу Авогадро:

$$F = |e| N_A = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл / моль.}$$

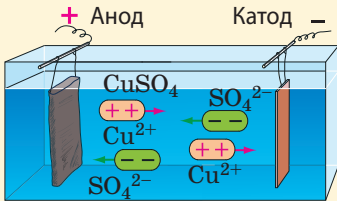
Тобто стала Фарадея дорівнює модулю заряду одного моля електронів.

4 Де застосовують електроліз

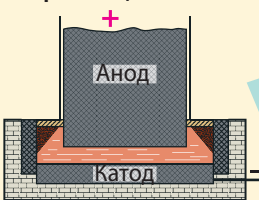
Електроліз широко застосовують у сучасній техніці, зокрема для полірування поверхонь, зарядження кислотних і лужних акумуляторів, отримання чистого водню (електроліз води), багатьох металів тощо.



Гальваностегія — електrolітичний спосіб покриття виробу тонким шаром металу (сріблення, хромування, позолочення, нікелювання). Предмет, який покривають металом, є катодом, металева пластинка — анодом.

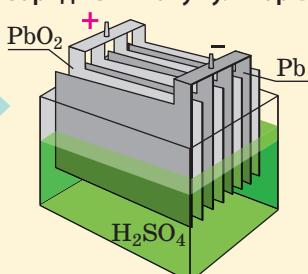


Рафінування — очищення металів за допомогою електролізу. Неочищений метал слугує анодом, тонка пластинка чистого металу — катодом.



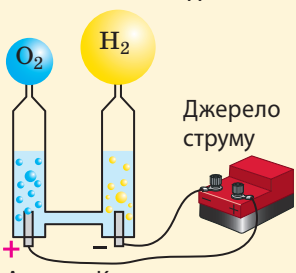
Виробництво металів

Електролітом є розчин чи розплав солі або оксиду металічного елемента. Катодом слугують дно та стінки ванни, і метал збирається на дні ванни; анодом слугує вугільний блок.

Зарядження акумуляторів

Під час роботи акумулятора на обох електродах утворюється плюмбум(II) сульфат ($PbSO_4$), а концентрація сульфатної кислоти (H_2SO_4) в розчині зменшується. Під час заряджання внаслідок електролізу на катоді знов утворюється свинець (Pb), на аноді — плюмбум(IV) оксид (PbO_2), а розчин збагачується сульфатною кислотою.

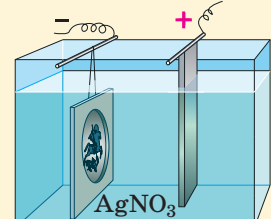


Виробництво чистого водню

Під час електролізу води на катоді утворюється водень, а на аноді — кисень.

Очищення стічних вод

Під час електролізу органічні речовини, що містяться у воді, розщеплюються, а із неорганічних речовин вилучаються метали — вони виділяються на катоді.



Гальванопластика — отримання за допомогою електролізу точних копій рельєфних виробів. Восковий зліпок, покритий тонким шаром графіту, є катодом, срібна пластинка — анодом.

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Під час рафінування міді анодом слугує пластина з неочищеної міді, що має 12 % домішок. Скільки електроенергії витратили для очищення 2 кг такої міді, якщо процес відбувається за напруги 0,5 В?

Аналіз фізичної проблеми. Витрати енергії дорівнюють роботі струму: $\Delta W = A = qU$, де q — заряд, який пройшов через електроліт за час рафінування. За першим законом Фарадея знайдемо заряд q і, скориставшись табличним значенням електрохімічного еквівалента міді (Cu^{2+}) (див. Додаток 1), визначимо шукану величину.

Дано:

$$m_{\text{доміш}} = 0,12 \text{ м}$$

$$m = 2 \text{ кг}$$

$$U = 0,5 \text{ В}$$

$$k = 0,33 \text{ кг/Кл}$$

 ΔW — ?*Пошук математичної моделі, розв'язання.*

За першим законом Фарадея: $m_{\text{Cu}} = kq \Rightarrow q = \frac{m_{\text{Cu}}}{k}$.

Отже, $\Delta W = A = qU = \frac{m_{\text{Cu}}}{k} U$.

За умовою задачі маса чистої міді дорівнює: $m_{\text{Cu}} = m - m_{\text{доміш}}$.

Остаточно маємо: $\Delta W = \frac{(m - m_{\text{доміш}})U}{k}$.

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[\Delta W] = \frac{\text{кг} \cdot \text{В}}{\text{кг/Кл}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{Кл}}{\text{Кл}} = \text{Дж}; \quad \Delta W = \frac{(2 - 0,12 \cdot 2) \cdot 0,5}{0,33 \cdot 10^{-6}} = \frac{0,88}{0,33 \cdot 10^{-6}} \approx 2,7 \cdot 10^6 \text{ (Дж)}.$$

Відповідь: $\Delta W \approx 2,7 \text{ МДж}$.**Підбиваємо підсумки**

Електричний струм в електролітах — це напрямлений рух вільних позитивних і негативних йонів. Процес виділення речовин на електродах, пов'язаний з окисно-відновними реакціями, що відбуваються на електродах під час проходження струму, називають електролізом.

- Перший закон електролізу: маса речовини, що виділяється на електроді, прямо пропорційна силі струму та часу його проходження через електроліт: $m = kIt$, де k — електрохімічний еквівалент.

- Другий закон електролізу: електрохімічний еквівалент k прямо пропорційний відношенню молярної маси елемента до валентності n цього елемента в даній хімічній сполуці: $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$, де $F = N_A |e|$ — стала Фарадея.

**Контрольні запитання**

1. У чому полягає явище електролітичної дисоціації? Наведіть приклади.
2. Що таке електроліт?
3. Що являє собою електричний струм у розчинах і розплавах електролітів?
4. опишіть процес електролізу.
5. Сформулюйте закони Фарадея.
6. Наведіть приклади застосування електролізу.

**Вправа № 6**

1. Через розчин купрум(II) сульфату досить довгий час пропускають електричний струм. Як змінюється маса міді, що виділяється на катоді за одиницю часу, якщо напруга на електродах є незмінною?

2. Заповніть таблицю.*

Речовина, яка виділилася на катоді			Час електролізу	Сила струму під час електролізу
назва	маса	електрохімічний еквівалент		
Мідь	6,6 г			0,4 А
		0,30 мг/Кл	1 год	0,6 А
Алюміній	135 мг		50 хв	5 А

3. Дві однакові електролітичні ванни заповнені розчином аргентум(I) нітрату. Концентрація розчину у ванні 1 більша, ніж у ванні 2. Визначте, на катоді якої ванни виділиться більше срібла, якщо ванни з'єднані: а) послідовно; б) паралельно.
4. На рис. 1 наведено схематичне зображення електричного кола, до складу якого входить електролізер із водним розчином цинк сульфату. Напруга на електродах становить 2 В; густина цинку — 7100 кг/м^3 . Визначте: а) який електрод є катодом, який — анодом; б) на якому електроді виділяється цинк; в) за який час на електроді утвориться шар цинку завтовшки 6,8 мкм і яка енергія буде на це витрачена.
5. Дізнайтеся докладніше, що таке *електролізер* (рис. 2). Чи відрізняється електролізер від електролітичної ванни?

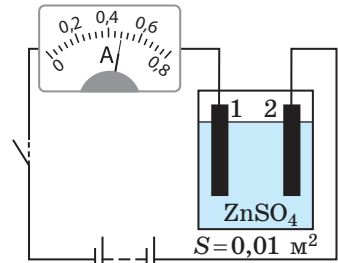


Рис. 1

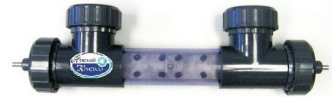
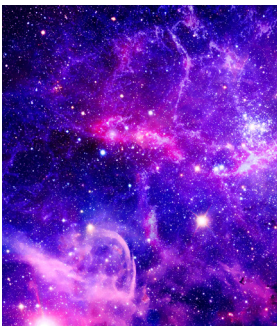


Рис. 2

§ 7. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ



99 % речовини Всесвіту перебуває у стані *плазми*: у цьому стані — речовина в зорях і галактичних туманностях, плазмою заповнений міжзоряний простір. На Землі ми теж часто маємо справу з плазмою: вона міститься і в каналі блискавки, і в язиках полум'я, і всередині рекламних трубок; процесами в навколосемній плазмі зумовлені магнітні бурі, полярні сяйва... **Плазма** — це частково або повністю йонізований газ, у якому концентрації позитивних і негативних зарядів практично однакові.

Про те, як йонізувати газ (створити плазму) і які процеси відбуваються, якщо йонізований газ помістити в електричне поле, згадаємо в цьому параграфі.

1 За яких умов гази стають провідниками

На відміну від металів та електролітів гази складаються з електрично нейтральних атомів і молекул та за звичайних умов майже не містять

* Зрозуміло, що в цьому та аналогічних завданнях таблиці, креслення тощо слід перенести в зошит.

вільних носіїв струму, тобто є ізоляторами. А от якщо якось змусити електрон залишити атом, то в газі утворюються *позитивні йони і вільні електрони*; деякі електрони, у свою чергу, можуть приєднатися до нейтральних молекул і атомів — утворюються *негативні йони* (рис. 7.1).

Процес утворення в газі позитивних і негативних йонів та вільних електронів із нейтральних молекул і атомів називають **йонізацією**.

Щоб змусити електрон залишити атом, необхідно надати йому певну мінімальну енергію — *енергію йонізації* (W_i), яка залежить від хімічної природи газу. Залежно від того, звідки береться ця енергія, розрізняють кілька видів йонізації (див., наприклад, рис. 7.2).

Якщо йонізований газ помістити в електричне поле, то позитивні йони рухатимуться в напрямку поля, негативні йони та електрони — в протилежному напрямку (рис. 7.3). У газі виникне *електричний струм*.

Електричний струм у газах — **газовий розряд** — являє собою напрямлений рух вільних електронів, позитивних і негативних йонів.

2

Самостійний і несамостійний газові розряди

Досліди показують: якщо усунути причину, яка викликала йонізацію газу (прибрати пальник, вимкнути джерело випромінювання), то зазвичай газовий розряд припиняється. Це пояснюється кількома причинами.

1. Електрон і позитивний йон можуть об'єднатися, перетворившись на нейтральну молекулу (атом). Цей процес називають *рекомбінацією*.

2. Вільні електрони поглинаються анодом.

3. Вільні йони біля електродів перетворюються на нейтральні частинки: негативні йони «віддають» «зайві» електрони аноду, а позитивні йони «забирають» електрони, яких їм «бракує», у катода. Після цього нейтральні частинки (молекули й атоми) повертаються в газ.

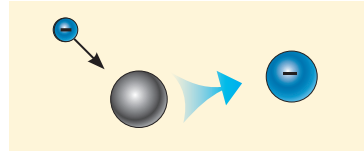
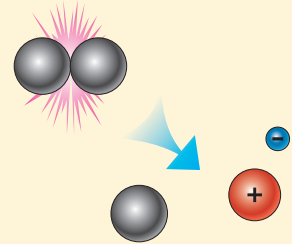


Рис. 7.1. Схема утворення негативних йонів у газах

Термічна йонізація: необхідна енергія виділяється під час непружного зіткнення молекул, які мають велику швидкість руху внаслідок збільшення температури газу.



Йонізація випромінювання: необхідну енергію постачає в атом високочастотне електромагнітне випромінювання.

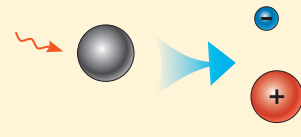


Рис. 7.2. Деякі види йонізації газів

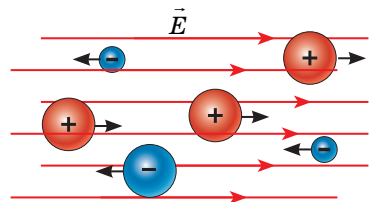


Рис. 7.3. За наявності електричного поля в йонізованому газі виникає напрямлений рух вільних заряджених частинок — електричний струм

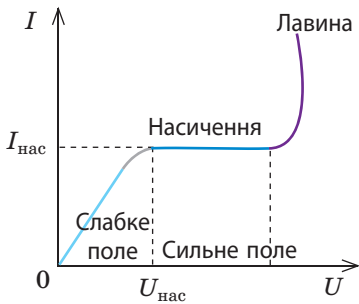


Рис. 7.4. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) газового розряду

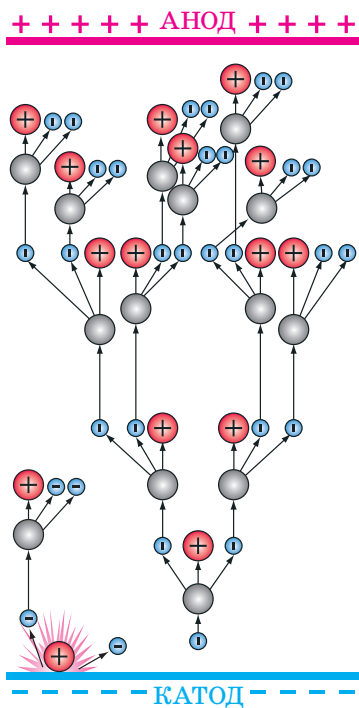


Рис. 7.5. Схема розвитку електронної лавини. Вільний електрон, прискорений електричним полем, зіштовхується з атомом (молекулою) і «вбиває» ще один електрон. Розігнавшись, два електрони звільняють ще два і т. д.

Газовий розряд, який відбувається тільки за дії зовнішнього йонізатора, називають **несамостійним газовим розрядом**.

Здавалося б, що збільшення напруги між пластинами обов'язково приведе до збільшення сили струму, навіть якщо інтенсивність йонізатора не змінюється. Але це не завжди так. Графік залежності сили розрядного струму від напруги між електродами за незмінних характеристик йонізатора наведений на [рис. 7.4](#). На графіку можна виділити кілька характерних ділянок.

Ділянка 1 (на графіку виділено блакитним). Залежність сили струму від напруги підкорюється закону Ома.

Ділянка 2 (виділено синім). Напруга збільшується, а сила струму залишається незмінною. Річ у тім, що в сильному електричному полі всі заряджені частинки, які створює йонізатор за одиницю часу, долітають до електродів. *Найбільшу силу струму, що є можливою внаслідок дії даного йонізатора, називають струмом насичення.*

Ділянка 3 (виділено фіолетовим). Сила струму різко зростає за незначного збільшення напруги. З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що це відбувається завдяки **йонізації газу електронним ударом**, унаслідок чого кількість вільних заряджених частинок лавиноподібно збільшується ([рис. 7.5](#)).

Електрони, що утворилися під час ударної йонізації, прямують до анода і врешті-решт поглинаються ним. Проте газовий розряд може й не припинитися, навіть якщо прибрати йонізатор. Одним із джерел нових електронів є поверхня катода: позитивні йони «бомбардують» катод і вибивають із нього нові електрони — відбувається *емісія (випромінювання) електронів* з поверхні катода.

Газовий розряд, який відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають **самостійним газовим розрядом**.

Залежно від тиску та температури газу, конфігурації електродів і напруги між ними розрізняють чотири види самостійних газових розрядів: *іскровий, тліючий, дуговий, коронний*.

Види самостійних газових розрядів

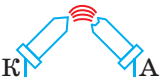
Іскровий газовий розряд

Виникає за атмосферного тиску та великої напруги між електродами. Має вигляд яскравих зигзагоподібних смуг, що розгалужуються, триває лише кілька десятків мікросекунд і зазвичай супроводжується звуковими ефектами (потріскування, тріск, грім тощо). *Використовують* у запальних свічках бензинових двигунів, для обробки особливо міцних металів, для запобігання перенапрузі лінії електропередачі (іскрові розрядники).

Приклад грандіозного іскрового розряду в природі — блискавка.

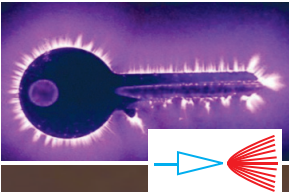
Тліючий газовий розряд

Виникає за невеликої напруги між електродами і низького тиску (десяті й соті частки міліметра ртутного стовпа): за зазначеного тиску відстань між молекулами є такою, що навіть у слабкому електричному полі електрони розганяються до такої швидкості, що набувають енергії, достатньої для ударної йонізації. *Використовують* у лампах денного світла (люмінесцентних трубках), кольорових газорозрядних трубках (колір світіння визначається природою газу). Найважливіша галузь застосування — квантові генератори світла (газові лазери).

Дуговий газовий розряд (електрична дуга)

Виникає за високої температури (до 4000 °С) і майже за будь-якого тиску. Являє собою яскраве дугоподібне полум'я. За такої високої температури з поверхні катода безперервно «випаровуються» електрони, а в стовпі розпеченого газу відбувається термічна йонізація. Висока температура катода й анода підтримується бомбардуванням електродів позитивними і негативними йонами та електронами, прискореними електричним полем.

Використовують у металургії (електропечі, зварювання жаром електричної дуги металів), як потужне джерело світла в прожекторах тощо.

Коронний газовий розряд

Виникає за тиску порядку атмосферного в сильному ($E > 500$ кВ/м), різко неоднорідному електричному полі. Такі поля формуються поблизу електродів із великою кривизною поверхні (вістря, тонкий дріт тощо). Являє собою слабе фіолетове світіння у вигляді корони (пучків, пензликів).

Використовують для очищення газів (електрофільтри), в лічильниках елементарних частинок (лічильники Гейгера — Мюллера); на виникненні цього розряду ґрунтується дія блискавковідводу.

У природі зазвичай спостерігається під час грози на гострих кінцях високих предметів (веж, щогл, вершин скал тощо); має ще одну назву — «вогни святого Ельма».

Зверніть увагу! Електрон, зіштовхнувшись з атомом (молекулою), не завжди вибиває з них електрон. Проте в будь-якому випадку електрон передає електронній оболонці атома частину своєї енергії. Атом збуджується, тобто його електронна оболонка переходить у стан із більшим рівнем енергії. Проте у збудженому стані атом перебуває дуже короткий час (кілька наносекунд) — майже миттєво він повертається в основний стан, випромінюючи надлишкову енергію у вигляді певної «порції» (кванта) світла. Оскільки під час газового розряду збуджується величезна кількість атомів, *газовий розряд зазвичай супроводжується світінням.*

3 Учимось розв'язувати задачі

Задача. Яку найменшу швидкість руху повинен мати електрон, щоб йонізувати атом Гідрогену? Енергія йонізації атома Гідрогену дорівнює 13,6 еВ.

Аналіз фізичної проблеми. Щоб йонізувати атом Гідрогену, електрон повинен мати кінетичну енергію не меншу, ніж енергія йонізації цього атома. Найменшу швидкість електрона знайдемо, користуючись рівністю $E_k = W_i$.

Дано:

$$W_i = 13,6 \text{ еВ} = 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 21,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

v — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання.

За означенням кінетичної енергії: $E_k = \frac{m_e v^2}{2}$, де m_e — маса електрона. Оскільки $E_k = W_i$, то $\frac{m_e v^2}{2} = W_i \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2W_i}{m_e}}$.

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}; v = \sqrt{\frac{2 \cdot 21,8 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 2,2 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right).$$

Відповідь: $v \approx 2,2 \cdot 10^6$ м/с.



Підбиваємо підсумки

- Процес утворення позитивних і негативних йонів та вільних електронів із електрично нейтральних атомів (молекул) газу називають йонізацією.
- Електричний струм у газах (газовий розряд) — напрямлений рух вільних електронів, позитивних і негативних йонів, які утворюються в газі внаслідок йонізації.
- Газовий розряд, який відбувається тільки під час дії зовнішнього йонізатора, називають несамостійним газовим розрядом; розряд, який відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають самостійним газовим розрядом.
- Залежно від тиску й температури газу, способу його йонізації, напруги та характеру світіння, яке супроводжує газовий розряд, розрізняють чотири види самостійних газових розрядів: іскровий, коронний, дуговий, тліючий.



Контрольні запитання

1. Що таке плазма?
2. Чому за звичайних умов газ не проводить електричний струм?
3. Що таке йонізація? Які існують види йонізації?
4. Який розряд у газі називають самостійним? несамостійним?
5. Опишіть механізм ударної йонізації.
6. Опишіть основні види самостійних газових розрядів: за яких умов вони виникають; який мають вигляд; де їх застосовують.



Вправа № 7

1. Який вид газового розряду описував римський філософ і поет *Луцій Анней Сенека* (4 р. до н. е. — 65 р.), говорячи, що перед грозою «зорі ніби сходять з неба і сідають на щогли кораблів»?
2. 5 листопада 1953 р. у Києві відкрили рух по мосту Патона — першому у світі суцільнозварному мосту (названий на честь видатного українського радянського вченого *Євгена Оскарівича Патона* (1870–1953), під керівництвом якого й був споруджений міст). Технологію застосування якого газового розряду досліджував і впроваджував Є. О. Патон?
3. Яку найменшу швидкість руху повинен мати електрон, щоб йонізувати атом Нітрогену? Енергія йонізації атома Нітрогену — 14,5 еВ.
4. Якою має бути температура атомарного водню, щоб середня кінетична енергія поступального руху його атомів була достатньою для йонізації шляхом зіткнень? Енергія йонізації атома Гідрогену — 13,6 еВ.
5. Об'єднавшись у невеликі групи, підготуйте короткі презентації або повідомлення про застосування та прояви в природі самостійних газових розрядів.

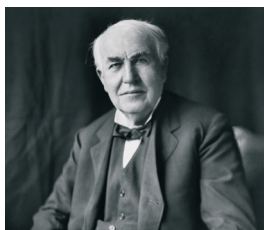
Фізика в цифрах

Деякі характеристики блискавки

- Напруга — 10–100 МВ; сила струму — 20–300 кА.
- Тривалість першого імпульсу струму — близько 80 мкс.
- Температура в каналі — близько 10 000 °С.
- Діаметр внутрішнього каналу — до 0,4 м.



§ 8. СТРУМ У ВАКУУМІ. ЕЛЕКТРОВАКУУМНІ ПРИЛАДИ



Томас Едісон
(1847–1931)

У 1883 р. американський винахідник *Томас Едісон*, намагаючись збільшити термін служби свого винаходу — електричної лампи розжарювання, увів у балон лампи, з якого було відкачано повітря, електрод. Приєднавши електрод до позитивного полюса джерела струму, а нитку розжарення лампи — до негативного, Едісон спостерігав появу струму. А от коли електрод був з'єднаний з негативним полюсом джерела, а нитка розжарення — з позитивним полюсом, струм не виявлявся. Про те, чому у вакуумі існував струм і чому лампа Едісона мала однобічну провідність, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1

Термоелектронна емісія

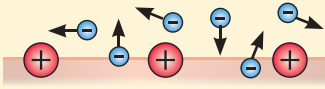
Щоб розібратися, що являє собою струм у вакуумі, спочатку визначимося з поняттям вакууму.

Вакуум (від латин. *vacuum* — порожнеча) — це стан газу за тиску, який менший від атмосферного.

Розрізняють *низький, середній, високий (глибокий) вакууми*. Коли кажуть про електричний струм у вакуумі, мають на увазі **високий (глибокий) вакуум** — стан газу, за якого довжина вільного пробігу молекул газу більша за лінійні розміри ємності, в якій міститься газ.

Види електронної емісії

- **Термоелектронна емісія** — процес випускання електронів нагрітими тілами.

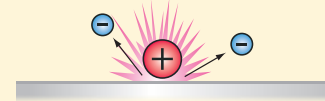


- **Фотоелектронна емісія** відбувається під дією випромінювання, яке падає на поверхню тіла.



- **Автоелектронна емісія** зумовлена наявністю біля поверхні тіла сильного електричного поля, яке «вириває» електрони з металу.

- **Вторинна електронна і йонно-електронна емісії** — випускання електронів із поверхні тіла внаслідок його бомбардування електронами або йонами відповідно.



- **Вибухова електронна емісія** — емісія електронів унаслідок переходу мікроскопічних ділянок катода в плазму (локальний вибух).

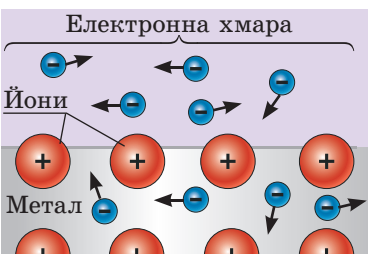


Рис. 8.1. Електрони, що покинули метал, утримуються біля його поверхні електричним полем, створеним електронною хмарою та некомпенсованими позитивними йонами металу

Щоб у вакуумі існував струм, слід помістити в нього джерело вільних заряджених частинок, наприклад електронів. Найбільша концентрація вільних електронів — у металах. Однак вільні електрони зазвичай не можуть залишити поверхню металу — вони утримуються силами кулонівського притягання з боку позитивних йонів. Для подолання цих сил електрону необхідно мати певну енергію.

Енергію, яку необхідно мати електрону, щоб залишити метал, називають **роботою виходу** $A_{\text{вих}}$.

Електрон може залишити метал, якщо його кінетична енергія E_k буде більшою за роботу виходу або буде дорівнювати їй:

$$E_k \geq A_{\text{вих}}, \text{ або } \frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}}$$

Роботу виходу електронів вимірюють в **електрон-вольтах** ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$), визначають експериментально для кожного металу окремо та заносять до таблиць (див. Додаток 1).

Процес випромінювання електронів із поверхні металів називають **електронною емісією**. Залежно від того, як була передана електронам необхідна енергія, розрізняють кілька видів емісій (див. колонку зліва). Щоб створити електричний струм у вакуумі, найчастіше використовують **термоелектронну емісію** — процес випромінювання електронів нагрітими тілами.

У нагрітому металі величезна кількість швидких електронів, які безперервно з нього вилітають. Саме тому біля поверхні металу утворюється **хмара вільних електронів** — **електронна хмара**, що має негативний заряд, а сама поверхня металу набуває **позитивного заряду** (рис. 8.1). Під впливом електричного поля, створеного електронною хмарою та поверхнею металу, деякі електрони повертаються назад у метал. У стані рівноваги кількість електронів, що залишили метал, дорівнює кількості електронів, що повернулися в нього. При цьому чим більша температура металу, тим більша густина електронної хмари.

Погодьтеся: описана «поведінка» електронів дуже нагадує «поведінку» молекул біля поверхні рідини, а електронна хмара асоціюється з насиченою парою біля поверхні рідини.

2 Електричний струм у вакуумі. Вакуумний діод

Ви вже знаєте, що для існування струму необхідно виконання двох умов: наявність вільних заряджених частинок і наявність електричного поля.

Для створення цих умов у скляний балон поміщують два електроди (катод і анод) і відкачують із балона повітря. Катод нагрівають, використовуючи нитку розжарення — тонкий дріт із тугоплавкого металу, підключений до джерела струму. У результаті з поверхні катода вилітають електрони. Щоб збільшити емісію електронів, катод покривають шаром оксидів лужноземельних металічних елементів (Барію, Стронцію, Калію тощо), для яких робота виходу електронів є невеликою. На катод подають негативний потенціал, а на анод — позитивний (пряме ввімкнення). Електрони, що вилетіли з катода, потрапляють в електричне поле між двома електродами й починають рухатися напрямлено, створюючи електричний струм (рис. 8.2).

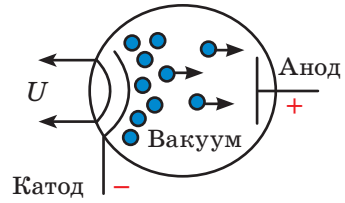


Рис. 8.2. Термоелектрони (електрони, що вилетіли з металу в ході термоелектронної емісії), рухаючись від катода до анода, створюють електричний струм

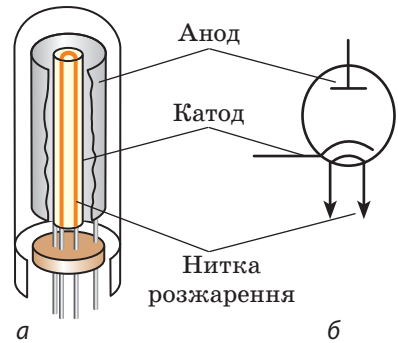


Рис. 8.3. Вакуумний діод: а — будова; б — позначення на схемі

Електричний струм у вакуумі являє собою напрямлений рух вільних електронів, отриманих у результаті електронної емісії.

Пристрій, що складається зі скляного балона, з якого відкачено повітря і в якому розташовано два електроди (анод і підігрівний катод), називають **вакуумним (ламповим) діодом** (рис. 8.3). Очевидно: якщо подати на катод позитивний потенціал, а на анод — негативний (зворотне ввімкнення), то електрони, що вилітають із катода, будуть відкидатися полем назад, на катод, і струму в колі не буде. Таким чином, *вакуумний діод має одnobічну провідність* (рис. 8.4).

? Чому в 1883 р. Т. Едісон не зміг пояснити причину того, що його лампа розжарювання з введеним додатковим електродом мала одnobічну провідність?

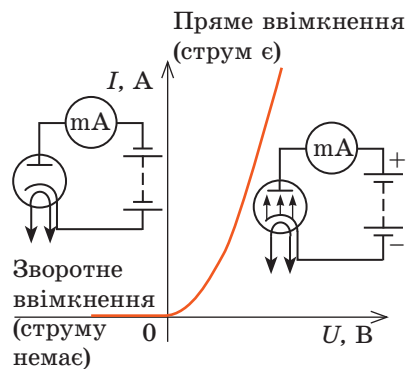


Рис. 8.4. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) вакуумного діода. *Пряме ввімкнення:* зі збільшенням напруги між електродами сила струму швидко зростає. *Зворотне ввімкнення:* сила струму дорівнює нулю

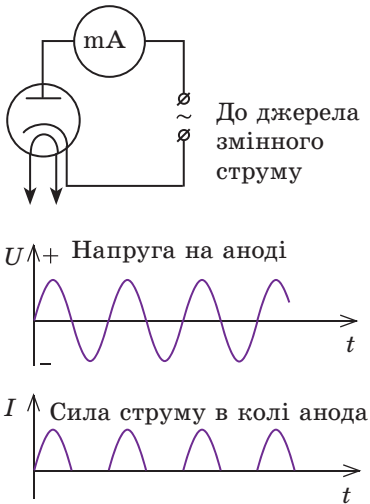


Рис. 8.6. Використання вакуумного діода для перетворення змінного струму на пульсуючий

Зварювання у відкритому космосі

25 липня 1984 р. радянські космонавти *Володимир Джанібеков* і *Світлана Савицька* вийшли у відкритий космос і протягом трьох годин здійснювали перше космічне зварювання в умовах глибокого вакууму.

Зварювальний апарат був розроблений і створений в *Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ*. Апарат дозволяв здійснювати зварювання, спаювання, різання і нагрівання металу. Ці операції виконувалися короткофокусною електронно-променевою гарматою масою 2,5 кг, яку слід було тримати в руці.



Поштова марка України:
«Зварювання в космосі», 2006 р.

Свого часу однобічну провідність вакуумного діода активно використовували в радіоелектроніці для перетворення змінного струму на пульсуючий. Якщо між катодом і анодом увімкнути джерело змінного струму, то протягом першого півперіоду діод пропускатиме електричний струм, а протягом другого півперіоду електрони відштовхуватимуться від анода і струму в лампі не буде (рис. 8.6). Отже, струм у колі буде незмінного напрямку, але пульсуючим. У сучасній електроніці замість лампових (вакуумних) діодів використовують напівпровідникові (див. § 9).

4 Електронні пучки: їх властивості та застосування

Якщо в аноді лампового діода зробити отвір, то частина електронів, прискорених електричним полем, влетить у цей отвір і створить за анодом **електронний пучок** — *потік електронів, які швидко рухаються*.

Властивості електронних пучків:

- 1) спричиняють нагрівання тіл у разі потрапляння на їх поверхню;
- 2) викликають появу рентгенівського випромінювання в разі швидкого гальмування;
- 3) викликають світіння деяких речовин і матеріалів (так званих люмінофорів);
- 4) відхиляються електричним і магнітним полями.

Першу властивість використовують для плавлення надчистих металів, для зварювання, спаювання та різання металів у вакуумі. Другу властивість використовують у рентгенівських трубках: під час різкого гальмування електронного пучка виникають електромагнітні хвилі частотою понад $2 \cdot 10^{17}$ Гц. Третю і четверту властивості використовують в *електронно-променевих трубках* — вакуумних пристроях з керованим електронним пучком і спеціальним екраном, який світиться в місцях потрапляння електронів (рис. 8.7). Електронно-променева трубка є основним елементом *осцилографа* — пристроя для дослідження змінних процесів в електричних колах.

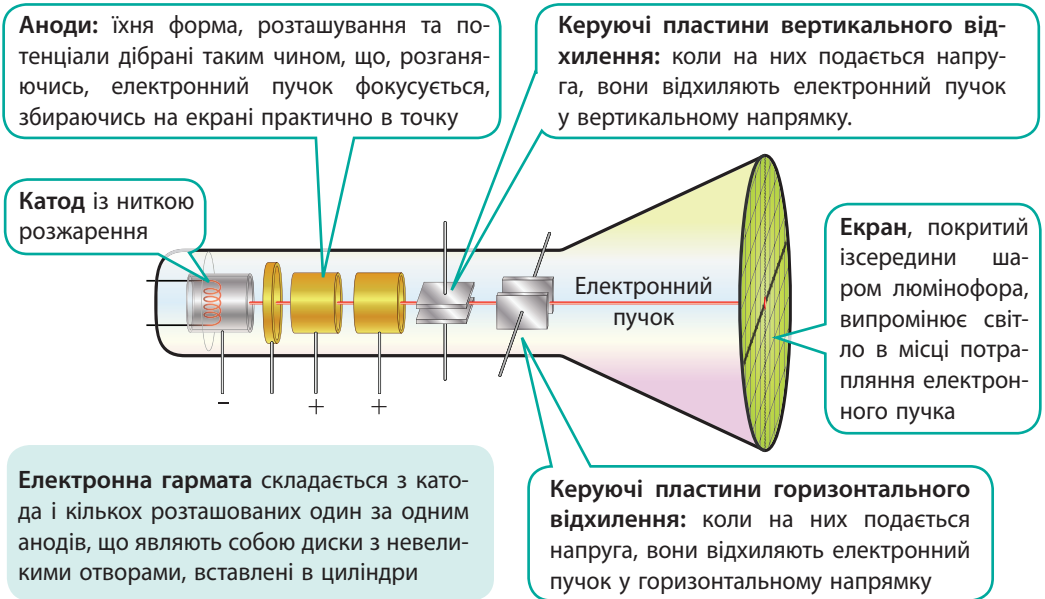


Рис. 8.7. Принципова будова електронно-променевої трубки з електростатичним керуванням електронним пучком



Підбиваємо підсумки

- Електричний струм у вакуумі являє собою напрямлений рух вільних електронів. Для створення струму у вакуумі необхідно джерело електронів, у ролі якого використовують металеві провідники, нагріті до високої температури, опромінені світлом, тощо.
- Енергію, яку має витратити електрон, щоб залишити поверхню металу, називають роботою виходу. Електрон може залишити метал, якщо кінетична енергія електрона буде більшою за роботу виходу або дорівнюватиме їй: $\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}}$. Процес випромінювання електронів із поверхні металів називають електронною емісією.
- Термоелектронна емісія — процес випромінювання електронів нагрітими тілами. Явище термоелектронної емісії набуло широкого застосування у вакуумних електронних пристроях, наприклад у вакуумних лампах й електронно-променевих трубках.



Контрольні запитання

1. Що являє собою електричний струм у вакуумі?
2. У чому полягає явище електронної емісії?
3. За якої умови електрон може залишити поверхню провідника?
4. Опишіть процес утворення електронної хмари.
5. Чому вакуумний діод має односторонню провідність?
6. Де застосовують вакуумні діоди?
7. Назвіть основні властивості електронних пучків. Де їх застосовують?
8. Назвіть основні частини електронно-променевої трубки. Якими є їхні функції?



Вправа № 8

- Установіть відповідність між потенціалами керуючих пластин електронно-променевої трубки та напрямком відхилення світної точки на її екрані (рис. 1).

1 $\varphi_1 = \varphi_2, \varphi_3 > \varphi_4$	А Відхиляється вгору
2 $\varphi_1 > \varphi_2, \varphi_3 > \varphi_4$	Б Відхиляється вниз
3 $\varphi_1 < \varphi_2, \varphi_3 = \varphi_4$	В Відхиляється ліворуч
	Г Відхиляється праворуч угору
- Яку найменшу швидкість повинен мати електрон, щоб вилетіти з поверхні катоду, покритого оксидом Барію?
- В електронно-променевої трубці потік електронів проходить прискорюючу різницю потенціалів 10 кВ. Якої середньої швидкості набувають електрони? Вважайте, що початкова швидкість руху електронів дорівнює нулю.
- У більшості електронно-променевих трубок керування електронним пучком відбувається за допомогою магнітного поля. На рис. 2 електронний пучок відхиляється вліво. Згадайте правило лівої руки та визначте, як напрямлено керуюче магнітне поле, які котушки його створюють і який напрямок струму в цих котушках.

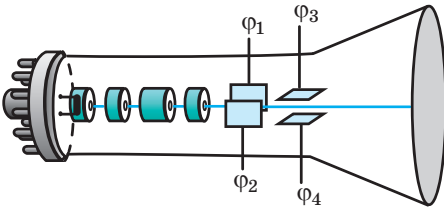


Рис. 1

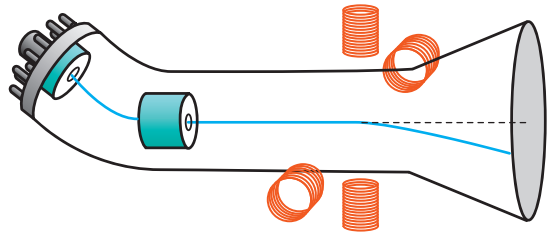


Рис. 2

- Сучасні ТВ-панелі працюють на рідких кристалах або світлодіодах, мають товщину кілька сантиметрів й так мало важать, що кріпляться на стіні за допомогою магнітів. А якими були телевізори першого покоління? Дізнайтеся.

Фізика і техніка в Україні



Вадим Євгенович Лашкарєв (1903–1974) — видатний український радянський науковець, із ім'ям якого пов'язані становлення та розвиток фізики і техніки напівпровідників в Україні. В. Є. Лашкарєв — один із «батьків» транзистора. Зараз без цього пристрою не працює жоден електронний прилад.

Вадим Євгенович народився в Києві, навчався в Київському інституті народної освіти. Згодом на запрошення академіка А. Ф. Йоффе він очолив лабораторію в Ленінградському фізико-технічному інституті.

Дослідження В. Є. Лашкарєва з розподілу електронної густини в кристалах виявилися настільки значимими, що в 1935 р. ученому було присуджено науковий ступінь доктора фізико-математичних наук без захисту дисертації.

У 1939 р. В. Є. Лашкарєв повернувся до Києва і почав працювати в Інституті фізики Академії наук УРСР. У 1941 р. вчений експериментально виявив p - n -перехід у купрум(І) оксиді. В. Є. Лашкарєв не тільки відкрив p - n -перехід і досліджував вплив домішок на це явище. У 1946 р. учений виявив біполярну дифузію нерівноважних носіїв електричного струму, а в 1948 р. побудував загальну теорію фото-ЕРС у напівпровідниках.

Визнанням видатних наукових результатів В. Є. Лашкарєва стало створення в 1960 р. Інституту напівпровідників АН УРСР, який учений очолив. Із 2002 р. Інститут фізики напівпровідників НАНУ носить його ім'я.

§ 9. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ



Кожен із вас добре знає, як виглядає звичайна лампа розжарювання. Приблизно такий самий розмір мають і вакуумні лампи — діоди і тріоди. А тепер уявіть, що у вашому смартфоні, мікросхема процесора якого містить кілька мільярдів мікротранзисторів, замість транзисторів використали тріоди... Уявили собі розмір такого смартфона? Кілька багатоповерхових будинків! Тепер ви розумієте, чому поява в 1960-х рр. напівпровідникових пристроїв спричинила справжню технічну революцію. Про напівпровідникові пристрої та електричний струм у напівпровідниках йтиметься в цьому параграфі.

1 Які особливості провідності напівпровідників

Напівпровідники, як це впливає з їхньої назви, за своєю провідністю посідають проміжне місце між провідниками та діелектриками (рис. 9.1).

У ході вивчення залежності провідності напівпровідників від зовнішніх чинників виявилось:

- 1) на відміну від металевих провідників *питомий опір напівпровідників зазвичай зменшується з підвищенням температури* (рис. 9.2);
- 2) *питомий опір більшості напівпровідників зменшується зі збільшенням освітленості;*
- 3) *різко зменшити питомий опір напівпровідників може введення домішок.*

Саме ці властивості забезпечили широке застосування напівпровідників.

2 Власна провідність напівпровідників

Розглянемо будову чистих (без домішок) напівпровідників на прикладі силіцію (рис. 9.3). У кристалі силіцію кожен атом Силіцію має чотири валентні електрони, які «відповідають» за зв'язок між сусідніми атомами: атом Силіцію ніби «позичає» своїм сусідам по одному валентному електрону; сусідні атоми, у свою чергу, «позичають» йому свої валентні електрони. У результаті між кожними двома атомами Силіцію утворюється електронна пара «для спільного користування».

Серед валентних електронів обов'язково є електрони, кінетична енергія яких є достатньою, щоб покинути зв'язки і стати вільними.

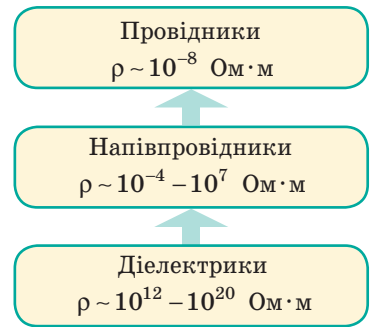


Рис. 9.1. Порядок питомого опору матеріалів. Стрілками показано напрямок збільшення концентрації вільних заряджених частинок (напрямок збільшення провідності)

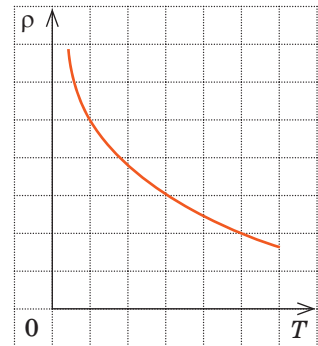


Рис. 9.2. Графік залежності питомого опору ρ напівпровідників від температури T

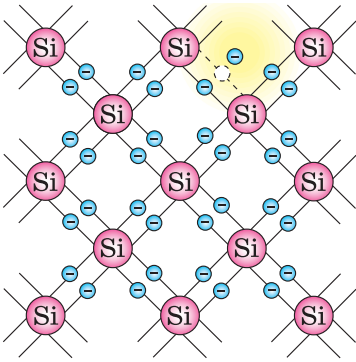


Рис. 9.3. Схематичне зображення ковалентного зв'язку силіцію

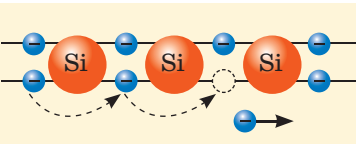


Рис. 9.4. Механізм діркової провідності напівпровідників

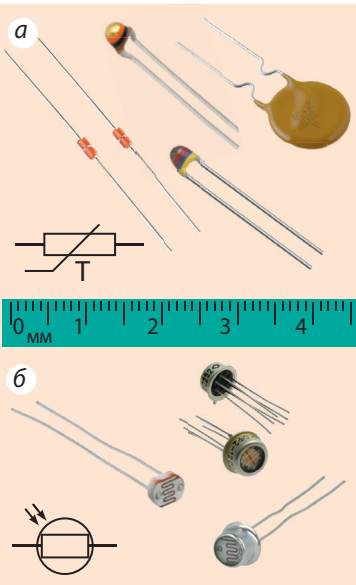


Рис. 9.5. Зовнішній вигляд і схематичне позначення термісторів (а) і фоторезисторів (б)

Один такий електрон показаний на жовтому полі рис. 9.3. Якщо напівпровідниковий кристал помістити в електричне поле, то вільні електрони почнуть рухатися до позитивного полюса джерела струму і в напівпровіднику виникне електричний струм.

Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю в них вільних електронів, називають **електронною провідністю**.

Ще раз звернемося до рис. 9.3. Після того як електрон «залишив» валентний зв'язок, його місце виявиться «порожнім» — таке місце фізики називають **діркою**. Зрозуміло, що дірці приписують позитивний заряд. На вакантне місце (в дірку) може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку. Тоді дірка з'явиться біля сусіднього атома. Послідовність таких «стрибків» виглядає так, ніби дірка (позитивний заряд) переміщується в кристалі (рис. 9.4).

Провідність напівпровідників, зумовлену переміщенням дірок, називають **дірковою провідністю**.

У чистому напівпровіднику електричний струм створює однакова кількість вільних електронів і дірок. Таку провідність називають **власною провідністю напівпровідників**.

Якщо напівпровідник нагріти або опромінити світлом, кількість вільних електронів і дірок збільшиться, відповідно збільшиться і провідність напівпровідника.

На залежності провідності напівпровідників від температури ґрунтується дія **термісторів** (рис. 9.5, а), які застосовують для контролю та вимірювання температури, а також в колах захисту електричних пристроїв від перегріву.

На залежності провідності напівпровідників від освітленості ґрунтується дія **фоторезисторів** (рис. 9.5, б), які застосовують для вимірювання освітленості, у системах сигналізації та автоматики, дистанційного керування виробничими процесами, для сортування виробів. За допомогою фоторезисторів запобігають нещасним випадкам і аваріям, автоматично зупиняючи роботу обладнання в разі порушення процесу.

❓ Як, на вашу думку, працює фоторезистор у пристрої для аварійного вимкнення (або ввімкнення) електричного кола? Де б ви застосували такий пристрій?

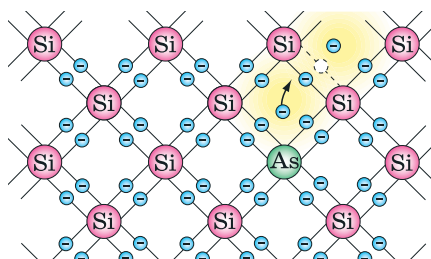
3 Чому на провідність напівпровідників впливають домішки

Якщо до чистого напівпровідника додати невелику кількість певної домішки, то механізм його провідності зміниться. Це легко простежити на прикладі силіцію з невеликою кількістю домішки більшої або меншої валентності (Силіцій є чотиривалентним елементом).

Домішкова провідність напівпровідників

Донорні домішки

Додамо у кристал силіцію домішку п'ятивалентного елемента, наприклад Арсену. Частина атомів Силіцію буде замінена атомами Арсену. Чотири валентні електрони атома Арсену утворюють парні електронні зв'язки із сусідніми атомами Силіцію; п'ятому валентному електрону зв'язку не вистачить, тому він легко може стати вільним. У результаті майже кожний атом домішки дасть вільний електрон.



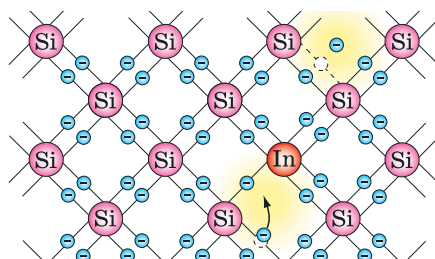
Домішки, атоми яких відносно легко віддають електрони, називають **донорними домішками** (від латин. *donare* — дарувати, жертвувати).

Бачимо, що донорні домішки додають до кристала тільки електрони, а додаткові дірки не утворюються, тому *в напівпровідниках із донорними домішками концентрація вільних електронів є значно вищою, ніж концентрація дірок*.

Напівпровідники з переважно електронною провідністю називають **напівпровідниками *n*-типу** (від латин. *negativus* — негативний).

Акцепторні домішки

Додамо у кристал силіцію домішку тривалентного елемента, наприклад Індію. Атом Індію має три валентні електрони, тому він може «встановити зв'язки» тільки з трьома атомами Силіцію. Щоб утримати структуру кристалічної ґратки, відсутній електрон (четвертий) Індію «запозичує» в атомів Силіцію. У результаті кожний атом Індію спричиняє утворення дірки.



Домішки, атоми яких «запозичують» електрони, називають **акцепторними домішками** (від латин. *acceptor* — той, що приймає).

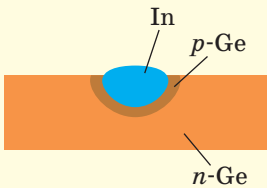
Бачимо, що акцепторні домішки додають до кристала тільки дірки, а додаткові вільні електрони не утворюються. *У напівпровідниках із акцепторними домішками основні носії струму — дірки*.

Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають **напівпровідниками *p*-типу** (від латин. *positivus* — позитивний).

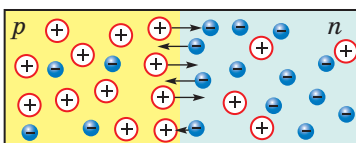
Оскільки за наявності домішок кількість носіїв струму збільшується (кожний атом домішки дає вільний електрон або дірку), провідність напівпровідників із домішками є набагато кращою, ніж провідність чистих напівпровідників.

Отримання кристалів із p - n -переходом

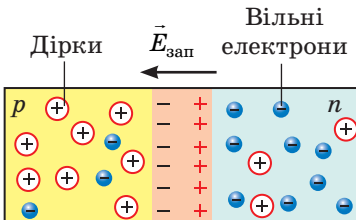
Щоб отримати p - n -перехід, у напівпровідниковому кристалі слід утворити дві контактуючі ділянки з різними типами провідності. **Сплавний метод.** На пластинку монокристала з донорною домішкою, наприклад на германій (n -Ge), кладуть шматочок індію і нагрівають до $500\text{ }^\circ\text{C}$. Сплавлюючись, германій та індій утворюють тонкий шар напівпровіднику p -типу (p -Ge).



Дифузний метод. Кристал з акцепторною домішкою, наприклад силіцій (p -Si), нагрівають до температури близько $700\text{ }^\circ\text{C}$ і спрямовують на його поверхню пари арсену. Атоми Арсену, дифундуючи в поверхневий шар кристалу, утворюють напівпровідник n -типу (n -Si).



а



б

Рис. 9.6. Формування p - n -переходу

4 Як утворюється p - n -перехід

Електронно-дірковий перехід (p - n -перехід) — це ділянка контакту двох напівпровідників із різними типами провідності — дірковою (напівпровідник p -типу) та електронною (напівпровідник n -типу).

Розглянемо процеси, які відбуваються в місці контакту. Відразу після того як відбувся контакт двох напівпровідників із різними типами провідності, починається процес дифузії електронів і дірок. Електрони дифундують у напівпровідник p -типу, і деякі з них рекомбінують із дірками; дірки «дифундують» у напівпровідник n -типу, і деякі з них рекомбінують із вільними електронами. Тобто відбуваються процеси відновлення зв'язків (рис. 9.6, а). Унаслідок цих процесів:

1) у прилеглих до місця контакту ділянках напівпровідників зменшується концентрація вільних носіїв струму (n -ділянка втрачає вільні електрони, p -ділянка — дірки), тому опір ділянки біля місця контакту істотно збільшується;

2) прилегла до місця контакту n -ділянка набуває позитивного заряду; прилегла до місця контакту p -ділянка набуває негативного заряду.

Таким чином, навколо місця контакту формується подвійний *запірний шар* (p - n -перехід), електричне поле якого ($\vec{E}_{\text{зап}}$) перешкоджає подальшій дифузії електронів і дірок (рис. 9.6, б).

5 Чому напівпровідниковий діод має односторонню провідність

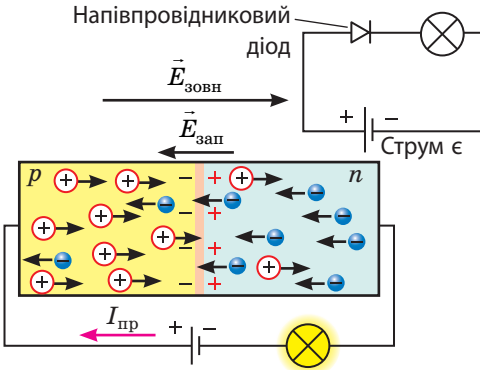
Напівпровідниковий пристрій, у внутрішній будові якого сформований один p - n -перехід, називають **напівпровідниковим діодом**.

Будь-який напівпровідниковий діод складається з двох контактуючих напівпровідникових ділянок із різними типами провідності — електронною (n -ділянка) і дірковою (p -ділянка); до кожної ділянки приєднано виводи. *Основна властивість напівпровідникового діода — пропускати електричний струм переважно в одному напрямку.* З'ясуємо, чому p - n -перехід має односторонню провідність.

Увімкнення напівпровідникового діода в електричне коло

Пряме увімкнення

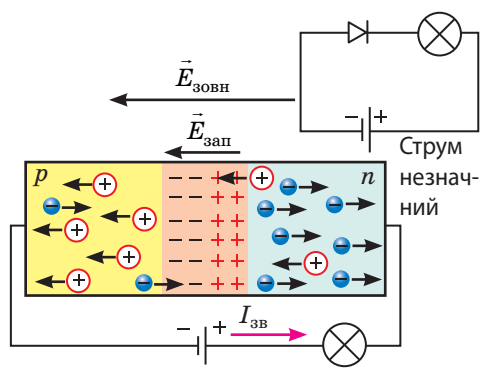
Підключимо кристал із сформованим у ньому *p-n*-переходом до джерела струму так, щоб *p*-ділянка була з'єднана з позитивним полюсом джерела, а *n*-ділянка — з негативним.



Електрони почнуть рух до позитивного полюсу джерела струму, а дірки — до негативного. Запірний шар поповниться вільними електронами і дірками, тому його опір зменшиться. Оскільки через місце контакту рухаються основні носії струму (електрони з *n*-ділянки, дірки з *p*-ділянки), яких багато, то в колі існує помітний електричний струм.

Зворотне увімкнення

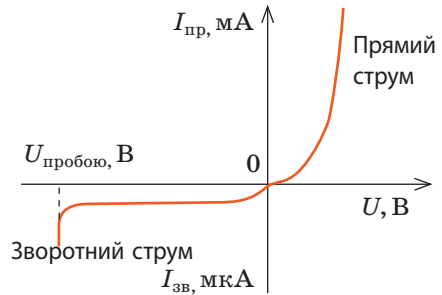
Підключимо кристал із сформованим у ньому *p-n*-переходом до джерела струму так, щоб *p*-ділянка була з'єднана з негативним полюсом джерела, а *n*-ділянка — з позитивним.



Електрони почнуть рух до позитивного полюсу джерела струму, дірки — до негативного. Запірний шар розшириться, і його опір збільшиться. Через місце контакту рухаються тільки неосновні носії струму (вільні електрони з *p*-ділянки, дірки з *n*-ділянки), яких дуже мало, тому сила зворотного струму незрівнянно менша від прямого.

Зверніть увагу!

1. Напряга запірного шару становить 0,3–0,7 В (залежно від складу напівпровідників), тому в разі прямого увімкнення, якщо напруга на діоді менша від даного значення, рух основних носіїв струму через *p-n*-перехід не відбуватиметься.
2. Якщо при зворотному увімкненні напруга на діоді перевищить певне максимальне значення, діод вийде з ладу (відбудеться пробій запірного шару), а його відновлення є неможливим.



Вольт-амперна характеристика (ВАХ) напівпровідникового діода

Оскільки напівпровідникові діоди пропускають електричний струм переважно в одному напрямку, їх, як і лампові (вакуумні) діоди, використовують для випрямлення змінного струму. Напівпровідникові діоди мають низку переваг перед ламповими: вони мініатюрні, їх легше виготовити, а отже, вони дешевші; для їх роботи не потрібно витрачати енергію на нагрівання. Тому в сучасній радіоелектроніці використовують саме напівпровідникові діоди.



Підбиваємо підсумки

- Провідність напівпровідників зумовлена рухом вільних і зв'язаних електронів (електронна і діркова провідності). У чистому напівпровіднику електричний струм створюється однаковою кількістю вільних електронів і дірок. Таку провідність називають власною провідністю напівпровідників.
 - У разі введення в чистий напівпровідник домішки з більшою валентністю (донорної домішки) вільних електронів стає в багато разів більше, ніж дірок. Напівпровідники з переважно електронною провідністю називають напівпровідниками n -типу.
 - У разі введення в чистий напівпровідник домішки з меншою валентністю (акцепторної домішки) дірок стає більше, ніж вільних електронів. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками p -типу.
 - Якщо напівпровідник містить дві дотичні ділянки з різними типами провідності, то на межі дотику утворюється p - n -перехід, який має однобічну провідність. Пристрій, у внутрішній будові якого сформований один p - n -перехід, називають напівпровідниковим діодом.



Контрольні запитання

1. Якими є основні властивості напівпровідників?
2. Поясніть механізм власної провідності напівпровідників.
3. Як зміниться опір чистого напівпровідника, якщо додати домішку?
4. Яку домішку називають донорною?
5. Яку домішку потрібно ввести, щоб одержати напівпровідник p -типу?
6. Як можна виготовити кристал із електронно-дірковим переходом?
7. Чому напівпровідниковий кристал з p - n -переходом має однобічну провідність?
8. Що таке напівпровідниковий діод? Наведіть його позначення на електричній схемі.



Вправа № 9

1. Які з наведених тверджень є істинними?
 - А Напівпровідник з акцепторною домішкою є напівпровідником p -типу.
 - Б Провідність напівпровідників збільшується зі збільшенням освітленості.
 - В Опір p - n -переходу залежить від напрямку струму.
 - Г У напівпровіднику n -типу значно більше дірок, ніж електронів.
2. На рис. 1 наведено схему прямого ввімкнення напівпровідника з p - n -переходом у коло постійного струму. Яка полярність підключення джерела струму до клем A і B ?
3. Електричне коло складається із п'яти однакових резисторів опором 2 Ом, двох ідеальних діодів і джерела струму, опір якого є нехтовно малим (рис. 2). Визначте: 1) загальний опір кола; 2) відношення сили струму в колі до сили струму після зміни полярності підключення джерела струму.
4. Електрична схема, зображена на рис. 3, має назву *діодний міст*. Дізнайтесь, як «працює» ця схема і для чого вона призначена.

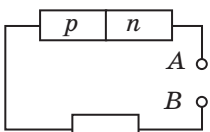


Рис. 1

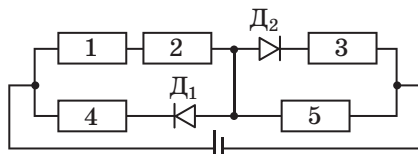


Рис. 2

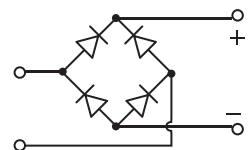


Рис. 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 1

Тема. Перевірка законів послідовного і паралельного з'єднань провідників.

Мета: експериментально перевірити співвідношення, які справджуються у випадку послідовного та у випадку паралельного з'єднань провідників.

Обладнання: джерело струму, вольтметр, амперметр, ключ, два резистори, з'єднувальні проводи.



ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

II Підготовка до експерименту

1. Накресліть схеми двох електричних кіл. Кожне коло має містити два резистори, які через ключ з'єднані з джерелом струму: *схема 1* — резистори з'єднані послідовно; *схема 2* — резистори з'єднані паралельно.
2. Біля кожної схеми запишіть співвідношення, які вам необхідно перевірити (формули для визначення загальної сили струму, загальної напруги, загального опору).

▶ Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиць.

Дослід 1. Дослідження послідовного з'єднання провідників

1. Складіть електричне коло за накресленою вами схемою 1.
2. Виміряйте напругу на першому резисторі (U_1), на другому резисторі (U_2), на обох резисторах разом (U). Накресліть схеми відповідних електричних кіл.
3. Виміряйте силу струму, увімкнувши амперметр спочатку між джерелом струму і першим резистором (I_1), потім між першим і другим резисторами (I_2), а потім між ключем і джерелом струму (I). Накресліть схеми відповідних електричних кіл.

Таблиця 1

Напруга, В				$\varepsilon_{U_{\text{посл}}}$ %	Сила струму, А			Опір, Ом				$\varepsilon_{R_{\text{посл}}}$ %
U_1	U_2	U	$U_{\text{посл}}$		I_1	I_2	I	R_1	R_2	R	$R_{\text{посл}}$	

Дослід 2. Дослідження паралельного з'єднання провідників

1. Складіть електричне коло за накресленою вами схемою 2.
2. Виміряйте напругу на кожному резисторі (U_1 , U_2), на обох резисторах разом (U). Накресліть схему електричного кола.
3. Виміряйте силу струму в першому резисторі (I_1), у другому резисторі (I_2), у нерозгалуженій ділянці кола (I). Накресліть схеми відповідних електричних кіл.

Таблиця 2

Напруга, В			Сила струму, А				$\varepsilon_{I_{\text{парал}}}$ %	Опір, Ом				$\varepsilon_{R_{\text{парал}}}$ %
U_1	U_2	U	I_1	I_2	I	$I_{\text{парал}}$		R_1	R_2	R	$R_{\text{парал}}$	

▶ Опрацювання результатів експерименту

1. Користуючись *законом Ома для ділянки кола*, для кожного досліджу визначте, опір першого резистора (R_1), опір другого резистора (R_2), загальний опір ділянки кола (R).
2. Користуючись *співвідношеннями для послідовного і паралельного з'єднань споживачів*, для кожного досліджу визначте загальний опір ділянки кола, напругу на ділянці, силу струму в колі:

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2, \quad U_{\text{посл}} = U_1 + U_2; \quad R_{\text{парал}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_{\text{парал}} = I_1 + I_2.$$

3. Оцініть відносну похибку експериментального підтвердження кожної з рівностей:

$$\varepsilon_{R_{\text{посл}}} = \left| 1 - \frac{R_{\text{посл}}}{R} \right| \cdot 100\%, \quad \varepsilon_{U_{\text{посл}}} = \left| 1 - \frac{U_{\text{посл}}}{U} \right| \cdot 100\%;$$

$$\varepsilon_{R_{\text{парал}}} = \left| 1 - \frac{R_{\text{парал}}}{R} \right| \cdot 100\%, \quad \varepsilon_{I_{\text{парал}}} = \left| 1 - \frac{I_{\text{парал}}}{I} \right| \cdot 100\%.$$

□ Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту сформулюйте і запишіть висновок, у якому зазначте: 1) які досліди ви проводили; 2) які співвідношення були підтвержені; 3) які чинники вплинули на точність результатів експерименту.

+ Творче завдання

Поміркуйте, який експеримент щодо визначення опору резистора можна провести, якщо в обладнанні до лабораторної роботи: 1) замість амперметра використати резистор відомого опору; 2) замість вольтметра використати резистор відомого опору. Запишіть план кожного експерименту, накресліть відповідні схеми. Проведіть експерименти.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 2

Тема. Вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму.

Мета: визначити ЕРС і внутрішній опір батареї гальванічних елементів на основі результатів вимірювань сили струму в колі та напруги на зовнішній ділянці кола.

Обладнання: джерело струму (батарея гальванічних елементів), вольтметр, амперметр, ключ, реостат, з'єднувальні проводи.



ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

▮ Підготовка до експерименту

1. Накресліть схему електричного кола, зображеного на рисунок.

2. Запишіть закон Ома для повного кола й отримайте формулу для визначення внутрішнього опору джерела струму (візьміть до уваги, що $IR = U$).



Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань і обчислень відразу заносьте до таблиці.

1. Складіть електричне коло за накресленою вами схемою. Установіть повзунок реостата в таке положення, щоб опір реостата був максимальним.
2. Виміряйте напругу на клеммах джерела струму у випадку, коли ключ розімкнено (отримане значення відповідатиме ЕРС джерела струму — $\mathcal{E}_{\text{вим}}$).
3. Замкніть ключ і виміряйте силу струму I в колі та напругу U на зовнішній ділянці кола.
4. Пересуньте повзунок реостата (тобто змініть опір реостата) і знову виміряйте силу струму I в колі та напругу U на зовнішній ділянці кола.
5. Повторіть дії, описані в п. 4, ще тричі.

Номер до-сліду	ЕРС $\mathcal{E}_{\text{вим}}$, В	Сила струму I , А	Напруга U , В	Внутрішній опір r , Ом	Середнє значення внутрішнього опору $r_{\text{сер}}$, Ом	Результати вимірювань: $r = r_{\text{сер}} \pm \Delta r$, Ом $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{вим}} \pm \Delta \mathcal{E}$, В



Опрацювання результатів експерименту

1. Скориставшись формулою $r = \frac{\mathcal{E}_{\text{вим}} - U}{I}$, визначте внутрішній опір r джерела струму за результатом кожного досліду та середнє значення внутрішнього опору ($r_{\text{сер}}$): $r_{\text{сер}} = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}{5}$.

2. Оцініть абсолютну похибку вимірювання ЕРС джерела струму: $\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{\text{прил}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{вип}}$, де $\Delta \mathcal{E}_{\text{прил}}$ — похибка вольтметра (див. Додаток 2); $\Delta \mathcal{E}_{\text{вип}}$ — випадкова похибка (похибка відліку), яка в даному випадку дорівнює половині ціни поділки шкали вольтметра.

3. Оцініть абсолютну (Δr) та відносну (ε_r) похибки вимірювання внутрішнього опору джерела струму:

$$\Delta r = \frac{|r_{\text{сер}} - r_1| + |r_{\text{сер}} - r_2| + |r_{\text{сер}} - r_3| + |r_{\text{сер}} - r_4| + |r_{\text{сер}} - r_5|}{5}; \quad \varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r_{\text{сер}}}$$

4. Округліть результати, скориставшись правилами округлення (див. Додаток 2), і подайте результати вимірювання ЕРС і внутрішнього опору у вигляді: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{вим}} \pm \Delta \mathcal{E}$; $r = r_{\text{сер}} \pm \Delta r$.

□ Аналіз експерименту та його результатів

За результатами експерименту сформулюйте і запишіть висновок, у якому зазначте: 1) які фізичні величини ви вимірювали; значення якої величини було встановлено шляхом прямих вимірювань, а якої — непрямих; 2) якими є результати вимірювань; 3) у чому причина похибок вимірювань; вимірювання якої величини дає найбільшу похибку.

+ Творче завдання

1. Доведіть, що графік залежності напруги U на зовнішній ділянці кола від сили струму I в колі — відрізок прямої, який починається в точці ($I = 0$; $U = \mathcal{E}$) і закінчується в точці ($I = \frac{\mathcal{E}}{r}$; $U = 0$).
2. За отриманими в ході експерименту даними побудуйте графік залежності $I(U)$. (Про правила побудови графіка за експериментальними точками див. у Додатку 2.)
3. Продовживши графік до перетину з осями напруги і сили струму, визначте ЕРС джерела струму і силу струму короткого замикання.
4. Skorиставшись формулою $I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r}$, визначте внутрішній опір джерела струму.
5. Яке із значень ЕРС джерела струму і значень внутрішнього опору, виміряних різними методами, є найбільш точними? Поясніть чому.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОБОТА № 3

Тема. Вимірювання температурного коефіцієнта опору металу.

Мета: експериментально довести, що залежність електричного опору металевго провідника від температури є лінійною; визначити температурний коефіцієнт опору міді.

Обладнання: мультиметр, термометр, пристрій для вивчення залежності опору металів від температури, нагрівник, посудина з водою, штатив із муфтою та лапкою, лампа на підставці.



ВКАЗІВКИ ДО РОБОТИ

II Підготовка до експерименту

1. Зберіть установку, подану на рисунку.
2. Переключіть тумблер мультиметра на вимірювання опору (Ω), встановивши його навпроти позначки 10^3 Ом.

▶ Експеримент

Суворо дотримуйтесь інструкції з безпеки (див. форзац).

Результати вимірювань відразу заносьте до таблиці.

1. Виміряйте початкову температуру t_0 та опір R мідного дроту за цієї температури.

Зверніть увагу! Торкатися клем пристрою щупами мультиметра слід тільки в момент вимірювання опору.

3. Увімкніть нагрівник і, слідкуючи за показами термометра, визначте опір дроту через кожні 10 °С в інтервалі від 30 до 90 °С. Вимкніть нагрівник.

Температура t , °С	$t_0 =$	30	40	50	60	70	80	90
Опір R , кОм	$R =$							



Опрацювання результатів експерименту

1. За даними таблиці побудуйте графік залежності опору дроту від його температури — $R(t)$. (Про правила побудови графіка за експериментальними точками див. у Додатку 2.)
2. Продовживши графік залежності $R(t)$ до перетину з віссю ординат, знайдіть опір R_0 мідного дроту за температури 0 °С.
3. Виберіть на графіку довільну точку та визначте для неї відповідні значення опору R і температури t мідного дроту. Skorиставшись формулою $\alpha_{\text{сеп}} = \frac{R - R_0}{R_0 t}$, визначте середнє значення температурного коефіцієнта опору міді.
4. Оцініть відносну й абсолютну похибки експерименту, порівнявши отриманий результат із табличним значенням температурного коефіцієнта опору міді:

$$\varepsilon_{\alpha} = \left| 1 - \frac{\alpha_{\text{сеп}}}{\alpha_{\text{табл}}} \right|; \Delta \alpha = \alpha_{\text{сеп}} \cdot \varepsilon.$$

6. Округліть результати вимірювання температурного коефіцієнта опору міді, скориставшись правилами округлення (див. Додаток 2), і подайте результати у вигляді: $\alpha = \alpha_{\text{сеп}} \pm \Delta \alpha$.



Аналіз експерименту та його результатів

Проаналізуйте експеримент і його результати. За результатами експерименту сформулюйте і запишіть висновок, у якому зазначте: 1) яку фізичну величину ви вимірювали; 2) яким є результат вимірювання; 3) у чому причина похибки вимірювання.



Творче завдання

Продумайте й запишіть перелік необхідного обладнання та план проведення експерименту з визначення температури нитки лампи розжарювання в робочому стані. Вважайте, що нитка виготовлена із вольфраму. Проведіть експеримент.

ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ І «ЕЛЕКТРОДИНАМІКА».

Частина 1. Електричний струм

1. Ви поглибили свої знання про *електричний струм* — напрямлений рух вільних заряджених частинок.

Наявність вільних частинок, що мають електричний заряд

Умови існування електричного струму

Наявність електричного поля

2. Ви згадали, що дізнатися про наявність електричного струму можна за його діями, а електричне поле створюється джерелами струму.

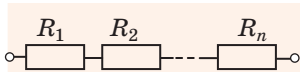
3. Ви вивчили *фізичні величини*, які застосовують для характеристики електричного кола, і простежили зв'язок між ними.

4. Ви згадали *закономірності послідовного і паралельного з'єднань споживачів*:

Послідовне

Види з'єднання провідників

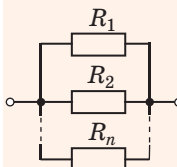
Паралельне



$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$



$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

5. Ви ознайомилися із *законом Ома для повного кола*: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$; згадали *закон Ома для ділянки кола*: $I = \frac{U}{R}$.

6. Ви згадали формули для визначення *роботи і потужності струму та кількості теплоти*, яка завжди виділяється під час проходження струму:

Робота струму

$$A = UIt$$

Потужність струму

$$P = UI$$

Кількість теплоти

$$Q = I^2 R t$$

7. Ви дізналися про *особливості електричного струму в різних середовищах*.

Електричний струм у різних середовищах

Метали

Напрямлений рух вільних електронів.
Залежність питомого опору від температури:
 $\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$;
 α — температурний коефіцієнт опору

Рідини

Напрямлений рух вільних йонів.
Закони електролізу:
1. $m = kq = kIt$
2. $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$

Газу

Напрямлений рух вільних йонів і електронів.
 $\frac{m_e v^2}{2} \geq W_i$;
 W_i — енергія іонізації

Напів-провідники

Напрямлений рух вільних електронів і дірок (вільних і зв'язаних електронів)

Вакуум

Напрямлений рух електронів.
 $\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}}$;
 $A_{\text{вих}}$ — робота виходу електронів



ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ I «ЕЛЕКТРОДИНАМІКА». Частина 1. Електричний струм

Завдання 1. Опір кожного резистора на ділянці кола однаковий і дорівнює 20 Ом (рис. 1).

- (2 бали) Визначте опір ділянки кола у випадку, коли буде замкненим тільки ключ K_2 :
а) 20 Ом; б) 40 Ом; в) 10 Ом; г) 30 Ом.
- (3 бали) Який ключ необхідно замкнути, щоб опір ділянки кола склав 60 Ом?
- (3 бали) До ділянки кола прикладено напругу 120 В. Які ключі необхідно замкнути, щоб амперметр показував 12 А? Обґрунтуйте свою відповідь.

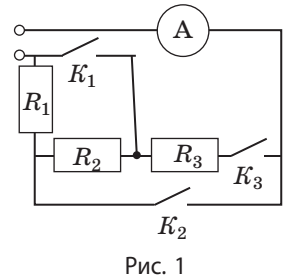


Рис. 1

Завдання 2. Спираль електроплити виготовлена з ніхромового дроту перерізом $0,15 \text{ мм}^2$ і довжиною 10 м. Плиту увімкнено в мережу напругою 220 В.

- (2 бали) Обчисліть кількість теплоти, що виділиться в спіралі електроплити за 20 хв роботи.
- (3 бали) Обчисліть об'єм води, узятої за температури 15°C , яку електроплита може довести до кипіння за 20 хв. ККД плити — 80 %.

Завдання 3. До джерела струму з ЕРС 1,5 В і внутрішнім опором 1 Ом приєднано резистор опором 4 Ом.

- (2 бали) Якою є сила струму в колі?
а) 0,3 А; б) 4,4 А; в) 1,5 А; г) 7,5 А.
- (3 бали) Обчисліть опір шунта, який необхідно приєднати до міліамперметра з межею вимірювання 10 мА, щоб цим міліамперметром можна було виміряти силу струму в колі. Опір міліамперметра — 9,9 Ом.

Завдання 4. На рис. 2 наведено схему електричного кола, до складу якого входить електролітична ванна.

- (1 бал) Які носії струму в електроліті?
а) дірки; в) негативні йони;
б) електрони; г) позитивні та негативні йони.
- (3 бали) До електролітичної ванни з розчином CuSO_4 (ванна 1) послідовно приєднали електролітичну ванну з розчином AgNO_3 (ванна 2). Визначте масу срібла, що виділилося на катоді ванни 2, якщо на катоді ванни 1 виділилося 0,36 г міді.

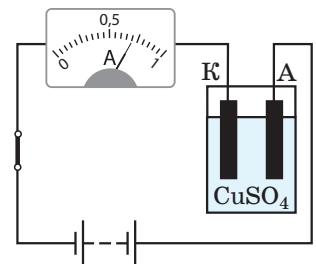


Рис. 2

Завдання 5. Сила струму, який проходить через вольфрамову нитку лампи розжарювання, в момент увімкнення лампи у 12,5 разу перевищує силу робочого струму.

- (1 бал) Опір нитки розжарення під час нагрівання:
а) не змінюється; в) увесь час зменшується;
б) увесь час збільшується; г) спочатку зменшується, а потім збільшується.
- (2 бали) Обчисліть температуру нитки розжарення лампи в робочому стані, якщо в момент увімкнення її температура становить 20°C .

Звірте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Поділіть суму на два. Одержане число відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.

ЧАСТИНА 2. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

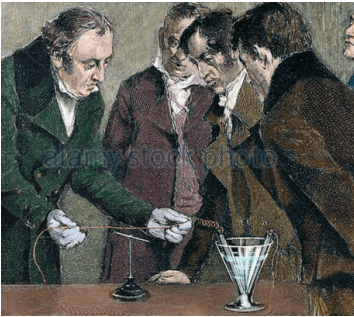


Рис. 10.1. Дослід Ерстеда: поблизу провідника зі струмом магнітна стрілка відхиляється від напрямку «північ — південь», намагаючись розташуватися перпендикулярно до провідника



§ 10. МАГНІТНЕ ПОЛЕ

У 1813 р. данський фізик *Ганс Крістіан Ерстед* (1777–1851) писав: «Слід випробувати, чи здійснює електрика... якісь дії на магніт...». І лише взимку 1820 р. Ерстед спостерігає і досліджує явище відхилення магнітної стрілки біля провідника зі струмом (рис. 10.1). Це було першим експериментальним підтвердженням зв'язку електрики та магнетизму. Чому стрілка відхиляється? Чому розвертається, якщо змінити напрямок струму? Згадаємо.



Які об'єкти створюють магнітне поле

Ви вже добре знаєте, що навколо заряджених тіл і заряджених частинок існує *електричне поле*, через яке між ними здійснюється *електрична взаємодія*; якщо заряджені частинки рухаються, то навколо них існує також і магнітне поле, через яке здійснюється *магнітна взаємодія*. Сучасна фізика розглядає єдину *електромагнітну взаємодію*. Вона відбувається через *електромагнітне поле*, яке має дві складові (дві форми прояву) — *електричне поле* і *магнітне поле*. Розглянемо детальніше магнітне поле.

Візьмемо два тонких гнучких провідники, розташуємо паралельно один одному і пропустимо в них електричний струм — провідники притягнуться або відштовхнуться один від одного незважаючи на те, що є електрично нейтральними (рис. 10.2). Уперше цей дослід продемонстрував у вересні 1820 р. французький математик і фізик *Андре-Марі Ампер* (1775–1836).

Ампер був прихильником *теорії далекодії* і вважав, що взаємодія провідників зі струмом здійснюється миттєво, а навколишній простір не бере участі в цій взаємодії. Англійський фізик *Майкл Фарадей* (1791–1867) створив *теорію близькодії*, відповідно до якої заряджені частинки, що напрямлено рухаються в кожному із двох провідників зі струмом, створюють у навколишньому просторі магнітне поле. Магнітне поле одного провідника діє на інший провідник, і навпаки. Тобто взаємодія провідників зі струмом здійснюється з певною швидкістю через *магнітне поле*.

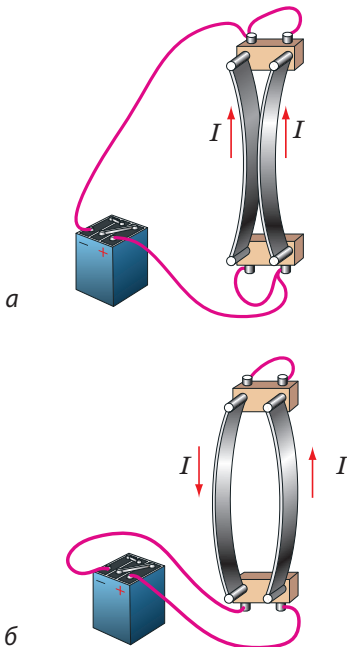


Рис. 10.2. Схема досліду Ампера. Якщо в двох паралельних провідниках течуть струми одного напрямку, провідники притягуються (а); якщо течуть струми протилежних напрямків, провідники відштовхуються (б)

Магнітне поле — це форма матерії (складова електромагнітного поля), яка існує навколо намагнічених тіл, провідників зі струмом, рухомих заряджених тіл і частинок та виявляється в дії на інші намагнічені тіла, провідники зі струмом, рухомі заряджені тіла й частинки, розташовані в цьому полі.

2 Силова характеристика магнітного поля

Якщо прямий провідник, виготовлений із немагнітного матеріалу, підвісити на проводах між полюсами постійного магніту і пропустити в провіднику струм, то провідник відхилиться. Причиною такого відхилення є сила, яка діє на провідник зі струмом з боку магнітного поля, — сила Ампера \vec{F}_A (рис. 10.3).

Змінюючи силу струму в провіднику, довжину активної частини провідника (тобто частини провідника, яка перебуває в магнітному полі), кут між провідником і лініями магнітного поля, можна переконатися:

1) сила Ампера прямо пропорційна і силі струму I , і довжині l активної частини провідника, а отже, прямо пропорційна їх добутку: $F \sim Il$;

2) сила Ампера є максимальною, якщо провідник розташований перпендикулярно до ліній магнітного поля.

Оскільки $F_{A\max} \sim Il$, для даної ділянки магнітного поля відношення $\frac{F_{A\max}}{Il}$ не залежить ані від сили струму в провіднику, ані від довжини провідника, а залежить тільки від

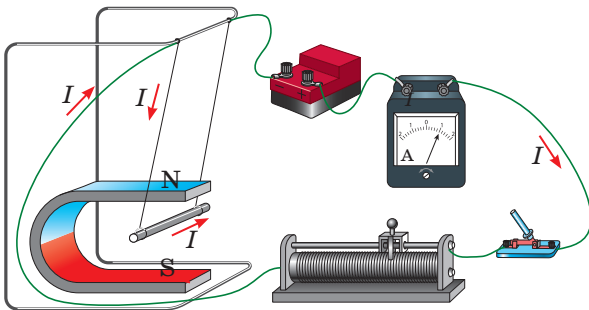
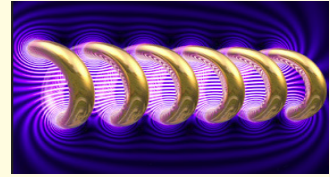


Рис. 10.3. Алюмінієвий провідник відхиляється в магнітному полі постійного магніту внаслідок дії сили Ампера

Властивості магнітного поля



1. *Магнітне поле є матеріальним* — воно існує реально, незалежно від наших уявлень.

2. *Магнітне поле є складовою електромагнітного поля.*

3. *Магнітне поле створюють:*

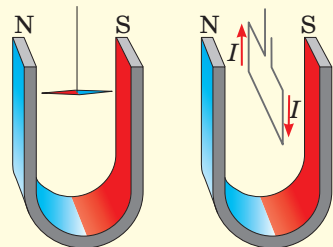
- намагнічені тіла;
- провідники зі струмом;
- рухомі заряджені частинки і тіла;
- змінне електричне поле.

4. *Магнітне поле діє з деякою силою:*

- на заряджені тіла й частинки, що рухаються в цьому полі;
- на провідники зі струмом;
- на намагнічені тіла.

5. *Магнітне поле чинить орієнтувальну дію:*

- на магнітну стрілку;
- на рамку зі струмом.



6. *Магнітне поле діє на будь-яку речовину, намагнічуючи її певним чином.*

Фізика в цифрах

Найпотужніші магніти

Серед відомих нам джерел магнітного поля найсильніше магнітне поле у Всесвіті — до $1 \cdot 10^{11}$ Тл — мають *магнітари* (магнітні нейтронні зірки). Для порівняння: магнітна індукція магнітного поля Сонця лише 5 мТл, Землі — у 100 разів менша.

У серпні 1918 р. японські фізики згенерували найпотужніше штучне магнітне поле у приміщенні — 1200 Тл. Для порівняння: магнітна індукція магнітного поля, яке створюють надпровідні електромагніти Великого адронного колайдера, — 8,3 Тл.

властивостей магнітного поля. Тому це відношення обрали за *силову характеристику магнітного поля* — вона одержала назву *магнітна індукція*.

Магнітна індукція \vec{B} — векторна фізична величина, що характеризує магнітне поле і за модулем дорівнює відношенню максимальної сили, з якою магнітне поле діє на розташований у цьому полі прямий провідник зі струмом, до добутку сили струму в провіднику і довжини активної частини провідника:

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

Одиниця магнітної індукції в СІ — **тесла** (названа на честь сербського фізика *Ніколи Тесли* (1856–1943)):

$$[B] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{ Тл (Т)}.$$

1 тесла — це магнітна індукція такого однорідного магнітного поля, яке діє з максимальною силою 1 ньютон на провідник завдовжки 1 метр, сила струму в якому 1 ампер.

? Магнітне поле діє на провідник завдовжки 10 см із максимальною силою 5 мН. Визначте індукцію магнітного поля, якщо сила струму в провіднику становить 2 А.

Магнітна індукція — векторна величина, тому, щоб її повністю визначити, слід знати не тільки її значення, а й напрямок. За напрямком вектора магнітної індукції в даній точці магнітного поля обрано *напрямок, у якому вказує північний полюс магнітної стрілки, встановленої в цій точці* (рис. 10.4, а).

Напрямок вектора магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом і колушки зі струмом визначають за допомогою правила свердлика або за допомогою правої руки:

Якщо спрямувати великий палець правої руки за напрямком струму в провіднику, то чотири зігнуті пальці вкажуть напрямок ліній магнітної індукції магнітного поля струму (рис. 10.4, б).

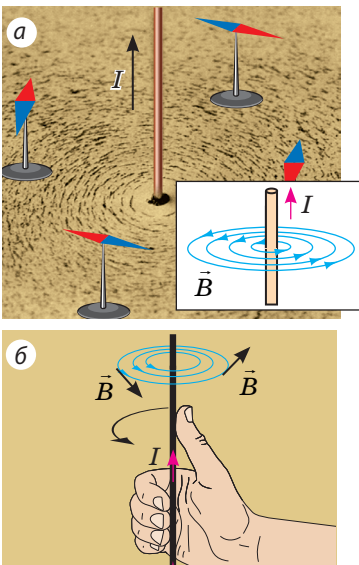


Рис. 10.4. Визначення напрямку магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом