

В. Г. Бар'яхтар, Ф. Я. Божинова,  
М. М. Кірюхін, О. О. Кірюхіна

# ФІЗИКА

11

Академічний рівень  
Профільний рівень



ВИДАВНИЦТВО  
**РАНОК**

УДК 372.853(075)  
ББК 74.262.22я721  
Б26

**Підручник виданий за рахунок державних коштів.  
Продаж заборонено**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
(наказ Міністерства освіти і науки України від 16.03.2011 р. № 235)

Наукову експертизу  
проводив Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України

Психолого-педагогічну експертизу  
проводив Інститут педагогіки НАПН України

**Бар'яхтар В. Г.**

**Б26** Фізика. 11 клас. Академічний рівень. Профільний рівень: Підручник для загальноосвіт. навч. закл. / В. Г. Бар'яхтар, Ф. Я. Божинова, М. М. Кірюхін, О. О. Кірюхіна. — Х.: Видавництво «Ранок», 2011. — 320 с.: іл.  
ISBN 978-617-540-443-0

Основна мета підручника — сприяти формуванню базових фізичних знань, достатніх для продовження навчання за напрямками, де потрібна відповідна підготовка з фізики.

УДК 372.853(075)  
ББК 74.262.22я721

Навчальне видання  
**БАР'ЯХТАР Віктор Григорович**  
**БОЖИНОВА Файна Яківна**  
**КІРЮХІН Микола Михайлович**  
**КІРЮХІНА Олена Олександрівна**

**ФІЗИКА. 11 клас. Академічний рівень. Профільний рівень**  
**Підручник для загальноосвітніх навчальних закладів**

Редактори *І. Л. Морева, О. В. Костіна*. Технічний редактор *С. Я. Захарченко*  
Художники *Ю. В. Пендраковська, О. В. Сміян*. Коректор *Н. В. Красна*  
Підписано до друку 07.07.2011. Формат 70×100/16. Папір офсетний. Гарнітура Шкільна.  
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 26,0. Обл.-вид. арк. 31,8.  
Наклад 58 350 прим.

ТОВ Видавництво «Ранок». Свідоцтво ДК № 3322 від 26.11.2008.  
61071 Харків, вул. Кібальчича, 27, к. 135.

Для листів: 61045 Харків, а/с 3355. E-mail: office@ranok.com.ua  
Тел. (057) 719-48-65, тел./факс (057) 719-58-67.

З питань реалізації: (057) 712-91-44, 712-90-87. E-mail: commerce@ranok.com.ua  
«Книга поштою»: (057) 717-74-55, (067) 546-53-73. E-mail: pochta@ranok.com.ua  
[www.ranok.com.ua](http://www.ranok.com.ua)

© В. Г. Бар'яхтар, Ф. Я. Божинова,  
М. М. Кірюхін, О. О. Кірюхіна, 2011  
© Ю. В. Пендраковська, О. В. Сміян, іл., 2011  
© ТОВ Видавництво «Ранок», 2011

ISBN 978-617-540-443-0



## Дорогі друзі!

У цьому навчальному році ви завершуєте вивчення курсу фізики загальноосвітньої школи. Сподіваємось, що подорож світом фізики виявилася цікавою і навіть надихнула декого з вас пов'язати своє подальше життя саме з цією наукою. У всякому разі фізичні знання, отримані в школі, напевно стануть у пригоді, чим би ви не займалися в майбутньому.

Цього року на вас чекають розділи фізики, з якими ви вже познайомилися в попередніх класах, отже, багато з фізичних явищ і понять не стануть для вас новими. Це такі розділи, як «*Електричне поле*», «*Електричний струм*», «*Електромагнетизм. Електромагнітне поле*», «*Оптика*», «*Атомна і ядерна фізика*». Зрозуміло, що вивчати ці розділи ви будете на більш високому рівні, розширите та поглибите набуті знання.

Новим для вас виявиться розділ «*Електромагнітні коливання і хвилі*», але й у ньому на вас чекає низка знайомих понять і механічних аналогій, з якими ви зустрічались у 10-му класі під час вивчення механічних коливань і хвиль.

В усіх розділах підручника наведено різноманітні задачі — навчитись їх розв'язувати вам допоможе пункт «*Учимося розв'язувати задачі*» у параграфах. Завдяки пункту «*Підбиваємо підсумки*» ви маєте можливість ще раз виділити основне у вивченому матеріалі та повторити його.


Як і в усіх попередніх підручниках цієї серії, параграфи завершуються кількома рубриками. З'ясувати, як ви зрозуміли вивчене, допоможуть «*Контрольні запитання*». Рубрика «*Вправа*» дозволить застосувати отримані знання на практиці.

У ході підготовки до контрольних робіт буде корисною рубрика «*Завдання для самоперевірки*», а рубрика «*Підбиваємо підсумки розділу*» допоможе систематизувати набуті знання й «побачити» матеріал розділу в цілому. Ті ж з вас, хто хоче більше дізнатися про розвиток фізичної науки та техніки, знайдуть чимало корисного в рубриці «*Фізика та техніка в Україні*». Фізика — наука експериментальна, тому наприкінці підручника подано вказівки до *лабораторних робіт*.

Зверніть увагу, що в підручнику використовуються такі позначки.

Зірочкою (\*) позначено матеріал і завдання підвищеної складності — для тих, хто прагне дізнатися більше.

Зірочками (★) обмежено матеріал, призначений для учнів, які вивчають фізику на профільному рівні.

Позначка ★ означає, що розширений виклад навчального матеріалу профільного рівня ви зможете знайти на сайті видавництва «Ранок», а саме: теоретичні висновки та обґрунтування наведених у підручнику законів, більш докладне пояснення деяких фізичних явищ, детальний опис роботи різних технічних пристроїв тощо.

*Нехай вам щастить!*



# РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

## § 1. АЗБУКА ЕЛЕКТРОСТАТИКИ



Усі фізичні явища пов'язані з тими чи іншими взаємодіями, мірою яких є сили. Якщо не брати до уваги силу тяжіння, у повсякденному житті ми зустрічаємося в основному з різними проявами *електромагнітних сил*. Усі види сил пружності й тертя мають електромагнітну природу; життєдіяльність рослин, організмів тварин і людей базується на електромагнітних взаємодіях. Крім того, електромагнітні сили визначають стійкість атомів, поєднують атоми в молекули; світло та радіохвилі, без яких неможливо уявити сучасне життя, — теж прояви електромагнітної взаємодії. Вивчає цю взаємодію *електродинаміка* — наука про властивості особливого виду матерії — електромагнітного поля, через яке здійснюється взаємодія електрично заряджених тіл або частинок. Якщо електрично заряджені тіла або частинки перебувають у спокої, то їх взаємодію розглядає розділ електродинаміки, який називається *електростатикою*. З основами електростатики ви ознайомились у курсі фізики 9-го класу. А щоб іти далі, необхідно відтворити в пам'яті базові поняття.



### Що таке електричний заряд

**Електричний заряд** — це фізична величина, яка характеризує властивість частинок або тіл вступати в електромагнітну взаємодію.

Електричний заряд позначають символом  $q$ . *Одиниця електричного заряду в СІ — кулон (Кл). 1 Кл дорівнює заряду, який проходить через поперечний переріз провідника за 1 с, якщо сила струму в провіднику 1 А: 1 Кл = 1 А · с.*

#### *Основні властивості електричного заряду*


1. Існують два роди електричних зарядів — *позитивні та негативні*. Електричний заряд такого роду, як заряд, отриманий на бурштині або ебонітовій паличці, потертих об вовну, прийнято називати негативним, а такого роду, як заряд, отриманий на паличці з оргекла, потертій об папір, — позитивним.

2. Тіла, що мають заряди одного знака, *відштовхуються*; тіла, що мають заряди протилежних знаків, *притягуються*.

3. *Носієм електричного заряду є частинка* — електричний заряд не існує окремо від неї.

4. Електричний заряд є *дискретним*, тобто електричні заряди фізичних тіл кратні певному найменшому (елементарному) заряду. *Носій найменшого негативного заряду — електрон*. Цей заряд зазвичай позначають символом  $e$ , а його значення записують так:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. *Носій найменшого позитивного заряду — протон*. Заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона.

Якщо  $q$  — заряд тіла,  $e$  — заряд електрона,  $N$  — ціле число, то  $|q| = N|e|$ .

 Перше досить точне вимірювання значення елементарного заряду здійснив американський фізик *Роберт Міллікен (1868–1953)*



під час дослідів 1906–1916 рр. з вивчення руху дрібних крапельок олії в електричному полі.★

Зверніть увагу: залежно від контексту під словом «заряд» будемо розуміти або значення заряду зарядженого тіла, або саме заряджене тіло.

## 2 Що відбувається під час електризації

**Електризація** — це процес одержання електричного заряду макроскопічними тілами або їх частинами.

Існують декілька способів електризації, серед яких — *електризація тертям*. Ви вже знаєте, що в процесі електризації тертям відбувається тісний контакт двох тіл, виготовлених із різних матеріалів, і частина електронів переходить з одного тіла на інше. Після роз'єднання цих тіл виявляється, що тіло, яке віддало частину своїх електронів, заряджене *позитивно*, а тіло, яке одержало їх, заряджене *негативно* (рис. 1.1).

За будь-якого способу електризації тіл відбувається *перерозподіл* наявних в них електричних зарядів, а не поява нових. Це твердження є наслідком одного з найважливіших законів природи — **закону збереження електричного заряду**:

Повний заряд замкненої системи тіл або частинок залишається незмінним під час усіх взаємодій, які відбуваються в цій системі:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const},$$

де  $q_1, q_2, \dots, q_n$  — заряди тіл або частинок, які утворюють замкнену систему;  $n$  — кількість тіл або частинок.

Таким чином, якщо перед електризацією тертям скляної палички об шовкову тканину і паличка, і тканина були незарядженими, то після тертя вони виявляються зарядженими, причому їхні заряди будуть однаковими за модулем і протилежними за знаком. Тобто їхній сумарний заряд, як і перед дослідом, дорівнюватиме нулю.

## 3 Для чого застосовують електроскоп

**Електроскоп** — прилад, який використовують для виявлення та якісного оцінювання електричного заряду.

Будову електроскопа показано на рис. 1.2.



Рис. 1.1. Під час електризації тертям частина електронів зі скляної палички перейде на клаптик шовку, в результаті чого скляна паличка набуде позитивного заряду, а клаптик шовку — негативного

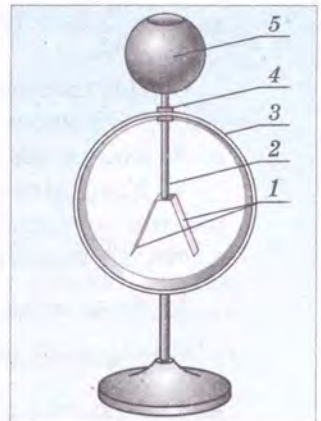


Рис. 1.2. Будова електроскопа: 1 — індикатор (паперові або металеві смужки); 2 — металевий стрижень; 3 — корпус; 4 — діелектрик у місці кріплення стрижня; 5 — кондуктор (металева порожня куля)



Рис. 1.3. Електрометр

### Принцип дії електроскопа

Коли до кондуктора електроскопа торкаються досліджуваним зарядженим тілом, то частина заряду цього тіла по металевому стрижню переходить на смужки електроскопа. Оскільки однойменно заряджені тіла відштовхуються, нижні кінці смужок розійдуться в різні боки. Кут між смужками залежить від значення отриманого ними заряду. Цей кут тим більший, чим більший отриманий заряд. Коли електроскоп незаряджений, то смужки розташовані вертикально.

Зверніть увагу: якщо смужки електроскопа замінити легкою металевою стрілкою, а на передній стінці корпусу розмістити шкалу, то отриманий прилад можна використовувати й для кількісного оцінювання електричного заряду. Такий прилад називають *електрометром* (рис. 1.3).

#### 4 Що визначає закон Кулона

Французький фізик *Шарль Кулон* (1736–1806) експериментально встановив закон, який став *основним законом електростатики* та був названий на його честь, — **закон Кулона**:

Значення сили  $\vec{F}$  взаємодії двох нерухомих точкових зарядів  $q_1$  і  $q_2$  прямо пропорційне добутку модулів цих зарядів та обернено пропорційне квадрату відстані  $r$  між ними:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

де  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  — коефіцієнт пропорційності.

Нагадаємо: *точковим зарядом* називають заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл, що розглядаються.

*Коефіцієнт пропорційності  $k$*  чисельно дорівнює силі, з якою взаємодіють два точкові заряди по 1 Кл кожний, розташовані у вакуумі на відстані 1 м один від одного.

Іноді замість коефіцієнта  $k$  застосовують *інший коефіцієнт* —  $\epsilon_0$ , що має назву *електрична стала*:  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ . Тоді математичний запис закону Кулона матиме такий вигляд:

$$F = \frac{|q_1| |q_2|}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Зверніть увагу:

— у законі Кулона йдеться про добуток *модулів* зарядів, оскільки знаки зарядів впливають лише на напрямок сили;



— сили, з якими взаємодіють точкові заряди, зазвичай називають *кулонівськими силами*;

— кулонівські сили *напрявлені вздовж умовної прямої, яка з'єднує точкові заряди, що взаємодіють* (рис. 1.4);

— якщо взаємодіють три чи більше зарядів, то спочатку визначаються сили взаємодії певного заряду з кожним із решти зарядів (за законом Кулона), а потім розраховується їх результуюча.

## 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача 1.** Кожна з двох однакових маленьких незаряджених кульок масою 0,01 г підвішена у вакуумі на шовковій нитці завдовжки 1,0 м так, що кульки торкаються одна одної. Першу кульку відвели вбік, зарядили і повернули в початкове положення. Після цього кульки відійшли одна від одної на відстань 14 см. Визначте заряд першої кульки перед дотиком.

$q_1$  — ?

Дано:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_2 = m = \\ &= 1 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \\ l_1 &= l_2 = l = 1,0 \text{ м} \\ r &= 0,14 \text{ м} \end{aligned}$$

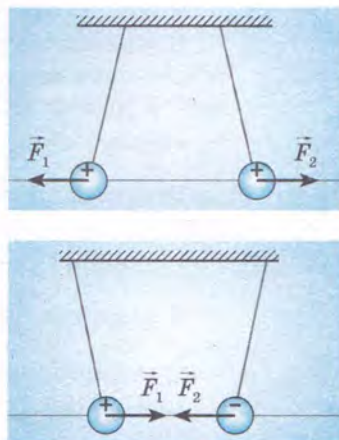
$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$$q_2 = 0$$

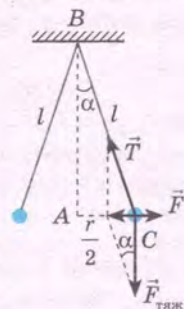
$$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} *$$

*Аналіз фізичної проблеми.* Після того як перша кулька торкнулася до другої, її заряд розподілився між даними двома кульками. У результаті між зарядженими кульками виникла сила кулонівського відштовхування, через дію якої вони розійшлися.

Зробивши пояснювальний *рисунок* і записавши умову рівноваги, можемо визначити модуль кулонівської сили. Тоді, знаючи його і скориставшись законом Кулона та законом збереження заряду, визначимо заряд першої кульки перед дотиком.



**Рис. 1.4.** Сили електричної взаємодії ( $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ ) напрямлені вздовж умовної прямої, яка з'єднує точкові заряди



*Пошук математичної моделі, розв'язання.* На кожную кульку діють три сили: кулонівська сила  $\vec{F}$ , сила тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  і сила  $\vec{T}$  натягу нитки. Оскільки кульки перебувають у рівновазі, геометрична сума сил дорівнює нулю:  $\vec{F} + \vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{T} = 0$ . Ця умова буде виконана, якщо модуль рівнодійної сил  $\vec{T}$  і  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  дорівнюватиме модулю  $\vec{F}$ :  $F_{\text{тяж}} \text{tg} \alpha = F$ .

За законом Кулона  $F = k \frac{|q'_1| |q'_2|}{r^2}$ , тому  $mg \text{tg} \alpha = k \frac{|q'_1| |q'_2|}{r^2}$  (1), де

$q'_1$  і  $q'_2$  — відповідно заряди першої і другої кульок після взаємодії.

\* Якщо не зазначено інше, під час розв'язування задач вважатимемо, що  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

Оскільки система кульок є замкненою, в ній виконується закон збереження заряду:  $q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$ , де  $q_1$  і  $q_2$  — відповідно заряди першої і другої кульок до взаємодії. Розміри кульок однакові, тож  $q'_1 = q'_2 = q'$ . Отже,  $q' = \frac{q_1}{2}$  (2).

Значення  $\text{tg} \alpha$  знайдемо з трикутника  $ABC$ :  $\text{tg} \alpha = \frac{r/2}{\sqrt{l^2 - r^2/4}}$ .

Оскільки  $\frac{r}{2} \ll l$ , то  $\sqrt{l^2 - r^2/4} \approx \sqrt{l^2} = l$ . Отже:  $\text{tg} \alpha = \frac{r}{2l}$  (3).

З рівняння (1) із урахуванням співвідношень (2) і (3) маємо, що модуль заряду першої кульки перед дотиком  $q_1 = r \sqrt{\frac{2mg \cdot r}{kl}}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[q_1] = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot \text{м}}{\frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2}}} = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}}} = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2}} = \frac{\text{м} \cdot \text{Кл}}{\text{м}} = \text{Кл};$$

$$\{q_1\} = 0,14 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \cdot 0,14}{9 \cdot 10^9 \cdot 1}} \approx 7,8 \cdot 10^{-9}, \quad q_1 \approx 7,8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

*Відповідь:* заряд першої кульки перед дотиком  $q_1 \approx 7,8$  нКл.

**Задача 2.** Три однакові позитивні точкові заряди по 18,0 нКл кожен розташовані у вершинах рівностороннього трикутника. Який точковий заряд необхідно помістити в центрі трикутника, щоб система зарядів перебувала в рівновазі?

$q_0$  — ?

Дано:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q = 18,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

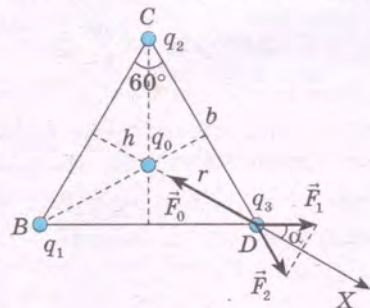
*Аналіз фізичної проблеми.* Шуканий заряд  $q_0$  має притягувати заряди  $q$ , розташовані у вершинах трикутника, компенсуючи їхнє взаємне відштовхування. Тому заряди  $q_0$  і  $q$  повинні бути різнойменними. За будь-якого значення заряду  $q_0$  він перебуватиме в рівновазі, оскільки розміщений у центрі симетрії

трикутника і сили, що діють на нього з боку зарядів, розташованих у вершинах трикутника, компенсуються.

Заряди, розташовані у вершинах трикутника, перебуватимуть у рівновазі, коли геометричні суми сил, які діють на них, дорівнюватимуть нулю. Виконавши пояснювальний рисунок і записавши умову рівноваги для одного із зарядів  $q$ , знайдемо значення заряду  $q_0$ .

*Пошук математичної моделі,*

*розв'язання.* Розглянемо, наприклад, умову рівноваги заряду, розташованого в точці  $D$ . На цей заряд діють сили відштовхування  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  з боку зарядів, розташованих у вершинах  $B$  і  $C$  відповідно, і сила  $\vec{F}_0$  притягання до заряду  $q_0$ .





Отже:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_0 = 0$ .

У проєкціях на вісь  $OX$  ця рівність набуде вигляду:

$$-F_0 + F_1 \cos \alpha + F_2 \cos \alpha = 0 \quad (*), \text{ де } \alpha = 30^\circ; \cos \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Щоб знайти модулі сил, необхідно знати відстань між зарядами. Позначимо  $b$  довжину сторони трикутника, а відстань від центра трикутника до вершини —  $r$ . Із геометрії відомо, що  $r = \frac{2}{3}h$ , де  $h$  — висота трикутника, яка, у свою чергу, дорівнює:  $h = \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{4}} = \frac{b\sqrt{3}}{2}$ . Тому  $r = \frac{b\sqrt{3}}{3}$ .

Знайдемо модулі сил, використовуючи закон Кулона і вважаючи, що система зарядів перебуває у вакуумі:  $F_1 = F_2 = k \frac{|q|^2}{b^2}$ ;  $F_0 = k \frac{3|q||q_0|}{b^2}$ .

Підставивши вирази для розрахунку сил у рівняння (\*), маємо:

$$-\frac{k \cdot 3 \cdot |q||q_0|}{b^2} + \frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot |q|^2}{b^2} = 0. \text{ Звідси } |q_0| = \frac{|q|}{\sqrt{3}}. \text{ Ураховуючи, що за-}$$

ряди  $q_0$  і  $q$  повинні бути різнойменними, маємо:  $q_0 = -\frac{q}{\sqrt{3}}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$\{q_0\} \approx -\frac{18 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{3}} \approx -10,4 \cdot 10^{-9}, \quad q_0 \approx -10,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

*Відповідь:* у центр трикутника необхідно помістити заряд  $q_0 \approx -10,4 \cdot 10^{-9}$  Кл.

### Контрольні запитання

1. Що називають електричним зарядом?
2. Назвіть одиницю електричного заряду.
3. Які роди зарядів існують?
4. Як взаємодіють тіла, що мають заряди одного знака? протилежних знаків?
5. Яка частинка має найменший негативний заряд? найменший позитивний заряд?
6. Як ви розумієте твердження, що електричний заряд є дискретним?
7. Що відбувається під час тісного контакту двох тіл, виготовлених із різних матеріалів?
8. Якщо електронейтральне тіло віддасть частину своїх електронів, заряд якого знака воно матиме?
9. Чому під час тертя ебонітової палички об вовну електризуються обидва тіла?
10. Сформулюйте закон збереження електричного заряду.
11. Як сконструйований електроскоп і яким є принцип його дії?
12. Чим електрометр відрізняється від електроскопа?
13. Який заряд називають точковим? Порівняйте поняття «точковий заряд» і «матеріальна точка».
14. Сформулюйте закон Кулона.

### Вправа № 1

1. Як зміниться сила взаємодії двох зарядів, якщо відстань між ними збільшити у 4 рази і модуль кожного заряду збільшити у 2 рази?
2. Як змінилася відстань між двома зарядами, якщо відомо, що сила їхньої взаємодії збільшилася у 9 разів?
3. Дві маленькі кульки, розташовані на відстані 10 см одна від одної, мають однакові негативні заряди. Визначте силу взаємодії кульок, якщо відомо, що на кожній з них є  $1 \cdot 10^{11}$  надлишкових електронів.

4. Дві однакові маленькі металеві кульки заряджені так, що модуль заряду однієї з них у 5 разів більший, ніж модуль заряду іншої. Кульки змусили доторкнутись одну до одної та розвели на початкову відстань. У скільки разів змінилася сила взаємодії кульок, якщо перед дотиком вони були заряджені однойменно? різнойменно?
5. На шовковій нитці підвісили маленьку заряджену кульку масою 2 г. Після того як знизу до неї піднесли другу заряджену кульку, сила натягу нитки, що діє на першу кульку, збільшилась у 2 рази. Визначте відстань між кульками, якщо їхні заряди різнойменні та рівні за модулем —  $5 \cdot 10^{-8}$  Кл.
6. У вершинах квадрата розташовані однакові точкові заряди  $q$ . Який точковий заряд  $q_0$  необхідно помістити в центр квадрата, щоб система перебувала в рівновазі?

## § 2. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ



Яким є механізм взаємодії зарядів? Яким чином заряди «відчувають» один одного і взаємодіють на відстані? Пошук відповідей на ці та багато інших запитань привів англійського фізика *Майкла Фарадея* (1791–1867) до ідеї поля, яку *Альберт Ейнштейн* (1879–1955) пізніше назвав найважливішим відкриттям з часів Ньютона. У курсах фізики 7-го та 9-го класів ви вже зустрічалися з поняттям поля, а зараз ознайомитеся з ним детальніше.



### Що називають електричним полем

Згідно з ідеєю *М. Фарадея* *електричні заряди не діють один на одного безпосередньо. Кожний заряд створює у доколишньому просторі електричне поле, і взаємодія зарядів відбувається через їхні поля.* Взаємодія, наприклад, двох електричних зарядів  $q_1$  і  $q_2$  зводиться до того, що поле заряду  $q_1$  діє на заряд  $q_2$ , а поле заряду  $q_2$  діє на заряд  $q_1$ .

Людина не може безпосередньо, за допомогою органів чуттів, сприймати електричне поле, проте об'єктивність його існування, *матеріальність*, доведено експериментально в ході вивчення електромагнітних хвиль (про це див. у розділі 4 підручника). Поле, як і речовина, є однією з форм існування матерії.

**Електричне поле** — це форма матерії, яка існує навколо заряджених тіл і виявляється в дії з деякою силою на будь-яке заряджене тіло, що перебуває в цьому полі.

*Електричне поле є складовою частиною єдиного електромагнітного поля.* Джерелом електричного поля можуть бути, крім електричних зарядів, і змінні магнітні поля. Однак незмінне в часі (*статичне*) електричне поле може бути створене тільки *нерухомими* зарядами. Таке поле називають *електростатичним*\*.

Зверніть увагу: *електричне поле поширюється в просторі з величезною, але скінченною швидкістю, — швидкістю світла.* Завдяки цій властивості взаємодія між двома зарядами починається не

\* У цьому розділі розглядатимемо *нерухомі заряди* і відповідно — *електростатичні поля*. Проте для простоти такі поля іноді називатимемо *електричними*.



миттєво, а через певний інтервал часу  $\Delta t = \frac{l}{c}$ , де  $l$  — відстань між зарядами, а  $c$  — швидкість світла у вакуумі. Таке запізнення взаємодії важко виявити на відстанях у декілька метрів, але в космічних масштабах воно є досить помітним.

## 2 Що прийнято вважати силовою характеристикою електричного поля

Електричне поле, що оточує заряджене тіло, можна досліджувати за допомогою *датчика*, який називають *пробним зарядом*. Зрозуміло, що датчик має не викривляти досліджуване поле, тому в такій функції доцільно використовувати дуже мале заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати. Моделлю такого тіла, як відомо, є *точковий заряд*. (Подумайте, яким вимогам повинне відповідати значення заряду такого датчика.)

Отже, для вивчення електричного поля в деякій точці слід у цю точку помістити пробний заряд  $q$  та виміряти силу  $\vec{F}$ , яка діє на нього. Очевидно, що в точці, де на заряд діє більша сила, електричне поле є сильнішим. Однак сила, яка діє на пробний заряд в електричному полі, неоднозначно характеризує це поле, бо залежить від значення заряду. А от *відношення*  $\frac{\vec{F}}{q}$  не залежить від значення заряду, тож таке відношення можна розглядати як характеристику поля. Цю силову характеристику називають *напруженістю електричного поля*.

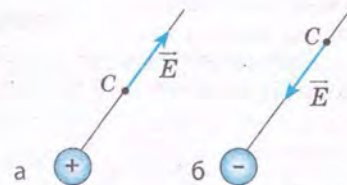
**Напруженість електричного поля**  $\vec{E}$  — це векторна фізична величина, яка характеризує електричне поле й дорівнює відношенню сили  $\vec{F}$ , з якою електричне поле діє на пробний заряд, поміщений у деяку точку поля, до значення  $q$  цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (*)$$

За напрямком вектора напруженості в деякій точці електричного поля беруть напрямок кулонівської сили, яка діяла би на пробний позитивний заряд, якщо б він був поміщений у цю точку поля (рис. 2.1).

Формула (\*) дозволяє визначити одиницю напруженості електричного поля —  $1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ . *Одиниця напруженості в СІ* —  $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . (Те, що  $1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ , буде доведено в § 5 підручника.)

Нехай точковим зарядом  $Q$ , *розташованим у вакуумі*, створено електричне поле. Щоб знайти напруженість даного поля в довільній точці  $C$ ,



**Рис. 2.1.** Визначення напрямку вектора  $\vec{E}$  напруженості електричного поля в деякій точці  $C$ :  $a$  — поле створене позитивним точковим зарядом  $Q$ ;  $b$  — поле створене негативним точковим зарядом  $Q$

у цю точку слід помістити пробний заряд  $q$ . Тоді, скориставшись формулою (\*) та законом Кулона ( $F = k \frac{|Q||q|}{r^2}$ , де  $F$  — сила, яка діє на пробний заряд  $q$ ;  $r$  — відстань від точкового заряду  $Q$  до пробного заряду  $q$ ), отримаємо формулу, яка визначає модуль напруженості  $\vec{E}$  електричного поля, створеного точковим зарядом, на відстані  $r$  від цього заряду:  $E = k \frac{|Q||q|}{r^2|q|}$ . Звідси:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}, \quad \text{або} \quad E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

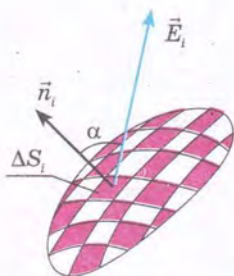


### 3 Як формулюється теорема Остроградського — Гаусса\*

Формулу  $E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}$  можна також вивести, скориставшись теоремою Остроградського — Гаусса:

Потік вектора напруженості електростатичного поля у вакуумі через замкнену поверхню довільної форми ( $\Phi$ ) чисельно дорівнює алгебраїчній сумі значень  $q$  вільних електричних зарядів, розташованих у межах цієї поверхні, поділений на електричну сталу:

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$$



Потік вектора напруженості електростатичного поля через задану поверхню — це фізична величина, яка визначається за формулою:  $\Phi = \sum_{i=1}^k E_i \cos \alpha_i \Delta S_i$  ( $\Delta S_i$  — площа невеликої ділянки, на які розбита поверхня;  $\vec{E}_i$  — вектор напруженості на цій ділянці;  $\alpha$  — кут між векторами  $\vec{E}_i$  і  $\vec{n}_i$ ) (рис. 2.2).

За допомогою зазначеної теореми розраховують напруженість електричного поля, джерелом якого є не тільки точковий заряд, але й, наприклад, рівномірно заряджені площина ( $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ , де  $\sigma = \frac{q}{S}$  — поверхнева густина заряду),

сфера ( $E = \begin{cases} 0, & \text{якщо } r < R, \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, & \text{якщо } r > R, \end{cases}$  де  $Q$  — заряд сфери).★

### 4 У чому суть принципу суперпозиції полів

Знаючи напруженість  $\vec{E}$  електричного поля, створеного деяким зарядом у даній точці простору, неважко визначити модуль і напря-

\* Названа на честь російського математика Михайла Васильовича Остроградського (1801–1862) і німецького математика Карла Фрідріха Гаусса (1777–1855).



мок вектора сили, з якою поле діятиме на будь-який заряд  $q$ , поміщений у цю точку:

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

Якщо ж поле утворене не одним зарядом, а кількома, то, як показує дослід, результуюча сила, що діє на пробний заряд з боку системи зарядів, визначається геометричною сумою всіх сил, з якими діяли б заряди системи окремо на даний пробний заряд.

Звідси випливає **принцип суперпозиції (накладання) електричних полів**:

Напруженість електричного поля системи зарядів у даній точці простору дорівнює векторній сумі напруженостей полів, що їх окремо створили б ці заряди системи в даній точці:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_k = \sum_{i=1}^k \vec{E}_i$$

Відповідно до принципу суперпозиції електричних полів можна знайти напруженість у будь-якій точці поля, створеного, наприклад, двома точковими зарядами  $q_1$  і  $q_2$  (рис. 2.3).

### 5 Як зробити видимим розподіл поля в просторі

Електричне поле можна зобразити *графічно*, використовуючи так звані *лінії напруженості електричного поля (силові лінії)* — лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості електричного поля (рис. 2.4).

Силкові лінії електричного поля мають *загальні властивості* (це впливає з їхнього визначення): вони не перетинаються; не мають зламів; починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних.

Напруженість поля визначена в кожній точці простору, тож силову лінію можна провести через будь-яку точку простору. Таким чином, число силових ліній є нескінченно великим.

Дуже просто побудувати силові лінії поля, створеного відокремленим точковим зарядом (рис. 2.5). Такі «родини» силових ліній полів точкових зарядів демонструють, що заряди є джерелами поля.

На підставі картини силових ліній можна робити висновок не тільки про напрямок вектора напруженості  $\vec{E}$ , але й про його модуль.

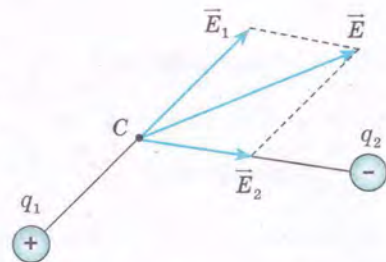


Рис. 2.3. Визначення напруженості електричного поля, створеного двома точковими зарядами  $q_1$  і  $q_2$ , у точці C

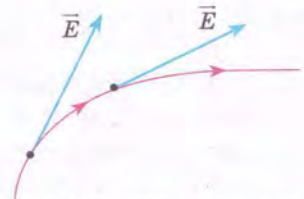
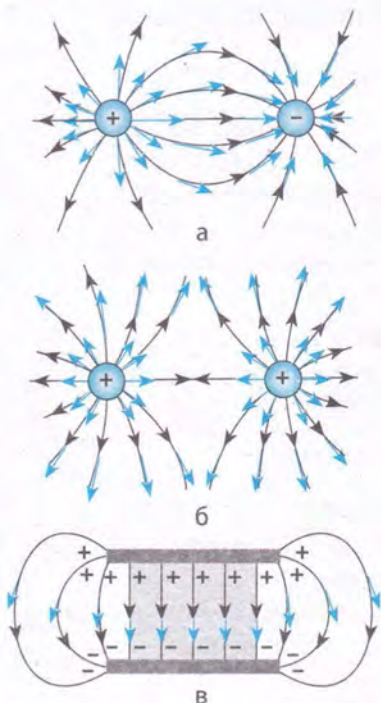


Рис. 2.4. Силова лінія електричного поля (на рисунку зображена червоним)



Рис. 2.5. Силкові лінії електричного поля, створеного точковим зарядом: а — позитивним; б — негативним



**Рис. 2.6.** Картини силових ліній електричних полів, створених системою: а — двох різнойменно заряджених кульок; б — двох позитивно заряджених кульок; в — двох пластин, заряди яких рівні за модулем і протилежні за знаком. Синім позначено напрямки векторів напруженості

Справді, для точкових зарядів напруженість поля більшає в міру наближення до заряду, і, як видно з рис. 2.5, силові лінії при цьому згущуються. Можна довести, що модуль напруженості поля прямо пропорційний кількості силових ліній, які перетинають поверхню одиничної площі, перпендикулярну до силових ліній. (Спробуйте довести це самостійно.)

Якщо відстань між лініями напруженості в деякій області простору однакова, то однакова і напруженість поля в цій області. Електричне поле, вектори напруженості якого однакові у всіх точках простору, називають *однорідним*.

Побудувати точну картину силових ліній електричного поля, створеного будь-яким зарядженим тілом, досить важко, саме тому зазвичай обмежуються наближеним зображенням картини, керуючись певною симетрією в розташуванні зарядів (рис. 2.6).

Зверніть увагу на картину силових ліній поля, створеного системою двох різнойменно заряджених пластин (рис. 2.6, в): в області простору між пластинами, розташованій порівняно далеко від країв пластин (на рисунку ця область зафарбована), відстані між лініями напруженості однакові (лінії паралельні), тобто поле в цій області є *однорідним*.

## 6 Учимся розв'язувати задачі

**Задача 1.** В однорідне електричне поле, утворене двома вертикальними пластинами, поміщено кульку масою 2,0 г, підвішену на тонкій шовковій нитці. Після того як кульці передали заряд  $1,0 \cdot 10^{-6}$  Кл, нитка відхилилася на кут  $30^\circ$  від вертикалі. Визначте напруженість поля.

$E$  — ?

Дано:

$$m = 2 \text{ г}$$

$$= 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$q = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

*Аналіз фізичної проблеми.* Після того як кульці на нитці передали заряд, на неї почала діяти сила з боку електричного поля пластин ( $\vec{F}_{\text{ел}}$ ), у результаті кулька почала відхилитися від початкового положення. Очевидно, що процес відхилення кульки триватиме доти, доки рівнодійна сили тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  і сили  $\vec{T}$  натягу нитки не зрівноважить силу  $\vec{F}_{\text{ел}}$ . Виконавши пояснювальний рисунок і записавши умову рівноваги для



кульки на нитці з урахуванням формули  $\vec{F} = q\vec{E}$ , визначимо напруженість поля пластин.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Кулька перебуває в рівновазі, тому геометрична сума сил, що діють на неї, дорівнює нулю:  $\vec{F}_{\text{ел}} + \vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{T} = 0$ .

Проекції цього рівняння на осі  $OX$  і  $OY$  матимуть вигляд:

$$\begin{cases} F_{\text{ел}} - T \sin \alpha = 0, & \begin{cases} F_{\text{ел}} = T \sin \alpha, \\ -F_{\text{тяж}} + T \cos \alpha = 0; & \begin{cases} F_{\text{тяж}} = T \cos \alpha. \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

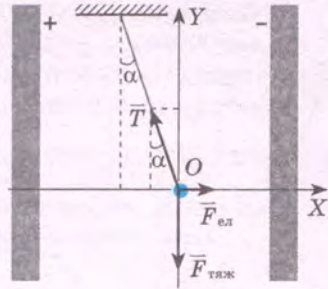
Розділивши перше рівняння на друге, одержимо:  $\frac{F_{\text{ел}}}{F_{\text{тяж}}} = \text{tg} \alpha$ , або  $F_{\text{ел}} = F_{\text{тяж}} \text{tg} \alpha$ .

Підставивши в останню рівність вирази для розрахунку модулів сили тяжіння ( $F_{\text{тяж}} = mg$ ) та сили, що діє з боку електричного поля ( $F_{\text{ел}} = qE$ ), маємо:  $qE = mg \text{tg} \alpha$ , звідки  $E = \frac{mg \text{tg} \alpha}{q}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[E] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}; \{E\} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \sqrt{3}}{10^{-6} \cdot 3} \approx 12 \cdot 10^3, E \approx 12 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл.}$$

*Відповідь:* напруженість електричного поля пластин становить  $E \approx 12 \text{ кН/Кл}$ .



**Задача 2.** У вершинах при гострих кутах ромба, складеного з двох рівносторонніх трикутників зі сторонами  $l = 0,25 \text{ м}$ , розміщено точкові заряди  $q_1 = q_2 = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ . У вершині при одному з тупих кутів ромба розміщений точковий заряд  $q_3 = -5,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ . Визначте напруженість електричного поля в четвертій вершині ромба.

$E$  — ?

Дано:

$$l = 0,25 \text{ м}$$

$$q_1 = q_2 = q = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_3 = -5,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

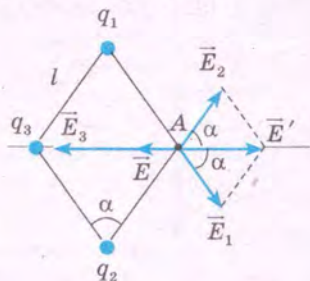
*Аналіз фізичної проблеми.* У четвертій вершині ромба кожен із трьох зарядів  $q_1$ ,  $q_2$  і  $q_3$  створює своє поле, і їх напруженості дорівнюють  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$  і  $\vec{E}_3$  відповідно. Зробивши пояснювальний рисунок і скориставшись принципом суперпозиції, визначимо напруженість поля в четвертій вершині ромба — у точці А.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Згідно

з принципом суперпозиції результуюча напруженість  $\vec{E}$  в точці А дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створених зарядами  $q_1$ ,  $q_2$  і  $q_3$ :  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$ .

Оскільки поле створюється системою точкових зарядів, то модуль напруженості поля кожного заряду розраховується за формулою

$$E = k \frac{|q|}{l^2}. \text{ Отже, } E_1 = E_2 = k \frac{|q|}{l^2}; E_3 = k \frac{|q_3|}{l^2}.$$



Модуль результуючої напруженості  $E'$  полів, створених зарядами  $q_1$  і  $q_2$ , дорівнює:  $E' = 2E_1 \cos \alpha$ , де  $\alpha = 60^\circ$ , оскільки ромб складений із рівносторонніх трикутників (див. рисунок). Тоді модуль напруженості  $E$  у четвертій вершині ромба (точці  $A$ ) дорівнює:

$$E = E_3 - E' = E_3 - 2E_1 \cos \alpha = k \frac{|q_3|}{l^2} - k \frac{2|q_1| \cos \alpha}{l^2} = k \frac{|q_3| - 2|q_1| \cos \alpha}{l^2}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[E] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{(\text{Кл} - \text{Кл})}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{Кл}}{\text{Кл}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}};$$

$$\{E\} = \frac{9 \cdot 10^9 (5 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5)}{625 \cdot 10^{-4}} = 0,36 \cdot 10^3, \quad E = 0,36 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл}.$$

**Відповідь:** напруженість поля в четвертій вершині ромба  $E = 0,36$  кН/Кл і напрямлена до заряду  $q_3$ .

### ! Підбиваємо підсумки

Електричне поле — це форма матерії, яка існує навколо заряджених тіл і виявляється в дії з деякою силою на будь-яке заряджене тіло, що перебуває в цьому полі.

Силову характеристику електричного поля — напруженість  $\vec{E}$ :

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

Теорема Остроградського — Гауса: потік вектора напруженості електростатичного поля у вакуумі через замкнену поверхню довільної форми ( $\Phi$ ) чисельно дорівнює алгебраїчній сумі значень  $q$  вільних електричних зарядів, розташованих у межах цієї поверхні, поділений

на електричну сталу:  $\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$ .

Напруженість електричного поля системи зарядів у даній точці простору дорівнює векторній сумі напруженостей полів, що їх окремо створили б ці заряди системи в даній точці:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$ .

Для графічного зображення полів використовують лінії напруженості електричного поля (силові лінії) — такі лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості електричного поля.

### ? Контрольні запитання

1. Що називають електричним полем?
2. Які об'єкти створюють електростатичне поле?
3. Що є силовою характеристикою електричного поля? За якою формулою її розраховують?
4. Чи залежить напруженість поля в даній точці від модуля пробного заряду, поміщеного в цю точку поля? від модуля заряду, який створює поле?
5. У чому полягає принцип суперпозиції полів?
6. Що називають лінією напруженості електричного поля?
7. Чи можуть лінії електричного поля перетинатися?
- ★ 8. Як формулюється теорема Остроградського — Гауса?

### ✎ Вправа № 2

1. Точковий електричний заряд  $8 \cdot 10^{-10}$  Кл розташований у деякій точці електричного поля. Визначте напруженість електричного поля в цій точці, якщо відомо, що поле діє на заряд із силою  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.
2. Напруженість поля точкового заряду на відстані 30 см від цього заряду дорівнює 600 Н/Кл. Чому дорівнює напруженість поля на відстані 10 см від заряду?



3. Два різноміненні точкові заряди, які мають однакове значення  $q$ , розміщені на відстані  $a$  один від одного. Знайдіть напруженість поля в точці  $A$ , яка ділить відрізок, що сполучає заряди, навпіл; у точках  $B$  і  $C$ , розташованих на продовженнях цього відрізка, на відстані  $\frac{a}{2}$  від кожного заряду (рис. 1).
4. У вершинах квадрата розташовані однакові за модулем позитивні точкові заряди. Чому дорівнює напруженість поля в центрі квадрата?
5. У дві вершини рівностороннього трикутника зі стороною  $0,1$  м поміщено точкові заряди  $+10^{-4}$  і  $-10^{-4}$  Кл. Знайдіть значення напруженості поля в третій вершині трикутника.
6. У вершинах квадрата зі стороною  $a$  розташовані три негативні й один позитивний заряд. Модулі всіх чотирьох зарядів однакові та дорівнюють  $q$ . Якою є напруженість поля, створеного зарядами, у центрі квадрата?
- ★ 7. Поле створене двома рівномірно зарядженими концентричними сферами (рис. 2). Визначте напруженість поля в точках  $O$ ,  $A$ ,  $B$ , якщо заряди сфер дорівнюють  $Q_1$  і  $Q_2$ , а відстані  $OA$  і  $OB$  дорівнюють  $l_1$  і  $l_2$  відповідно.

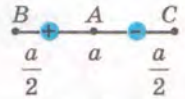


Рис. 1

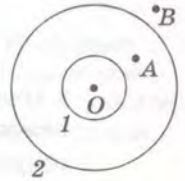


Рис. 2

## § 3. РОБОТА З ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗАРЯДУ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ.

### ★ ПОТЕНЦІАЛЬНА ЕНЕРГІЯ ВЗАЄМОДІЇ ТОЧКОВИХ ЗАРЯДІВ ★

?!

Якщо електростатичне поле діє з деякою силою на електрично заряджені тіла, то за певних умов воно здатне виконати роботу з переміщення цих тіл. При цьому робота електростатичних (кулонівських) сил (як і робота гравітаційних сил) не залежить від форми траєкторії, по якій переміщується тіло, і по замкненій траєкторії дорівнює нулю. У курсі фізики 10-го класу це твердження було доведено для гравітаційних сил. Зараз розглянемо його доведення для електростатичних сил.

1

### Як розрахувати роботу з переміщення заряду в однорідному електростатичному полі

Нехай в однорідному електричному полі напруженістю  $\vec{E}$  позитивний точковий заряд  $q$  переміщується із точки 1 з координатою  $x_1$  у точку 2 з координатою  $x_2$  (рис. 3.1).

Обчислимо роботу, яка буде виконана силами електростатичного поля з переміщення цього заряду. З курсу фізики 10-го класу ви знаєте, що робота  $A$ , яку виконує сила  $\vec{F}$  з переміщення тіла, дорівнює:

$$A = F s \cos \alpha,$$

де  $\vec{s}$  — переміщення тіла;  $\alpha$  — кут між векторами  $\vec{F}$  і  $\vec{s}$ .

У нашому випадку сила  $\vec{F}$ , що діє на заряд  $q$ , дорівнює  $\vec{F} = q\vec{E}$ , а  $s \cos \alpha = d = x_2 - x_1$  є проекцією вектора переміщення на напрямок силових

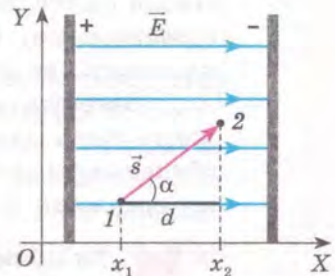


Рис. 3.1. До обчислення роботи сили однорідного електростатичного поля

ліній поля, який у даному випадку збігається з напрямком осі  $OX$ . Отже, робота сил однорідного електростатичного поля в ході переміщення електричного заряду з точки 1 у точку 2 ( $A_{1 \rightarrow 2}$ ) дорівнює:

$$A_{1 \rightarrow 2} = qE(x_2 - x_1), \quad \text{або}$$

$$A_{1 \rightarrow 2} = qEd \quad (1)$$

Зверніть увагу: якби в даному випадку заряд переміщувався не з точки 1 у точку 2, а навпаки, то знак роботи змінився б на протилежний, тобто робота виконувалась би проти сил поля. Той самий результат було б отримано, якби з точки 1 у точку 2 переміщувався не позитивний, а негативний заряд.

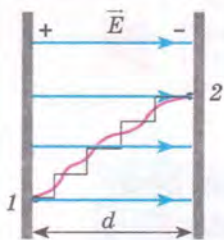


Рис. 3.2. До доведення потенціалності однорідного електростатичного поля

Формула (1) буде справджуватись у випадках руху заряду по будь-якій траєкторії. Справді, будь-яку лінію, що сполучає точки 1 і 2 в однорідному електростатичному полі, можна подати у вигляді ламаної, нескінченно малі ланки якої розташовані паралельно силовим лініям і перпендикулярно до них (рис. 3.2). У цьому випадку робота  $A_{1 \rightarrow 2}$ , яку виконують сили поля в ході переміщення заряду з точки 1 у точку 2, може бути подана у вигляді суми робіт:  $A_{1 \rightarrow 2} = A_{\parallel} + A_{\perp}$ , де  $A_{\parallel}$  і  $A_{\perp}$  — роботи, що виконуються силами поля на ділянках, відповідно паралельних силовим лініям і перпендикулярних до них. При цьому в разі переміщення заряду перпендикулярно до силових

ліній робота поля дорівнює нулю (оскільки  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , то

$\cos \alpha = 0$ ). Отже,  $A_{1 \rightarrow 2} = A_{\parallel} = qEd = qE(x_2 - x_1)$ , тобто робота сил однорідного електростатичного поля не залежить від форми траєкторії руху заряду в цьому полі, а визначається початковим та кінцевим положеннями заряду; у випадку замкненої траєкторії заряду робота сил поля дорівнює нулю.

Зазначені властивості має будь-яке електростатичне поле, а не тільки однорідне, тобто електростатичне поле є **потенціальним (консервативним)**. (Спробуйте довести це за допомогою закону збереження енергії, не використовуючи формул.)

Зверніть увагу: **силові лінії електростатичного поля не можуть бути замкненими**: якби замкнені силові лінії існували, то, обчислюючи роботу поля з переміщення заряду вздовж цих ліній, ми одержали б не нуль, а деяку додатну величину.

### ★ 2 Як обчислити роботу з переміщення заряду в полі, створеному точковим зарядом

Нехай поле створено позитивним точковим зарядом  $Q$ , розташованим у вакуумі, а позитивний пробний заряд  $q$  рухається в цьому полі



з точки 1 у точку 2 (рис. 3.3). Припустимо також, що спочатку заряд  $q$  рухався вздовж радіуса по ділянці  $1 \rightarrow 2'$ , а потім уздовж дуги по ділянці  $2' \rightarrow 2$ . Тоді робота  $A_{1 \rightarrow 2}$  поля при переміщенні заряду з точки 1 у точку 2 дорівнює сумі робіт  $A_{1 \rightarrow 2'}$  і  $A_{2' \rightarrow 2}$  на цих ділянках:  $A_{1 \rightarrow 2} = A_{1 \rightarrow 2'} + A_{2' \rightarrow 2}$ .

Очевидно, що робота  $A_{2' \rightarrow 2}$  дорівнює нулю, оскільки в цьому випадку вектор сили в будь-який момент часу перпендикулярний до вектора переміщення. А от визначення роботи  $A_{1 \rightarrow 2'}$  потребує використання спеціального прийому, адже сила  $\vec{F}$ , яка діє на заряд з боку електростатичного поля, у міру віддалення від джерела поля змінюється. Тому розіб'ємо весь шлях  $r$  заряду на ділянці  $1 \rightarrow 2'$  на дуже малі відрізки  $\Delta r$ , на яких силу можна вважати постійною. Тоді робота  $\Delta A$  поля на кожному відрізку  $\Delta r$  дорівнюватиме:  $\Delta A = F \Delta r = k \frac{Qq}{r^2} \cdot \Delta r$ .

Роботу поля на всьому шляху можна знайти як суму:

$A_{1 \rightarrow 2} = \sum_{r_1}^{r_2} \Delta A_i = \sum_{r_1}^{r_2} F_i \Delta r_i$ . Операція знаходження такої суми здійснюється за допомогою апарату вищої математики й називається *інтегруванням*. Використовуючи результат інтегрування, можна розрахувати роботу, яку виконують сили поля, створеного точковим зарядом  $Q$ , з переміщення в цьому полі пробного заряду  $q$  з точки 1 у точку 2:

$A_{1 \rightarrow 2} = k \frac{Qq}{r_1} - k \frac{Qq}{r_2}$ , де  $r_1$  і  $r_2$  — відстані від джерела поля до точки 1 і точки 2 відповідно. Звідси:

$$A_{1 \rightarrow 2} = kQq \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

Оскільки електростатичне поле є потенціальним, розрахунок роботи поля з переміщення пробного заряду по будь-якій іншій траєкторії дасть той самий результат.★

### 3 Як пов'язані робота і потенціальна енергія

Тіло, що перебуває в потенціальному полі, має потенціальну енергію, за рахунок зменшення якої сили поля виконують роботу. Тому заряджене тіло, поміщене в електростатичне поле, так само як і тіло, що перебуває в гравітаційному полі Землі, має потенціальну енергію. А різниця її значень у довільних точках 1 і 2 дорівнює роботі, яку повинні виконати сили поля, щоб перемістити заряджене тіло (заряд) із точки 1 у точку 2:  $A_{1 \rightarrow 2} = W_{n1} - W_{n2}$ . Отже:

$$A_{1 \rightarrow 2} = -\Delta W_n, \quad (3)$$

де  $W_{n1}$  і  $W_{n2}$  — потенціальні енергії заряду в точках 1 і 2 відповідно.

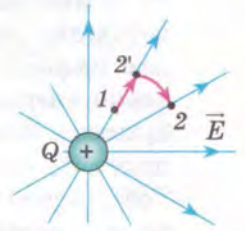


Рис. 3.3. До обчислення роботи сил з переміщення пробного заряду в полі, створеному точковим зарядом



Щоб дати коректне визначення потенціальної енергії заряду, необхідно домовитися про вибір нульової точки. Нагадаємо: *нульовою називається точка, про яку домовляються, що в ній потенціальна енергія заряду дорівнює нулю*. Зазвичай за нульову обирають будь-яку точку, що нескінченно віддалена від зарядів, які створюють поле:  $W_n \rightarrow 0$ , якщо  $r \rightarrow \infty$ . У такому випадку  $W_{n2} = 0$ , а  $A_{1 \rightarrow \infty} = W_{n1}$ . Тобто *потенціальна енергія заряду в даній точці електростатичного поля дорівнює роботі, яку має виконати поле для переміщення заряду з цієї точки в нескінченність*.

★ Порівнюючи формули (2) і (3) і вважаючи, що потенціальна енергія нескінченно віддалених один від одного зарядів дорівнює нулю ( $W_n \rightarrow 0$ , якщо  $r \rightarrow \infty$ ), можна одержати вираз для обчислення потенціальної енергії електростатичної взаємодії двох точкових зарядів  $Q$  і  $q$ , розташованих на відстані  $r$  один від одного:

$$W_n = k \frac{Qq}{r}$$

Таким чином, *енергія взаємодії двох точкових зарядів має зміст роботи, яку має виконати електростатичне поле для збільшення відстані між цими зарядами від  $r$  до нескінченності*.

Якщо система складається із зарядів одного знака, то внаслідок дії сил відштовхування заряди прагнуть відійти один від одного на нескінченно велику відстань. Тому система цих зарядів від самого початку має здатність виконати роботу, отже, її енергія є додатною; у результаті віддалення зарядів енергія системи зменшується до нуля (рис. 3.4, графік 1).

Якщо система складається із зарядів протилежних знаків, ситуація кардинально інакша, оскільки такі заряди притягуються. Тепер уже не сили поля, а зовнішні сили мають виконати додатну роботу, щоб віддалити заряди на нескінченно велику відстань. Тому

в ході віддалення зарядів один від одного енергія їхньої взаємодії буде збільшуватися до нуля, а отже, від самого початку вона була *від'ємною* (рис. 3.4, графік 2).★

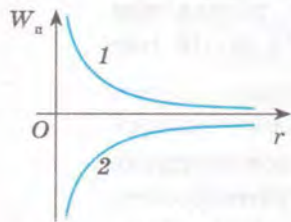


Рис. 3.4. Схематичні графіки залежності потенціальної енергії  $W_n$  взаємодії двох точкових зарядів від відстані  $r$  між ними: 1 — графік для зарядів одного знака; 2 — графік для зарядів протилежних знаків

### ! Підбиваємо підсумки

Електростатичне поле є потенціальним. В електростатичному полі робота з переміщення заряду  $q$  між двома довільними точками 1 і 2:

— не залежить від форми траєкторії, а залежить від положення цих точок;

— дорівнює зменшенню потенціальної енергії  $W_n$  заряду в цьому полі:  $A_{1 \rightarrow 2} = W_{n1} - W_{n2} = -\Delta W_n$ ;

— у випадку однорідного поля розраховується за формулою  $A_{1 \rightarrow 2} = qEd$ , де  $d$  — відстань, на яку перемістився заряд уздовж лінії напруженості електричного поля;



— ★ у випадку, коли поле створене точковим зарядом, розташованим у вакуумі, розраховується за формулою  $A_{1-2} = kQq \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ .

Енергія взаємодії двох точкових зарядів  $Q$  і  $q$  має зміст роботи, яку виконує електростатичне поле в ході збільшення відстані між цими зарядами від  $r$  до нескінченності:  $W_n = k \frac{Qq}{r}$ . ★



### Контрольні запитання

1. За якою формулою розраховують роботу сил однорідного поля за переміщення заряду в цьому полі? 2. Які поля називають потенціальними? 3. Доведіть, що однорідне електростатичне поле є потенціальним. ★ 4. Чому дорівнює робота електростатичного поля, створеного точковим зарядом, з переміщення пробного заряду з однієї точки поля в іншу? 5. За рахунок якої енергії сили електростатичного поля виконують роботу? ★ 6. Чому дорівнює потенціальна енергія взаємодії двох точкових зарядів? ★ 7. Що називають нульовою точкою потенціальної енергії? Яку точку найчастіше обирають за нульову?



### Вправа № 3

- В однорідному полі під кутом  $60^\circ$  до напрямку силових ліній переміщується заряд, значення якого  $5$  нКл. Визначте роботу поля та зміну потенціальної енергії заряду, якщо напруженість поля дорівнює  $30$  кН/Кл, а модуль переміщення заряду становить  $20$  см. Як зміняться одержані значення, якщо переміщуватися буде заряд, значення якого  $-5$  нКл?
- ★ Два однакові точкові заряди по  $50$  мкКл кожен перебувають на відстані  $1$  м один від одного. Яку роботу необхідно виконати, щоб зблизити їх до відстані  $0,5$  м?
- ★ Два нескінченно довгі паралельні плоскі пластини заряджені різнойменними зарядами з поверхневою густиною  $3 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>. Відстань між пластинами дорівнює  $1,5$  см. Визначте роботу, яку виконає поле, переміщуючи заряд  $2,5 \cdot 10^{-6}$  Кл з однієї пластини на другу.

## § 4. ПОТЕНЦІАЛ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ. РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ



У повсякденному житті ми доволі часто, особливо в суху погоду, зустрічаємось із ситуацією, коли, торкнувшись якогось тіла, відчуваємо неприємний удар. Як показує досвід, таких сюрпризів можна чекати від тіл, що мають високий потенціал. Саме з цим поняттям ви ознайомитесь у даному параграфі.



### 1 Що називають потенціалом електростатичного поля

**Потенціал**  $\varphi$  електростатичного поля в даній точці — це скалярна фізична величина, яка характеризує енергетичні властивості електростатичного поля й дорівнює відношенню потенціальної енергії  $W_n$  електричного заряду, поміщеного в дану точку поля, до значення  $q$  цього заряду:

$$\varphi = \frac{W_n}{q} \quad (1)$$

Одиниця потенціалу в СІ — вольт (В);  $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$ .

★ Нехай у полі, створеному у вакуумі точковим зарядом  $Q$ , на відстані  $r$  від  $Q$  перебуває пробний заряд  $q$ . Ви вже знаєте, що потенціальна енергія  $W_n$  взаємодії цих зарядів дорівнює:  $W_n = k \frac{Qq}{r}$ . Підставивши цей вираз у формулу (1), одержимо формулу для розрахунку потенціалу  $\varphi$  поля, створеного точковим зарядом  $Q$ , у точках, що розташовані на відстані  $r$  від заряду  $Q$ :

$$\varphi = k \frac{Q}{r}. \quad (2)$$

Нагадаємо, що значення потенціальної енергії залежить від вибору нульової точки. Таким чином, щоб однозначно визначити потенціал у будь-якій точці, спочатку необхідно обрати нульову точку. У формулі (2) за таку точку обрано «нескінченність», тобто точку, віддалену від заряду на дуже велику відстань:  $\varphi \rightarrow 0$ , якщо  $r \rightarrow \infty$ . Тому, якщо  $Q > 0$ , то  $\varphi > 0$ , а якщо  $Q < 0$ , то  $\varphi < 0$ .

Слід зауважити, що формула (2) справджується і для потенціалу поля рівномірно зарядженої сфери (або кулі) на відстанях, що більші за її радіус або дорівнюють йому, бо поле сфери (кулі) поза сферою (кулею) й на її поверхні збігається з полем точкового заряду, поміщеного в центр сфери (кулі).

Коли поле утворене кількома довільно розташованими зарядами  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , потенціал  $\varphi$  поля в будь-якій точці цього поля дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ , створюваних кожним зарядом окремо:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i$$

Дане твердження випливає з принципу суперпозиції полів.★

2

### Як визначають різницю потенціалів

Потенціал у певній точці може мати різні значення, зумовлені вибором нульової точки, тому практично важливу роль відіграє не сам потенціал, а різниця потенціалів, яка не залежить від вибору нульової точки. *Різниця потенціалів — це різниця значень потенціалу в початковій і кінцевій точках траєкторії руху заряду.* З'ясуємо, як визначають різницю потенціалів.

Коли в електростатичному полі заряд рухається з точки 1 у точку 2, це поле виконує роботу, яка дорівнює зміні потенціальної енергії заряду, взятій із протилежним знаком:  $A_{1 \rightarrow 2} = -\Delta W_n$ . Отже:

$$A_{1 \rightarrow 2} = W_{n1} - W_{n2}. \quad (3)$$

Якщо потенціальну енергію подати як  $W_n = q\varphi$  і цей вираз підставити у формулу (3), одержимо:  $A_{1 \rightarrow 2} = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Звідси:

$$\frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2, \text{ або } \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}.$$



**Різниця потенціалів** між двома точками — це скалярна фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи сил електростатичного поля з переміщення заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього заряду:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q} \quad (4)$$

Одиниця різниці потенціалів в СІ — **вольт (В)**. Різниця потенціалів між двома точками поля дорівнює 1 В, якщо для переміщення між ними заряду 1 Кл електричне поле виконує роботу 1 Дж.

Слід зазначити, що різницю потенціалів ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) у подібних випадках також називають *напругою (U)*.

Важливо не плутати зміну потенціалу  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  і різницю потенціалів (напругу)  $\varphi_1 - \varphi_2$ .

(Використовуючи визначення різниці потенціалів, спробуйте самостійно визначити фізичний зміст потенціалу поля.)

### 3 Як пов'язані напруженість електростатичного поля та різниця потенціалів

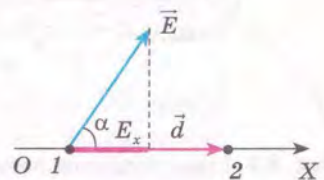
Розглянемо однорідне електричне поле на ділянці між будь-якими точками 1 і 2, що перебувають на відстані  $d$  одна від одної; нехай із точки 1 у точку 2 під дією поля переміщується заряд  $q$  (рис. 4.1). У цьому випадку виконувану полем роботу можна подати через різницю потенціалів ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) між цими точками:  $A_{1 \rightarrow 2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$  або через напруженість  $\vec{E}$  поля:  $A_{1 \rightarrow 2} = qEd \cos \alpha = qE_x d$ , де  $E_x = E \cos \alpha$  — проекція вектора  $\vec{E}$  на вісь  $OX$ , проведену через точки 1 і 2. Порівнюючи обидва вирази для роботи, маємо:  $q(\varphi_1 - \varphi_2) = qE_x d$ , звідки:  $\varphi_1 - \varphi_2 = E_x d$ , або

$$E_x = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} \quad (5)$$

З урахуванням співвідношення  $\varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi$  формула (5) набуває вигляду:  $E_x = -\frac{\Delta\varphi}{d}$ .

Очевидно, що аналогічні вирази можна написати для проекцій напруженості поля на інші осі координат. А у випадку, коли напрямки переміщення заряду та напруженості електричного поля збігаються, формула (5) набуває вигляду:  $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$  або  $E = \frac{U}{d}$ .

Одиницю напруженості поля в СІ — **вольт на метр**  $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$  — встановлено на підставі формули (5). Напруженість однорідного електричного поля дорівнює 1 В/м, якщо різниця потенціалів між точками, розташованими на відстані 1 м у цьому полі, дорівнює 1 В.



**Рис. 4.1.** До виведення формули зв'язку напруженості електростатичного поля та різниці потенціалів



Як уже говорилося, напруженість можна також подавати в **ньютон**ах на кулон  $\left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right)$ . Дійсно:  $1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \cdot \frac{1}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .

Аналіз формули (5) показує: чим менше змінюється потенціал електростатичного поля на даній відстані, тем меншою є напруженість цього поля; якщо ж потенціал не змінюється, то напруженість поля дорівнює нулю.

#### ★ 4 Які поверхні називають еквіпотенціальними

Для наочного уявлення електростатичного поля крім силових ліній використовують *еквіпотенціальні поверхні*.

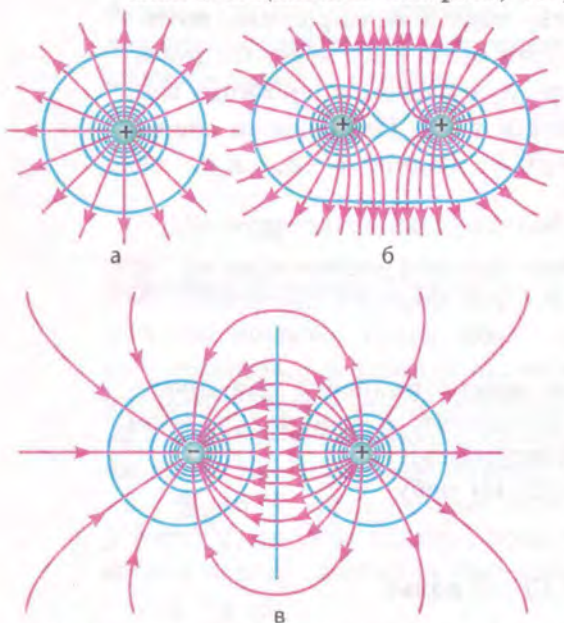
**Еквіпотенціальна поверхня** — це поверхня, в усіх точках якої потенціал електростатичного поля має однакове значення.

Для більшої наочності слід розглядати не одну еквіпотенціальну поверхню, а їх сукупність. Проте графічно зобразити сукупність складних поверхонь на одному рисунку дуже важко. Тому часто графічно зображують тільки перетини еквіпотенціальних поверхонь певною площиною або (що рівнозначно) — лінії, які являють собою множини точок з однаковим потенціалом у певній площині.

Еквіпотенціальні поверхні тісно пов'язані із силовими лініями електричного поля. Якщо електричний заряд переміщується по еквіпотенціальній поверхні, то робота поля дорівнює нулю, оскільки

$A = -q\Delta\phi$ , а на еквіпотенціальній поверхні  $\Delta\phi = 0$ . Цю роботу можна також подати через силу  $\vec{F}$ , що діє на заряд з боку електростатичного поля:  $A = Fscos\alpha$ , де  $s$  — модуль переміщення заряду;  $\alpha$  — кут між векторами  $\vec{F}$  і  $\vec{s}$ . Оскільки  $A = 0$ , а  $F \neq 0$  і  $s \neq 0$ , то  $cos\alpha = 0$ , отже,  $\alpha = 90^\circ$ . Це означає, що під час руху заряду вздовж еквіпотенціальної поверхні вектор сили  $\vec{F}$ , а отже, й вектор напруженості  $\vec{E}$  поля в будь-якій точці перпендикулярні до вектора переміщення  $\vec{s}$ . Таким чином, *силові лінії електростатичного поля перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь*. Крім того, скориставшись формулою (5), легко довести, що *силові лінії вказують напрямок максимального зменшення потенціалу електростатичного поля*.

На рис. 4.2 показано картини силових ліній і еквіпотенціальних поверхонь деяких простих електростатичних полів.



**Рис. 4.2.** Еквіпотенціальні поверхні (сині лінії) та силові лінії (червоні лінії) простих електричних полів, створених: *a* — позитивним точковим зарядом; *b* — двома рівними позитивними точковими зарядами; *c* — двома точковими зарядами, рівними за модулем і протилежними за знаком



Зауважимо, що симетрія еквіпотенціальних поверхонь повторює симетрію джерел поля. Наприклад, поле точкового заряду сферично симетричне, тож еквіпотенціальними поверхнями поля точкового заряду є концентричні сфери; у випадку однорідного поля еквіпотенціальні поверхні являють собою систему паралельних площин. ★

### 5 Учимося розв'язувати задачі

**Задача 1.** Електрон пройшов прискорювальну різницю потенціалів  $-300$  В. Визначте швидкість руху електрона, якщо початкова швидкість його руху дорівнювала нулю. Маса електрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, значення його заряду  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

$v$  — ?

Дано:  
 $\varphi_1 - \varphi_2 = -300$  В  
 $v_0 = 0$   
 $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг  
 $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл

*Аналіз фізичної проблеми.* Оскільки знак заряду електрона є від'ємним і початкова швидкість його руху дорівнює нулю, то під дією сил поля електрон рухатиметься в напрямку, протилежному напрямку силових ліній поля, тобто в напрямку збільшення потенціалу. Таким чином, поле буде виконувати додатну роботу, в результаті чого кінетична енергія електрона і, відповідно, швидкість його руху збільшуватимуться.

Отже, скориставшись формулою для розрахунку роботи електростатичного поля, яка подана через різницю потенціалів, і теоремою про кінетичну енергію, знайдемо шукану величину.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Згідно з теоремою про кінетичну енергію:  $A = \Delta W_k = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$ , де  $A$  — робота сил поля, яка дорівнює  $A = e(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Таким чином,  $e(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{mv^2}{2}$ , звідки  $v = \sqrt{\frac{2e(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{Кл}(\text{В} - \text{В})}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}}{\text{Кл} \cdot \text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\{v\} = \sqrt{\frac{2 \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot (-300)}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 1,0 \cdot 10^7, \quad v \approx 1,0 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$$

*Відповідь:* швидкість руху електрона, що пройшов прискорювальну різницю потенціалів,  $v \approx 1,0 \cdot 10^7$  м/с.

**★Задача 2.** На відстані 50 см від поверхні кулі, рівномірно зарядженої до потенціалу 25 кВ, розташований точковий заряд  $1,0 \cdot 10^{-8}$  Кл. Яку роботу необхідно виконати, щоб зменшити відстань між кулею і зарядом до 20 см? Радіус кулі — 9,0 см.

$A'$  — ?

Дано:  
 $d_1 = 0,5$  м  
 $\varphi = 25 \cdot 10^3$  В  
 $q = 1,0 \cdot 10^{-8}$  Кл  
 $d_2 = 0,2$  м  
 $R = 9,0 \cdot 10^{-2}$  м

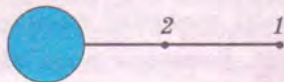
*Аналіз фізичної проблеми.* Вважатимемо, що точковий заряд переміщується в полі, створеному зарядженою кулею. Куля і заряд мають заряди одного знака, тому, щоб перемістити заряд до кулі, необхідно прикласти зовнішню силу, робота  $A'$  якої дорівнює:  $A' = -A$ , де  $A$  — робота сил поля.

З огляду на те що формула для розрахунку потенціалу поля, створеного рівномірно зарядженою кулею,



має той самий вигляд, що й для потенціалу поля, створеного точковим зарядом, можемо шляхом нескладних математичних перетворень знайти значення роботи  $A'$  зовнішньої сили.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.*  
Нехай точковий заряд переміщується з точки 1 у точку 2 (див. рисунок). Роботу зовнішньої сили з переміщення заряду знайдемо за формулою:  $A' = q(\varphi_2 - \varphi_1)$  (1).



Ураховуючи, що потенціали поля, утвореного зарядженою кулею, у точках 1 і 2 дорівнюють відповідно  $\varphi_1 = k \frac{Q}{(R+d_1)}$  і  $\varphi_2 = k \frac{Q}{(R+d_2)}$ ,

перепишемо формулу (1) у вигляді:  $A' = kqQ \left( \frac{1}{R+d_2} - \frac{1}{R+d_1} \right)$  (2).

Заряд кулі знайдемо з формули потенціалу точки на поверхні кулі:  $\varphi = k \frac{Q}{R}$ . Отже,  $Q = \frac{R\varphi}{k}$  (3).

Підставивши вираз (3) у формулу (2), маємо:  $A' = \varphi Rq \left( \frac{1}{R+d_2} - \frac{1}{R+d_1} \right)$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[A'] = \text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл} \left( \frac{1}{\text{м}} - \frac{1}{\text{м}} \right) = \frac{\text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл}}{\text{м}} = \text{В} \cdot \text{Кл} = \text{Дж};$$

$$\{A'\} = 25 \cdot 10^3 \cdot 9 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-8} \left( \frac{1}{0,29} - \frac{1}{0,59} \right) \approx 39 \cdot 10^{-6}, \quad A' \approx 39 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}.$$

**Відповідь:** зовнішня сила має виконати роботу  $A' \approx 39$  мкДж. ★

**Задача 3.** Однорідне електростатичне поле створене двома паралельними пластинами довжиною по 3 см. Електрон влітає в це поле зі швидкістю руху  $2 \cdot 10^6$  м/с, напрямленою паралельно пластинам. На яку відстань по вертикалі зміститься електрон до моменту виходу з простору між пластинами, якщо на пластини подано напругу 4,8 В, а відстань між ними 16 мм? Маса електрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, модуль його заряду  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

$h$  — ?

Дано:

$$l_1 = l_2 = l = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$v_0 = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$U = 4,8 \text{ В}$$

$$d = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

*Аналіз фізичної проблеми.* Протягом усього часу руху електрона між пластинами на нього діють сила тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  та електрична сила  $\vec{F}$ , напрямлені вертикально вниз. Дією сили тяжіння можна знехтувати, оскільки її значення в багато разів менше від значення електричної сили. Таким чином, електрон під дією сили  $\vec{F}$  буде рухатися рівноприскорено по параболічній траєкторії в бік позитивно зарядженої пластини. Подавши складний рух електрона як результат додавання двох простих рухів: рівномірного — вздовж осі  $OX$  і рівноприскореного — вздовж осі  $OY$ , записавши відповідні рівняння кінематики та формули електростатики, знайдемо шукані величини.



*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Зробимо пояснювальний рисунок, на якому покажемо осі координат, початкове та кінцеве положення електрона, напрямок його початкової швидкості та прискорення руху.

1) Запишемо рівняння координати й конкретизуємо їх для даної задачі:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \\ y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}. \end{cases}$$

З урахуванням того, що  $x = l$ ;  $x_0 = 0$ ;  $v_{0x} = v_0$ ;  $a_x = 0$ ;  $y = h$ ;  $y_0 = 0$ ;  $v_{0y} = 0$ ;  $a_y = a$ , маємо:

$$l = v_0 t, \quad (1)$$

$$h = \frac{at^2}{2}. \quad (2)$$

Визначимо з рівняння (1) час руху:  $t = \frac{l}{v_0}$ ; підставимо його в рівняння (2):  $h = \frac{al^2}{2v_0^2}$ .

Під час руху електрона між пластинами на нього діє електрична сила:  $F = |e|E = |e|\frac{U}{d}$  (3). Під дією цієї сили електрон набуває прискорення  $a$ , яке за другим законом Ньютона дорівнює  $a = \frac{F}{m}$ , або з урахуванням формули (3):  $a = \frac{|e|U}{md}$ .

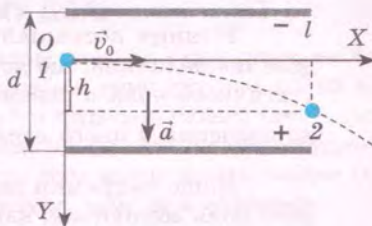
Знаючи прискорення руху електрона, визначимо відстань, на яку зміститься електрон за час руху між пластинами:  $h = \frac{|e|Ul^2}{2mdv_0^2}$ .

Визначимо значення шуканих величин:

$$[h] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Н}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м};$$

$$\{h\} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,8 \cdot 9 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 16 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{12}} \approx 6 \cdot 10^{-3}, \quad h \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

*Відповідь:* на момент виходу з простору між пластинами електрон зміститься на відстань  $h \approx 6$  мм.



### Підбиваємо підсумки

Енергетичною характеристикою електростатичного поля є потенціал  $\varphi$ , який визначається відношенням потенціальної енергії  $W_n$  електричного заряду, поміщеного в дану точку електростатичного поля, до значення  $q$  цього заряду:  $\varphi = \frac{W_n}{q}$ . Одиниця потенціалу в СІ — вольт (В);  $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$ .

★ Потенціал поля, створеного у вакуумі точковим зарядом  $Q$ , у точках, що розташовані на відстані  $r$  від цього заряду:  $\varphi = k \frac{Q}{r}$ . Потенціал поля, створеного системою зарядів, визначається виразом

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i. \star$$

Різниця потенціалів між двома точками  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  — скалярна фізична величина, що дорівнює відношенню роботи  $A_{1 \rightarrow 2}$  сил електростатичного поля з переміщення заряду з початкової точки в кінцеву до значення  $q$  цього заряду:  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}$ .

Якщо напрямки переміщення заряду та напруженості електричного поля збігаються, напруженість електростатичного поля пов'язана з різницею потенціалів  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  співвідношенням  $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$ .

★ Для наочного уявлення електростатичного поля крім силових ліній використовують екіпотенціальні поверхні — поверхні з однаковим потенціалом.★



### Контрольні запитання

1. Що називають потенціалом електростатичного поля? Якою є його одиниця в СІ?
2. Які фізичні величини є характеристиками електростатичного поля?
3. Як пов'язані робота з переміщення заряду в електростатичному полі та потенціали в початковій і кінцевій точках траєкторії руху заряду? ★
4. Виведіть формулу для розрахунку потенціалу поля точкового заряду. ★
5. Потенціал поля яких об'єктів і за яких умов можна розрахувати за формулою потенціалу поля точкового заряду? ★
6. Що таке різниця потенціалів? ★
7. Яким є співвідношення між напруженістю поля та різницею потенціалів? ★
8. Які поверхні називають екіпотенціальними? ★
9. Як розташовані лінії напруженості поля відносно екіпотенціальних поверхонь? ★
10. Що являють собою екіпотенціальні поверхні поля точкового заряду? ★
11. Куди напрямлений вектор напруженості поля, якщо його потенціал зростає в напрямку знизу вгору?



### Вправа № 4

1. В електростатичному полі із точки з потенціалом 450 В у точку з потенціалом 900 В рухається негативно заряджена частинка. Визначте модуль заряду частинки, якщо в ході її переміщення електричне поле виконує роботу 1,8 мкДж.
2. Дві паралельні пластини, розташовані на відстані 10 см одна від одної, заряджені до різниці потенціалів 1 кВ. Визначте силу, яка діятиме з боку електричного поля на заряд  $1 \cdot 10^{-4}$  Кл, поміщений між пластинами.
3. Електрон, що рухається зі швидкістю  $3 \cdot 10^7$  м/с, влітає в однорідне електричне поле напруженістю  $1 \cdot 10^3$  В/м. Визначте різницю потенціалів, яку необхідно пройти електрону, щоб швидкість його руху становила  $1 \cdot 10^7$  м/с, а також інтервал часу, за який електрон зупиниться. Вектори напруженості поля та швидкості руху електрона напрямлені однаково.
4. Електрон влітає в однорідне електростатичне поле напруженістю 600 В/см, створене двома однаковими горизонтальними пластинами. Швидкість руху електрона дорівнює  $2 \cdot 10^7$  м/с і напрямлена паралельно пластинам. Визначте довжину пластин, якщо до моменту виходу з простору між пластинами електрон змістився по вертикалі на 5 мм.



- ★ 5. Електричне поле створене рівномірно зарядженою сферою радіусом 5 см. По радіусу між точками, розташованими на відстанях 12 і 15 см від центра сфери, рухається електрон. При цьому швидкість його руху змінюється від  $2 \cdot 10^5$  до  $2 \cdot 10^6$  м/с. Знайдіть поверхневу густину заряду сфери.

## § 5. ПРОВІДНИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ

?! Проводячи аналогії між гравітаційною та електростатичною взаємодіями, ми знаходили якісь спільні для них властивості. Однак між ними існують і суттєві відмінності. Одна з них (решту, сподіваємося, ви без труднощів назвете самі) — всепроникність гравітаційного поля. Справді, прихисток від сили тяжіння побудувати неможливо. А от від дії сил електростатичного поля можна досить надійно сховатися, побудувавши захист із провідника. З'ясуємо, чому це є можливим.

### 1 У чому полягають особливості внутрішньої будови провідників

Будь-яка речовина складається з молекул, атомів або йонів, які, у свою чергу, містять заряджені частинки. Тому, якщо тіло помістити в електричне поле, це спричинить певні зміни в речовині, з якої тіло виготовлене. Зрозуміло, що ці зміни залежать від властивостей самої речовини. За електричними властивостями речовини розділяють на *провідники, діелектрики та напівпровідники*.

*Провідниками називають речовини, здатні проводити електричний струм.* Щоб речовина була провідником, вона має містити заряджені частинки, здатні вільно пересуватися. Типові представники провідників — метали. Нагадаємо: внутрішня структура металів являє собою утворену позитивно зарядженими йонами кристалічну ґратку, яка перебуває в «газі» вільних електронів. Саме наявність вільних електронів зумовлює провідні властивості металів.

Провідниками також є електроліти (наприклад, водні розчини солей, кислот, лугів), а за деяких умов — і газу. В електролітах вільними зарядженими частинками є позитивні та негативні йони, а в газах ще й електрони.

### 2 Якими є електростатичні властивості провідників\*

Провідники, поміщені в електростатичне поле, виявляють такі властивості.

*Властивість 1. Напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю.*

Розглянемо процеси, що відбуваються в провіднику і приводять до знищення електростатичного поля всередині нього. Для цього помістимо провідник в електростатичне поле (рис. 5.1). Під дією електричних сил рух вільних електронів стане напрямленим. Якщо електричне поле не надто велике,

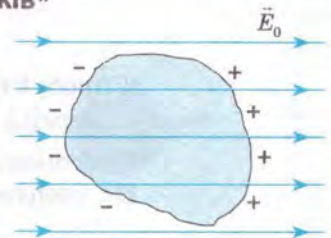
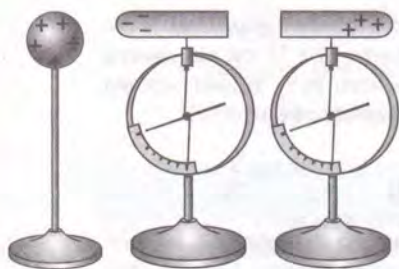


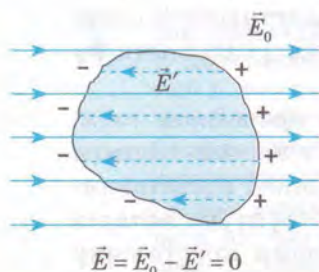
Рис. 5.1. Зовнішнє електростатичне поле індукуює на поверхні провідника заряди протилежних знаків

\* У даному та подібних випадках під провідником будемо розуміти провідне тіло, виготовлене з металу.





**Рис. 5.2.** Дослід, що демонструє явище електростатичної індукції. Якщо два металеві циліндри, які перебувають у тісному контакті один з одним, роз'єднати за присутності поряд з ними зарядженої кулі, то кожен циліндр виявиться зарядженим



**Рис. 5.3.** Перерозподіл зарядів у провіднику відбувається доти, доки напруженість  $\vec{E}'$  поля індуктованих зарядів не стане дорівнювати напруженості  $\vec{E}_0$  індуктованого поля

то електрони не можуть залишити провідник і накопичуються в певній області його поверхні, — ця область поверхні провідника набуває негативного заряду; протилежна — позитивного (його створюють позитивні йони, що там залишилися). Таким чином, на поверхні провідника з'являються *наведені (індуковані) електричні заряди*, при цьому сумарний заряд провідника, звичайно, залишається незмінним (рис. 5.2). Описане явище називають *електростатичною індукцією*.

**Електростатична індукція** — це явище перерозподілу електричних зарядів у провіднику, поміщеному в електростатичне поле, у результаті чого на поверхні провідника виникають електричні заряди.

Індуковані заряди, що виникли, створюють власне електричне поле напруженості  $\vec{E}'$ , яка напрямлена в бік, протилежний напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля (рис. 5.3). Процес перерозподілу зарядів у провіднику триватиме до того моменту, коли створюване індуктованими зарядами поле всередині провідника повністю компенсує зовнішнє поле. За дуже малий інтервал часу *напруженість  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$  результуючого поля всередині провідника дорівнюватиме нулю*. Справді, якби це було не так, то під дією поля електрони весь час напрямлено рухалися б, тобто в провіднику існував би електричний струм. Але це суперечить умові електростатичності.

(Спробуйте довести *властивість 1* виходячи із закону збереження енергії.)

**Властивість 2.** Поверхня провідника є екіпотенціальною.

Це твердження є прямим наслідком співвідношення, що існує між напруженістю поля та різницею потенціалів:  $E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d}$ . Якщо напруженість поля всередині провідника дорівнює нулю, то різниця потенціалів також дорівнює нулю, тому потенціали у всіх точках провідника однакові. Очевидно, що *точки поверхні провідника також мають однакові потенціали, тобто поверхня провідника є екіпотенціальною*.



**Властивість 3.** Увесь статичний заряд провідника зосереджений на його поверхні.

Дана властивість є наслідком закону Кулона та властивості однопольових зарядів відштовхуватися. (Цікаво, що першим, хто експериментально довів цю властивість, був не Шарль Кулон, а англієць Генрі Кавендіш (1731–1810), причому за 14 років до відкриття Кулона.)

★ Доведемо властивість 3 методом від протилежного. Припустимо, що в деякій частині провідника існує заряджена ділянка. Оточимо цю ділянку замкненою поверхнею  $S$ . Згідно з теоремою Остроградського — Гаусса потік вектора напруженості електричного поля через цю поверхню відмінний від нуля і прямо пропорційний заряду, що міститься всередині поверхні. Отже, в точках цієї поверхні напруженість електростатичного поля теж має бути відмінною від нуля, але це суперечить властивості 1. Отже, всередині провідника електричний заряд дорівнює нулю.★

**Властивість 4.** Вектор напруженості електростатичного поля провідника напрямлений перпендикулярно до його поверхні.

Доведемо властивість 4 методом від протилежного.

Припустимо, що в певній точці поверхні провідника вектор  $\vec{E}$  напруженості електростатичного поля напрямлений під деяким кутом до поверхні провідника. Розкладемо цей вектор на два складники: нормальний  $\vec{E}_n$ , перпендикулярний до поверхні, і тангенціальний  $\vec{E}_t$ , напрямлений по дотичній до поверхні (рис. 5.4).

Зрозуміло, що під дією  $\vec{E}_t$  електрони напрямлено рухатимуться по поверхні, але це означає, що по поверхні провідника тече електричний струм, а це, у свою чергу, суперечить електростатичності. Отже, у випадку рівноваги зарядів:  $\vec{E}_t = 0$ , а  $\vec{E} = \vec{E}_n$ .

**Властивість 5.** Електричні заряди розподіляються по поверхні провідника так, що напруженість електростатичного поля провідника виявляється більшою на виступах провідника і меншою на його западинах.

Якісно цю властивість можна пояснити так. Нехай існує заряджений провідник неправильної форми (рис. 5.5). Нагадаємо, що будь-яке заряджене тіло на дуже великих відстанях від нього можна вважати точковим зарядом, екіпотенціальні поверхні поля якого мають вигляд концентричних сфер. Таким чином, у міру віддалення

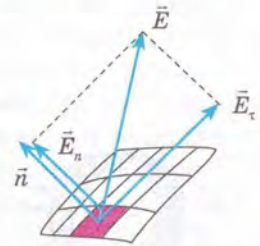


Рис. 5.4. Доведення від протилежного перпендикулярності вектора  $\vec{E}$  напруженості електростатичного поля до поверхні провідника. Насправді  $\vec{E}_t = 0$ ,  $\vec{E} = \vec{E}_n$ , тобто напруженість  $\vec{E}$  напрямлена перпендикулярно до поверхні провідника

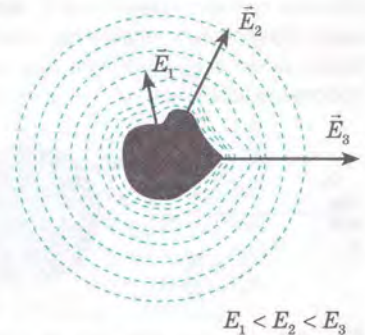
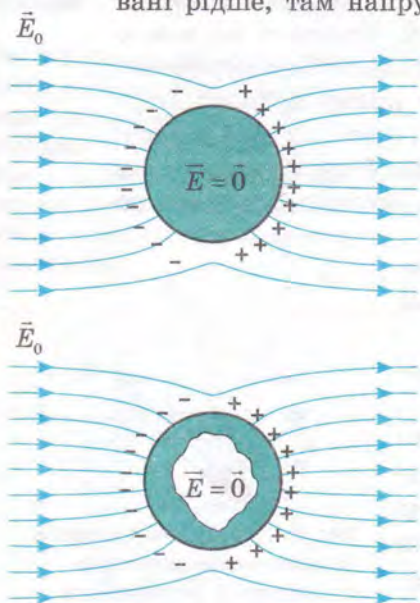


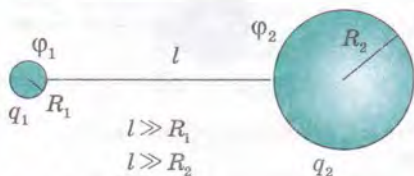
Рис. 5.5. Напруженість електростатичного поля провідника більша на виступах провідника і менша на його западинах



від провідника еквіпотенціальні поверхні, що поблизу провідника повторюють форму його поверхні, мають поступово й плавно набувати обрисів сфери. Але це можливе тільки в тому випадку, якщо еквіпотенціальні поверхні будуть згущені біля виступів провідника й розріджені біля западин (див. рис. 5.5). Там, де еквіпотенціальні поверхні розташовані густіше, напруженість електростатичного поля, яка перпендикулярна до поверхні провідника, більша, а де розташовані рідше, там напруженість поля менша.



**Рис. 5.6.** Електростатичний захист. Під дією зовнішнього поля на поверхні кулі виникають індуковані заряди, поле яких екранує зовнішнє електричне поле: напруженість поля всередині кулі стає рівною нулю (а). Картина силових ліній поля та розподіл індукованих зарядів не змінюється, якщо всередині кулі вирізати порожнину (б)



**Рис. 5.7.** Заряд  $Q$ , переданий системі з двох куль, з'єднаних провідником, розподілиться між кулями таким чином, що їхні потенціали  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  будуть рівними

### 3 Як застосовують електростатичні властивості провідників

Наведемо деякі приклади використання розглянутих електростатичних властивостей провідників.

**Електростатичний захист.** Іноді виникає необхідність ізолювати від впливу зовнішніх електричних полів деякі тіла, прилади. Очевидно, що для цього їх необхідно помістити всередину металевого корпусу, оскільки зовнішнє електричне поле викликає появу індукованих зарядів тільки на поверхні провідника, а поле всередині провідника дорівнює нулю (рис. 5.6). Кажуть, що провідна оболонка *екранує* зовнішнє електричне поле. Аналогічний ефект досягається навіть у тому випадку, якщо суцільну провідну оболонку замінити на металеву сітку з дрібними гніздами: електричне поле проникає за сітку на глибину порядку розмірів гнізда сітки.

**Заземлення.** Щоб розрядити невелике заряджене тіло, його необхідно з'єднати провідником із тілом більших розмірів, адже на тілі більших розмірів накопичується більший електричний заряд. Щоб обґрунтувати це твердження, розглянемо дві з'єднані провідником провідні кулі з радіусами  $R_1$  і  $R_2$ . Кулі перебувають на великій відстані  $l$  одна від одної ( $l \gg R_1$ ,  $l \gg R_2$ ) (рис. 5.7). Очевидно, що електричний заряд  $Q$ , переданий системі, розподілиться між кулями таким чином, що їхні потенціали будуть рівними ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ), а сумарний заряд системи не зміниться ( $Q = q_1 + q_2$ , де  $q_1$  і  $q_2$  — заряд першої та другої кулі відповідно). Відстань між кулями значно більша за їхні радіуси, тому, розраховуючи потенціал кожної кулі,



взаємним впливом їхніх полів можна знехтувати і скористатися формулою для потенціалу  $\varphi$  окремої кулі:

$$\varphi_1 = k \frac{q_1}{R_1}; \quad \varphi_2 = k \frac{q_2}{R_2}.$$

Оскільки  $\varphi_1 = \varphi_2$ , одержимо, що заряди куль прямо пропорційні їхнім радіусам:  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_1}{R_2}$ , або:

$$q_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} Q; \quad q_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} Q. \quad (1)$$

Таким чином, якщо  $R_2 \gg R_1$ , то з формул (1) випливає:

$$q_1 \approx 0; \quad q_2 \approx Q. \quad (2)$$

Отже, якщо одна із заряджених куль значно більша за другу, то після їх з'єднання практично весь заряд виявиться на більшій кулі. Цей висновок справджується і для провідних тіл довільної форми. Так, якщо до зарядженого електроскопа торкнутися рукою, заряд перерозподілиться між електроскопом і тілом людини, але оскільки людина значно більша за розмір пристрою, то можна вважати, що весь заряд перейде на людину. Часто як тіло великих розмірів використовують усю земну кулю: прилади, на яких не повинен збиратись електричний заряд, «заземлюють» — приєднують до масивного провідника, закопаного в землю. Вважають, що потенціал заземленого тіла дорівнює нулю і рівності (2) виконуються точно.

### Підбиваємо підсумки

Провідниками називають речовини, здатні проводити електричний струм. Провідник, поміщений в електростатичне поле, має такі властивості: напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю; поверхня провідника є екіпотенціальною; увесь статичний заряд провідника зосереджений тільки на його поверхні; вектор напруженості електростатичного поля провідника напрямлений перпендикулярно до його поверхні; електричні заряди розподіляються по поверхні провідника так, що напруженість електростатичного поля провідника виявляється більшою на виступах провідника і меншою на його западинах.

На електростатичних властивостях провідників ґрунтуються електростатичний захист і заземлення.

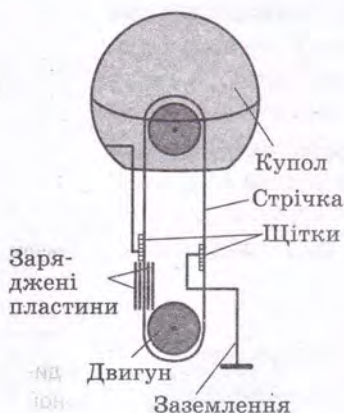
### Контрольні запитання

1. Які речовини називають провідниками? 2. Що таке електростатична індукція? 3. Назвіть основні електростатичні властивості провідників. 4. Чому напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю? 5. Доведіть, що всередині провідника всі точки мають однаковий потенціал. 6. Як захищають обладнання та прилади від впливу електричного поля? 7. Навіщо застосовують заземлення?

### Вправа № 5

1. До кондуктора зарядженого електромметра підносять (не торкаючись до нього) незаряджене провідне тіло. Як і чому зміниться відхилення стрілки електромметра? Відповідь перевірте експериментально.





2. Незаряджена гільза з фольги висить на шовковій нитці. До неї наближають заряджену паличку. Опишіть і поясніть подальшу поведінку гільзи.
3. Як за допомогою негативно зарядженої металевої кульки, не зменшуючи її заряду, негативно зарядити іншу таку саму кульку?
4. Яку електростатичну властивість провідника використовував Б. Франклін, який винайшов ефективний засіб захисту від удару блискавки?
5. На рисунку зображено принципову схему деякого обладнання. Як ви гадаєте, яке призначення має це обладнання і в чому полягає принцип його дії?
- ★ 6. Металеву кульку, яка має радіус  $r$  і заряд  $q$ , поміщено в центр незарядженої металевої сфери, внутрішній і зовнішній радіуси якої дорівнюють  $R_1$  і  $R_2$  відповідно. Знайдіть напруженість і потенціал електростатичного поля, створеного системою, якщо: а) сфера не заземлена; б) сфера заземлена.

## § 6. ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ. ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ



Формулюючи закон Кулона або одержуючи вирази для розрахунку напруженостей електростатичних полів, створених різними зарядженими тілами, ми щоразу зазначали, що тіла розташовані у вакуумі. Неважко здогадатися, що речовина, внесена в електростатичне поле, може не тільки суттєво змінити його, але й навіть знищити. Так, власне, й відбувається в металевих провідниках. Проте існують речовини, які не є провідниками, — їх М. Фарадей назвав *діелектриками*. Із цього параграфа ви дізнаєтесь, як поле впливає на діелектрик і як діелектрик впливає на поле.



### Якими є особливості внутрішньої будови діелектриків

*Діелектриками називають речовини, які погано проводять електричний струм:* за звичайних умов в них практично відсутні заряди, що можуть вільно пересуватися. Залежно від хімічної будови діелектрики поділяють на три такі групи.



**Рис. 6.1.** Схематичне зображення неполярного атома. За відсутності зовнішнього електростатичного поля електронна хмара розташована симетрично відносно атомного ядра

1. *Неполярні діелектрики* — речовини, молекули (атоми) яких неполярні: у них за відсутності зовнішнього електростатичного поля центри мас позитивних і негативних зарядів збігаються (рис. 6.1). Типовими прикладами таких речовин є одноатомні інертні гази (аргон, ксенон); гази, що складаються із симетричних двоатомних молекул (кисень, водень, азот); деякі органічні рідини (олії, бензини); з твердих тіл — пластмаси.

2. *Полярні діелектрики* — речовини, молекули яких полярні: у них за відсутності зовнішнього електростатичного поля центри мас позитивних і негативних зарядів не збігаються, тобто електронні хмари в молекулах зміщені до одного з атомів. Прикладом полярного діелектрика є вода ( $H_2O$ ), у молекул якої



електронні хмари зсунуті до атома Оксигену. Молекули води (рис. 6.2), як і молекули інших полярних діелектриків, являють собою мікроскопічні *електричні диполі*.

**Електричний диполь** — електронейтральна сукупність двох зарядів, рівних за модулем і протилежних за знаком, розташованих на деякій відстані один від одного (рис. 6.3).

За відсутності зовнішнього електростатичного поля дипольні молекули завдяки тепловому руху розташовуються безладно. Тому геометрична сума напруженостей полів, які створені дипольними молекулами діелектрика, дорівнює нулю.

3. *Йонні діелектрики* — речовини, які мають йонну структуру.

Серед них солі та луги: натрій хлорид ( $\text{NaCl}$ ), калій хлорид ( $\text{KCl}$ ) тощо. Кристалічні ґратки багатьох йонних діелектриків можна розглядати як такі, що складаються з двох вставлених одна в одну підґраток, кожна з яких утворена йонами одного знака. За відсутності зовнішнього поля кожна комірка кристала і кристал у цілому є електронейтральними.

## 2 Як електростатичне поле впливає на діелектрик

Внесення діелектрика в зовнішнє електростатичне поле спричиняє *поляризацію діелектрика*. Механізми поляризації різних типів діелектриків різні, оскільки визначаються характером хімічного зв'язку в діелектриках.

Розглянемо випадки поляризації *однорідного діелектрика в однорідному електростатичному полі*. Якщо йдеться про поляризацію неоднорідного діелектрика або про неоднорідне поле, задача ускладнюється і її розгляд виходить за рамки курсу фізики 11-го класу.

У процесі поляризації *неполярних* діелектриків виявляється *електронний (деформаційний) механізм*. Під дією зовнішнього електростатичного поля молекули неполярних діелектриків поляризуються: позитивні заряди зміщуються в напрямку вектора напруженості  $\vec{E}_0$  цього поля, а негативні — у протилежному напрямку (рис. 6.4, а). Зрештою молекули перетворюються

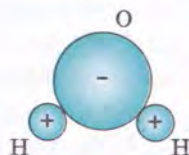


Рис. 6.2. Схематичне зображення молекули води — полярної молекули



Рис. 6.3. Електричний диполь — модель полярної молекули

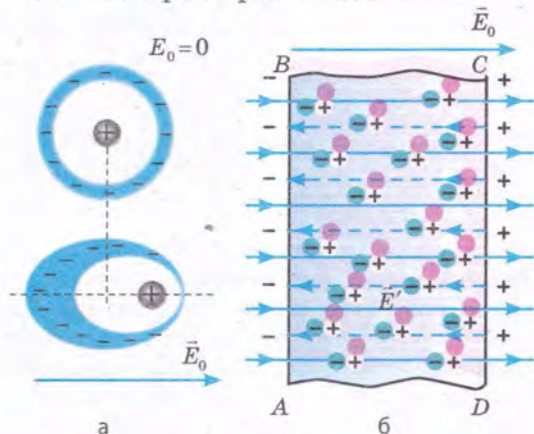
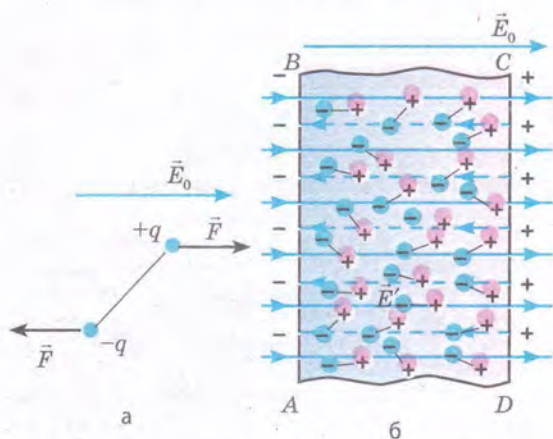


Рис. 6.4. Неполярний діелектрик в електростатичному полі напруженістю  $\vec{E}_0$ . Унаслідок поляризації молекули неполярного діелектрика перетворюються на диполі, осі яких розташовані вздовж ліній напруженості  $\vec{E}_0$  (а). У результаті на поверхнях  $AB$  і  $CD$  з'являються зв'язані заряди, що утворюють своє поле — напруженістю  $\vec{E}'$  (б)



на електричні диполі, розташовані ланцюжками вздовж силових ліній зовнішнього поля. У результаті на поверхнях  $AB$  і  $CD$  з'являються некомпенсовані зв'язані\* заряди протилежних знаків, що утворюють своє поле, напруженість  $\vec{E}'$  якого напрямлена назустріч напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля (рис. 6.4, б).

У процесі поляризації *полярних* діелектриків виникає *орієнтаційна поляризація*. Під дією зовнішнього електричного поля дипольні молекули діелектрика намагаються повернутися так, щоб їхні осі були розташовані вздовж силових ліній поля. Проте тепловий рух молекул, який відіграє роль дезорієнтаційного чинника, перешкоджає цьому процесу. Тому виникає лише часткове впорядкування дипольних молекул (рис. 6.5), ступінь якого зростає зі збільшенням напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля та зі зменшенням температури діелектрика. Наявність упорядкування в розташуванні молекул приводить до того, що на поверхнях  $AB$  і  $CD$  з'являються некомпенсовані зв'язані заряди протилежних знаків. Ці заряди утворюють своє поле напруженістю  $\vec{E}'$ , напрямом якої протилежний напрямку напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля.



**Рис. 6.5.** Полярний діелектрик в електростатичному полі напруженістю  $\vec{E}_0$ . З боку поля на кожну дипольну молекулу діє пара сил — вони створюють момент сил, який орієнтує хаотично розташовані молекули, повертаючи їх уздовж ліній напруженості  $\vec{E}_0$  (а). У результаті на поверхнях  $AB$  і  $CD$  з'являються зв'язані заряди, які утворюють своє поле — напруженістю  $\vec{E}'$  (б)

Зауважимо, що в полярних діелектриках наявний і електронний механізм поляризації, тобто під дією електричного поля відбувається зсув зарядів у молекулах. Однак ефект орієнтації на кілька порядків перевершує електронний ефект, тому останнім часто нехтують.

У процесі поляризації *йонних* діелектриків спостерігається *йонна поляризація*. Унаслідок дії зовнішнього поля йони різних знаків, що складають дві підґратки, зміщуються в протилежних напрямках, від чого на гранях кристала з'являються некомпенсовані зв'язані заряди, тобто кристал поляризується.

Слід підкреслити, що йонна поляризація в чистому вигляді не спостерігається, — її завжди супроводжує електронна поляризація.

\* Зв'язані заряди отримали таку назву тому, що вони являють собою різноіменні заряди, які входять до складу атома (або молекули) і які за звичайних умов під дією електричного поля не можуть переміщатися незалежно один від одного.



Підсумовуючи, *поляризацію діелектрика* можна визначити як процес появи орієнтованих диполів або орієнтації диполів, які вже існують у діелектрику, під дією зовнішнього електростатичного поля.

У цьому та попередньому параграфі було викладено особливості поведінки провідників і діелектриків в електростатичному полі, однак ними не обмежується все різноманіття речовин. Зараз є зрозумілим, що прогрес і розвиток низки галузей науки та техніки неможливо уявити без розвитку досліджень у галузі *рідких кристалів*. Найхарактерніша властивість цих речовин — здатність змінювати орієнтацію молекул, тобто оптичної осі, під впливом електричного поля, і це відкриває широкі можливості застосування рідких кристалів для створення дисплеїв, індикаторів тощо.\*

### 3 Як діелектрик впливає на електростатичне поле

Розглядаючи різні механізми поляризації діелектриків, ви переконалися, що внесення діелектричного зразка в зовнішнє електростатичне поле спричиняє появу зв'язаних зарядів на поверхні зразка. Зв'язані заряди створюють електричне поле напруженістю  $\vec{E}'$ , яка всередині діелектрика напрямлена протилежно вектору напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля. Через це поле всередині діелектрика слабшає. У результаті напруженість  $\vec{E}$  результуючого поля всередині діелектрика виявляється за модулем меншою, ніж напруженість  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля:  $E = E_0 - E'$ . Зменшення модуля напруженості  $\vec{E}$  електростатичного поля в речовині порівняно з модулем напруженості  $\vec{E}_0$  електростатичного поля у вакуумі характеризується фізичною величиною, яку називають *діелектрична проникність  $\epsilon$  речовини*:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

Значення діелектричної проникності різних речовин можуть відрізнятися одне від одного в десятки разів. Так, значення діелектричної проникності газів близьке до одиниці, рідких і твердих неполярних діелектриків — до кількох одиниць (для гасу  $\epsilon = 2$ ), полярних діелектриків — до кількох десятків одиниць (для води  $\epsilon = 81$ ). Є речовини, діелектрична проникність яких становить значення порядку десятків і сотень тисяч (ці речовини називаються *сегнетоелектриками*).

Зменшення напруженості електричного поля в діелектрику в  $\epsilon$  разів порівняно з напруженістю поля у вакуумі\* веде до такого самого зменшення сили електростатичної взаємодії точкових зарядів

\* Якщо бути точними, твердження про те, що діелектрик завжди зменшує напруженість електростатичного поля, в якому він розташований, в  $\epsilon$  разів, є не завжди правильним, — воно справджується тільки для випадків, коли силові лінії зовнішнього поля перпендикулярні до меж тіла або ці межі так далеко, що полем поляризаційних зарядів можна знехтувати.



у цьому діелектрику. Тому закон Кулона для випадку взаємодії двох електричних зарядів, які мають значення  $q_1$  і  $q_2$  і розташовані в діелектрику на відстані  $r$  один від одного, має вигляд:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}.$$

Так само змінюються формули для розрахунку потенціалу  $\phi$  і напруженості  $\vec{E}$  поля, створеного точковим зарядом  $Q$ , розташованим у діелектрику:  $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$ ,  $\phi = k \frac{Q}{\epsilon r}$ , де  $r$  — відстань від заряду до точки, в якій розраховується напруженість або потенціал поля.

### Підбиваємо підсумки

Діелектриками називають речовини, які погано проводять електричний струм. Залежно від хімічної будови діелектрики поділяють на три групи: неполярні діелектрики ( $H_2$ ,  $O_2$ ), полярні діелектрики ( $H_2O$ ,  $H_2S$ ), йонні діелектрики ( $NaCl$ ,  $KCl$ ).

Молекула полярних діелектриків являє собою електричний диполь — нейтральну сукупність двох зарядів, які рівні за модулем, протилежні за знаком і розташовані на певній відстані один від одного.

Внесення діелектрика в зовнішнє електростатичне поле викликає поляризацію діелектрика. Поляризований діелектрик створює власне поле, яке ослаблює дію зовнішнього поля всередині діелектрика. Зменшення модуля напруженості  $\vec{E}$  електростатичного поля в речовині порівняно з модулем напруженості  $\vec{E}_0$  електростатичного поля у вакуумі характеризується діелектричною проникністю речовини:  $\epsilon = \frac{E_0}{E}$ .

Закон Кулона для випадку взаємодії точкових електричних зарядів у діелектрику:  $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$ .

### Контрольні запитання

1. Які речовини називаються діелектриками? Наведіть приклади.
2. Чим відрізняються полярні діелектрики від неполярних?
3. Що називають електричним диполем?
4. Чому незаряджені тіла, виготовлені з діелектрика, притягуються до заряджених тіл?
5. Що називають поляризацією діелектрика? Якими є її механізми?
6. Що характеризує діелектрична проникність речовини?

### Вправа № 6

1. Дві маленькі кульки, заряди яких однакові за модулем, перебуваючи в трансформаторному мастилі на відстані 50 см одна від одної, взаємодіють із силою 2,2 мН. Визначте модуль заряду кожної кульки. Діелектрична проникність трансформаторного мастила 2,2.
2. Над кондуктором зарядженого електрометра розташували незаряджену пластину з оргскла. Як зміниться після цього відхилення стрілки електрометра? Відповідь обґрунтуйте.
3. Чи зміняться результати досліду, зображеного на рис. 5.2, якщо циліндри будуть виготовлені з діелектрика? Відповідь обґрунтуйте.



4. Заряджена металева кулька масою 40 г і об'ємом 4,2 см<sup>3</sup> міститься в посудині з мастилом. Після того як систему помістили в однорідне електростатичне поле напруженістю 4,0 МВ/м, кулька спливла, у результаті опинившись на іншій глибині. Знайдіть значення заряду кульки. Густина мастила 800 кг/м<sup>3</sup>, діелектрична проникність — 5.

- ★ 5. Металева кулька, яка має радіус  $R_1$  і заряд  $q$ , оточена сферичним шаром діелектрика з діелектричною проникністю  $\epsilon$ . Внутрішній радіус діелектрика дорівнює  $R_1$ , зовнішній —  $R_2$ . Визначте зв'язані заряди, наведені на поверхнях сферичного шару.

## § 7. ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. КОНДЕНСАТОРИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В ТЕХНІЦІ

?! Те, що гроші зберігають у банках, знає навіть першокласник. А от де зберігають заряди? І навіщо взагалі це потрібно? Відповіді ви дізнаєтесь із цього параграфа.

### 1 Що таке електроємність

*Електроємність* характеризує здатність провідників або системи з кількох провідників накопичувати електричний заряд, а отже, й електроенергію, яка надалі може бути використана (наприклад, у фотозйомці, освітленні лампами денного світла).

Розрізняють електроємність відокремленого провідника та електроємність системи провідників (наприклад, конденсатора). *Відокремленим* називається провідник, розташований на віддалі від інших заряджених і незаряджених тіл так, що вони не здійснюють на цей провідник жодного впливу.

**Електроємність відокремленого провідника  $C$**  — скалярна фізична величина, яка характеризує здатність провідника накопичувати заряд і дорівнює відношенню значення  $q$  електричного заряду відокремленого провідника до його потенціалу  $\phi$ :

$$C = \frac{q}{\phi}$$

Одиниця електроємності в СІ — **фарад (Ф)** (названа на честь М. Фарадея). 1 Ф — це електроємність такого провідника, потенціал якого змінюється на 1 В, коли йому передають заряд 1 Кл;

$$1 \text{ Ф} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}}$$

Оскільки 1 Ф — дуже велика одиниця ємності, зазвичай застосовують частинні одиниці: 1 пФ = 10<sup>-12</sup> Ф; 1 нФ = 10<sup>-9</sup> Ф; 1 мкФ = 10<sup>-6</sup> Ф і т. д.

Хоча електроємність подається через відношення заряду до потенціалу, вона не залежить ані від того, ані від другого. Це подібне до того, як густина  $\rho$  речовини визначається через відношення маси  $m$  речовини до об'єму  $V$ , який вона займає  $\left(\rho = \frac{m}{V}\right)$ , проте не залежить ані від маси речовини, ані від її об'єму, бо  $\epsilon$  характеристикою речовини.

Крім того, електроємність не залежить від матеріалу, з якого виготовлений провідник. Це так само, як ємність чашки не залежить від того, з якого матеріалу вона виготовлена, а визначається її формою та розмірами.

★ Якщо відокремленим провідником є заряджена куля, значення заряду якої дорівнює  $q$ , то потенціал  $\phi$  поля на її поверхні дорівнює  $\phi = k \frac{Q}{\epsilon r}$ , або  $\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R}$ , де  $R$  — радіус кулі;  $\epsilon$  — діелектрична проникність середовища, у якому перебуває куля. Підставивши останній вираз у формулу  $C = \frac{q}{\phi}$ , отримаємо формулу для електроємності відокремленого сферичного провідника:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$$

За цією формулою можна розрахувати електроємність Землі ( $C_3$ ), вважаючи її відокремленим провідником. Якщо діелектрична проникність середовища  $\epsilon = 1$  (повітря, вакуум) і радіус  $R$  Землі становить  $6,4 \cdot 10^6$  км, то  $C_3 = 700$  мкФ\*.

Зверніть увагу: усе зазначене стосується відокремленого провідника. У дійсності жоден провідник не є відокремленим — завжди існують якісь предмети, що змінюватимуть його електроємність. Останнє можна довести, якщо до кондуктора зарядженого електрометра наблизити долоню: спостерігатиметься зменшення заряду електрометра, і це свідчить про збільшення його електроємності. (Спробуйте пояснити це явище самостійно.)

## 2 Що таке конденсатор

Чи можна створити пристрій, що має достатньо велику електроємність, яка не залежить від розташування навколишніх тіл? Виявляється, такий пристрій придумали вже досить давно, — він називається конденсатор.

**Конденсатор** — це пристрій, що являє собою систему з двох провідних обкладок, розділених шаром діелектрика, товщина якого є малою порівняно з розмірами обкладок.

(Найдавніший тип конденсатора — *лейденську банку* (рис. 7.1) — уперше було створено в середині XVIII ст. у голландському місті Лейден. Цей конденсатор являє собою скляну банку, обклеєну всередині та ззовні станіолем.)

\* Припускаючи, що Земля є відокремленим провідником, ми не враховуємо розташованих на відстані 100–200 км від неї (в йоносфері) електричних зарядів, які разом із Землею утворюють своєрідний конденсатор. Ємність такого конденсатора разів у 30–50 більша, ніж знайдене нами значення, і сягає 20 000–30 000 мкФ.



Обкладкам конденсатора передають однакові за модулем, але протилежні за знаком заряди, що сприяє накопиченню зарядів: різнойменні заряди притягуються, а отже, розташовуються на внутрішніх поверхнях обкладок.

Для зарядження конденсатора зазвичай обидві його обкладки з'єднують із полюсами батареї акумуляторів. Унаслідок цього на обкладках з'являються рівні за модулем, але протилежні за знаком заряди. Результат не зміниться, якщо з'єднати з полюсом батареї тільки одну обкладку, заземливши другу. При цьому внаслідок електростатичної індукції на заземленій обкладці також з'явиться заряд, який дорівнюватиме за модулем заряду на іншій обкладці, але матиме протилежний знак.

*Зарядом конденсатора називають модуль заряду однієї з його обкладок.* Очевидно, що заряд конденсатора визначає різниця потенціалів між його обкладками. При цьому відношення значення  $q$  заряду даного конденсатора до різниці потенціалів  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  між його обкладками не залежить ані від  $q$ , ані від  $(\varphi_1 - \varphi_2)$ , а отже, може слугувати характеристикою конденсатора. Така характеристика називається *електроємністю конденсатора*.

**Електроємність конденсатора  $C$**  — скалярна фізична величина, яка характеризує здатність конденсатора накопичувати заряд і дорівнює відношенню значення  $q$  заряду однієї з обкладок конденсатора до різниці потенціалів  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  між цією обкладкою і сусідньою:

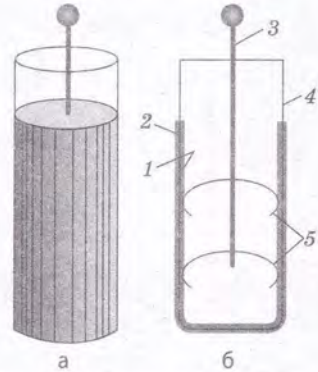
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (1), \quad \text{або} \quad C = \frac{q}{U},$$

де  $U$  — напруга між обкладками, яка в даному випадку дорівнює різниці потенціалів між ними.

Очевидно, що *одиниця електроємності конденсатора в СІ збігається з одиницею електроємності відокремленого провідника, — фарад (Ф).*

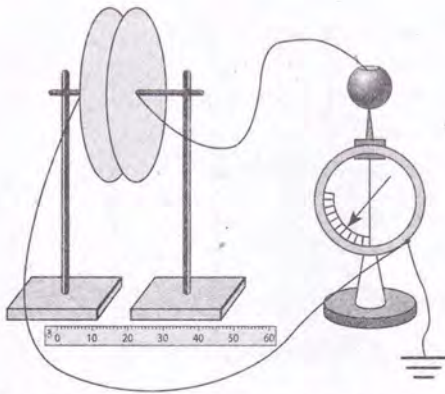
$1 \text{ Ф}$  — це електроємність конденсатора, між обкладками якого виникає різниця потенціалів  $1 \text{ В}$ , якщо заряд на кожній із обкладок становить  $1 \text{ Кл}$ .

Як показують дослідження, ємність конденсатора збільшиться, якщо збільшити площу поверхні обкладок або наблизити обкладки



**Рис. 7.1.** Лейденська банка: а — загальний вигляд; б — схема будови: 1 і 2 — станіолеві обкладки, 3 — металевий стрижень, 4 — склянка, 5 — пружні металеві смужки для контакту





**Рис. 7.2.** Дослід із вивчення залежності ємності конденсатора від відстані між його пластинами: якщо зсунути пластини, ємність конденсатора збільшується; кут відхилення стрілки електрометра зменшується, хоча заряд лишається тим самим

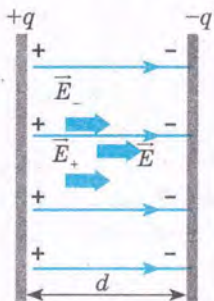
одну до одної (рис. 7.2). На ємність конденсатора впливає також характеристика використовуваного діелектрика, Чим більша його діелектрична проникність, тим більшу ємність має конденсатор порівняно з ємністю такого ж конденсатора, діелектриком у якому слугує повітря.

Власне електрометр теж являє собою конденсатор, однією з обкладок якого є стрижень зі стрілкою, а другою — корпус. Ємність електрометра залежить від розмірів і взаємного розташування його частин. Оскільки в електрометрі частини закріплені в незмінному положенні, ємність даного електрометра буде цілком визначеною (невеликою зміною ємності, пов'язаною з переміщенням стрілки, можна знехтувати). Саме тому

ми й можемо користуватись електрометром як для вимірювання різниці потенціалів, так і для визначення наявного на ньому заряду. Дійсно, кут відхилення стрілки електрометра визначається напруженістю поля між нею і корпусом приладу, тобто різницею потенціалів  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  між цими тілами. Але згідно з формулою (1) заряд електрометра  $q = C(\varphi_1 - \varphi_2)$ , де  $C$  — ємність електрометра, яка є для приладу постійною. Таким чином, можна проградувати прилад або в одиницях різниці потенціалів (вольтах), або в одиницях заряду (кулонах).

### Чому дорівнює електроємність плоского конденсатора

**3** Плоский конденсатор складається з двох паралельних металевих пластин (обкладок), розділених шаром діелектрика, наприклад повітрям, слюдою, парафіновим папером та ін.



Для визначення електроємності плоского конденсатора введемо такі позначення:  $q$  — заряд конденсатора;  $S$  — площа кожної пластини конденсатора;  $d$  — відстань між пластинами.

Поле плоского конденсатора можна розглядати як сукупність полів двох різнойменно заряджених площин (рис. 7.3). Тоді напруженість  $\vec{E}$  поля між пластинами (обкладками) такого конденсатора дорівнює сумі напруженостей полів, створених кожною з пластин:

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-,$$

де  $\vec{E}_+$  і  $\vec{E}_-$  — напруженості полів, створених позитивно та негативно зарядженими пластинами відповідно.

**Рис. 7.3.** До розрахунку напруженості поля між пластинами плоского конденсатора



Оскільки  $E_+ = E_- = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}$ , де  $\epsilon$  — діелектрична проникність діелектрика, який заповнює простір між обкладками, а  $\sigma = \frac{q}{S}$  — поверхнева густина заряду на обкладках конденсатора, то  $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}$ , звідки

$$E = \frac{q}{\epsilon_0\epsilon S}. \quad (2)$$

Поле між пластинами плоского конденсатора є однорідним, тому зв'язок між напруженістю  $E$  поля між пластинами і напругою  $U$  на пластинках конденсатора подається як  $U = Ed$ . Останню формулу з урахуванням формули (2) можна переписати у вигляді:  $U = \frac{qd}{\epsilon_0\epsilon S}$ .

Підставимо цей вираз у формулу (1):  $C = \frac{q}{U} = \frac{q\epsilon_0\epsilon S}{qd}$ ; отже, маємо формулу для розрахунку електроємності плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}$$

Таким чином, ємність плоского конденсатора залежить від площі його обкладок, відстані між ними та діелектричної проникності діелектрика, який заповнює простір між обкладками.

### Як розраховують електроємність батареї конденсаторів

**4** Кожен конденсатор характеризується ємністю та *максимальною робочою напругою*  $U_{\max}$ . Якщо напруга на конденсаторі значно перевищує  $U_{\max}$ , то відбувається *пробій* — між обкладками конденсатора виникає іскра, яка руйнує ізоляцію.

Щоб одержати необхідну електроємність за певної робочої напруги, конденсатори з'єднують між собою в *батарей*, застосовуючи при цьому *паралельне, послідовне та змішане з'єднання*.

Для простоти сприйняття розглядатимемо батарею, яка складається з трьох конденсаторів електроємностями  $C_1, C_2, C_3$  відповідно. Зверніть, однак, увагу, що закономірності, які будуть одержані, справджуються й для батареї, що містить *будь-яку кількість конденсаторів*.

У разі *паралельного з'єднання конденсаторів* позитивно заряджені обкладки всіх конденсаторів з'єднують в один вузол, а негативно заряджені — в інший вузол (рис. 7.4). У такому випадку загальний заряд  $q$  батареї конденсаторів дорівнює алгебраїчній сумі зарядів окремих конденсаторів:

$$q = q_1 + q_2 + q_3,$$

де  $q_1, q_2, q_3$  — заряд першого, другого та третього конденсаторів відповідно.

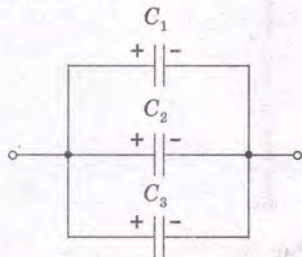


Рис. 7.4. Батарея з трьох паралельно з'єднаних конденсаторів

## РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

З'єднані в один вузол обкладки являють собою один провідник, тому потенціали обкладок і різниця потенціалів (напруга) між обкладками всіх конденсаторів однакові:

$$U = U_1 = U_2 = U_3.$$

Отже, у випадку паралельного з'єднання конденсаторів допустима робоча напруга батареї визначається робочою напругою одного конденсатора.

Оскільки  $q = CU$ ,  $q_1 = C_1U$ ,  $q_2 = C_2U$ ,  $q_3 = C_3U$ , то  $CU = C_1U + C_2U + C_3U$ , отже, загальна електроємність батареї, яка складається з трьох паралельно з'єднаних конденсаторів, становить:

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

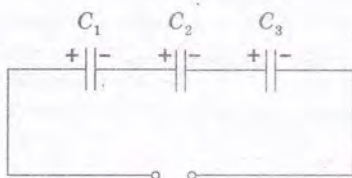


Рис. 7.5. Батарея з трьох послідовно з'єднаних конденсаторів

У разі *послідовного з'єднання* конденсатори з'єднують між собою різнойменно зарядженими обкладками (рис. 7.5). У цьому випадку потенціали різнойменно заряджених обкладок розміщених поряд конденсаторів є однаковими. Завдяки явищу електростатичної індукції також однаковим для всіх конденсаторів буде й заряд, який дорівнюватиме заряду батареї. Отже:

$$q = q_1 = q_2 = q_3.$$

Напруга на батареї послідовно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі напруг на окремих конденсаторах:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Оскільки  $U = \frac{q}{C}$ ;  $U_1 = \frac{q}{C_1}$ ;  $U_2 = \frac{q}{C_2}$ ;  $U_3 = \frac{q}{C_3}$ , то  $\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$ , отже, величина, обернена загальній електроємності батареї, що складається з трьох послідовно з'єднаних конденсаторів, дорівнює:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Фізична величина

Вид з'єднання конденсаторів ( $n$  — кількість конденсаторів у батареї)  
Послідовне Паралельне

Заряд

$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n$$

$$q = \sum_{i=1}^n q_i$$

Напруга

$$U = \sum_{i=1}^n U_i$$

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

Ємність

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i$$

У разі послідовного з'єднання конденсаторів ємність батареї менша, ніж ємність конденсатора з мінімальною ємністю. Завдяки цьому збільшується допустима робоча напруга батареї порівняно з допустимою робочою напругою окремого конденсатора.

Уже зазначалось, що наведені співвідношення можна *узагальнити для батарей, які містять будь-яку кількість конденсаторів* (див. таблицю).



Зверніть увагу:

1) Якщо батарея містить  $n$  паралельно з'єднаних конденсаторів електроємністю  $C'$  кожен, то:

$$C = nC'.$$

2) Якщо батарея містить  $n$  послідовно з'єднаних конденсаторів електроємністю  $C'$  кожен, то:

$$\frac{1}{C} = \frac{n}{C'}, \text{ або } C = \frac{C'}{n}.$$

### 5 Для чого потрібні конденсатори

У сучасній *техніці* складно знайти галузь, де б широко й різноманітно не застосовувались конденсатори. Без них не можуть обійтися *радіотехнічна й телевізійна апаратура* (настроювання коливальних контурів), *радіолокаційна техніка* (одержування імпульсів великої потужності), *телефонія й телеграфія* (розділення кіл змінного та постійного струмів, гасіння іскор у контактах), *техніка лічильного обладнання* (у спеціальних запам'ятовувальних пристроях), *електровимірвальна техніка* (створення зразків ємності), *лазерна техніка* (одержування потужних імпульсів). І це далеко не повний перелік.

У сучасній *електроенергетиці* конденсатори також мають доволі різноманітне застосування: вони обов'язково присутні в конструкціях люмінесцентних освітлювачів, електрозварювальних апаратів, пристроїв захисту від перенапруг.

Конденсатори застосовують і в інших, неелектротехнічних галузях техніки та промисловості (у медицині, фотографічній техніці).

Різноманітність галузей застосування зумовлює велике розмаїття конденсаторів (рис. 7.6). Поряд із мініатюрними конденсаторами, що мають масу меншу за грам і розміри порядку кількох міліметрів, можна зустріти конденсатори з масою в декілька тонн і заввишки більші за людський зріст. Ємність сучасних конденсаторів може становити від часток пікофарада до кількох десятків і навіть сотень тисяч мікрофарадів, а робоча напруга може бути в межах від кількох вольтів до кількох сотень кіловольтів.

### 6 Які вони, сучасні конденсатори

Конденсатори можна класифікувати за такими ознаками та властивостями:

— за *призначенням* — постійної та змінної ємності;

— за *формою обкладок* — плоскі, сферичні, циліндричні та ін.;

— за *типом діелектрика* — повітряні, паперові, слюдяні, керамічні, електролітичні та ін.

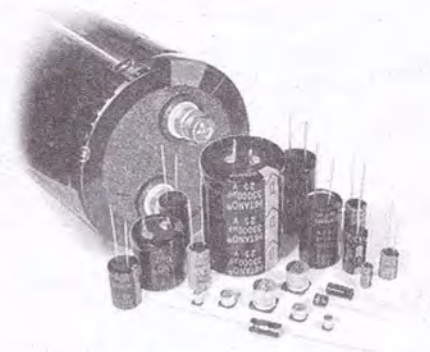


Рис. 7.6. Різні типи конденсаторів



Сучасна промисловість випускає конденсатори різних конструкцій і зі застосуванням різних матеріалів. Від того, як і з чого зроблений конденсатор, залежать його характеристики. Найчастіше конденсатори конструюють із використанням металевої фольги та матеріалів з високою діелектричною проникністю, як-от слюда або кераміка. Ємність цих конденсаторів може коливатися в межах від 1 до 100 мкФ. Альтернативний метод виробництва конденсаторів — напилення металевих плівок на діелектрик. Конденсатори такої конструкції (відомі як срібно-слюдяні) досить стабільні й мають непогані характеристики. Їхня ємність лежить у межах від кількох пікофарадів до приблизно 5000 пФ.

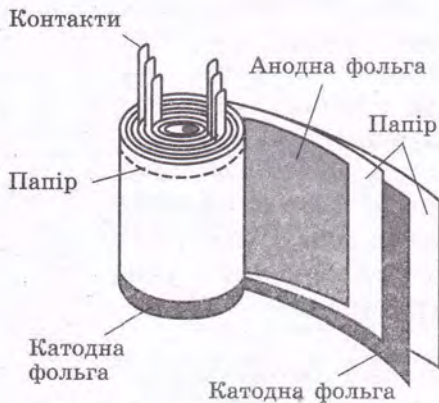


Рис. 7.7. Схема формування електролітичного конденсатора

Щоб одержати ще більшу ємність конденсаторів, необхідно більше скоротити відстань між пластинами. Цього можна домогтися, зануривши металеву пластину в електроліт. У цьому випадку діелектриком між «пластинами» (металом і електролітом) буде тонка оксидна плівка. Конструкція «метал — оксид — електроліт» має властивості конденсатора (рис. 7.7), а дуже тонкий шар оксиду (зазвичай 0,1 мм) забезпечує високу ємність (до 5000 мкФ).

Для резонансних індуктивно-ємнісних генераторів потрібні конденсатори змінної ємності. Ємність таких конденсаторів змінюється регулюванням площі пластин, відстані між пластинами або діелектричної проникності. Зміна ємності в усіх змінних конденсаторів є малою й зазвичай не перевищує кількох сотень пікофарадів.

**Учимося розв'язувати задачі**

**7** **Задача 1.** Металеву кулю ємністю  $C_1 = 2$  пФ, заряджену до потенціалу  $\phi_1 = 30$  В, з'єднали тонким довгим дротом з кулею ємністю  $C_2 = 3$  пФ, на якій міститься заряд  $q_2 = 0,6$  нКл. Визначте потенціали куль після перерозподілу зарядів.

$\phi'_1$  — ?  
 $\phi'_2$  — ?

Дано:

$C_1 = 2 \cdot 10^{-12}$  Ф  
 $\phi_1 = 30$  В  
 $C_2 = 3 \cdot 10^{-12}$  Ф  
 $q_2 = 0,6 \cdot 10^{-19}$  Кл

*Аналіз фізичної проблеми.* За будь-якого перерозподілу зарядів в ізольованій системі, якою є в цьому випадку заряджені кулі, виконується закон збереження заряду. Скориставшись ним і врахувавши той факт, що після з'єднання куль провідником заряди будуть переходити з однієї кулі на другу доти, доки потенціали куль не стануть однаковими, можемо знайти потенціали куль після з'єднання.



*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Нехай до з'єднання куль їхні заряди дорівнювали  $q_1$  і  $q_2$ , а після з'єднання —  $q'_1$  і  $q'_2$ , тоді згідно із законом збереження заряду  $q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$  (1). За умови рівноваги зарядів на кулях, з'єднаних дротом, потенціали куль вирівнюються, тому  $\varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi'$  (2).

Використовуючи формулу електроємності  $C = \frac{q}{\varphi}$ , подамо початковий заряд  $q_1$  першої кулі, а також заряди  $q'_1$  і  $q'_2$  куль після з'єднання:  $q_1 = C_1\varphi_1$ ;  $q'_1 = C_1\varphi'$ ;  $q'_2 = C_2\varphi'$ . (3)

Підставивши формули (3) у формулу (1) із урахуванням рівності (2), одержимо:  $C_1\varphi_1 + q_2 = C_1\varphi' + C_2\varphi'$ , звідки  $\varphi' = \frac{C_1\varphi_1 + q_2}{C_1 + C_2}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[\varphi'] = \frac{\Phi \cdot В + Кл}{\Phi + \Phi} = \frac{Кл \cdot В / В + Кл}{Кл / В} = \frac{Кл \cdot В}{Кл} = В;$$

$$\{\varphi'\} = \frac{2 \cdot 10^{-12} \cdot 30 + 0,6 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-12} + 3 \cdot 10^{-12}} = \frac{0,06 \cdot 10^{-9} + 0,6 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 10^{-12}} = 132, \varphi' = 132 \text{ В.}$$

*Відповідь:* потенціали куль після перерозподілу зарядів становлять:  $\varphi' = \varphi'_1 = \varphi'_2 = 132 \text{ В}$ .

**Задача 2.** Між клемми А і В приєднано конденсатори ємностями  $C_1 = 2 \text{ мкФ}$  і  $C_2 = 1 \text{ мкФ}$  (рис. 1). Обчисліть ємність батареї конденсаторів.

$C - ?$

Дано:

$$C_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

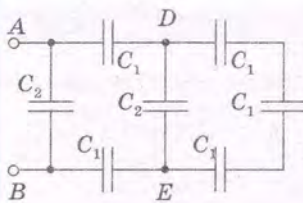


Рис. 1

*Аналіз фізичної проблеми.*

Аналіз схеми показує, що вона містить змішане з'єднання конденсаторів. Отже, спочатку необхідно відшукати конденсатори, з'єднані між собою послідовно або паралельно.

Потім слід замінити їх конденсатором з еквівалентною ємністю й одержати спрощену схему. Застосувавши цей прийом кілька разів, знайдемо ємність батареї конденсаторів.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Розглянемо окремо ділянку між точками D і E (див. рис. 1). Вона складається з двох паралельних віток, в одну з яких включено послідовно три конденсатори ємностями  $C_1$  (їхню загальну ємність позначимо  $C'$ ), а в другу — конденсатор ємністю  $C_2$ . Тоді загальна ємність  $C_{DE}$  конденсаторів, які складають ділянку DE, становить:  $C_{DE} = C_2 + C'$ ;  $C'$  знаходимо з умови:

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1} = \frac{3}{C_1}, \text{ звідки } C' = \frac{C_1}{3}.$$

$$C_{DE} = C_2 + \frac{C_1}{3} = \frac{3C_2 + C_1}{3}. \quad (1)$$

Отже, можемо спростити вихідну схему (рис. 2). Тепер шукана ємність  $C$  дорівнює сумі ємностей двох паралельних віток, в одну з яких включено послідовно три конденсатори ємностями  $C_1$ ,  $C_{DE}$  і  $C_1$  (їхню загальну ємність позначимо  $C''$ ), а в другу — конденсатор ємністю  $C_2$ . Тоді  $C = C_2 + C''$ , де  $C''$  знаходимо з умови:

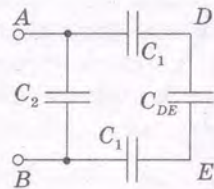


Рис. 2

$$\frac{1}{C''} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{DE}} + \frac{1}{C_1} = \frac{2}{C_1} + \frac{1}{C_{DE}} \quad (2).$$

Перетворимо вираз (2) за допомогою рівняння (1):  $\frac{1}{C''} = \frac{2}{C_1} + \frac{3}{3C_2 + C_1}$ , звідки  $C'' = \frac{C_1(3C_2 + C_1)}{6C_2 + 5C_1}$ .

Отже, повна ємність усієї системи:  $C = C_2 + \frac{C_1(3C_2 + C_1)}{6C_2 + 5C_1}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$C = 10^{-6} + \frac{2 \cdot 10^{-6}(3 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6})}{6 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} \approx 2 \cdot 10^{-6}, \quad C \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

**Відповідь:** ємність батареї конденсаторів  $C \approx 2$  мкФ.

### Підбиваємо підсумки

Електроємність  $C$  відокремленого провідника дорівнює відношенню електричного заряду  $q$  відокремленого провідника до його потенціалу  $\phi$ :  $C = q/\phi$ . Одиниця електроємності в СІ — фарад (Ф). Електроємність конденсатора, що має заряд  $q$  і напругу між обкладками  $U$ , дорівнює:  $C = q/U$ . Електроємність плоского конденсатора розраховується за формулою  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ , де  $S$  — площа обкладок конденсатора;  $d$  — відстань між обкладками;  $\epsilon$  — діелектрична проникність діелектрика, що поміщений між обкладками конденсатора. Для одержання необхідної ємності конденсатори з'єднують між собою в батареї.

У разі паралельного з'єднання конденсаторів виконуються співвідношення:  $q = \sum_{i=1}^n q_i$ ;  $U = U_1 = \dots = U_n$ ;  $C = \sum_{i=1}^n C_i$ .

У разі послідовного з'єднання конденсаторів виконуються співвідношення:  $q = q_1 = \dots = q_n$ ;  $U = \sum_{i=1}^n U_i$ ;  $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$ .

Конденсатори класифікують за призначенням (постійної та змінної ємностей); за формою обкладок (плоскі, сферичні, циліндричні); за типом діелектрика (повітряні, паперові, слюдяні, керамічні, електротлітчні).

### Контрольні запитання

1. Що називають електроємністю відокремленого провідника? Якою є її одиниця? ★
2. За якою формулою розраховується електроємність кулі? ★
3. Що таке конденсатор? Для чого він призначений? ★
4. Як називається перший створений конденсатор? ★
5. Для чого простір між обкладками конденсатора заповнюють діелектриком? ★
6. Від чого залежить електроємність конденсатора? ★
7. За якою



формулою розраховується електроємність плоского конденсатора? 8. Як розрахувати електроємність батареї, яка складається з конденсаторів, з'єднаних послідовно? з'єднаних паралельно? 9. Назвіть галузі застосування конденсаторів. Наведіть приклади. 10. Які типи конденсаторів вам відомі?

### Вправа № 7

- Чотири однакові конденсатори з'єднані в одному випадку паралельно, а в другому — послідовно. У якому випадку ємність батареї конденсаторів більша й у скільки разів?
- Два конденсатори ємностями 2 і 1 мкФ з'єднані послідовно й приєднані до джерела, напруга якого 120 В. Визначте напругу між обкладками першого і напругу між обкладками другого конденсатора.
- Який заряд потрібно передати батареї з двох лейденських банок ємностями 0,0005 і 0,001 мкФ, з'єднаних паралельно, щоб зарядити її до напруги 10 кВ?
- Конденсатор, заряджений до напруги 100 В, з'єднується паралельно з конденсатором такої ж ємності, але зарядженим до 200 В. Яка напруга встановиться між обкладками конденсаторів?
- Два провідники ємністю  $C_1$  і  $C_2$ , заряджені до потенціалів  $\phi_1$  і  $\phi_2$ , перебувають на великій відстані один від одного. Яким буде потенціал провідників, якщо з'єднати їх тонким дротом?
- Визначте ємність батарей конденсаторів, показаних на рис. 1 і 2. Ємність кожного конденсатора однакова й дорівнює  $C$ .

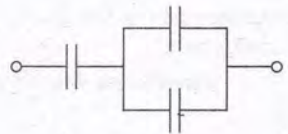


Рис. 1

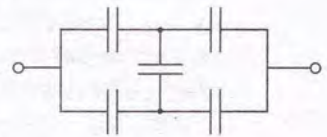


Рис. 2

## § 8. ЕНЕРГІЯ ТА ГУСТИНА ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

У попередньому параграфі йшлося про те, що конденсатор зберігає заряди. Але навіть накопичувати заряди та зберігати їх? Що ще ховається між обкладками зарядженого конденсатора? Чим відрізняється заряджений конденсатор від незарядженого? У цьому параграфі ви дізнаєтеся відповіді на ці запитання.

### 1 Чому дорівнює енергія плоского конденсатора

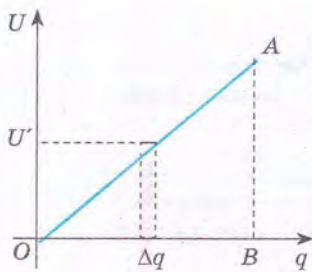
Заряджений конденсатор, як і будь-яка інша система заряджених тіл, має енергію. У правильності цього твердження можна переконатися за допомогою простого експерименту.

Приєднаємо до обкладок зарядженого конденсатора лампочку кишенькового ліхтарика й виявимо, що в момент замикання ключа лампочка спалахує. Тепер виміряємо напругу на обкладках конденсатора — напруга дорівнюватиме нулю, отже, конденсатор розрядився. А це, у свою чергу, означає, що заряджений конденсатор мав енергію, яка перетворилася на енергію світла.

Розрахуємо енергію зарядженого до напруги  $U$  конденсатора, який має ємність  $C$  і заряд  $q$ .

Під час розрядження конденсатора напруга  $U$  на його обкладках змінюється прямо пропорційно заряду  $q$  конденсатора, оскільки електроємність  $C$  конденсатора  $\left( C = \frac{q}{U} \right)$  у даному випадку є постійною.





**Рис. 8.1.** До розрахунку роботи, яку виконує електричне поле зарядженого конденсатора під час його розрядження

Таким чином, графік залежності  $U(q)$  має вигляд, поданий на рис. 8.1. Тоді, щоб розрахувати роботу  $A$ , яку виконує електричне поле зарядженого конденсатора під час його розрядження, скористаємося вже відомим вам прийомом. Уявно розділимо увесь заряд конденсатора на маленькі «порції»  $\Delta q$  і будемо вважати, що під час втрати кожної такої «порції» заряду напруга на конденсаторі не змінюється. Таким чином отримуємо ряд відрізків, кожний із яких відповідає зменшенню заряду конденсатора на  $\Delta q$ . На рис. 8.1 показано прямокутник, побудований на одному з таких відрізків. Площа прямокутника дорівнює добутку двох його сторін, тобто  $\Delta q U'$ , де  $U'$  — напруга, за якої конденсатор втрачав дану «порцію» заряду  $\Delta q$ . Вам уже відомо,

що  $A = qU$ . Таким чином, площа даного прямокутника чисельно дорівнює роботі, яку виконає поле під час втрати конденсатором заряду  $\Delta q$ . Зрозуміло, що повна робота, яку виконає поле під час зменшення заряду конденсатора від  $q$  до  $0$ , визначається площею фігури під графіком залежності  $U(q)$ , тобто площею трикутника  $AOB$ . Отже,  $A = \frac{qU}{2}$ . Урахувавши, що  $q = CU$ , отримуємо:  $A = \frac{CU^2}{2}$ , або  $A = \frac{q^2}{2C}$ .

З іншого боку, робота, виконана під час розрядження конденсатора, дорівнює зміні енергії  $\Delta W_{\text{п}}$  електричного поля:

$$A = -\Delta W_{\text{п}} = W_{\text{п}0} - 0 = W_{\text{п}0}. \text{ Отже, } W_{\text{п}0} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

Таким чином, енергія  $W_{\text{п}}$  зарядженого до напруги  $U$  конденсатора, який має електроємність  $C$  і заряд  $q$ , дорівнює:

$$W_{\text{п}} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Цю енергію точніше було б назвати енергією електростатичного поля, яке існує між обкладками конденсатора, оскільки енергія будь-яких заряджених тіл зосереджена в електричному полі, створюваному цими тілами, і розподілена по всьому простору, де є це поле. Чітке доведення цього твердження в рамках електростатики неможливе, оскільки в дослідах з електростатики заряджені тіла та поля не відокремлені одні від одних. Однак у ході вивчення електромагнітних хвиль (розділ 4 підручника) буде доведено, що енергія локалізована в полі.

### Що називають об'ємною густиною енергії електричного поля

подамо енергію електричного поля конденсатора через характеристику поля. Для цього виразимо напругу через напруженість ( $U = Ed$ ) і скористаємося виразом для електроємності плоского



конденсатора  $\left(C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}\right)$ . Після підстановки наведених формул у формулу  $W_{\text{п}} = \frac{CU^2}{2}$  отримаємо:  $W_{\text{п}} = \frac{CE^2 d^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon SE^2 d^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} Sd = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V$ .

Аналізуючи останню формулу, доходимо висновку, що енергія однорідного поля прямо пропорційна об'єму, який займає поле. У зв'язку з цим говорять про *енергію одиниці об'єму поля*, так звану **об'ємну густину енергії**  $\omega_{\text{ел}}$ :  $\omega_{\text{ел}} = \frac{W_{\text{п}}}{V}$ . Тоді:

$$\omega_{\text{ел}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \quad (*)$$

*Одиниця об'ємної густини енергії в СІ — джоуль на кубічний метр  $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}\right)$ .*

Формула (\*) справджується не тільки для будь-якого електростатичного поля, але й для змінного електричного поля.

Слід зауважити, що вперше поняття густини енергії електричного поля ввів британський фізик і математик *Джеймс Клерк Максвелл* (1831–1879) (див. рис. 25.2), який слушно вважав, що енергія електричного поля розподілена по всьому об'єму, де є поле з густиною, вираженою формулою (\*). ★

### Учимося розв'язувати задачі

**3** **Задача 1.** Конденсатор 1 зарядили до різниці потенціалів 100 В, відключили від джерела напруги і паралельно приєднали до конденсатора 2. Знайдіть енергію іскри, яка проскочила в момент з'єднання конденсаторів, якщо ємність конденсатора 1 дорівнює 0,5 мкФ, а конденсатора 2 — 0,4 мкФ.

$\Delta W$  — ?

Дано:

$$\Delta\phi_1 = U_1 = 100 \text{ В}$$

$$C_1 = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

$$C_2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

*Аналіз фізичної проблеми.* Заряджений конденсатор 1 має енергію. Після підключення до нього незарядженого конденсатора 2 одержана батарея також матиме енергію, однак її значення буде меншим, ніж значення початкової енергії конденсатора 1. Визначивши зміну енергії системи конденсаторів, знайдемо шукану величину.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Енергія зарядженого конденсатора 1 дорівнює:  $W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2}$ . Після приєднання конденсатора 2 енергія батареї становитиме  $W_2 = \frac{CU^2}{2}$ , де  $C$  — ємність батареї конденсаторів,  $U$  — напруга на ній. Ємність батареї, що складається з двох паралельно з'єднаних конденсаторів, визначається за формулою:  $C = C_1 + C_2$ .

За умовою задачі конденсатор 1 був відключений від джерела напруги, тому  $q_1 = q$ , де  $q_1$  і  $q$  — заряди конденсатора 1 і батареї

відповідно. Тоді з урахуванням, що  $q_1 = C_1 U_1$  і  $q = CU$ , маємо:  $C_1 U_1 = CU$ .

Отже,  $U = \frac{C_1 U_1}{C}$ . Підставивши вирази для  $C$  і  $U$  у формулу для  $W_2$ ,

$$\text{отримуємо: } W_2 = \frac{C_1^2 U_1^2}{2(C_1 + C_2)}.$$

$$\text{Енергію іскри } \Delta W \text{ знайдемо з умови: } \Delta W = W_1 - W_2 = \frac{C_1 C_2 U_1^2}{2(C_1 + C_2)}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[\Delta W] = \frac{\Phi \cdot \Phi \cdot V^2}{\Phi} = \Phi \cdot V^2 = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}^2}{\text{В}} = \text{Дж};$$

$$\{\Delta W\} = \frac{5 \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot 10^4}{2(5+4) \cdot 10^{-7}} \approx 1 \cdot 10^{-3}, \Delta W \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Відповідь: енергія іскри  $\Delta W \approx 1$  мДж.

**★ Задача 2.** Металева куля, яка має радіус 3 см і заряд 20 нКл, занурена в посудину з гасом так, що не торкається до стінок посудини. Визначте об'ємну густину енергії поля, створеного цією кулею, в точках, віддалених від центра кулі на відстані 2 і 4 см.

$\omega_{\text{ел}1}$  — ?

$\omega_{\text{ел}2}$  — ?

Дано:

$$R = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$q = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$d_1 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d_2 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\epsilon = 2$$

*Аналіз фізичної проблеми.* Точка, розташована на відстані 2 см від центра кулі, перебуває всередині кулі, тому напруженість поля в цій точці дорівнює нулю:  $E_1 = 0$ . Отже,  $\omega_{\text{ел}1} = 0$ .

Густину енергії в точці, віддаленій від центра кулі на 4 см, знайдемо, використовуючи формули для розрахунку напруженості поля, створеного кулею.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* За означенням  $\omega_{\text{ел}2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E_2^2}{2}$ , де  $E_2$  — напруженість поля кулі в точці, розташованій на відстані  $d_2$  від центра кулі.

$$\text{Оскільки } E_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon d_2^2}, \text{ то } \omega_{\text{ел}2} = \frac{\epsilon_0\epsilon}{2} \left( \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon d_2^2} \right)^2, \text{ або } \omega_{\text{ел}2} = \frac{q^2}{32\pi^2\epsilon_0\epsilon d_2^4}.$$

Обчислимо значення шуканої величини:

$$[\omega_{\text{ел}2}] = \frac{\text{Кл}^2}{\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot \text{м}^4} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3};$$

$$\{\omega_{\text{ел}2}\} = \frac{4 \cdot 10^{-16}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 32 \cdot 3,14^2 \cdot 2 \cdot 4^4 \cdot 10^{-8}} \approx 0,03, \omega_{\text{ел}2} \approx 0,03 \text{ Дж/м}^3.$$

Відповідь: об'ємна густина енергії поля в даних точках дорівнює:  $\omega_{\text{ел}1} = 0$ ;  $\omega_{\text{ел}2} \approx 0,03$  Дж/м<sup>3</sup> відповідно. ★

### Підбиваємо підсумки

Енергія  $W_n$  зарядженого конденсатора прямо пропорційна його електричній ємності  $C$  і квадрату напруги  $U$  між його обкладками:  $W_n = \frac{CU^2}{2}$ . Енергію конденсатора також можна розрахувати за



формулою  $W_n = \frac{q^2}{2C}$ , де  $q$  — заряд конденсатора. Уся ця енергія зосереджена в електричному полі. ★ Об'ємна густина енергії поля прямо пропорційна квадрату напруженості поля:  $w_{\text{ел}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$ . ★

### Контрольні запитання

1. Який досвід підтверджує, що заряджений конденсатор має енергію? 2. За допомогою яких формул розраховують енергію зарядженого конденсатора? Виведіть ці формули. ★ 3. Що таке об'ємна густина енергії електричного поля? Як її розраховують? ★ 4. Хто вперше ввів поняття об'ємної густини енергії електричного поля?

### Вправа № 8

- Напруга між обкладками плоского конденсатора дорівнює 12 В. Заряд конденсатора 60 мкКл. Яку електроємність має конденсатор? Чому дорівнює його енергія? Як зміниться енергія конденсатора, якщо, не змінюючи напруги між його обкладками, удвічі збільшити відстань між ними?
- За різниці потенціалів між обкладками плоского повітряного конденсатора 5000 В його заряд дорівнює 0,1 мкКл. Обчисліть площу пластин конденсатора й енергію, запасену в ньому. Відстань між пластинами конденсатора 5 мм.
- Плоский повітряний конденсатор після зарядження відключили від джерела напруги та опустили в гас. Як зміниться енергія конденсатора?
- Відстань між пластинами плоского конденсатора збільшують від 5 до 12 мм. На скільки при цьому зміниться енергія конденсатора, якщо різниця потенціалів між його пластинами становить 180 В? Площа пластини конденсатора дорівнює 174 см<sup>2</sup>.
- Два провідники розташовані на великій відстані один від одного. Перший, ємністю  $10^{-5}$  мкФ, заряджений до потенціалу 6 кВ, а другий, ємністю  $2 \cdot 10^{-5}$  мкФ, — до потенціалу 12 кВ. Яка кількість теплоти виділиться, якщо з'єднати провідники тонким дротом?
- ★ Дві однакові металеві кулі розташовані на великій відстані одна від одної. Поле першої кулі має енергію  $16 \cdot 10^{-4}$  Дж, другої —  $36 \cdot 10^{-4}$  Дж. Яка кількість теплоти виділиться, якщо з'єднати ці кулі тонким дротом?

### ФІЗИКА ТА ТЕХНІКА В УКРАЇНІ

#### Інститут електродинаміки НАН України (Київ)

Інститут, створений у 1947 р., свого часу очолювали такі видатні вчені, як академіки С. О. Лебедев, А. К. Шидловський, чл.-кор. АН УРСР О. М. Мілях. У 1951 р. акад. С. О. Лебедев створив першу на Європейському континенті електронну обчислювану машину (ЕОМ). З неї почався розвиток комп'ютерної індустрії в СРСР. У 1997 р. вченого було нагороджено американською премією як засновника радянської комп'ютерної індустрії.



О. В. Кириленко

Основні напрямки діяльності Інституту електродинаміки: перетворення та стабілізація електромагнітної енергії; аналіз, оптимізація та автоматизація електроенергетичних систем; інформаційно-вимірвальні системи та метрологічне забезпечення в енергетиці; комплексні енергетичні системи з відновлюваними джерелами енергії. У цих галузях Інститут є провідним в Україні. Досягнення інституту в галузі електроенергетичних систем дозволяють уникати аварій за умов одночасного використання різних потужних електростанцій.

Учені інституту мають багато державних та міжнародних відзнак і премій. З 2007 р. директор Інституту електродинаміки — академік НАНУ Олександр Васильович Кириленко.

# ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ 1 «ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ»

1. Вивчаючи розділ 1, ви поглибили свої знання про *електричне поле*.

*Електричне поле* — це форма матерії, яка існує навколо заряджених тіл і виявляється в дії з деякою силою на будь-яке заряджене тіло, що перебуває в цьому полі

2. Ви довели, що електричне поле має *енергію*, за рахунок якої сили, що діють з боку поля на електричний заряд, виконують *роботу*:

$$A = W_{n1} - W_{n2}; \quad A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Робота сил однорідного поля:

$$A = Eqd$$

по замкненій траєкторії  
 $A = 0$

Робота сил поля точкового заряду:

$$A = \frac{kQq}{\epsilon} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

3. Ви дізналися про *фізичні величини, які характеризують електричне поле*.

Характеристики електричного поля

Силова

Енергетична

Напруженість:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ ; для поля точкового заряду:  $E = \frac{k|q|}{\epsilon r^2}$ ;  $[E] = \frac{В}{м} = \frac{Н}{Кл}$

Потенціал:  $\varphi = \frac{W_n}{q}$ ; для поля точкового заряду:  $\varphi = \frac{kq}{\epsilon r}$ ;  $[\varphi] = В$

4. Ви вивчили *основний принцип та основну теорему електростатики*.

Принцип суперпозиції полів

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^k \vec{E}_i$$

Теорема Остроградського — Гаусса

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \sum_i q_i$$

5. Ви навчилися *графічно зображувати електричне поле*.

6. Ви дізналися, як електричне поле впливає на речовину і як речовина впливає на електричне поле.

Провідники:  $\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}' = 0$

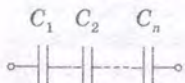
Діелектрики:  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'; \quad \epsilon = \frac{E_0}{E}$

7. Ви довідалися, що таке *конденсатори* і що їх класифікують за *призначенням, формою обкладок і типом діелектрика*.

$$C = \frac{q}{U}; \quad \text{для плоского конденсатора: } C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}; \quad [C] = \Phi;$$

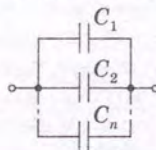
$$W = \frac{q^2}{2C}$$

Послідовне ← Види з'єднання конденсаторів → Паралельне



$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n;$$

$$U = \sum_{i=1}^n U_i; \quad \frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$



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

$$q = \sum_{i=1}^n q_i; \quad C = \sum_{i=1}^n C_i$$



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ 1 «ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ»

**Завдання 1.** На шовковій нитці висить металева кулька, заряд якої  $+20$  нКл, а маса  $2$  г. Під нею на деякій відстані розташували таку саму кульку, але заряд якої  $-4$  нКл.

(1 бал) Чи зміниться сила натягу нитки, і якщо зміниться, то як?

- а) збільшиться;      в) залишиться незмінною;  
б) зменшиться;      г) спочатку збільшиться, а потім зменшиться.

(3 бали) На якій відстані потрібно розташувати другу кульку, щоб сила натягу нитки змінилася у  $2$  рази? Кульки розташовані в повітрі.

★(6 балів) Замість кульки із зарядом  $-4$  нКл на відстані  $2$  см від металевої кульки розташували тонку металеву пластину. З якою силою ця пластина буде діяти на кульку? ★

**Завдання 2.** Електрон, рухаючись у вакуумі вздовж силової лінії електричного поля, проходить між двома точками з різницею потенціалів  $400$  В. Після проходження цієї різниці потенціалів швидкість руху електрона стає рівною нулю.

(1 бал) Яка із сил, зображених на рис. 1, показує напрямок сили, що діє на електрон?

- а)  $\vec{F}_1$ ;      б)  $\vec{F}_2$ ;      в)  $\vec{F}_3$ ;      г)  $\vec{F}_4$ .

(2 бали) Чому дорівнює робота, виконана електричним полем?

(3 бали) Визначте, якою була швидкість руху електрона, коли він потрапив в електричне поле, а також відстань, яку подолав електрон, якщо напруженість електричного поля становить  $8$  кВ/м.

(4 бали) Чому буде дорівнювати зміна кінетичної енергії електрона, якщо він потрапить в електричне поле з тією самою початковою швидкістю, але перпендикулярно до силових ліній поля? Час руху електрона в полі  $2 \cdot 10^{-8}$  с. Напруженість поля  $300$  В/м.

**Завдання 3.** Два точкові заряди, значення кожного з яких  $+40$  мкКл, розташовують у вакуумі на деякій відстані один від одного.

(2 бали) Чому дорівнює напруженість електричного поля в точці, розташованій посередині між цими зарядами?

★(6 балів) Чому дорівнює густина енергії електричного поля, створеного цими зарядами, у точці, що розташована на відстані  $10$  см від кожного заряду? ★

**Завдання 4.** На рис. 2 зображено слюдяний конденсатор, на корпусі якого вказані значення ємності та робочої напруги.

(2 бали) Визначте модуль заряду однієї з обкладок зарядженого до робочої напруги конденсатора.

- а)  $6$  мКл;      в)  $38$  кКл;  
б)  $27$  мкКл;      г)  $400$  мкКл.

(3 бали) Як зміниться енергія цього конденсатора, якщо його зарядити до робочої напруги, а потім приєднати до нього паралельно такій самий незаряджений конденсатор?

(3 бали) Чому буде дорівнювати електроємність батареї з таких конденсаторів, якщо їх з'єднати так, як показано на рис. 3?

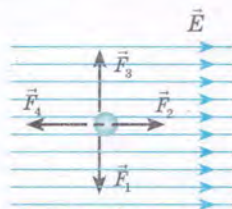


Рис. 1



Рис. 2

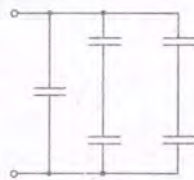


Рис. 3

Зверте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму розділіть на два (для академічного рівня) або на три (для профільного рівня). Одержане число відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.



## РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

### § 9. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА З ПОСЛІДОВНИМ І ПАРАЛЕЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМИ ПРОВІДНИКІВ.

#### ★ ШУНТИ ТА ДОДАТКОВІ ОПОРИ ★



У розділі 1 було докладно розглянуто властивості електростатичного поля, створеного нерухомими електричними зарядами. А от якщо електричні заряди *рухаються*, виникають інші фізичні явища та процеси. Саме з ними ви й ознайомитесь у цьому розділі. А почнемо з повторення базових понять та законів, відомих вам із курсу фізики 9-го класу.



#### За яких умов виникає та існує електричний струм

**Електричний струм** — це процес напрямленого руху заряджених частинок.

Для виникнення та існування електричного струму необхідні:

— наявність вільних заряджених частинок — носіїв струму;

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

За створення електричного поля «відповідають» *джерела струму*.

**Джерела електричного струму** — пристрої, що перетворюють різні види енергії на електричну енергію.

У джерелах електричного струму виконується *робота з розділення різномісних електричних зарядів*, у результаті чого на одному полюсі джерела накопичується позитивний заряд, а на другому — негативний; у такий спосіб створюється електричне поле.

Прикладами джерел струму можуть слугувати акумулятори та гальванічні елементи.



#### Що таке електричне коло

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

**Електричною схемою** називають креслення, на якому умовними позначеннями показано, з яких елементів складається електричне коло і яким чином ці елементи з'єднані між собою.

Умовні позначення деяких елементів електричного кола наведено на рис. 9.1.

Зверніть увагу:

— *напрямок струму в колі умовно вважають напрямком*, у якому рухалися б по колу позитивно заряджені частинки, тобто напрямком від позитивного полюса джерела струму до негативного;

— в умовному позначенні джерела струму *довга риска* означає позитивний полюс джерела, а *коротка* — негативний.



Елемент електричного кола	Умовне позначення	Елемент електричного кола	Умовне позначення
Гальванічний елемент або акумулятор		Резистор	
Батарея гальванічних елементів або акумуляторів		Електрична лампа	
З'єднання проводів		Електричний дзвінок	
Перетин проводів (без з'єднання)		Нагрівальний елемент	
Затискачі для під'єднання якого-небудь приладу		Штепсельна розетка	
Ключ		Запобіжник	

Рис. 9.1. Умовні позначення деяких елементів електричного кола

### 3 Яка фізична величина характеризує електричний струм

**Сила струму  $I$**  — це фізична величина, яка характеризує електричний струм і дорівнює відношенню заряду  $\Delta q$ , що проходить через поперечний переріз провідника за інтервал часу  $\Delta t$ , до цього інтервалу:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Якщо сила струму не змінюється з часом, то такий електричний струм називають *постійним*. Сила постійного струму  $I$  в провіднику чисельно дорівнює заряду  $q$ , що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{q}{t}$$

Одиниця сили струму в СІ — **ампер (А)**. Це одна з основних одиниць СІ. 1 А дорівнює силі струму, який, проходячи в двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини та нехтовно малої площі кругового поперечного перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликає би на кожній ділянці провідників довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

Для організму людини вважається безпечною сила струму, значення якої не перевищує 1 мА; сила струму 100 мА може призвести до серйозних уражень.

Прилад для вимірювання сили струму називають *амперметром*. Амперметр вмикають в електричне коло послідовно з провідником, у якому вимірюють силу струму (рис. 9.2).

Зверніть увагу: *не можна* приєднувати амперметр до кола, в якому *відсутній споживач струму*.

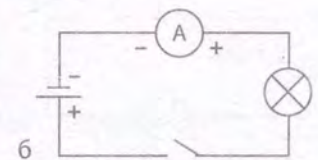


Рис. 9.2. Вимірювання амперметром сили струму, який проходить через лампу: а — загальний вигляд електричного кола; б — схема

**4 Як формулюється закон Ома для ділянки кола**

Сила струму в ділянці кола визначається **законом Ома для ділянки кола**:

Сила струму  $I$  в ділянці кола прямо пропорційна напрузі  $U$  на кінцях цієї ділянки.

Математичним записом закону Ома є формула:

$$I = \frac{U}{R},$$

де  $R$  — опір ділянки (залежить тільки від властивостей провідників, що її складають).

Якщо ділянка кола *не містить джерела струму*, електрична напруга  $U$  на її кінцях чисельно дорівнює роботі електричного поля з переміщення одиничного позитивного заряду  $q$  по цій ділянці:

$$U = \frac{A}{q},$$

де  $A$  — робота, яку виконує (або може виконати) електричне поле при переміщенні заряду  $q$  по даній ділянці кола. *Одиниця напруги в СІ — вольт (В).*

Прилад для вимірювання напруги називають *вольтметром*. Вольтметр приєднують до електричного кола *паралельно* ділянці кола, на якій необхідно виміряти напругу (рис. 9.3).

**Електричний опір** — це фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти електричному струму.

*Одиниця опору в СІ — Ом. 1 Ом — це опір такого провідника, в якому тече струм силою 1 А за напруги на кінцях провідника 1 В.*

Опір  $R$  провідника прямо пропорційний його довжині  $l$ , обернено пропорційний площі  $S$  його поперечного перерізу й залежить від речовини, з якої виготовлений провідник:

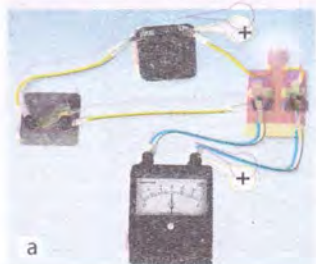
$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де  $\rho$  — питомий опір речовини, з якої виготовлений провідник.

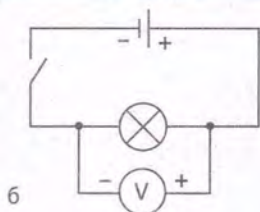
**Питомий опір речовини** — це фізична величина, яка характеризує електричні властивості речовини та чисельно дорівнює опору виготовленого з неї провідника довжиною 1 м і площею поперечного перерізу 1 м<sup>2</sup>.

*Одиниця питомого опору в СІ — ом-метр (Ом·м).*

Зверніть увагу: значення питомого опору речовини зумовлене *хімічною природою речовини* та істотно залежить від *температури*.



а



б

**Рис. 9.3.** Вимірювання вольтметром напруги на лампі:  
а — загальний вигляд;  
б — схема електричного кола



### 5 Які характерні риси має ділянка кола, яка складається з послідовно з'єднаних провідників

З'єднання провідників називають *послідовним*, якщо воно не містить розгалужень, тобто провідники розташовані послідовно один за одним (рис. 9.4). Зрозуміло, що таким чином можна з'єднати будь-яку кількість провідників.

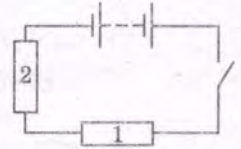


Рис. 9.4. Схема кола, яке складається з послідовного з'єднання провідників

Як приклад розглянемо ділянку кола, яка містить послідовне з'єднання лише двох резисторів, а потім *узагальнимо отримані співвідношення* для послідовного з'єднання будь-якої кількості провідників.

1. Сила струму в кожному з двох послідовно з'єднаних провідників однакова:  $I_1 = I_2 = I$

Дійсно, оскільки коло з послідовним з'єднанням провідників не містить розгалужень, то заряд, який пройшов через поперечний переріз будь-якого провідника за деякий час  $t$ , буде однаковим:  $q_1 = q_2 = q$ .

Поділивши цей вираз на  $t$ , отримуємо:  $\frac{q_1}{t} = \frac{q_2}{t} = \frac{q}{t}$ . Отже,  $I_1 = I_2 = I$ .

2. Загальна напруга на двох послідовно з'єднаних провідниках дорівнює сумі напруг на них:  $U = U_1 + U_2$

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 даного заряду через обидва провідники має бути виконана робота  $A = A_1 + A_2$ . Поділивши обидві частини рівності на значення  $q$  цього заряду, маємо:  $\frac{A}{q} = \frac{A_1}{q} + \frac{A_2}{q}$ .

Оскільки  $U = \frac{A}{q}$ , отримаємо  $U = U_1 + U_2$ .

3. У разі послідовного з'єднання двох провідників напруга на кожному провіднику прямо пропорційна його опорі:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$

Зважаючи на закон Ома та співвідношення 1, маємо:  $\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$ ,  
або  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ .

4. Загальний опір двох послідовно з'єднаних провідників дорівнює сумі їхніх опорів:  $R = R_1 + R_2$

Згідно зі співвідношеннями 1 і 2 та законом Ома маємо:  $IR = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$ . Після скорочення на  $I$  отримаємо:  $R = R_1 + R_2$ .

Як уже зазначалося, наведені співвідношення можна *уза-*

Отже, у разі послідовного з'єднання  $n$  провідників справджуються такі співвідношення:

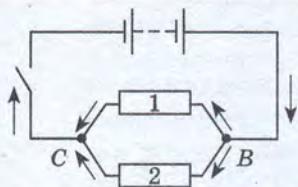
$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \qquad U = \sum_{i=1}^n U_i \qquad R = \sum_{i=1}^n R_i$$

Зверніть увагу:

— загальний опір провідників, з'єднаних послідовно, більший за опір кожного з цих провідників;

— загальний опір  $R$  послідовно з'єднаних провідників, кожний з яких має опір  $R'$ , дорівнює:  $R = nR'$ , де  $n$  — кількість провідників.

**6 Які характерні риси має ділянка кола, яка складається з паралельно з'єднаних провідників**



**Рис. 9.5.** Схема кола, яке містить паралельне з'єднання провідників. Стрілками показано напрямок струму в нерозгалуженій частині кола та у відгалуженнях. Літерами  $B$  і  $C$  позначені вузлові точки

З'єднання провідників називають *паралельним*, якщо для проходження струму є два чи більше шляхів — *віток* — і всі ці вітки мають одну пару спільних точок — *вузлів*. 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, що містить паралельне з'єднання лише двох резисторів (рис. 9.5), а потім *узагальнимо отримані співвідношення* для будь-якої кількості паралельно з'єднаних провідників.

1. *Загальна напруга на ділянці та напруга на кожному з двох паралельно з'єднаних провідників є однаковими:*  $U = U_1 = U_2$

Ця рівність випливає з визначення паралельного з'єднання провідників.

2. У разі паралельного з'єднання двох провідників *сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів у відгалуженнях (окремих вітках):*  $I = I_1 + I_2$

Дійсно, струм, дійшовши до розгалуження (вузлова точка  $B$ ), розтікається по двох вітках. Оскільки заряд у вузловій точці не накопичується, то заряд  $q$ , який надійшов у вузол за певний час  $t$ , дорівнює сумі зарядів ( $q_1 + q_2$ ), які вийшли з цього вузла за той же час:  $q = q_1 + q_2$ . Поділимо обидві частини рівності на  $t$ :  $\frac{q}{t} = \frac{q_1}{t} + \frac{q_2}{t}$ .

Оскільки  $\frac{q}{t} = I$ , то:  $I = I_1 + I_2$ .

3. У разі паралельного з'єднання двох провідників *сила струму в кожній вітці обернено пропорційна її опорю:*  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$



Зважаючи на закон Ома та співвідношення 1, маємо:  $I_1 R_1 = I_2 R_2$ ,  
 або  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ .

4. Величина, обернена загальному опору розгалуженої ділянки кола, дорівнює сумі величин, кожна з яких обернена опору відповідної вітки цього розгалуження:

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

Згідно зі співвідношеннями 1 і 2 та законом Ома одержимо:  
 $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$ . Після скорочення на  $U$  маємо:  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ .

Отже, узагальнимо: для паралельно з'єднаних  $n$  провідників справджуються такі співвідношення:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \qquad U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \qquad \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Зверніть увагу:

- загальний опір провідників, з'єднаних паралельно, менший за опір кожного з цих провідників;
- загальний опір  $R$  паралельно з'єднаних провідників, кожний з яких має опір  $R'$ , дорівнює:  $R = \frac{R'}{n}$ , де  $n$  — кількість провідників.

**★ 7 Для чого потрібні шунти та додаткові опори**

Кожен вольтметр має певну верхню межу вимірювання — найбільше значення напруги, яке можна виміряти цим приладом. Але якщо до вольтметра послідовно приєднати так званий додатковий опір, наприклад резистор, то межа вимірювання вольтметра збільшиться. Це відбудеться тому, що вимірювана напруга  $U$  ділиться на дві частини: одна частина припадає на вольтметр ( $U_b$ ), а друга — на резистор, який забезпечує *додатковий опір* ( $U_d$ ):  $U = U_b + U_d$  (рис. 9.6). Згідно зі співвідношенням 3 для послідовно з'єднаних

провідників  $\frac{U_b}{U_d} = \frac{R_b}{R_d}$ , де  $R_b$  — опір вольтметра;  $R_d$  — опір резистора. Звідси  $R_d = \frac{U_d}{U_b} R_b$ . Тоді з урахуванням  $U_d = U - U_b$  отримаємо:

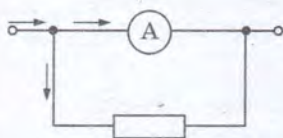
$$R_d = \frac{U - U_b}{U_b} R_b = \frac{U}{U_b} R_b - R_b = R_b (n - 1), \text{ де } n = \frac{U}{U_b} \text{ —}$$

коефіцієнт, який показує, у скільки разів зростає межа вимірювання вольтметра, тобто в скільки разів зростає ціна поділки його шкали. Отже, значення *додаткового опору* ( $R_d$ ) обчислюють за формулою:

$$R_d = R_b (n - 1).$$



Рис. 9.6. Збільшення межі вимірювання вольтметра за допомогою резистора, який приєднують послідовно до вольтметра



**Рис. 9.7.** Схема шунтування амперметра за допомогою резистора, який приєднують паралельно амперметру. Стрілками показано напрямки струму

Для вимірювання сили струму, більшої за ту, на яку розрахований амперметр, можна скористатися цим самим амперметром. Для цього слід паралельно амперметру підключити резистор, який у цьому випадку називають *шунтом* (рис. 9.7).

У разі застосування шунта сила струму, який іде через амперметр ( $I_a$ ), дорівнює:  $I_a = I - I_m$  (\*), де  $I$  — вимірювана сила струму;  $I_m$  — сила струму, який проходить через шунт. Згідно зі співвідношенням 3 для паралельно з'єднаних провідників  $\frac{I_m}{I_a} = \frac{R_a}{R_m}$ , де  $R_a$  — опір амперметра;  $R_m$  — опір шунта (резистора). Звідси  $R_m = \frac{I_a R_a}{I_m}$ .

Тоді з урахуванням формули (\*) отримаємо:  

$$R_m = \frac{I_a}{I - I_a} R_a = \frac{R_a}{\frac{I}{I_a} - 1} = \frac{R_a}{n - 1}$$
, де  $n = \frac{I}{I_a}$  — коефіцієнт, який показує,

у скільки разів зростає значення верхньої межі вимірювання сили струму амперметром, тобто у скільки разів зростає ціна поділки його шкали. Отже, значення опору шунта обчислюють за формулою:

$$R_m = \frac{R_a}{n - 1} \star$$

## 8 Учимся розв'язувати задачі

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

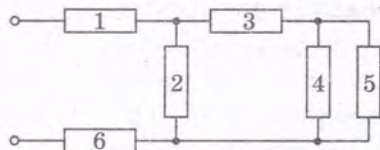


Схема 1

$$R_{1;2;3;4;5;6} \text{ — ?}$$

$$U_2 \text{ — ?}$$

$$I_1 \text{ — ?}$$

$$I_6 \text{ — ?}$$

Дано:

$$U = 31,2 \text{ В}$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = \\ = R_5 = R_6 = R = 8 \text{ Ом}$$

*Аналіз фізичної проблеми.* Аналіз поданої електричної *схеми 1* показує, що електричне коло містить мішане з'єднання провідників. Тому спочатку спростимо дану схему, а потім, скориставшись законом Ома та співвідношеннями для послідовного та паралельного з'єднань провідників, знайдемо значення шуканих величин.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Оскільки резистори 4 і 5 з'єднані паралельно, то  $R_{4;5} = \frac{R}{2} = \frac{8 \text{ Ом}}{2} = 4 \text{ Ом}$ .



Отже, у схемі 1 резистори 4 і 5 можна замінити одним резистором 4-5, опір якого  $R_{4;5} = 4$  Ом. Тоді вихідна схема набуде вигляду, який має схема 2.

У схемі 2 можна замінити резистори 3 і 4-5 резистором 3-4-5, опір якого  $R_{3;4;5} = R_3 + R_{4;5} = 12$  Ом, і отримати схему 3.

Потім замінимо резистори 2 і 3-4-5 резистором 2-3-4-5 та отримаємо схему 4. Опір  $R_{2;3;4;5}$  розрахуємо за допомогою формули:

$$\frac{1}{R_{2;3;4;5}} = \frac{1}{R_{3;4;5}} + \frac{1}{R_2},$$

$$\frac{1}{R_{2;3;4;5}} = \frac{20}{96 \text{ Ом}} \Rightarrow R_{2;3;4;5} = 4,8 \text{ Ом}.$$

Схема 4 містить послідовне з'єднання резисторів 1, 2-3-4-5 і 6. Таким чином, загальний опір ділянки кола становить:

$$R_{1;2;3;4;5;6} = R_1 + R_{2;3;4;5} + R_6 = 2R + R_{2;3;4;5} = 16 \text{ Ом} + 4,8 \text{ Ом} = 20,8 \text{ Ом}.$$

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

Оскільки  $I_1 = I_6 = I$ , то  $I_1 = I_6 = 1,5$  А.

Аналізуючи схеми 2 і 3, доходимо висновку, що  $U_{2;3;4;5} = U_2$ . Тому  $U_2 = IR_{2;3;4;5} = 1,5 \text{ А} \cdot 4,8 \text{ Ом} = 7,2 \text{ В}$ .

**Відповідь:** загальний опір ділянки кола  $R_{1;2;3;4;5;6} = 20,8$  Ом; напруга на резисторі 2 становить  $U_2 = 7,2$  В; сила струму в резисторах 1 і 6 однакова:  $I_1 = I_6 = 1,5$  А.

### ★ Задача 2.

Амперметр розрахований на максимальну силу струму  $I_a = 2$  А. Визначте, який додатковий опір необхідно приєднати до цього амперметра, щоб прилад можна було використовувати як вольтметр для вимірювання напруг до  $U = 220$  В. Відомо: якщо до даного амперметра приєднати шунт із опором  $R_{ш} = 0,5$  Ом, то ціна поділки шкали зростає в 10 разів.

$R_d = ?$

Дано:

$$I_a = 2 \text{ А}$$

$$U = 220 \text{ В}$$

$$R_{ш} = 0,5 \text{ Ом}$$

$$n = 10$$

**Аналіз фізичної проблеми.** Щоб використовувати амперметр як вольтметр із межею вимірювання  $U$ , до амперметра необхідно послідовно приєднати додатковий опір. При цьому значення додаткового опору має бути таким, щоб під час проходження через амперметр максимальної сили струму  $I_a$  загальна напруга на амперметрі та додатковому опорі становила  $U$ . Тоді, визначивши опір амперметра та використавши співвідношення для послідовного з'єднання провідників, знайдемо шукану величину.

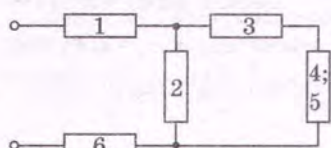


Схема 2

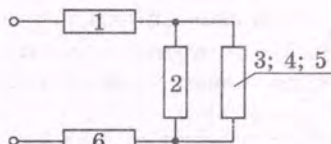


Схема 3

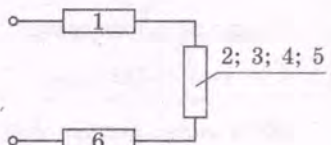


Схема 4

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Спочатку визначимо опір амперметра, враховуючи, що приєднання до нього шунта з опором  $R_{\text{ш}}$  збільшить ціну поділки шкали амперметра в  $n = \frac{I}{I_a}$  разів. Таким чином, маємо:  $\frac{I_a}{I_{\text{ш}}} = \frac{R_{\text{ш}}}{R_a}$ ;  $I_{\text{ш}} = I - I_a$ . Отже,  $R_a = \frac{R_{\text{ш}}(I - I_a)}{I_a} = R_{\text{ш}}(n - 1)$ .

Після підключення до амперметра додаткового опору будуть справджуватися співвідношення  $I_a = I_d$  і  $U = U_a + U_d$ , де  $U_a$  і  $U_d$  — напруга на амперметрі та додатковому опорі відповідно. Зважаючи на закон Ома, перепишемо останню рівність у вигляді:  $U = I_a R_a + I_d R_d$ . Звідси  $R_d = \frac{U - I_a R_a}{I_a}$ . Після підставлення виразу для опору амперметра отримаємо:  $R_d = \frac{U}{I_a} - R_{\text{ш}}(n - 1)$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[R_d] = \frac{\text{В}}{\text{А}} - \text{Ом} = \text{Ом} - \text{Ом} = \text{Ом}; \quad \{R_d\} = \frac{220}{2} - 4,5 \approx 106, \quad R_d \approx 106 \text{ Ом.}$$

*Відповідь:* додатковий опір, який потрібно підключити до амперметра,  $R_d \approx 106 \text{ Ом}$ .★



### Контрольні запитання

1. Що таке електричний струм? Сформулюйте умови виникнення та існування електричного струму.
2. Які пристрої називають джерелами електричного струму?
3. Що називають електричною схемою?
4. Як на електричних схемах зображують гальванічний елемент? батарею гальванічних елементів? електричний дзвінок? ключ?
5. Що беруть за напрямок струму в електричному колі?
6. Дайте характеристику сили струму як фізичної величини.
7. Дайте характеристику напруги як фізичної величини.
8. Що таке опір провідника? Від яких величин він залежить?
9. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
10. Що таке питомий опір речовини?
11. Яке з'єднання провідників називають послідовним?
12. Які співвідношення справджуються в разі послідовного з'єднання провідників? Доведіть їх.
13. Яке з'єднання провідників називають паралельним?
14. Які співвідношення справджуються в разі паралельного з'єднання провідників? Доведіть їх.★
15. Як можна збільшити верхню межу вимірювання вольтметра?★
16. У якому випадку шунтують амперметри?



### Вправа № 9

*Якщо не зазначено інше, опором з'єднувальних проводів слід знехтувати.*

1. По провіднику, до кінців якого прикладена напруга 12 В, за 5 хв пройшов заряд 60 Кл. Визначте опір провідника.
2. Яким має бути завдовжки ніхромовий дріт з площею поперечного перерізу 0,2 мм<sup>2</sup>, щоб під час проходження в ньому струму 0,4 А напруга на його кінцях становила 4,4 В? Питомий опір ніхрому  $1,1 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .
3. Під час проходження електричного струму в алюмінієвому дроті завдовжки 100 м напруга на ньому становить 1 В. Чому дорівнює маса алюмінієвого дроту, якщо сила струму в ньому 15 А? Густина алюмінію 2700 кг/м<sup>3</sup>.
4. Коло, що має опір 100 Ом, живиться від джерела постійної напруги. Амперметр із опором 1 Ом, приєднаний до кола, показав силу струму 5 А. Якою була сила струму в колі до приєднання амперметра?



5. Визначте загальний опір  $R$  ділянки кола (рис. 1), 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 резисторів.
- ★ 7. Шкала деякого приладу з внутрішнім опором 50 Ом має 100 поділок. Ціна поділки шкали дорівнює 10 мкА. Як із цього приладу зробити: а) вольтметр із межею вимірювання напруги 200 В? б) міліамперметр із межею вимірювання сили струму 800 мА?
- ★ 8. Зі шматка дроту, що має опір 32 Ом, виготовлено кільце. До двох точок цього кільця приєднано проводи, які підводять напругу. У якому відношенні точки приєднання ділять довжину кола кільця, якщо загальний опір утвореного кола становить 6 Ом?
- ★ 9. Коли в ділянці кола, схему якої зображено на рис. 2, замкнено ключ, сила струму, який проходить через амперметр, дорівнює 0,45 А. Якої сили струму тектиме через амперметр, коли ключ розімкнено? Опори резисторів 1 і 3 та 2 і 4 попарно однакові та дорівнюють  $R$  і  $2R$  відповідно. Напруга на клеммах є постійною.

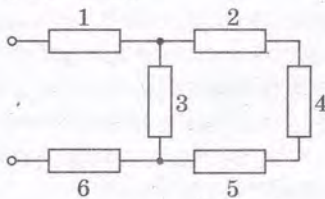


Рис. 1

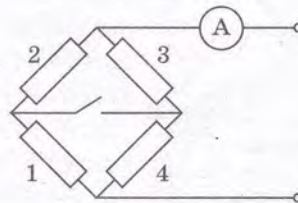


Рис. 2

## § 10. ЕЛЕКТРУРУШІЙНА СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА

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

**1** **Умови існування постійного електричного струму в колі**  
Ви вже знаєте умови виникнення та існування електричного струму. Існування електричного струму в провіднику можливе тільки за наявності в ньому електричного поля. Розглянемо, як це можна реалізувати на практиці.

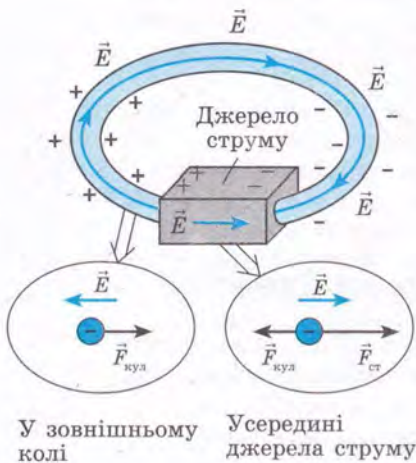
Відомо, що електричне поле існуватиме в провіднику, якщо на його кінцях якимось чином створити різницю потенціалів, — наприклад, приєднати один кінець провідника до позитивно зарядженої обклашки конденсатора, а другий — до негативно зарядженої. Як тільки буде створена різниця потенціалів, вільні електрони провідника, не припиняючи хаотичного руху, під дією кулонівських сил почнуть рухатися напрямлено — від кінця провідника з нижчим потенціалом до кінця з вищим потенціалом, тобто від кінця, що має негативний заряд, до кінця, що має позитивний заряд. Такий перерозподіл зарядів спричинить зменшення різниці потенціалів між



кінцями провідника та поступово приведе до того, що ця різниця дорівнюватиме нулю (конденсатор розрядиться), а електричний струм припиниться.

Таким чином, щоб електричний струм у провіднику існував протягом *тривалого часу*, необхідно *постійно підтримувати різницю потенціалів на кінцях провідника*. Тобто необхідно приєднувати провідник не до конденсатора, а до пристрою, між клемми якого тривалий час може існувати різниця потенціалів. Такий пристрій називають *джерелом струму* або *генератором струму*.

Різниця потенціалів між клемми джерела струму створюється за рахунок примусового «перетягування» зарядів усередині джерела; при цьому долаються сили, що діють з боку електричного поля, яке, власне, виникає та підсилюється в результаті такого «перетягування». Причини руху зарядів у джерелі за своєю природою *відмінні від природи кулонівських сил*. Тому сукупність причин, які викликають примусове переміщення зарядів усередині джерела струму, називають *сторонніми силами*.



**Рис. 10.1.** Модель замкнутого кола. Коли до полюсів джерела струму приєднують провідник (споживач струму), то в провіднику створюється електростатичне поле напруженістю  $\vec{E}$ . Під дією кулонівських сил ( $\vec{F}_{кул}$ ) електрони починають рухатися від негативного полюса джерела струму до позитивного. Усередині ж джерела завдяки дії сторонніх сил ( $\vec{F}_{ст}$ ) негативні заряди переміщуються від позитивного полюса до негативного, тобто в напрямку, протилежному напрямку кулонівських сил, які також діють усередині джерела

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

Приєднання провідника до джерела струму створює провідний замкнений контур, який називають *замкнене електричне коло*. Якщо на полюсах джерела струму існує постійна різниця потенціалів, то й на кінцях провідника (споживача струму), який разом із джерелом складає замкнене коло, створюється постійна різниця потенціалів. У результаті починається «коловорот» зарядів у колі, тобто в ньому йде постійний струм (рис. 10.1).

## 2 Що називають електрорушійною силою

Ми дійшли висновку, що для підтримки в замкнутому колі постійного струму в коло необхідно включити джерело струму.

✎ Коли до кола підключають джерело струму, всередині провідника виникає електричне поле. Механізм створення цього поля є доволі складним. Дещо спрощено можна сказати, що на поверхні провідника з'являються некомпенсовані заряди, які



створюють усередині провідника таке електричне поле, що підтримує постійний у всьому колі електричний струм.★

Основна характеристика джерела струму — *електрорушійна сила\** (ЕРС).

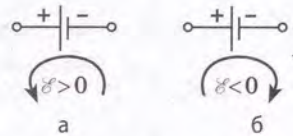
**Електрорушійна сила**  $\mathcal{E}$  — це скалярна фізична величина, яка характеризує енергетичні властивості джерела струму та дорівнює відношенню роботи сторонніх сил ( $A_{\text{ст}}$ ) з переміщення позитивного заряду всередині джерела струму від негативного полюса до позитивного до значення  $q$  цього заряду:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} \quad (1)$$

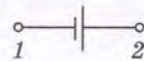
Одиниця ЕРС у СІ — **вольт (В)**.

ЕРС джерела струму дорівнює 1 В, якщо сторонні сили, які діють у джерелі, виконують роботу 1 Дж, переміщуючи одиничний позитивний заряд від негативного полюса до позитивного.

Електрорушійна сила того самого джерела струму може мати як негативне, так і позитивне значення залежно від довільно обраного напрямку *обходу* ділянки електричного кола, на якій розміщене джерело струму. Так, якщо обхід відбувається від негативного полюса до позитивного, то ЕРС додатна, бо в цьому випадку сторонні сили всередині джерела виконують додатну роботу (рис. 10.2).



**Рис. 10.2.** Визначення знака ЕРС джерела струму: *a* — ЕРС джерела додатна, оскільки обхід відбувається від негативного до позитивного полюса джерела; *б* — ЕРС джерела від'ємна, оскільки обхід відбувається від позитивного до негативного полюса джерела. Стрілками показано напрямок обходу



**Рис. 10.3.** Схема неоднорідної ділянки 1–2 електричного кола, яка містить джерело струму

### 3 Що називають напругою на ділянці кола

Спочатку зазначимо, що ділянки електричного кола бувають неоднорідними та однорідними. Якщо під час проходження в ділянці електричного струму на вільні заряджені частинки діють *кулонівські та сторонні сили*, ділянку називають *неоднорідною*, якщо діють *тільки кулонівські сили*, — *однорідною*.

Розглянемо *неоднорідну* ділянку 1–2 електричного кола, зображену на рис. 10.3.

Ділянка є неоднорідною, тому робота  $A_{1 \rightarrow 2}$  з переміщення вільних заряджених частинок, яка виконується під час проходження електричного струму в цій ділянці, дорівнює:  $A_{1 \rightarrow 2} = A_{1 \rightarrow 2}^{\text{кул}} + A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}$ , де  $A_{1 \rightarrow 2}^{\text{кул}}$  і  $A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}$  — робота з переміщення заряду з точки 1 в точку 2 ділянки, яка виконується кулонівськими та сторонніми силами відповідно.

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

Тоді робота з переміщення *одиночного* позитивного заряду в ділянці 1–2 електричного кола, в якому тече постійний струм, становить:  $\frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q} = \frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{кул}}}{q} + \frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}}{q}$ , де  $q$  — значення позитивного заряду, який переноситься на ділянці 1–2. Однак відношення  $\frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}}{q}$  за ви- значенням дорівнює різниці потенціалів між точками 1 і 2 ділян- ки 1–2 кола, тобто  $\frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{кул}}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2$ , а відношення  $\frac{A_{1 \rightarrow 2}^{\text{ст}}}{q}$  згідно з форму- лою (1) дорівнює ЕРС  $\mathcal{E}$  джерела струму. Отже,  $\frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}$ , або  $U_{1 \rightarrow 2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}$ , де  $U_{1 \rightarrow 2}$  — *напруга (падіння напруги)* на ділян- ці 1–2 кола.

Таким чином, *напруга (падіння напруги)* на ділянці 1–2 ко- ла — це скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює повній роботі  $A_{1 \rightarrow 2}$  кулонівських і сторонніх сил з переміщення одиночного позитивного заряду в ділянці кола з точки 1 в точку 2:  $U_{1 \rightarrow 2} = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}$ . Отже:

$$U_{1 \rightarrow 2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E} \quad (2)$$

Зверніть увагу: у загальному випадку напруга на даній ділянці кола дорівнює алгебраїчній сумі різниці потенціалів і ЕРС на цій ділянці. Якщо ж на ділянці діють тільки кулонівські сили, а сто- ронні сили відсутні (саме з такими ділянками ви до цього параграфу мали справу), то напруга на ділянці дорівнює різниці потенціалів:  $U_{1 \rightarrow 2} = \varphi_1 - \varphi_2$  за  $\mathcal{E} = 0$ .

#### 4 Чому дорівнює сила струму в повному колі



Рис. 10.4. Схема неоднорідної ді- лянки 1–2 електричного кола, яка містить джерело струму та резистор

Визначимо силу струму в *неоднорідній* ділянці електричного кола, зображеній на рис. 10.4.

Відповідно до закону Ома для ділянки кола сила струму  $I = \frac{U}{R}$ , де  $U$  — напруга на ділянці;  $R$  — опір ділянки. Отже, з ураху- ванням (2) маємо:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}}{R}, \quad (3)$$

де  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  — різниця потенціалів між точка- ми 1 і 2 ділянки;  $\mathcal{E}$  — ЕРС джерела струму, яке містить ділянка.

Якщо з'єднати кінці даної ділянки, отримаємо найпростіше повне (замкнене) електричне коло (рис. 10.5), що складається



Рис. 10.5. Повне (замкнене) коло складається з двох частин (діля- нок) — внутрішньої та зовнішньої



з двох частин (ділянок) — *внутрішньої* та *зовнішньої*. Внутрішня частина являє собою джерело струму, яке має ЕРС  $\mathcal{E}$  і внутрішній опір  $r^*$ ; зовнішня — з'єднувальні проводи та резистор, загальний опір яких  $R$ . Зрозуміло, що для повного кола  $\phi_1 = \phi_2$ , а загальний опір кола дорівнює сумі опорів зовнішньої та внутрішньої частин кола ( $R+r$ ). Тоді формула (3) набуває вигляду:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ . (4)

Отже, маємо **закон Ома для повного кола**:

Сила струму  $I$  у повному електричному колі дорівнює відношенню ЕРС джерела струму ( $\mathcal{E}$ ) до суми опорів зовнішньої частини кола ( $R$ ) і внутрішньої його частини ( $r$ ):

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

Фактично цей закон можна розглядати як закон збереження енергії для системи рухомих зарядів. (Спробуйте довести це твердження самостійно.)

Уже зазначалося, що для вирішення різних електротехнічних завдань джерела струму з'єднують у батареї. У разі *послідовного з'єднання  $n$  однакових джерел струму* (рис. 10.6), кожне з яких має ЕРС  $\mathcal{E}'$  і внутрішній опір  $r'$ , закон Ома для повного кола має вигляд:

$$I = \frac{n\mathcal{E}'}{R+nr'}$$

Послідовне з'єднання джерел струму застосовують у тому випадку, коли  $R \gg nr'$  і батарея може забезпечити силу струму  $I = \frac{n\mathcal{E}'}{R}$  у  $n$  разів більшу, ніж сила струму від одного джерела.

У разі *паралельного з'єднання  $n$  однакових джерел струму* (рис. 10.7), кожне з яких має ЕРС  $\mathcal{E}'$  і внутрішній опір  $r'$ , закон Ома для повного кола має вигляд:

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

Паралельне з'єднання джерел струму застосовують, наприклад, у тому випадку, коли для нормальної роботи споживача необхідна сила струму, значення якої перевищує максимальну силу струму одного джерела. Паралельне з'єднання є доцільним, коли  $R < r'$ .

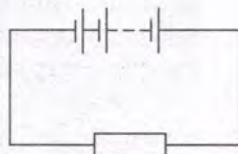


Рис. 10.6. Коло з послідовним з'єднанням джерел струму

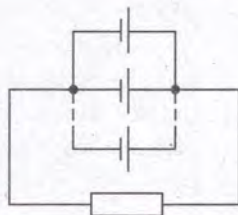


Рис. 10.7. Коло з паралельним з'єднанням джерел струму

\* Якщо джерелом струму є генератор, його внутрішній опір — це опір обмоток; якщо джерелом є гальванічний елемент або акумулятор, їх внутрішній опір — це опір електроліту та електродів.

## ★ 5 Що називають коротким замиканням

Формулу, що виражає закон Ома для повного кола, можна записати у вигляді:  $\mathcal{E} = I(R+r)$ , або  $\mathcal{E} = IR + Ir$ , де  $IR = U$  — падіння напруги на зовнішній частині кола;  $Ir$  — падіння напруги на внутрішній частині кола (всередині джерела струму).

Таким чином,  $\mathcal{E} = U + Ir$ , звідки:

$$U = \mathcal{E} - Ir. \quad (5)$$

Аналізуючи формулу (5), доходимо висновку, що при  $\mathcal{E} = \text{const}$  напруга на зовнішній частині кола зменшується зі збільшенням сили струму в колі.

Після підставлення у формулу (5) виразу для сили струму (4) одержимо:

$$U = \mathcal{E} \left( 1 - \frac{r}{R+r} \right).$$

Проаналізуємо останню формулу для деяких граничних режимів роботи кола.

Якщо коло розімкнене ( $R \rightarrow \infty$ ), то  $U = \mathcal{E}$ , тобто напруга на полюсах джерела струму дорівнює його ЕРС. Цим користуються у вимірюванні ЕРС джерела струму за допомогою вольтметра, який підключають до клем джерела струму. Зрозуміло, що для вимірювання необхідно взяти вольтметр, опір  $R_v$  якого набагато більший, аніж внутрішній опір  $r$  джерела струму ( $R_v \gg r$ ), оскільки тільки за такої умови покази вольтметра будуть близькими до значення ЕРС джерела струму.

Якщо до клем джерела струму підключений провідник, опір  $R$  якого набагато менший, аніж внутрішній опір  $r$  джерела струму ( $R \ll r$ ), то  $R+r \approx r$  і тоді  $U = \mathcal{E} \left( 1 - \frac{r}{r} \right) = 0$ , тобто напруга на полюсах джерела струму дорівнює нулю, а сила струму сягає максимального значення.

Підключення до полюсів джерела струму провідника з мізерно малим опором називають *коротким замиканням*, а струм, який при цьому виникає, — *струмом короткого замикання*. Значення сили струму короткого замикання ( $I_{к.з}$ ) є максимальним для даного джерела струму:

$$I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

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

Сила струму короткого замикання нового 1,5-вольтового гальванічного елемента дорівнює приблизно 15 А. Тому коротке замикання



гальванічного елемента призведе до значного нагріву пристрою. Дуже небезпечними є можливі наслідки короткого замикання, наприклад, в електричній проводці житлового будинку. Так, струм короткого замикання побутових розеток (значення  $I_{к.з}$  може сягати понад 40 А) може викликати перегрів проводів та пожежу в будівлі. Саме тому електрична проводка повинна містити запобіжники.★

## 6 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Коли батарею гальванічних елементів замикають на опір  $R_1$ , напруга на затискачах батареї становить 5 В. Коли зовнішній опір збільшують у 6 разів, напруга на затискачах зростає вдвічі. Чому дорівнює ЕРС батареї?

$\mathcal{E}$  — ?

Дано:

$$U_1 = 5 \text{ В}$$

$$R_2 = 6R_1$$

$$U_2 = 2U_1$$

*Аналіз фізичної проблеми.* У задачі йдеться про повне коло, в якому джерело залишається тим самим, а зовнішній опір змінюється. Тому, записавши для двох випадків закон Ома для повного кола та застосувавши його для ділянки кола, можемо скласти систему рівнянь; розв'язавши її, знайдемо шукану величину.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Позначимо через  $I_1$  та  $I_2$  силу струму в колі в першому та другому випадках відповідно.

Зважаючи на закон Ома для повного кола, маємо: 
$$\begin{cases} \mathcal{E} = I_1(R_1 + r), \\ \mathcal{E} = I_2(R_2 + r). \end{cases}$$

Сили струмів  $I_1$  та  $I_2$  знайдемо із закону Ома для ділянки кола, враховуючи, що  $U_1 = R_1 I_1$  і  $2U_1 = 6R_1 I_2$ . Отже,  $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$  і  $I_2 = \frac{2U_1}{6R_1}$ .

Після підставлення значень  $I_1$  і  $I_2$  у формули системи маємо:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = \frac{U_1}{R_1}(R_1 + r), & \mathcal{E} = U_1 \left(1 + \frac{r}{R_1}\right), \\ \mathcal{E} = \frac{2U_1}{6R_1}(6R_1 + r); & \mathcal{E} = 2U_1 \left(1 + \frac{r}{6R_1}\right). \end{cases}$$

З першого рівняння знайдемо:  $\frac{r}{R_1} = \frac{\mathcal{E} - U_1}{U_1}$  і підставимо в друге.

$$\text{Тоді } \mathcal{E} = 2U_1 \left(1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{\mathcal{E} - U_1}{U_1}\right). \text{ Звідси } \mathcal{E} = \frac{5U_1}{2}.$$

Обчислимо значення шуканої величини:  $\mathcal{E} = \frac{5 \cdot 5}{2} = 12,5 \text{ (В)}$ .

**Відповідь:** ЕРС батареї  $\mathcal{E} = 12,5 \text{ В}$ .

## ! Підбиваємо підсумки

Основна енергетична характеристика джерела струму — електрорушійна сила (ЕРС). Електрорушійна сила — це скалярна фізична величина, знак якої залежить від довільно обраного напрямку об-

Електрорушійна сила  $\mathcal{E}$  дорівнює відношенню роботи сторонніх сил ( $A_{\text{ст}}$ ) із переміщення позитивного заряду всередині джерела струму від негативного полюса до позитивного до значення  $q$  цього заряду:  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$ . Одиниця ЕРС у СІ — вольт.

Сила струму  $I$  в повному колі дорівнює відношенню ЕРС  $\mathcal{E}$  джерела струму до повного опору кола:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ , де  $R$  і  $r$  — опір зовнішньої та внутрішньої частин кола відповідно. Це твердження називають законом Ома для повного кола.

★ Підключення до полюсів джерела струму провідника з мізерно малим опором називають коротким замиканням. Силу струму короткого замикання ( $I_{\text{к.з}}$ ) джерела струму з ЕРС  $\mathcal{E}$  і внутрішнім опором  $r$  розраховують за формулою:  $I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ . ★



**Контрольні запитання**

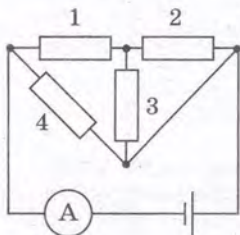
1. Що називають сторонніми силами? 2. Сформулюйте умови існування постійного струму в провіднику. 3. Що таке ЕРС? 4. Покажіть на прикладі, як визначити знак ЕРС. 5. Що називають електричною напругою на ділянці електричного кола? 6. У якому випадку електрична напруга між двома точками електричного кола дорівнює різниці потенціалів між цими точками? 7. Сформулюйте закон Ома для повного кола. ★ 8. Що називають коротким замиканням? ★ 9. Як розрахувати силу струму короткого замикання?



**Вправа № 10**

Якщо не зазначено інше, опором з'єднувальних проводів слід знехтувати.

1. До джерела струму з ЕРС 6 В і внутрішнім опором 2 Ом підключено резистор, опір якого 10 Ом. Визначте напругу на полюсах джерела струму.
2. До полюсів джерела струму з ЕРС 4 В підключили лампочку опором 8 Ом, у результаті чого в колі встановилася сила струму 0,4 А. Визначте внутрішній опір джерела.
3. Джерело струму, внутрішній опір якого 0,5 Ом, живить 5 однакових лампочок, з'єднаних паралельно. Кожна лампа має опір 15 Ом; опір з'єднувальних проводів дорівнює 1,5 Ом. Знайдіть напругу на полюсах джерела струму та його ЕРС, якщо напруга на кожній лампі 1,8 В.
4. Повне коло складається із джерела струму з ЕРС 3 В, амперметра та чотирьох резисторів, з'єднаних так, як показано на рисунку. Визначте показ амперметра, якщо внутрішній опір джерела струму 1 Ом, а опори резисторів дорівнюють:  $R_1 = 6$  Ом;  $R_2 = R_3 = 8$  Ом;  $R_4 = 10$  Ом.



5. Напруга на полюсах джерела струму, замкненого на зовнішній опір, дорівнює 10 В. Якщо зовнішній опір збільшити у 5 разів, напруга на полюсах джерела зросте до 30 В. Знайдіть ЕРС джерела струму.
- ★ 6. Під час заряджання акумулятора напруга на його клеммах дорівнює  $U_1$ , а сила струму в акумуляторі  $I_1$ . Під час розряджання акумулятора напруга на його клеммах становить  $U_2$ , а сила струму в акумуляторі  $I_2$ . Знайдіть силу струму короткого замикання цього акумулятора.



## ★ § 11. РОЗГАЛУЖЕНІ КОЛА. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ. ПРАВИЛА КІРХГОФА ★

**?!**  Закон Ома встановлює залежність між силою струму, напругою та опором для найпростішого електричного кола, що являє собою один замкнений контур. На практиці зазвичай зустрічаються складніші — розгалужені — електричні кола, які мають кілька замкнених контурів і кілька вузлів, до яких сходяться струми, що проходять в окремих відгалуженнях. Значення сил струмів і напруг для таких кіл можна знаходити за допомогою *правил Кірхгофа* (рис. 11.1).



**Рис. 11.1.** Густав Роберт Кірхгоф (1824–1887) — німецький фізик. Сформулював правила розрахунку електричних кіл ще коли був студентом Кенігсберзького університету. Разом із хіміком Робертом Бунзенем (1811–1889) розробив основи спектроскопії; відкрив закони, що описують теплові поглинання та випромінювання

### 1 У чому суть правил Кірхгофа

Перше правило Кірхгофа є наслідком закону збереження електричного заряду і стосується вузлів, які містяться в електричному колі.

#### Перше правило Кірхгофа (правило вузлів):

Алгебраїчна сума сил струмів у провідниках, що сходяться у вузлі електричного кола, дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^p I_i = 0,$$

де  $p$  — кількість провідників, які сходяться у вузлі.

Зазвичай вважають, що сила струму додатна, якщо струм втікає у вузол, і від'ємна, якщо струм витікає з вузла.

Застосовуючи перше правило Кірхгофа для вузла  $A$ , показаного на рис. 11.2, маємо:  $I_3 + I_4 - I_1 - I_2 = 0$ , або  $I_3 + I_4 = I_1 + I_2$ .

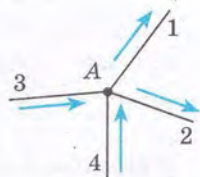
Друге правило Кірхгофа є наслідком закону Ома для неоднорідної ділянки кола і стосується окремих замкнених контурів електричного кола.

#### Друге правило Кірхгофа (правило контурів):

У кожному довільно обраному замкненому контурі електричного кола алгебраїчна сума добутків сил струмів на опори відповідних ділянок дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС джерел струму в цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i,$$

де  $n$  — кількість опорів\* у контурі;  $m$  — кількість джерел струму в контурі.



**Рис. 11.2.** Приклад вузла, в якому сходяться чотири провідники. Стрілками позначено напрямки струмів у провідниках

\* Тут під опорами будемо розуміти елементи кола, що чинять опір електричному струму.



Щоб скласти рівняння для даного контуру згідно з другим правилом Кірхгофа, спочатку необхідно обрати напрямок обходу контуру. Знаки окремих доданків рівняння слід визначати, зважаючи на таке: силу струму вважають додатною, якщо напрямок струму співпадає з обраним напрямком обходу контуру; ЕРС джерела струму вважають додатною, якщо джерело створює струм, напрямок якого співпадає з обраним напрямком обходу контуру. У протилежних випадках і силу струму, і ЕРС вважають від'ємними.

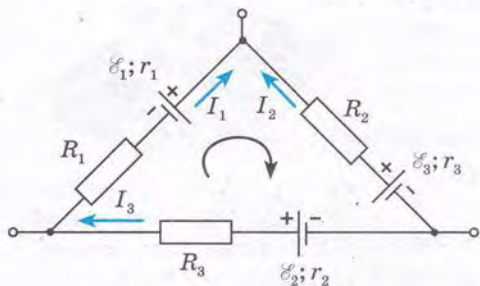


Рис. 11.3. Приклад окремого контуру електричного кола. Червоною стрілкою позначено напрямок обходу контуру

Зверніть увагу: на електричних схемах для наочності поряд із кожною стрілкою, що показує напрямок струму, зазначатимемо відповідну силу струму, а поряд із будь-яким елементом кола — його характеристики.

Для прикладу запишемо друге правило Кірхгофа для контуру, який є частиною складного електричного кола (рис. 11.3):

$$I_1(R_1 + r_1) - I_2(R_2 + r_2) + I_3(R_3 + r_3) = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3.$$

## 2 Як розв'язувати задачі за допомогою правил Кірхгофа

Розрахунок розгалужених кіл за допомогою правил Кірхгофа здійснюється в такій послідовності.

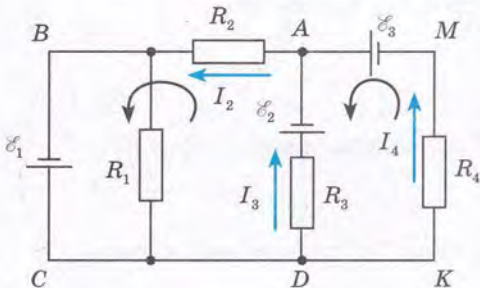
1. Довільно оберіть напрямки струмів у всіх ділянках кола. (Зверніть увагу: якщо в результаті розв'язання задачі отримано від'ємне значення сили струму на якійсь ділянці, то це означає, що напрямок струму в ній протилежний обраному.)

2. На основі першого правила Кірхгофа запишіть незалежні рівняння в кількості  $(N-1)$ , де  $N$  — кількість вузлів у колі.

3. Довільно оберіть замкнені контури. При цьому слід керуватися таким принципом: кожний наступний контур має містити хоча б одну ділянку кола, яка не входить у раніше обрані контури.

4. Для кожного з обраних контурів запишіть друге правило Кірхгофа.

5. З отриманих рівнянь складіть систему рівнянь і розв'яжіть її відносно шуканих величин.



## 3 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** На рисунку зображено схему кола, яка містить чотири резистори з опорамі  $R_1, R_2, R_3, R_4$  і три джерела струму з ЕРС  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$  відповідно. Визначте силу струму в резисторі з опором  $R_4$ . Внутрішні опори джерел струму вважайте нехтовно малими.



$I_4$  — ?

$R_1$   
 $R_2$   
 $R_3$   
 $R_4$   
 $\mathcal{E}_1$   
 $\mathcal{E}_2$   
 $\mathcal{E}_3$

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

1. Позначимо можливі напрямки струмів у колі стрілками (див. рисунок).

2. Для одного з вузлів (наприклад, А) складемо рівняння відповідно до першого правила Кірхгофа:

$$I_3 + I_4 - I_2 = 0.$$

У цьому випадку складати рівняння для інших вузлів немає сенсу, оскільки нічого нового для розв'язання задачі вони не дадуть.

3. Розглянемо контури  $ABCD$  і  $MADKM$ . Обравши напрямком обходу кожного контуру проти ходу годинникової стрілки, запишемо для них друге правило Кірхгофа:

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2; \quad -I_3 R_3 + I_4 R_4 = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3.$$

4. Після розв'язання системи трьох рівнянь

$$\begin{cases} I_3 + I_4 - I_2 = 0, \\ I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2, \\ -I_3 R_3 + I_4 R_4 = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 \end{cases}$$

маємо: 
$$I_4 = \frac{\mathcal{E}_1 R_3 + \mathcal{E}_3 (R_2 + R_3) + \mathcal{E}_2 R_2}{R_2 R_3 + R_4 (R_2 + R_3)}.$$

*Відповідь:* сила струму в резисторі з опором  $R_4$  дорівнює:

$$I_4 = \frac{\mathcal{E}_1 R_3 + \mathcal{E}_3 (R_2 + R_3) + \mathcal{E}_2 R_2}{R_2 R_3 + R_4 (R_2 + R_3)}.$$

### ! Підбиваємо підсумки

Розрахунок складних розгалужених електричних кіл здійснюють за допомогою двох правил Кірхгофа: перше:  $\sum_{i=1}^p I_i = 0$ , де  $p$  — кількість

провідників, що сходяться у вузлі; друге:  $\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i$ , де  $n$  і  $m$  — відповідно кількість опорів і джерел струму в контурі.

### ? Контрольні запитання

1. Що на схемі електричного кола називають вузлом? 2. Наслідком чого є перше правило Кірхгофа? Сформулюйте це правило. 3. У якому випадку значення сили струму є додатним? 4. У чому суть другого правила Кірхгофа? 5. Про що слід пам'ятати, визначаючи знак доданків під час складання рівнянь згідно з другим правилом Кірхгофа? 6. Про що свідчить від'ємне значення сили струму, яке отримано в результаті розв'язування задач? 7. Скільки рівнянь для даного електричного кола можна скласти на основі першого правила Кірхгофа? 8. Якої послідовності дій слід дотримуватися під час розв'язування задач за допомогою правил Кірхгофа?

### ✍ Вправа № 11

Якщо не зазначено інше, внутрішніми опорами джерел струму та опором з'єднувальних проводів слід знехтувати.

1. На рис. 1 зображено схему електричного кола. Обчисліть значення та визначте напрямок струму в резисторі з опором  $R$ , якщо  $\mathcal{E}_1 = 1,5$  В;  $\mathcal{E}_2 = 3,7$  В;  $R_1 = 10$  Ом;  $R_2 = 20$  Ом;  $R = 5,0$  Ом.

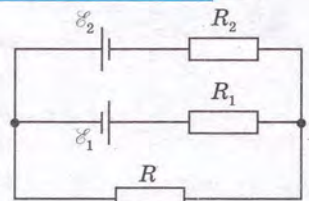


Рис. 1

2. Два джерела струму з ЕРС  $\mathcal{E}_1$  і  $\mathcal{E}_2$  та внутрішніми опороми  $r_1$  і  $r_2$  з'єднані так, як показано на рис. 2. Визначте сили струмів в джерелах і різницю потенціалів між точками А і В. Якою стане ця різниця потенціалів, якщо змінити полярність підключення другого джерела?
3. Електричне коло містить чотири резистори опором 1 кОм кожний та два джерела струму (рис. 3). ЕРС першого джерела дорівнює 1,5 В, а другого — 1,8 В. Визначте силу струму в усіх резисторах.
4. Визначте заряд конденсаторів електроємностями  $C_1$  і  $C_2$  (рис. 4). Опір резисторів:  $R_1$  і  $R_2$ ; ЕРС джерел:  $\mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}_2$ ,  $\mathcal{E}_3$ .

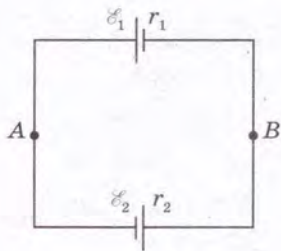


Рис. 2

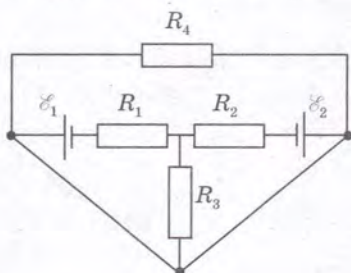


Рис. 3

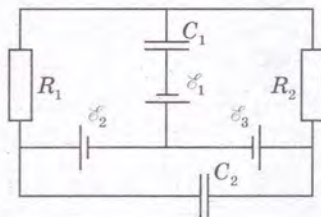


Рис. 4

## § 12. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ



Поняття роботи електричного струму та його потужності вам відомі з курсу фізики 9-го класу. А от у якому випадку потужність, що виділяється в споживачі струму, буде максимальною і від чого залежить коефіцієнт корисної дії джерела струму, ви дізнаєтесь із цього параграфа.



### 1 Як розрахувати роботу електричного струму

Ви вже знаєте, що електрична напруга  $U$  на ділянці електричного кола визначається за формулою  $U = \frac{A}{q}$ , де  $A$  — повна робота кулонівських і сторонніх сил з переміщення на цій ділянці позитивного заряду  $q$ . Цю роботу часто називають *роботою струму*. Отже, роботу  $A$  постійного електричного струму можна знайти за формулою  $A = Uq$ . Подавши заряд  $q$  через силу струму  $I$  та час  $t$  проходження струму ( $q = It$ ), отримуємо формулу для розрахунку роботи електричного струму на даній ділянці кола:

$$A = UIt$$

Одиниця роботи електричного струму в СІ — **джоуль** (Дж);  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$ . В електротехніці використовують *позасистемну* одиницю роботи струму — **кіловат-годину** (кВт · год);  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ . Прилади для прямого вимірювання роботи струму називають *лічильниками електричної енергії* або *електролічильниками* (рис. 12.1).



Рис. 12.1. Електролічильник



Якщо на ділянці кола, в якій тече струм, не виконується механічна робота й не відбуваються хімічні реакції, то робота електричного струму приводить тільки до нагрівання провідника. Нагрітий провідник шляхом теплопередачі віддає отриману енергію навколишнім тілам. Отже, в цьому випадку згідно із законом збереження енергії кількість виділеної теплоти  $Q$  дорівнюватиме роботі  $A$  струму:  $Q = A$ . Оскільки  $A = UIt$ , а  $U = IR$ , маємо:  $Q = I^2Rt$ .

Остання формула є математичним записом закону, який незалежно один від одного дослідним шляхом встановили англійській фізик Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889) і російський фізик Емілій Християнович Ленц (Генріх Ленц) (1804–1865). Згодом зазначений 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:

$$Q = I^2Rt$$

Слід зазначити, що зараз математичний вираз закону Джоуля — Ленца ми одержали для окремого випадку, але дослідження довели, що кількість теплоти, яка виділяється в процесі проходження струму в ділянці кола, *завжди* можна обчислити за формулою  $Q = I^2Rt$ . А от іншими модифікаціями цієї формули —  $Q = \frac{U^2t}{R}$  і  $Q = UIt$  — можна користуватися *тільки в тому випадку, коли вся електрична енергія витрачається на нагрівання*.

2

## Як розрахувати потужність електричного струму

**Потужність електричного струму**  $P$  — фізична величина, яка характеризує швидкість виконання струмом роботи та дорівнює відношенню роботи  $A$  струму до часу  $t$ , за який цю роботу виконано:

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

Ураховуючи, що  $A = UIt$ :

$$P = UI,$$

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

Нагадаємо, що *одиниця потужності в СІ — ват*;  $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$ . Із формули для розрахунку потужності електричного струму випливає:  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$ .

Для вимірювання потужності струму існують спеціальні прилади — *ватметри*.

Якщо коло складається з кількох споживачів, то, розраховуючи їхню фактичну потужність, слід пам'ятати: *за будь-якого з'єднання*

споживачів загальна потужність струму в усьому колі дорівнює сумі потужностей окремих споживачів.

Звернемося знову до рис. 12.1. На електролічильнику подано значення двох фізичних величин: 220 В; 15 А. Перша з них показує, у коло з якою напругою слід вмикати електролічильник, друга — максимально допустиму силу струму в приладі. Перемноживши ці значення, одержимо максимально допустиму потужність споживачів, які можна підключити через цей електролічильник ( $UI = P$ ). До речі, уважно роздивіться електролічильники у вашій оселі та визначте, скільки потужних споживачів ви можете підключити разом, щоб не зіпсувати прилад.

### 3 У якому випадку на зовнішній частині кола виділяється максимальна потужність

Для визначення залежності  $P(I)$  — потужності, яка споживається зовнішньою частиною кола, від сили струму — розглянемо електричне коло, яке являє собою джерело струму із внутрішнім опором  $r$  і ЕРС  $\mathcal{E}$ , замкнене на зовнішнє навантаження з опором  $R$ . Якщо в колі є струм, то, зважаючи на закон Ома для повного кола, ЕРС джерела можемо визначити так:  $\mathcal{E} = IR + Ir$ , де  $I$  — сила струму в колі. Помноживши обидві частини рівності на  $I$ , отримаємо:

$$\mathcal{E}I = I^2R + I^2r,$$

де  $\mathcal{E}I = P_{\text{п}}$  — повна потужність, яку розвиває джерело струму;  $I^2R = P$  — потужність, яку споживає зовнішня частина кола (потужність, яку споживає зовнішнє навантаження);  $I^2r = P_{\text{в}}$  — потужність, яку споживає внутрішня частина кола. Отже, потужність, яку споживає зовнішня частина кола, становить:

$$P = \mathcal{E}I - I^2r, \text{ або } P = I(\mathcal{E} - Ir).$$

Графік залежності  $P(I)$  — парабола (рис. 12.2). Аналіз отриманої залежності показує, що потужність, яку споживає зовнішня

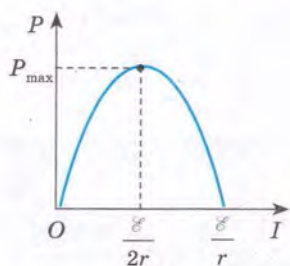


Рис. 12.2. Графік залежності  $P(I)$  — потужності, яку споживає зовнішня частина кола, від сили струму

частина кола, за сил струму  $I_1 = 0$  та  $I_2 = \frac{\mathcal{E}}{r}$  дорівнює нулю:  $P = 0$ , а за сили струму  $I = \frac{\mathcal{E}}{2r}$  має максимальне значення  $P_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}$ .

Після підставлення  $I = \frac{\mathcal{E}}{2r}$  у формулу, що виражає закон Ома для повного кола, маємо:

$\frac{\mathcal{E}}{2r} = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ . Звідси випливає, що максимальна потужність споживається зовнішнім навантаженням у випадку, коли  $R = r$ , тобто коли опір  $R$  зовнішнього навантаження дорівнює внутрішньому опору  $r$  джерела струму.



**4 Як розраховують коефіцієнт корисної дії джерела струму**

Коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta$  джерела струму визначається як відношення потужності  $P$ , яку споживає зовнішня частина кола (корисна потужність), до повної потужності  $P_n$ , яку розвиває джерело струму:  $\eta = \frac{P}{P_n}$ .

Після підставлення  $P_n = \mathcal{E}I$  і  $P = UI$  в останню формулу маємо:

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}},$$

де  $U$  — напруга на зовнішньому колі;  $\mathcal{E}$  — ЕРС джерела струму.

Отримана формула справджується за будь-якого споживача електричного струму.

Якщо ж у зовнішній частині кола вся енергія джерела перетворюється тільки на внутрішню енергію провідників, то, замінивши:  $U = IR$  і  $\mathcal{E} = I(R+r)$ , де  $R$  і  $r$  — опір зовнішньої частини кола та опір джерела струму відповідно,  $I$  — сила струму в колі, — отримаємо:

$$\eta = \frac{R}{R+r}.$$

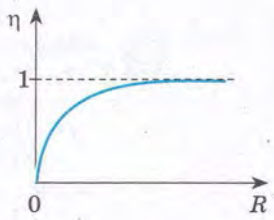
Розділивши чисельник і знаменник останньої формули на  $R$ , маємо:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}. \quad (*)$$

Графік залежності  $\eta(R)$  при  $r = \text{const}$  наведено на рис. 12.3.

Аналіз формули (\*) і графіка  $\eta(R)$  показує, що  $\eta \rightarrow 1$ , коли  $\frac{r}{R} \ll 1$ . Тобто для збільшення ККД джерела необхідно по можливості зменшити його внутрішній опір.

У випадку короткого замикання ( $R \rightarrow 0$ )  $\eta \rightarrow 0$ , тобто вся потужність споживається всередині джерела струму. Це може призвести не тільки до перегріву внутрішніх частин джерела та виходу його з ладу, але й до пожежі. Саме тому короткі замикання є недопустимими.



**Рис 12.3.** Графік  $\eta(R)$  залежності ККД джерела струму від опору зовнішньої частини кола,  $r = \text{const}$

**5 Учимося розв'язувати задачі**

**Задача.** У разі підключення електромотора до джерела електричного струму з ЕРС 120 В напруга на клеммах джерела становить 96 В. Загальний опір підвідних проводів і джерела струму дорівнює 14 Ом. Яку корисну потужність розвиває електромотор, якщо його ККД становить 0,65? Втратами потужності на обмотках електромотора знехтуйте.

$P_{\text{кор}}$  — ?

Дано:

$$\mathcal{E} = 120 \text{ В}$$

$$U = 96 \text{ В}$$

$$r = 14 \text{ Ом}$$

$$\eta = 0,65$$

**Розв'язання.** Під час роботи електродвигуна електрична енергія перетворюється на механічну енергію, яка пов'язана з обертанням якоря електромотора, і на внутрішню енергію, про збільшення якої свідчить нагрівання провідників. Таким чином, згідно із законом збереження енергії повна потужність  $P_{\text{н}}$ , яку розвиває джерело струму, дорівнює сумі механічної потужності  $P$  та потужності  $P_{\text{н}}$ , яка витрачається на нагрівання провідників:  $P_{\text{н}} = P + P_{\text{н}}$ .

З урахуванням того що  $P_{\text{н}} = \mathcal{E}I$  і  $P_{\text{н}} = I^2r$ , маємо:  $\mathcal{E}I = P + I^2r$  (1).

Оскільки ККД двигуна дорівнює  $\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P}$ , де  $P_{\text{кор}}$  — корисна потужність, яку розвиває електромотор, то  $\frac{P_{\text{кор}}}{P} = \eta$  (2).

Згідно із законом Ома маємо:  $U = \mathcal{E} - Ir$ . Звідси:  $I = \frac{\mathcal{E} - U}{r}$ . Після підставлення виразу для сили струму в (1) з урахуванням (2) отримуємо:  $P_{\text{кор}} = \eta U \frac{\mathcal{E} - U}{r}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[P_{\text{кор}}] = \frac{\text{В}(\text{В} - \text{В})}{\text{Ом}} = \frac{\text{В} \cdot \text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = \text{Вт};$$

$$\{P_{\text{кор}}\} = \frac{0,65 \cdot 96 \cdot 24}{14} \approx 107, P_{\text{кор}} \approx 107 \text{ Вт.}$$

**Відповідь:** корисна потужність електромотора  $P_{\text{кор}} \approx 107 \text{ Вт}$ .

### ! Підбиваємо підсумки

На ділянці кола електричний струм виконує роботу, значення якої дорівнює добуткові напруги, сили струму і часу проходження струму:  $A = UI t$ .

Одиниця роботи електричного струму в СІ — джоуль (Дж):  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$ .

Фізичну величину, яка характеризує швидкість виконання струмом роботи, називають потужністю електричного струму. Потужність електричного струму обчислюють за формулою  $P = UI$ . Одиниця потужності електричного струму в СІ — ват (Вт);  $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$ .

Проходження струму в провіднику супроводжується виділенням теплоти, кількість якої прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника та часу проходження струму:  $Q = I^2 R t$  (закон Джоуля — Ленца).

ККД  $\eta$  джерела струму розраховується за формулою  $\eta = \frac{U}{\mathcal{E}}$ , де  $U$  — напруга на зовнішній частині кола;  $\mathcal{E}$  — ЕРС джерела струму.

### ? Контрольні запитання

1. За якою формулою обчислюють роботу електричного струму?
2. Назвіть відомі вам одиниці роботи електричного струму.
3. Доведіть, що  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .
4. Сформулюйте закон Джоуля — Ленца. Чому він має таку назву?
5. Які формули

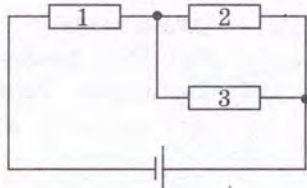


для розрахунку кількості теплоти, що виділяється під час проходження струму в провіднику, ви знаєте? Чи завжди можна користуватися ними? **6.** Що називають потужністю електричного струму? За якою формулою її можна обчислити? **7.** За якою формулою визначають потужність, яку споживає зовнішня частина кола? За якої умови вона набуває максимального значення? **8.** Як розрахувати ККД джерела струму?



### Вправа № 12

1. Дві лампи, які мають потужності 90 і 40 Вт, з'єднані паралельно і підключені до джерела струму, що має напругу 220 В. Визначте силу струму, який протікає через кожну лампу, та опір кожної лампи.
2. Визначте силу струму, який споживає електродвигун підйомального крана, якщо вантаж масою 1 т кран підіймає на висоту 19 м за 50 с. ККД електродвигуна становить 80 %, напруга на клеммах — 380 В.
3. Лампа, розрахована на напругу 127 В, споживає потужність 50 Вт. Який додатковий опір треба приєднати до лампи, щоб увімкнути її в мережу напругою 220 В?
4. Коли зовнішня ділянка кола споживає потужність 18 Вт, ККД джерела струму становить 64 %. Яка потужність споживається при цьому всередині джерела струму?
5. Скільки часу буде нагріватися 1,5 л води від 20 до 100 °С в електричному чайнику потужністю 600 Вт, якщо ККД чайника становить 80 %?
6. Від джерела струму необхідно передати споживачеві потужність 4 кВт. Яка напруга має бути на затискачах джерела, щоб втрати потужності в підвідних провадах становили 4 % споживаної потужності? Опір підвідних провідів 0,4 Ом.
7. Визначте потужність, яку споживає кожний із трьох резисторів, що складають електричне коло (див. рисунок), якщо ЕРС джерела струму 12 В, а його внутрішній опір — 6 Ом. Опори резисторів дорівнюють 18, 40 і 60 Ом відповідно.
8. Дві електроплити, спіралі яких мають однакові опори, спочатку увімкнули в мережу послідовно, а потім паралельно. У якому випадку електроплити споживали більшу потужність і в скільки разів?



## § 13. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ.

### ★ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА ★



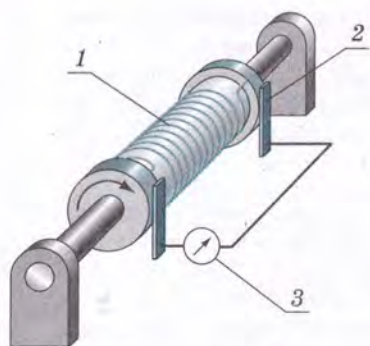
Електричний струм можуть проводити рідини та тверді речовини, за певних умов електричний струм проводять і гази. Вивчення електричного струму в різних середовищах почнемо з вивчення струму в металах. По-перше, тому, що всі без винятку метали добре проводять електричний струм, а по-друге, саме з провідністю металів пов'язане широке застосування електричної енергії в житті людини.



### 1 Як експериментально визначили природу електричного струму в металах

Ви вже знаєте, що створення електричного поля в металевому провіднику спричиняє появу в ньому електричного струму. Згідно з класичною теорією електропровідності металів *електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.*





**Рис. 13.1.** Схема досліду з вивчення електричного струму в металах: 1 — котушка з металевим дротом; 2 — ковзні контакти; 3 — чутливий гальванометр. Котушці надають швидкого обертання й різко зупиняють. У результаті в колі виникає електричний струм, який реєструється гальванометром

Першим експериментальним доказом цього положення офіційно вважається результат досліду американських фізиків *Р. Толмена* і *Т. Стюарда* в 1916 р.\* Ідея досліду базувалась на таких міркуваннях учених. Якщо металевому провіднику надати швидкого руху, а потім різко зупинити, то наявні в провіднику вільні заряджені частинки рухатимуться за інерцією (аналогічно тому, як у випадку різкої зупинки транспорту в ньому продовжують рух незакріплені предмети) (рис. 13.1). Але ж рух вільних частинок в одному напрямку і є електричним струмом. Цей струм, а також його напрямок можна зафіксувати гальванометром. За напрямком струму легко визначити знак заряду частинок, що рухалися за інерцією.

Результати досліду, як і очікувалось, свідчили про те, що струм створювався рухом *негативно* заряджених частинок. Але цього замало для того, щоб визначити, які саме частинки є носіями струму в металах. Як у кожної людини є свої унікальні відбитки пальців, за якими можна ідентифікувати людину, так і в частинок є свій ідентифікатор — це відношення модуля заряду  $|q_0|$  частинки до її маси  $m$ . Тож учені мали визначити це відношення. Знаючи довжину та опір дроту котушки, швидкість її руху до гальмування та вимірюючи заряд  $q$ , який пройшов через гальванометр за час гальмування котушки, вчені розраховували відношення  $\frac{|q_0|}{m}$ . Виявилось, що у випадку, коли котушка містила мідний дріт,  $\frac{|q_0|}{m} = 1,6 \cdot 10^{11}$  Кл/кг, що доволі точно (враховуючи труднощі досліду) збіглося зі значенням такого відношення для електронів, визначеним іншими способами:  $\frac{|e|}{m} = 1,8 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

Таким чином, досліди підтвердили уявлення класичної теорії електропровідності металів, яка розглядає внутрішню будову металу як утворену позитивно зарядженими йонами кристалічну ґратку, що перебуває в «газі» вільних електронів. У випадку появи в металевому провіднику електричного поля на хаотичний рух електронів накладається дрейф електронів у напрямку, протилежному напрямку

\* Слід зазначити, що схожий дослід був здійснений російськими вченими *Леонідом Ісааковичем Мандельштамом* і *Миколою Дмитровичем Папалексі* в 1911 р., але його результат не був опублікований авторами.



напруженості електричного поля. Цей дрейф електронів і являє собою електричний струм.

Зазначена класична теорія обґрунтовує закони Ома та Джоуля — Ленца і пояснює деякі електричні явища. Однак у деяких випадках висновки класичної теорії суперечать результатам дослідів, а розв'язати ці суперечності можливо тільки за допомогою уявлень квантової фізики, з деякими положеннями якої ви ознайомитесь у § 49 підручника.

## **2 Як, з точки зору класичної фізики, рухаються електрони в металевому провіднику, в якому створене електричне поле**

Згідно з класичною теорією, електрони в процесі руху під дією електричного поля зіштовхуються з позитивними йонами кристалічної ґратки. Серед цих зіткнень є такі, за яких електрони всю енергію, здобуту під час розгону в електричному полі, передають ґраткам. Саме такі зіткнення — їх називають *ефективними* — і є «відповідальними» за опір металу.

Нехай середній інтервал часу між зіткненнями дорівнює  $\tau$ . Тоді можна уявити модель руху електрона в металі, коли в цьому металі створене електричне поле напруженістю  $\vec{E}$ . В інтервалі часу від 0 до  $\tau$  електрон рухається з прискоренням  $\vec{a} = \frac{|e|\vec{E}}{m}$ , отже, модуль швидкості напрямленого руху електрона лінійно зростає з часом. У момент часу  $\tau$  електрон зіштовхується з йоном і зупиняється. Далі він знову прискорюється електричним полем і процес повторюється. Розмірковуючи подібним чином, можна визначити середню швидкість  $\bar{v}$  напрямленого руху (швидкість дрейфу) електрона.

Подамо силу струму  $I$  в провіднику через швидкість дрейфу  $\bar{v}$  електронів. За інтервал часу  $\Delta t$  через переріз площею  $S$  провідника проходить  $N$  електронів:  $N = nS\bar{v}\Delta t$ , де  $n$  — концентрація електронів у провіднику. При цьому переноситься заряд  $\Delta q = |e|N = n|e|S\bar{v}\Delta t$ .

Отже, в провіднику тече струм  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = n|e|S\bar{v}$ .

Оцінимо середню швидкість напрямленого руху електронів, наприклад, у мідному проводі перерізом  $10 \text{ мм}^2$  за сили струму в ньому  $10 \text{ А}$ .

У більшості металів концентрація вільних електронів приблизно дорівнює концентрації атомів, оскільки один із валентних електронів кожного атома є *колективізованим*, тобто вільним. Таким чином, значення концентрації вільних електронів у металах розташоване в межах  $10^{28} \dots 10^{29} \text{ м}^{-3}$ . Так, для міді  $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Тоді за сили струму  $10 \text{ А}$  в мідному дроті перерізом  $10 \text{ мм}^2$  швидкість напрямленого руху вільних електронів дорівнює:

$$\bar{v} = \frac{I}{n|e|S} = \frac{10}{8,4 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0,74 \text{ (мм/с)}.$$



Як бачите, отримане значення швидкості напрямленого руху вільних електронів надзвичайно мале порівняно зі значенням швидкості, з якою поширюється електричне поле в провіднику ( $v \approx 3 \cdot 10^8$  м/с). Завдяки дії електричного поля вільні електрони, розташовані в будь-якій точці провідника, втягуються в направлений рух майже миттєво, а сам цей рух відбувається з дуже малою швидкістю. (Спробуйте обчислити, через який інтервал часу після вмикання плеєра ви почули б музику в навушниках, якби електричне поле поширювалось зі швидкістю напрямленого руху електронів.)

### 3 Як опір металів залежить від температури

Опір металевого провідника залежить не тільки від його геометричних параметрів та речовини, з якої він виготовлений, але й від температури (останнє доводиться у квантовій теорії електропровідності металів).

Досліди доводять: якщо температура є не надто високою і не надто низькою, залежності питомого опору та опору провідника від температури передаються формулами:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0(1 + \alpha \Delta T); \\ R &= R_0(1 + \alpha \Delta T), \end{aligned} \quad (*)$$

де  $\rho_0$ ,  $\rho$  — питомі опори речовини провідника відповідно за температури  $T_0 = 273$  К ( $0$  °С) і за даної температури  $T$ ;  $R_0$ ,  $R$  — опори провідника за температури  $T_0 = 273$  К ( $0$  °С) і за даної температури  $T$ ;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору;  $\Delta T$  — різниця температур ( $\Delta T = T - 273$  К).

*Температурний коефіцієнт опору  $\alpha$  — фізична величина, яка характеризує залежність опору речовини від температури і чисельно дорівнює відносній зміні питомого опору  $\rho$  речовини в разі нагрівання її на 1 К:*

$$\alpha = \frac{1 \cdot \Delta \rho}{\rho \Delta T}.$$

*Одиниця температурного коефіцієнту в СІ — кельвін у мінус першому степені (К<sup>-1</sup>).*

Для всіх металевих провідників  $\alpha > 0$ . Наприклад, температурний коефіцієнт опору алюмінію становить  $3,8 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>, заліза —  $6,0 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>, міді —  $4,3 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>.

Зверніть увагу: розв'язуючи задачі, формулу, яка описує температурну залежність опору провідників, простіше подавати у вигляді:  $R = R_0(1 + \alpha t)$ , де  $R_0$ ,  $R$  — опори провідника за  $0$  °С і  $t$  °С;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору;  $t$  — температура за шкалою Цельсія. (Спробуйте самостійно довести, що остання формула еквівалентна формулі (\*)).



#### 4 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 спостерігалося з оловом, свинцем та іншими металами. Це явище назвали *надпровідністю* (рис. 13.2). Зараз відомі багато речовин і матеріалів, які за відповідної температури переходять у надпровідний стан.

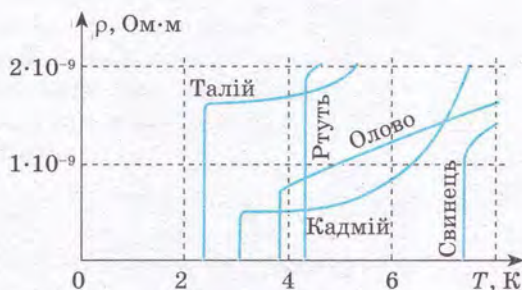
Якщо в замкненому провіднику, який перебуває в надпровідному стані, створити електричний струм, то струм буде існувати в провіднику без підтримки джерела струму необмежений час. Ця та інші властивості надпровідників відкривають широкі можливості їх застосування в техніці та промисловості. Тільки створення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

Широкому застосуванню надпровідників перешкоджає «ціна питання». Дотепер знайдено матеріали, які переходять у надпровідний стан за температури близько 100 К (–173 °С) і нижче. Тобто труднощі в застосуванні надпровідності пов'язані з необхідністю охолодження матеріалів до низьких температур.

А це доволі дорого коштує.

Зараз учені працюють над отриманням надпровідних матеріалів, які зберігають свої властивості за кімнатної температури.

Надпровідність неможливо пояснити з погляду класичної теорії електропровідності металів. У 1957 р. група американських учених (*Джон Бардін, Леон Купер, Джон Роберт Шифер*) і незалежно від них радянський вчений *Микола Миколайович Боголюбов* (1909–1992) розробили *квантову теорію надпровідності*.



**Рис. 13.2.** Графіки зміни питомого опору деяких металів за температур, близьких до абсолютного нуля. З наближенням до нульової позначки питомий опір цих металів стрибком падає до нуля — метал переходить у надпровідний стан



#### 5 Які явища називають термоелектричними

**Термоелектричні явища** — сукупність фізичних явищ, зумовлених взаємозв'язком між тепловими та електричними процесами у твердих провідниках.

До термоелектричних явищ належать *ефект Зеебека* (виникнення ЕРС в електричному колі, складеному з послідовно з'єднаних



різнорідних провідників, контакти між якими мають різну температуру), *ефект Пельтьє* (виділення або поглинання теплоти під час проходження електричного струму через контакт двох різнорідних провідників), *ефект Томсона* (виділення теплоти (окрім джоулевої) або поглинання теплоти в провіднику зі струмом, вздовж якого є градієнт температури).

Ефект Зеебека в металах використовується в *термопарах* — термочутливих елементах, які розміщують у приладах для вимірювання температури, сили струму, освітленості тощо.★

### ★ 6 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Електричне коло складається з джерела струму, міліамперметра, опір якого 20 Ом, та реостата, виготовленого із залізного дроту. За температури 0 °С міліамперметр показує 30 мА Опір реостата за цієї температури дорівнює 200 Ом. Яким буде показ міліамперметра, якщо реостат нагріється на 50 °С? Температурний коефіцієнт опору заліза становить  $6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ . Внутрішнім опором джерела, а також зміною опору амперметра та з'єднувальних проводів унаслідок нагрівання знехтувати.

$I$  — ?

Дано:

$$R_a = 20 \text{ Ом}$$

$$t_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{С}$$

$$I_0 = 30 \text{ мА} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ А}$$

$$R_0 = 200 \text{ Ом}$$

$$t_1 = 50 \text{ } ^\circ\text{С}$$

$$\alpha = 6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$$

*Аналіз фізичної проблеми.* Оскільки реостат нагрівається, його опір збільшується, що, в свою чергу, спричиняє зміну опору зовнішнього кола і відповідно — сили струму в ньому. Тоді, записавши закон Ома для повного кола для двох значень сили струму та формулу залежності опору від температури, з отриманих рівнянь знайдемо шукану величину.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* До нагрівання реостата сила струму за законом Ома для повного кола дорівнює  $I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R_0 + R_a}$ .

Після нагрівання реостата  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_a}$ . Тут  $R = R_0(1 + \alpha t_1)$ , де  $\alpha$  — термічний коефіцієнт опору заліза. Разом розв'язуючи записані рівняння, одержуємо:  $I = \frac{I_0(R_0 + R_a)}{R_0(1 + \alpha t_1) + R_a}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$\{I\} = \frac{A(\text{Ом} + \text{Ом})}{(\text{Ом} + \text{Ом})} = A; \quad I = \frac{3 \cdot 10^{-2}(200 + 20)}{200(1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot 50) + 20} \approx 24 \cdot 10^{-3}, \quad I \approx 24 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

*Відповідь:* після нагрівання реостата показ міліамперметра становитиме приблизно 24 мА.



**Підбиваємо підсумки**

Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

За відсутності електричного поля вільні електрони в металах рухаються хаотично. Якщо ж у металевому провіднику створити електричне поле, то вільні електрони, не припиняючи свого хаотичного руху, починають рухатися напрямлено.

Залежність опору металевих провідників від температури передається формулою:  $R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$ , де  $R_0$ ,  $R$  — опори провідника відповідно за температури  $T_0 = 273$  К і даної температури  $T$ ;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору;  $\Delta T$  — різниця температур ( $\Delta T = T - 273$  К).

У разі зменшення температури деяких металів до температур, близьких до абсолютного нуля, їхній опір стрибком падає до нуля. Це явище називають надпровідністю.

Термоелектричними явищами називається сукупність фізичних явищ, зумовлених взаємозв'язком між тепловими та електричними процесами у твердих провідниках.

Термопара — термочутливий елемент у пристроях для вимірювання температури, сили струму, освітленості тощо.

**Контрольні запитання**

1. Що являє собою електричний струм у металах?
2. Опишіть суть дослідів учених 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 полягає причина опору металів?
5. Чи залежить опір металів від температури? Якщо залежить, то як?
6. У чому полягає явище надпровідності?
7. Які явища називаються термоелектричними?
8. Що таке термопара? Де вона застосовується?

**★ Вправа № 13**

1. Металевий волосок розжарювання електричної лампи поступово тоншає через випаровування металу з його поверхні; врешті-решт у найтоншому місці волосок перегоріє. Поясніть, чому лампа перегоріє найчастіше саме в той момент, коли її вмикають.
2. Яку довжину має вольфрамовий волосок розжарювання лампи, розрахованої на напругу 220 В і потужність 220 Вт? Температура розжареного волоска 2700 К, його діаметр — 0,03 мм. Питомий опір вольфраму  $5,5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м за температури 293 К. Вважайте, що питомий опір вольфраму прямо пропорційний абсолютній температурі.
3. На котушку намотано сталевий провід діаметром 1,2 мм. Маса проводу 0,2 кг. На котушку подається напруга 53,8 В. Визначте силу струму в дроті, якщо дріт нагрівся до температури 393 К. Питомий опір сталі за температури 293 К дорівнює  $1,2 \cdot 10^{-7}$  Ом·м, температурний коефіцієнт опору сталі  $6,0 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>. Густина сталі  $7,8 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>. ★



## § 14. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІДИНАХ

**?** Те, що звичайна вода непогано проводить електричний струм, загальновідомо. Саме тому є суворими правила безпеки під час роботи з електричними колами у вологих приміщеннях. А от яким є механізм електропровідності води і чим він відрізняється від механізму електропровідності металевих провідників? Якщо відповідь на це запитання вам відома, то одразу переходьте до контрольних запитань, а потім виконуйте вправу. Якщо ж ні, то розпочніть із вивчення параграфа.

**1** Що являє собою електричний струм в електролітах

**Електроліти** — це будь-які тверді тіла або рідини, що мають йонну провідність. Механізм йонної провідності у твердих тілах є доволі складним, тому розглянемо йонну провідність лише рідких електролітів. Прикладами останніх є водні розчини солей, кислот або лугів.

Як ви знаєте з курсу хімії, під час розчинення у воді солей, кислот або лугів нейтральні молекули цих речовин можуть розпастися на окремі йони. Це явище називають *електролітичною дисоціацією*.

Слід зазначити, що за умови значного збільшення температури деякі солі та оксиди металів можуть розпадатися на окремі йони й без «допомоги» розчинника. Тому розплави цих речовин також є електролітами.

Разом із дисоціацією в розчинах або розплавах електролітів відбувається обернений процес — об'єднання йонів протилежних знаків у молекулу. Цей процес називають *рекомбінацією*. За незмінних умов у розчині або розплаві встановлюється *динамічна рівновага* — стан, за якого кількість молекул, що розпадаються на йони за одиницю часу, дорівнює кількості пар йонів, які за цей час об'єднуються в нейтральні молекули.

У разі відсутності електричного поля йони перебувають у хаотичному тепловому русі. Однак в електричному полі, яке створене розміщеними в розчині або розплаві різнойменно зарядженими електродами, йони, як і вільні електрони в металах, дрейфують у напрямку діючої сили: позитивні йони (катіони) — до негативного електрода (катода); негативні йони (аніони) — до позитивного електрода (анода). Тобто в розчині проходить електричний струм.

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

**2** Що таке електроліз

Проходження електричного струму через електроліт (на відміну від його проходження через метал) характеризується тим, що *йони переносять хімічні складові електроліту і ті виділяються на електродах* — відкладаються у вигляді твердого шару або виділяються



в газоподібному стані. Наприклад, якщо через водний розчин купрум хлориду протягом кількох хвилин пропускати струм (рис. 14.1), то поверхню катода вкриє тонкий шар міді, а біля анода виділиться газоподібний хлор. Наявність хлору можна визначити за характерним запахом. Це відбувається тому, що під час проходження струму через розчин купрум хлориду вільні позитивні йони Купруму ( $\text{Cu}^{2+}$ ) прямують до катода, а вільні негативні йони Хлору ( $\text{Cl}^-$ ) — до анода. Досягши катода, катіон Купруму «бере» з його поверхні електрони, яких йому бракує, тобто відбувається *хімічна реакція відновлення*. Унаслідок цієї реакції катіон Купруму перетворюється на нейтральний атом; на поверхні катода осідає мідь. Водночас аніони Хлору, досягши поверхні анода, навпаки, «віддають» йому надлишкові електрони — відбувається *хімічна реакція окиснення*; на аноді виділяється хлор.

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

3

### Закони електролізу

Уперше явище електролізу докладно вивчив англійський фізик *Майкл Фарадей*. Точно вимірюючи масу речовин, які виділялися на електродах під час проходження електричного струму через розчин електроліту, вчений сформулював закони, які згодом почали називати *законами електролізу*, або *законами Фарадея*.

#### Перший закон електролізу (перший закон Фарадея):

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

$$m = kIt,$$

де  $k$  — коефіцієнт пропорційності, який отримав назву *електрохімічний еквівалент речовини*.

Одиниця електрохімічного еквівалента в СІ — **кілограм на кулон** (кг/Кул).

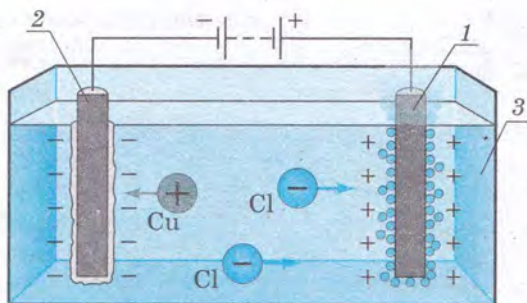


Рис. 14.1. Схема дослідження електричного струму в рідинах: 1 — анод; 2 — катод; 3 — ванна з розчином електроліту. Після замикання кола позитивні йони (катіони) рухаються до катода, негативні йони (аніони) — до анода

## Електрохімічні еквіваленти деяких речовин

Речовина	Електрохімічний еквівалент $k$ , $\times 10^{-6}$ кг/Кл	Речовина	Електрохімічний еквівалент $k$ , $\times 10^{-6}$ кг/Кл
Алюміній ( $\text{Al}^{3+}$ )	0,09	Нікель ( $\text{Ni}^{2+}$ )	0,30
Водень ( $\text{H}^+$ )	0,01	Срібло ( $\text{Ag}^+$ )	1,12
Кисень ( $\text{O}^{2-}$ )	0,08	Хром ( $\text{Cr}^{3+}$ )	0,18
Мідь ( $\text{Cu}^{2+}$ )	0,33	Хлор ( $\text{Cl}^-$ )	0,37
Натрій ( $\text{Na}^+$ )	0,24	Цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ )	0,34

Електрохімічні еквіваленти різних речовин істотно відрізняються один від одного (див. таблицю). Як визначається та від чого залежить електрохімічний еквівалент речовини? Відповідь на це запитання дає *другий закон електролізу*.

**Другий закон електролізу (другий закон Фарадея):**

Електрохімічний еквівалент  $k$  речовини прямо пропорційний її хімічному еквіваленту  $\frac{M}{n}$ :

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

де  $F$  — стала Фарадея;  $n$  — валентність речовини;  $M$  — молярна (або атомна) маса речовини.

Стала Фарадея  $F$  визначається як добуток модуля заряду  $|e|$  електрона на сталу Авогадро  $N_A$ :  $F = |e|N_A = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль. Тобто можна сказати, що стала Фарадея дорівнює модулю заряду одного моля електронів.

Після підставлення останньої рівності у формулу, яка є математичним записом другого закону електролізу, маємо:

$k = \frac{1}{|e|N_A} \cdot \frac{M}{n}$ . В отриманій формулі  $\frac{M}{N_A} = m_{\text{йона}}$  і  $|e|n = q_{\text{йона}}$ , де  $m_{\text{йона}}$  і  $q_{\text{йона}}$  — відповідно маса та заряд йона речовини. Отже, *електрохімічний еквівалент даної речовини дорівнює відношенню маси йона цієї речовини до модуля його заряду*:  $k = \frac{m_{\text{йона}}}{q_{\text{йона}}}$ .

Зверніть увагу: той самий хімічний елемент у різних сполуках може мати різну валентність і відповідно — різні електрохімічні еквіваленти.

**4 Де застосовують електроліз**

Електроліз лежить в основі електрохімічного методу отримання металів (наприклад, міді, нікелю, алюмінію та ін.) і очищення



металів від домішок (*рафінування*). Електроліз застосовують і для нанесення на поверхню металевого виробу покриття (з нікелю, хрому, срібла тощо), яке має певні фізичні властивості та може слугувати для захисту поверхні від корозії або для надання виробу привабливого вигляду. Електролітичний спосіб покриття виробу тонким шаром металів називають *гальваностегією*.

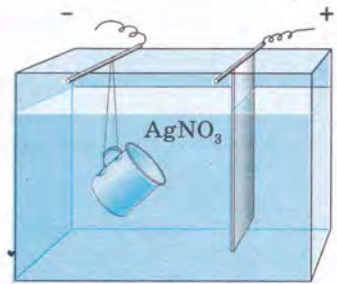
Виріб, який бажають покрити тонким шаром металу, опускають у ванну з розчином електроліту, до складу якого входить потрібний метал. Виріб, що покривається, є катодом, а пластинка металу, яким покривають виріб, — анодом. Під час пропускання струму метал осідає на виробі (катоді), а анодна пластинка поступово розчиняється (рис. 14.2).

За допомогою електролізу можна виготовити точні копії рельєфних виробів. Цей процес називають *гальванопластикою*. Спочатку роблять зліпок рельєфного предмета з воску або іншого пластичного матеріалу. Щоб поверхня зліпка проводила струм, її покривають тонким шаром графіту. Потім зліпок поміщають у ванну з розчином електроліту; зліпок слугуватиме катодом. Анодом буде пластинка металу. Під час пропускання струму через розчин на зліпку нарощується досить товстий шар металу, що заповнює всі нерівності зліпка. Після припинення електролізу восковий зліпок відділяють від шару металу і в результаті отримують точну копію виробу (рис. 14.3).

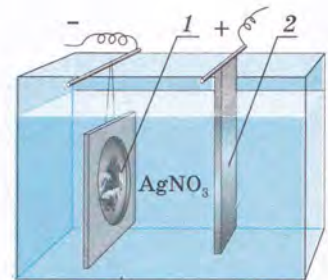
Зрозуміло, що застосування електролізу в сучасній техніці не обмежене розглянутими прикладами. За допомогою електролізу можна здійснити полірування поверхні анода; електроліз лежить в основі заряджання та розряджання кислотних і лужних акумуляторів тощо.

### ★ 5 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Під час рафінування міді анодом слугує пластинка з неочищеної міді, яка має 12 % домішок. Скільки електроенергії необхідно витратити для очищення 2 кг такої міді, якщо процес відбувається за напруги 5 В?



**Рис. 14.2.** Гальванічне сріблення. Предмет, який покривають сріблом (кружка), є катодом, срібна пластинка — анодом; ванна наповнена розчином аргентум нітрату



**Рис. 14.3.** Схема пристрою для отримання рельєфних копій за допомогою електролізу: восковий зліпок, покритий тонким шаром графіту, є катодом (1), срібна пластинка — анодом (2); ванна наповнена розчином аргентум нітрату



$W$  — ?

Дано:

$m_d = 0,12m_m$

$m_m = 2 \text{ кг}$

$U = 5 \text{ В}$

*Аналіз фізичної проблеми.* Витрати електроенергії можна знайти за формулою  $W = qU$ , де  $q$  — заряд, який пройшов через електроліт за час рафінування. Подавши заряд  $q$  із першого закону Фарадея і скориставшись табличним значенням електрохімічного еквівалента міді ( $\text{Cu}^{2+}$ ), визначимо шукану величину.

*Розв'язання.* За першим законом Фарадея  $m = kIt$ , де (відповідно до умови задачі)  $m$  — маса чистої міді, що виділяється на електроді за весь час рафінування, а  $It = q$ . Отже,  $q = \frac{m}{k}$  (1).

З іншого боку, маса  $m$  чистої міді за умовою дорівнює:

$$m = m_m - m_d = m_m - 0,12m_m = 0,88m_m \quad (2).$$

Після підставлення (1) і (2) у формулу  $W = qU$  отримаємо:

$$W = \frac{0,88m_m U}{k}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[W] = \frac{\text{кг} \cdot \text{В}}{\text{кг/Кл}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{Кл}}{\text{Кл}} = \text{Дж};$$

$$\{W\} = \frac{0,88 \cdot 2 \cdot 5}{0,33 \cdot 10^{-6}} \approx 27 \cdot 10^6, \quad W \approx 27 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

*Відповідь:* для очищення міді необхідно витратити  $W \approx 27$  МДж енергії. ★

### Підбиваємо підсумки

Електроліти — це будь-які тверді або рідкі речовини, які мають йонний характер провідності.

Електричний струм в електролітах — це напрямлений рух вільних 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:  $m = kIt$ . Коефіцієнт пропорційності  $k$  — електрохімічний еквівалент речовини.

Другий закон електролізу: електрохімічні еквіваленти різних речовин прямо пропорційні їх хімічним еквівалентам:  $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$ , де  $F$  — стала Фарадея;  $F = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль.

За допомогою електролізу одержують метали, а також очищують їх. Спосіб очищення металів за допомогою електролізу називають рафінуванням.

Електролітичний спосіб покриття виробу тонким шаром металу називають гальваностегією, а одержування за допомогою електролізу точних копій рельєфних виробів — гальванопластикою.

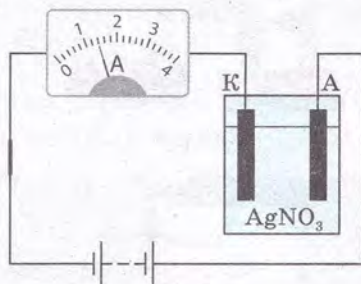


**Контрольні запитання**

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. Яким є фізичний зміст електрохімічного еквівалента речовини?
7. Наведіть приклади застосування електролізу.

**★ Вправа № 14**

1. Через розчин аргентум нітрату протягом двох годин пропускали електричний струм. Визначте масу срібла, яке утворилося на катоді під час електролізу, якщо напруга на електродах становила 2 В, а опір розчину — 0,4 Ом.
2. Під час електролізу розчину сульфатної кислоти за 50 хв виділилося 3 г водню. Визначте потужність, яку витрачено на нагрівання розчину електроліту, якщо його опір становив 0,4 Ом.
3. На рисунку наведено схематичне зображення електричного пристрою, одним із елементів якого є посудина з водним розчином аргентум нітрату. За даними рисунка визначте час, необхідний для утворення на електроді шару срібла завтовшки 8 мкм, якщо густина срібла  $10,5 \text{ г/см}^3$ . Яка енергія буде при цьому витрачена, якщо напруга на електродах становить 11 В? Активна площа електрода дорівнює  $0,03 \text{ м}^2$ .
4. Батарея гальванічних елементів складається з 30 елементів, з'єднаних у три однакові паралельні групи. Яка кількість міді виділиться на катоді ванни за 5 хв роботи батареї, яка ввімкнена в навантаження з опором 205 Ом? ЕРС кожного елемента 0,9 В, внутрішній опір кожного елемента 0,6 Ом. ★



Л. І. Анатичук

**ФІЗИКА ТА ТЕХНІКА В УКРАЇНІ**

**Інститут термоелектрики НАН і МОН молодьспорт України**  
(Чернівці)

Інститут термоелектрики був створений у 1990 р.

*Основні напрямки наукової діяльності* вчених інституту: перехід від точкових джерел термоелектрики до просторових джерел; термоелектричне матеріалознавство; технологія термоелектричних матеріалів.

Інститут термоелектрики успішно співпрацює з російськими, японськими, італійськими вченими.

В інституті створено серію термоелектричних пристроїв, які суттєво розширюють можливості використання термоелектрики: пристрої, які дозволяють використовувати теплову енергію ґрунтів і водних просторів; термоелектричні генератори, що перетворюють ту теплову енергію від двигунів внутрішнього згорання, яка зазвичай втрачалася; системи термоелектричного охолодження, у тому числі космічного призначення, тощо. В інституті створено також серію термоелектричних приладів виміральної техніки.

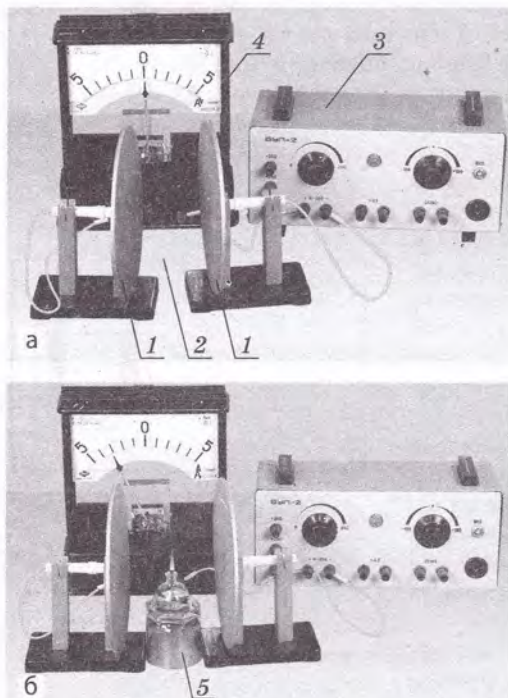
Засновник і незмінний директор Інституту термоелектрики — академік НАНУ **Лук'ян Іванович Анатичук**.



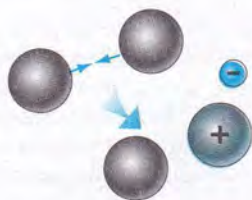
## § 15. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ. ПЛАЗМА ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ



Яскраві (а іноді й небезпечні) явища: блискавка, полярне сяйво, моторошні для необізнаної людини «вогни святого Ельма», різнобарвне світіння газових трубок, сліпуче світло під час зварювання металу,— усе це приклади різних самостійних газових розрядів. Від чого залежить і як виникає той чи інший електричний розряд у газах, ви дізнаєтеся з цього параграфу.



**Рис. 15.1.** Експеримент із вивчення провідності газів: 1 — металеві пластини; 2 — повітряний проміжок; 3 — потужне джерело струму; 4 — гальванометр; 5 — спиртівка. За звичайних умов повітря не проводить електричного струму (а); у разі внесення в повітряний проміжок запаленої спиртівки повітря стає провідником (б)



**Рис. 15.2.** Схема йонізації молекули газу. Втративши в результаті зіткнення електрон, молекула стає позитивним іоном

### 1 Механізм провідності газів

Складемо електричне коло з потужного джерела струму, гальванометра та двох металевих пластин (рис. 15.1, а). Пластини відсунуті одна від одної, отже, між ними є повітря. Замкнувши коло, побачимо, що стрілка гальванометра не відхиляється. Таким чином, за звичайних умов повітря не проводить електричного струму.

Помістимо між металевими пластинами запалену спиртівку і побачимо, що стрілка гальванометра відхиляється (рис. 15.1, б). Це означає, що в повітрі з'явилися вільні заряджені частинки і воно почало проводити електричний струм. З'ясуємо, що це за частинки, звідки і як вони з'явилися.

Полум'я нагріває повітря, й кінетична енергія теплового руху молекул (атомів) повітря збільшується. Тепер у разі їхнього зіткнення електрон може відірватися від молекули (атома) та стати вільним. Втративши електрон, молекула (атом) стає позитивним іоном (рис. 15.2). Відрив електрона від атома потребує витрат певної енергії — *енергії йонізації*  $W_i$ . Енергію йонізації зазвичай виражають у електронвольтах (eВ):  $1\text{eВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1\text{В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Енергія йонізації залежить від хімічної природи газу та енергетичного стану електрона в атомі. Так, для відриву першого електрона від атома Нітрогену витрачається енергія 14,5 eВ, для відриву другого електрона — 29,5 eВ, для відриву третього — 47,4 eВ.



Під час теплового руху електрон, зіткнувшись із нейтральною молекулою чи атомом, може «прилипнути» до них — таким чином утвориться негативний йон (рис. 15.3).

Процес утворення в газі позитивних і негативних йонів та вільних електронів з молекул (атомів) називають **йонізацією**.

Слід звернути увагу на той факт, що газ може стати йонізованим не тільки в результаті підвищення його температури, але й унаслідок впливу інших чинників. Наприклад, верхні шари атмосфери Землі йонізуються під дією космічних променів; сильний йонізаційний вплив на газ мають рентгенівські промені й т. д.

## 2 Що таке газовий розряд

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

Електричний струм у газах інакше називають *електричним або газовим розрядом*. Якщо усунути причину, яка викликала йонізацію газу (наприклад, прибрати паливник у досліді на рис. 15.1), то газовий розряд припиняється.

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

З'ясуємо, чому після припинення дії йонізатора газовий розряд припиняється.

По-перше, у процесі теплового руху позитивний йон може наблизитися до електрона і притягти його, у результаті чого утвориться нейтральна молекула (атом) газу. Цей процес називають **рекомбінацією** (рис. 15.4). Унаслідок рекомбінації кількість вільних заряджених частинок у повітряному проміжку між пластинами зменшується.

По-друге, позитивний йон, досягнувши негативного електрода (катода), «забирає» з нього електрон і перетворюється на нейтральну молекулу (атом). Аналогічно негативний йон, досягнувши позитивного електрода (анода), віддає йому зайвий електрон і теж перетворюється на нейтральну молекулу (атом). Нейтральні молекули (атоми) повертаються в газ, а вільні електрони притягуються до анода й поглинаються ним.

Якщо йонізатор «працює», у газі безперервно з'являються нові йони. Після припинення дії йонізатора кількість вільних заряджених частинок у газі швидко зменшується і газ перестає бути провідником електрики.

Зрозуміло, що збільшення напруги між пластинами, скоріш за все, спричинить збільшення розрядного струму, навіть якщо інтенсивність йонізатора не буде змінюватися. Графік залежності сили розрядного струму від різниці потенціалів (напруги) між електродами



Рис. 15.3. Схема утворення негативних йонів у газі: електрон «прилипає» до нейтральної молекули



Рис. 15.4. Схема рекомбінації (відновлення) молекул газу.



за незмінних характеристик йонізатора — вольт-амперна характеристика газового розряду — наведений на рис. 15.5. На графіку можна виділити кілька характерних ділянок.

За відносно невеликої напруги (від 0 до  $U_1$ ) між електродами залежність сили струму від напруги підпорядковується закону Ома, потім пропорційність порушується і починаючи з  $U_{\text{нас}}$  сила струму не змінюється. Найбільшу силу струму, що є можливою внаслідок дії даного йонізатора, називають **струмом насиченості**  $I_{\text{нас}}$ . При струмі насиченості всі йони, що виникають в одиницю часу, долітають до електродів, не встигнувши рекомбінувати. Значення сили струму насиченості визначається властивостями йонізатора. Для збільшення  $I_{\text{нас}}$  слід збільшити інтенсивність йонізації.

За досить великих напруг ( $U > U_2$ ) кінетична енергія електрона зростає настільки, що внаслідок його співударяння з нейтральною молекулою газу від неї відщеплюється зовнішній електрон. Це явище називають **ударною йонізацією** молекул газу.

Електрони, що вивільнилися, прискорюються в електричному полі і в свою чергу йонізують нейтральні молекули газу, які стикаються з цими електронами. Число електронів і йонів у газі лавиноподібно зростає (рис. 15.6), а разом з ним зростає і розрядний струм. За ще більших значень напруги ударну йонізацію викликають і йони. Тепер до обох електродів рухаються лавини: до катода — позитивна йонна, до анода — електронна. Ці лавини зумовлюють **самостійну провідність газу**. Отже, при  $U > U_2$  виникає **самостійний газовий розряд**, який може існувати без зовнішнього йонізатора. Генерація вільних носіїв заряду відбувається в цьому випадку за рахунок ударної йонізації.

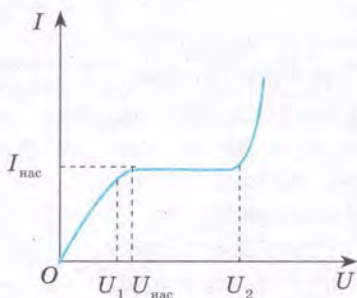


Рис. 15.5. Вольт-амперна характеристика газового розряду

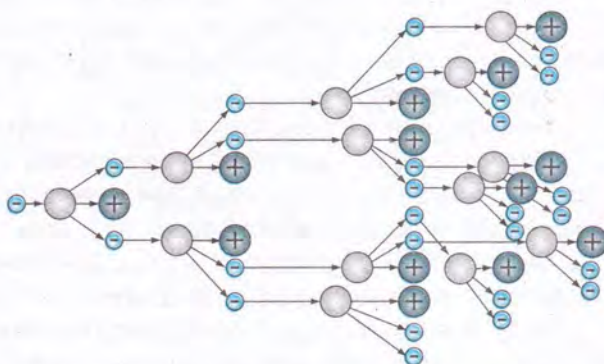


Рис. 15.6. Схема розвитку електронної лавини. Вільний електрон, прискорений електричним полем, йонізує молекулу чи атом і звільняє ще один електрон. Розігнавшись, два електрони звільняють ще два. До анода летять уже чотири електрони і т. д. Число вільних електронів збільшується лавиноподібно доти, доки вони не досягнуть анода



Слід, однак, зазначити, що для існування самостійного розряду необхідно, щоб у газі відбувалися й інші процеси, що спричиняють появу нових електронів замість тих, що «пішли» на анод. Такими процесами можуть бути вторинна емісія електронів з катода (вибиття електронів із катода позитивними йонами, які розганяються в електричному полі), йонізація йонами і внутрішня фотойонізація (випромінювання, яке супроводжує рекомбінацію йонів, може бути поглинене нейтральними атомами, у результаті чого деякі з них йонізуються).


**3**

### Типи самостійних газових розрядів

Існує кілька типів самостійних газових розрядів, серед яких розрізняють іскровий, коронний, дуговий і тліючий.

**Іскровий розряд** має вигляд яскравих зигзагоподібних смужок, що розгалужуються. Прикладом грандіозного іскрового розряду в природі є блискавка.

Іскровий розряд триває всього кілька десятків мікросекунд і зазвичай супроводжується певними звуковими ефектами (потріскування, тріск, грім тощо). Річ у тім, що температура газу, а отже, й тиск у каналі розряду різко підвищуються, в результаті повітря швидко розширюється і виникають звукові хвилі.

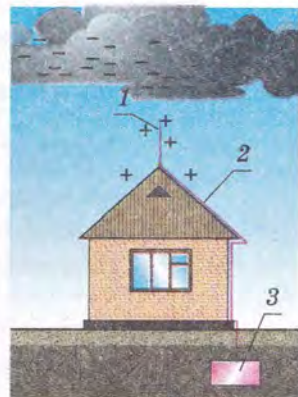
У техніці іскровий розряд використовують, наприклад, у свічках запалювання бензинових двигунів, для обробки поверхні особливо міцних металів.

Перед грозою або під час грози біля гострих виступів предметів іноді можна спостерігати слабе фіолетове світіння у вигляді корони, що охоплює вістря. Дослідження показують, що причиною цього явища є самостійний газовий розряд. Описаний вид газового розряду — **коронний розряд**.

На виникненні коронного розряду ґрунтується дія блискавковідводу. Блискавковідвід являє собою загострений металевий стрижень, з'єднаний товстим провідником із металевим предметом (див. рис. 15.7). Стрижень установлюють вище за найвищу точку будинку, який захищають, а металевий предмет закопують глибоко в землю (на рівні ґрунтових вод). Під час грози на кінці блискавковідводу виникає коронний розряд. У результаті заряд не накопичується на будинку, а стікає з вістря блискавковідводу.

Якщо приєднати два вугільні електроди до полюсів електричної батареї та з'єднати електроди один з одним, а потім трохи розсунути, то між кінчиками електродів можна спостерігати яскраве дугоподібне полум'я — **дуговий розряд** (електричну дугу).

Висока температура йонізованого газу у випадку дугового розряду, а також випромінювання світла, що супроводжує такий розряд,



**Рис. 15.7.** Блискавковідвід (гromовідвід): 1 — загострений металевий стрижень; 2 — провідник — товстий з'єднувальний провід; 3 — металевий предмет, закопаний глибоко в землю



забезпечили широке застосування електричної дуги в науці, техніці, промисловості. Електрична дуга «працює» як потужне джерело світла в прожекторах. У металургії широко застосовують електропечі, в яких використовують дуговий розряд; жаром електричної дуги зварюють метали тощо.

За низького тиску, що становить десятки й соті частки міліметра ртутного стовпа, можна спостерігати світіння розрідженого газу — **тліючий розряд**. За такого низького тиску відстань між молекулами достатня для того, щоб навіть у слабкому електричному полі електрон устиг набрати досить велику швидкість, а отже, набути енергії, достатньої для ударної йонізації.

Тліючий розряд використовують у рекламних трубках, лампах денного світла (люмінесцентних трубках), у квантових джерелах світла — газових лазерах.

Останнім часом поширені телевізори з плазмовими екранами (екранами, функціонування яких ґрунтується на електричному розряді в газах).★

4

#### Що кожний старшокласник має знати про плазму

**Плазма** — це частково або повністю йонізований газ, у якому густини позитивних і негативних зарядів практично однакові.

Як правило, позитивно заряджені частинки — це йони, а негативно заряджені частинки — електрони. Тому в цілому плазма є *електрично нейтральною* системою.

**Ступінь йонізації плазми** ( $\alpha$ ) визначається відношенням числа йонізованих атомів до їх загального числа:  $\alpha = \frac{N_1}{N}$ . Залежно від ступеня йонізації плазма поділяється на *слабко йонізовану* ( $\alpha$  становить частки відсотка), *частково йонізовану* ( $\alpha$  — кілька відсотків) і *повністю йонізовану* ( $\alpha = 100\%$ ).

Нагадаємо, що в стані плазми перебуває більша частина речовини Всесвіту — зорі, зоряні атмосфери, галактичні туманності й міжзоряне середовище; плазма заповнює магнітосферу Землі та йоносферу. Процесами в навколосемній плазмі зумовлені магнітні бурі та полярні сяйва. Відбиття радіохвиль від йоносферної плазми забезпечує можливість далекого радіозв'язку на Землі.

У різкій відмінності властивостей плазми від властивостей нейтральних газів визначальну роль відіграють два чинники.

По-перше, взаємодія частинок плазми характеризується кулонівськими силами притягання та відштовхування, які зменшуються з відстанню набагато повільніше, ніж сили взаємодії нейтральних частинок. Із цієї причини взаємодія частинок у плазмі є не парною, а колективною — одночасно взаємодіє велика кількість частинок.

По-друге, електричні та магнітні поля сильно діють на плазму, викликаючи появу в ній об'ємних зарядів і струмів та зумовлюючи



цілу низку специфічних властивостей плазми. Ці відмінності дозволяють розглядати плазму як особливий, «четвертий», стан речовини.

Термін «плазма» був уведений у фізику на початку 1930-х рр., але особлива зацікавленість плазмою виникла після 1949 р., коли розпочалися роботи зі створення водневої бомби та керованих термоядерних пристроїв.

Високотемпературна плазма ( $T \sim 10^8$  К) поки не має широкого застосування, але саме з такою плазмою із Дейтерію й Тритію, а також ізотопу Гелію  $^3\text{He}$  пов'язана ідея створення керованого термоядерного синтезу.

Низькотемпературна плазма ( $T \sim 10^3$  К) має застосування в газорозрядних джерелах світла й у газових лазерах, у пристроях перетворення теплової енергії на електричну. Були також розроблені магнітогідродинамічні генератори, в яких за допомогою плазми, що рухається, створюються значні електричні поля. Пристрої під назвою *плазмотрони*, що створюють струмені густої низькотемпературної плазми, широко застосовуються в різних галузях техніки. Зокрема, за їхньою допомогою ріжуть і зварюють метали, наносять покриття.

### ★ 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Яку найменшу швидкість повинен мати електрон, щоб йонізувати атом Гідрогену? Енергія йонізації атома Гідрогену 13,5 В.

$v$  — ?

Дано:

$$W_i = 13,5 \text{ В}$$

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

*Аналіз фізичної проблеми.* Для того щоб йонізувати атом Гідрогену, електрон повинен мати кінетичну енергію, що дорівнює енергії йонізації атома Гідрогену. Порівнявши відповідні вирази, знайдемо з отриманої рівності шукану величину.

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Кінетична енергія електрона визначається виразом  $\frac{m_e v^2}{2} = W_k$ , де  $m_e$  — маса електрона.

Оскільки  $W_k = W_i$ , то  $\frac{m_e v^2}{2} = W_i$ . Тоді  $v = \sqrt{\frac{2W_i}{m_e}}$ .

$$\text{Оскільки } W_k = W_i, \text{ то } \frac{m_e v^2}{2} = W_i. \text{ Тоді } v = \sqrt{\frac{2W_i}{m_e}}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\{v\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 13,5}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 2,2 \cdot 10^6, \quad v = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

*Відповідь:* мінімально необхідна швидкість руху електрона для йонізації атома Гідрогену  $v = 2,2 \cdot 10^6$  м/с. ★

### ! Підбиваємо підсумки

За звичайних умов газ практично не містить вільних заряджених частинок, тому не проводить електричного струму. Щоб газ почав проводити струм, його необхідно йонізувати. Йонізацією газу називають



процес утворення позитивних і негативних йонів та вільних електронів з електрично нейтральних атомів (молекул).

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

Газовий розряд, який відбувається тільки за наявності зовнішнього йонізатора, називають несамостійним газовим розрядом. Розряд у газі, що відбувається без дії зовнішнього йонізатора, називають самостійним газовим розрядом — він можливий завдяки йонізації електронним ударом та емісії електронів з катода.

Залежно від тиску й температури газу, способів його йонізації, напруги та характеру світіння, яке супроводжує газовий розряд, розрізняють чотири основні види самостійних газових розрядів: іскровий, коронний, дуговий, тліючий.

Плазма — це частково або повністю йонізований газ, у якому густини позитивних і негативних зарядів практично однакові. Як правило, позитивно заряджені частинки — це йони, а негативно заряджені частинки — електрони. Тому в цілому плазма є електрично нейтральною системою.

### Контрольні запитання



1. Чому за звичайних умов газ не проводить електричного струму?
2. Який газ називають йонізованим?
3. Що таке йонізація?
4. Який розряд у газі називають самостійним? несамостійним?
5. Опишіть механізм ударної йонізації.
6. Перелічіть основні види самостійних газових розрядів.
7. Наведіть приклади іскрового газового розряду. За яких умов він виникає?
8. Що являє собою коронний розряд?
9. Які особливості дугового розряду забезпечили його широке застосування?
10. Де застосовують електричну дугу?
11. За яких умов виникає тліючий розряд? Де його використовують?
12. Що таке плазма? Які її основні властивості?



### Вправа № 15

1. Яку найменшу швидкість повинен мати електрон, щоб йонізувати атом Нітрогену, якщо енергія йонізації Нітрогену дорівнює 14,5 еВ?
2. Якою має бути температура  $T$  атомарного водню, щоб середня кінетична енергія поступального руху атомів була достатньою для йонізації шляхом зіткнень? Енергія йонізації атомарного водню дорівнює 13,6 еВ.
3. Знайдіть силу струму насичення між пластинами конденсатора, якщо під дією йонізатора в кожному кубічному сантиметрі простору між пластинами конденсатора кожної секунди утворюється 108 пар йонів, кожен з яких несе один елементарний заряд. Відстань між пластинами конденсатора дорівнює 1 см, площа кожної пластини становить 100 см<sup>2</sup>.
- 4\*. У йонізаційній камері, відстань між плоскими електродами якої дорівнює 5 см, проходить струм насичення густиною 16 мкА/м<sup>2</sup>. Визначте, скільки пар йонів утворюється в кожному кубічному сантиметрі камери щосекунди.

## § 16. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ ТА ЇЇ ВИДИ. ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВИЙ ПЕРЕХІД І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ



Технічна можливість створення невеликих за габаритами та масою електронних приладів (радіоприймачі, плеєри, мобільні телефони тощо) з'явилася завдяки розробкам у галузі напівпровідників. Із матеріалу цього параграфа ви з'ясуєте, як пов'язана конструкція цих пристроїв з «провідністю напівпровідників».



### Що таке напівпровідники

Напівпровідники, як це випливає з їхньої назви, за своєю провідністю посідають проміжне місце між провід-



никами та діелектриками. Якщо значення питомого електричного опору провідників становить приблизно  $10^{-8}$  Ом · м, діелектриків —  $10^{12}$ ... $10^{20}$  Ом · м, то напівпровідників —  $10^{-4}$ ... $10^7$  Ом · м. Це означає, що концентрація вільних заряджених частинок у напівпровідниках набагато менша, ніж у провідниках, і набагато більша, ніж у діелектриках.

У процесі вивчення залежності провідності напівпровідників від зовнішніх чинників виявилось, що ця залежність у напівпровідників значно відрізняється від тієї, що спостерігається в металах.

По-перше, з підвищенням температури питомий опір напівпровідників зменшується (рис. 16.1), а питомий опір металів, навпаки, збільшується. По-друге, *питомий опір деяких напівпровідників знижується зі збільшенням освітленості*, тоді як опір металів від освітленості практично не залежить. По-третє, *введення домішок може різко зменшити питомий опір напівпровідників*, тоді як метали за наявності домішок зазвичай гірше проводять струм.

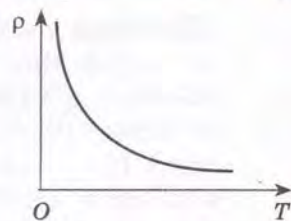


Рис. 16.1. Схематичний графік залежності питомого опору напівпровідників від температури

2

### Яким є механізм власної провідності напівпровідників

З'ясуємо, які частинки є носіями зарядів у напівпровідниках, за яких умов концентрація цих частинок збільшується і звідки вони з'являються. Для цього розглянемо будову чистих (без домішок) напівпровідників на прикладі силіцію. Силіцій має чотири валентні електрони, які «відповідають» за зв'язок між сусідніми атомами. У кристалі силіцію кожен атом Силіцію ніби «позичає» своїм сусідам по одному валентному електрону. Сусіди, у свою чергу, «позичають» йому свої валентні електрони. У результаті між кожними двома атомами Силіцію утворюється електронна пара «для спільного користування» (рис. 16.2, а).

У напівпровідниковому кристалі серед валентних електронів обов'язково є електрони, кінетична енергія яких настільки велика, що вони можуть покинути зв'язок і стати вільними. Один такий електрон показаний на жовтому полі рис. 16.2, а. 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**, а вільні електрони — **електронами провідності**.

Ще раз звернемося до рис. 16.2, а. Після того як електрон «покинув» валентний зв'язок, його місце виявиться «пустим», — фізики



таке місце називають *діркою*. Природно, що *дірці* *приписують позитивний заряд*. На вакантне місце (у дірку) може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку. Тоді дірка з'явиться біля сусіднього атома. Послідовність таких «стрибків» збоку виглядає так, ніби дірка (або позитивний заряд) переміщується в кристалі. Хоча насправді в кристалі — у зворотному напрямку — переміщуються електрони.

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

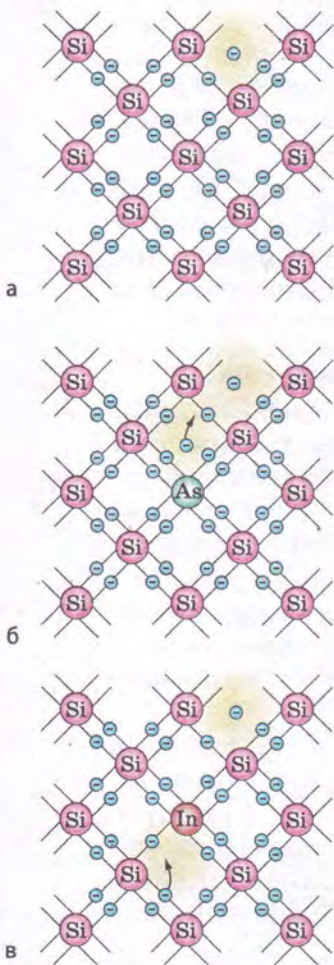
У напівпровіднику з малою кількістю домішок електричний струм створює однакова кількість вільних електронів і дірок. Таку провідність називають *власною провідністю напівпровідників*.

Зі збільшенням температури середня кінетична енергія електронів збільшується, в результаті чого дедалі більше електронів стають вільними. Тому, незважаючи на те що йони внаслідок коливального руху ще більше заважають рухові вільних електронів, опір напівпровідника зменшується.

### 3 Яким є вплив домішок на провідність напівпровідників

Якщо до чистого напівпровідника додати невелику кількість домішки, то механізм провідності різко зміниться. Ці зміни легко простежити на прикладі силіцію з невеликою кількістю домішок арсену. У новому кристалі частина атомів Силіцію буде заміщена атомами Арсену (рис. 16.2, б). Арсен, як відомо, — п'ятивалентний елемент. Чотири валентні електрони атома Арсену утворюють парні електронні зв'язки із сусідніми атомами Силіцію. П'ятому ж валентному електрону зв'язку не вистачить, й оскільки він слабо зв'язаний із атомом Арсену, то легко стане вільним. У результаті значна кількість атомів домішки дасть вільні електрони. Зверніть увагу на те, що домішки типу арсену привносять у кристал тільки електрони, а вакантні місця (дірки) при цьому не утворюються. Домішки, атоми яких відносно легко віддають електрони, називають *донорними домішками* (від латин. *donare* — дарувати, жертвувати).

У напівпровідників у більшості випадків концентрація вільних електронів, які надаються



**Рис. 16.2.** Схематичне зображення кристалічної ґратки Силіцію: без домішок (а); з домішками Арсену (б); з домішками Індію (в)



домішками, є значно вищою, ніж концентрація власних електронів та дірок. Отже, основні носії зарядів у напівпровідниках з донорними домішками — негативні частинки. Тому такі напівпровідники називають *напівпровідниками  $n$ -типу* (від латин. *negativus* — негативний).

На рис. 16.2, б показано кристалічну ґратку з частковою заміною чотиривалентного Силіцію на п'ятивалентний Арсен. Розглянемо тепер зворотню ситуацію — додамо в Силіцій як домішку тривалентний елемент, наприклад Індій (рис. 16.2, в). Оскільки атом Індію має три валентні електрони, то він може «встановити зв'язки» тільки з трьома сусідніми атомами Силіцію. Щоб утримати структуру кристалічної ґратки, відсутній (четвертий) електрон треба «започити» в сусідніх атомах Силіцію. У результаті кожний атом Індію стає джерелом створення дірок. Домішки такого роду називаються *акцепторними домішками* (від латин. *acceptor* — той, що приймає). У напівпровідників із акцепторними домішками основні носії заряду — дірки. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають *напівпровідниками  $p$ -типу* (від латин. *positivus* — позитивний).

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

4

#### Що таке $n$ - $p$ -перехід

**Електронно-дірковий перехід** (або  *$n$ - $p$ -перехід*) — це ділянка контакту двох напівпровідників із різними типами провідності.

Електронно-дірковий перехід утворюється в напівпровідниковому кристалі, в якому є контакт між ділянкою з електронною провідністю та ділянкою з дірковою провідністю. Розглянемо явища, які відбуваються в такому кристалі. Якщо електричне поле відсутнє, то вільні електрони та дірки хаотично рухаються в кристалі, проникаючи в тому числі в ділянки з домінуванням протилежного типу провідності (пригадайте процес дифузії).

Електрони, переходячи із зони з провідністю  $n$ -типу, несуть із собою негативний заряд, тому в кристалі на межі  $n$ - $p$ -переходу ця ділянка заряджається позитивно, а граничний шар зони з провідністю  $p$ -типу — негативно. Дірки приносять позитивний заряд до зони з провідністю  $n$ -типу, а в результаті їхнього переходу зона з провідністю  $p$ -типу одержує додатковий негативний заряд. Таким чином, на межі напівпровідників утворюється подвійний *запірний шар*, електричне поле якого перешкоджає подальшій дифузії електронів і дірок назустріч одне одному.

Якщо кристал із сформованим у ньому  $n$ - $p$ -переходом підключити до джерела струму так, щоб  $p$ -ділянка була з'єднана з позитивним полюсом джерела, а  $n$ -ділянка — з негативним, то товщина запирного



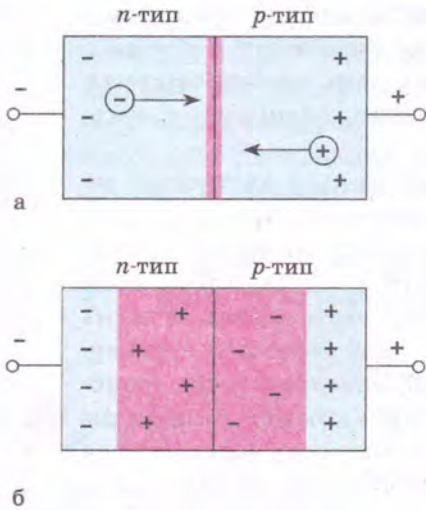


Рис. 16.3. Схематичне зображення р-п-переходу при прямому (а) та зворотному (б) включенні. Запірний шар зафарбовано рожевим кольором

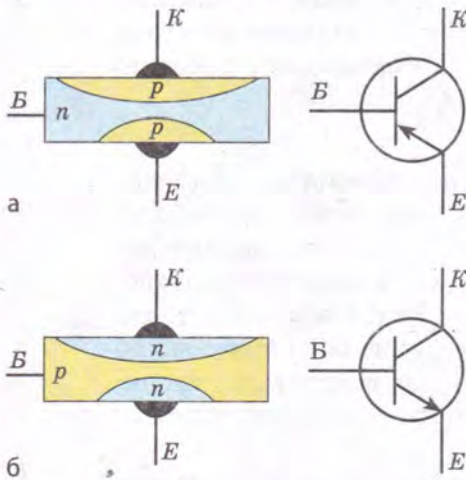


Рис. 16.4. Будова та схематичне позначення транзисторів р-п-р-типу (а); п-п-п-типу (б)

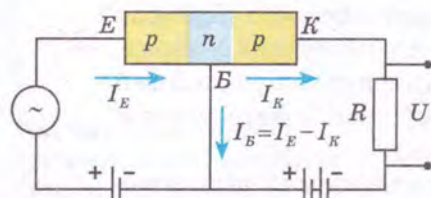


Рис. 16.5. Включення в електричне коло транзистора р-п-р-типу

шару зменшується і з'являється рух основних носіїв зарядів через місце контакту напівпровідників. Цей спосіб підключення називають *прямим* (рис. 16.3, а).

Якщо кристал з *п-р-переходом* підключити до джерела струму так, щоб *р-ділянка* була з'єднана з негативним полюсом джерела, а *п-ділянка* — з позитивним, то рух основних носіїв зарядів через місце контакту припиниться й спостерігатиметься тільки рух неосновних носіїв зарядів. Цей спосіб підключення називають *зворотним* (рис. 16.3, б).

### ★ 5 Як працює транзистор

**Транзистори** — напівпровідникові прилади з двома *п-р-переходами*.

Головний елемент транзистора являє собою напівпровідниковий кристал, наприклад германій, з уведеними в нього донорними та акцепторними домішками. Домішки розподілені так, що між напівпровідниками з однаковою домішкою (їх називають *емітер* і *колектор*) залишається тонкий прошарок германію з домішкою іншого типу — цей прошарок називають *базою*.

Транзистори бувають двох типів: *р-п-р-транзистори* та *п-р-п-транзистори* (рис. 16.4). (Зверніть увагу, що на рисунку літерами позначено: Б — база, К — колектор, Е — емітер.) Якщо в емітері та колекторі дірок істотно більше, ніж електронів (ці ділянки мають провідність *р-типу*), а в базі більше електронів (провідність *п-типу*), — це транзистор *р-п-р-типу* (рис. 16.4, а). Якщо в емітері та колекторі електронів більше, ніж дірок, а в базі більше електронів, — це транзистор *п-р-п-типу* (рис. 16.4, б).

Розглянемо роботу транзистора *р-п-р-типу*. Три виводи транзистора з ділянок із різними типами провідності включають у коло так, як показано на рис. 16.5. Якщо коло емітера відключене,



то струму в колі колектора немає, тому що перехід «база — колектор» ( $n-p$ ) закритий для основних носіїв зарядів. Якщо замкнути коло емітера, дірки — основні носії заряду в емітері — переходять із нього до бази, створюючи в цьому колі струм  $I_e$ . У цьому випадку для дірок, які потрапили до бази з емітера,  $n-p$ -перехід у колі колектора відкритий. Більшість дірок захоплюється полем цього переходу та проникає до колектора, створюючи струм  $I_k$ . Щоб струм колектора практично дорівнював струму емітера, базу транзистора роблять у вигляді дуже тонкого шару. Сила струму в колі емітера практично дорівнює силі струму в колі колектора.

Якщо в коло емітера включене джерело змінної напруги, то на резисторі з опором  $R$ , включеному в коло колектора, також виникає змінна напруга. Якщо опір  $R$  великий, то амплітуда напруги в колі колектора може в багато разів перевищувати амплітуду вхідного сигналу. Отже, *транзистор виконує роль підсилювача змінної напруги.*★

## 6 Як застосовують особливості провідності напівпровідників

Зараз напівпровідникові пристрої набувають винятково широкого застосування в радіоелектроніці. Зокрема, особливості залежності електропровідності напівпровідників від температури (див. рис. 16.1) дають змогу застосовувати їх у спеціальних приладах — *термісторах*.

*Термістор* — напівпровідниковий терморезистор (від грец. *therme* — тепло, жар і латин. *resisto* — опираюся), *електричний опір якого істотно змінюється з підвищенням температури*.

Термістори застосовують як термометри для вимірювання температури навколишнього середовища. Вони більш чутливі, ніж термометри опору, які виготовляють з металу.

У багатьох напівпровідників зв'язок між електронами й атомами настільки незначний, що достатньо опромінити кристали світлом, щоб в них виникла додаткова кількість вільних носіїв зарядів. Тож коли такий кристал підключений до електричного кола, його провідність буде змінюватися залежно від того, опромінюється він світлом чи ні.

*Напівпровідниковий пристрій, в якому використовується властивість провідника змінювати свій опір залежно від зміни освітлення, називають фоторезистором*. Фоторезистори застосовують у системах сигналізації та автоматики, дистанційного керування виробничими процесами, сортування виробів. За їхньою допомогою запобігають нещасним випадкам і аваріям, автоматично зупиняючи машини в разі порушення ходу процесу.

Слід, однак, зазначити, що широке застосування напівпровідників у техніці здебільшого зумовлене використанням властивостей електронно-діркового переходу.



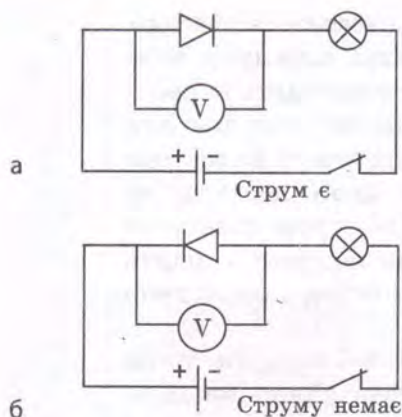


Рис. 16.6. Пряме (а) і зворотне (б) включення напівпровідникового діода в електричне коло

Так, *p-n*-перехід дозволяє створювати *напівпровідникові діоди* — прилади, які мають *однобічну провідність* (рис. 16.6). За допомогою таких пристроїв можна перетворити змінний струм на постійний.

Інша можливість виникає в разі застосування потрібного переходу. Такий складний перехід дозволяє створити пристрій для підсилення електричного сигналу. Назва цього пристрою — *напівпровідниковий триод*, або *транзистор*. Причому на відміну від свого вакуумного аналога напівпровідниковий пристрій має значно менші габарити та масу.

Відразу після своєї появи в 1960-х рр. напівпровідникові діоди та транзистори зробили справжню технічну революцію.

Замість важких вакуумних електронних ламп з'явилися пристрої масою декілька грамів та розміром декілька міліметрів. Тож були створені порівняно невеликі переносні радіоприймачі — вагою в декілька кілограмів та розміром зі шкільний рюкзак. Сучасні технології дозволяють виготовляти діоди, транзистори, напівпровідникові фотоприймачі та інші пристрої розміром у кілька мікрометрів. Тож замість одного радіоприймача рюкзак сучасного учня може вміщати ноутбук, мобільний телефон, плеєр тощо.



7

Булева алгебра — основа роботи комп'ютера

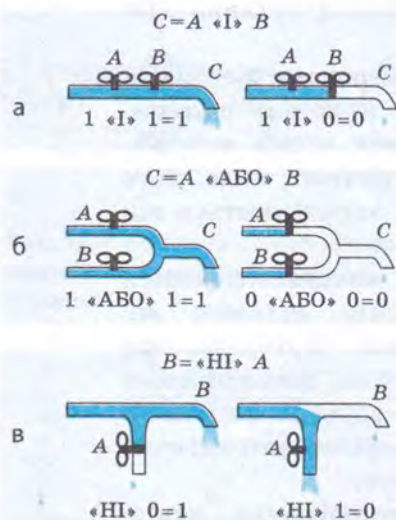


Рис. 16.7. «Водопровідна модель» операцій булевої алгебри

«Серце» сучасного комп'ютера — його центральний процесор. Основна функція процесора — обробка інформації, а оскільки дані в сучасних електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ) подаються у двійковому вигляді, то й операції з ними здійснюються на основі бінарної логіки, або так званої *булевої алгебри*. Булева алгебра розглядає величини, які набувають тільки двох значень — 0 або 1. Значення булевої величини можна подати як хибність або істинність будь-якого твердження (0 — хибне, 1 — істинне). Тому з такими величинами можна здійснювати різні операції — так само, як ми оперуємо твердженнями під час міркувань. Основні операції: «І», «АБО», «НІ».

Виконання логічних операцій можна проілюструвати на наочній фізичній моделі «водопроводу». Уявімо твердження, над якими



здійснюються операції, у вигляді вентилів на трубах (відкритий вентиль — твердження істинне, закритий — хибне). Результат операції уявимо у вигляді крана, з якого вода може або текти (істина), або не текти (хиба). На рис. 16.7 зображено системи труб, які реалізують основні логічні операції. Наприклад, розглянемо операцію «І»:  $C = A \text{ «І» } B$  (рис. 16.7, а). Вентилі  $A$  і  $B$  встановлені на трубі послідовно, тому вода з крана  $C$  тече, тільки якщо вони обидва відкриті. Якщо ж установити вентилі на дві паралельні труби, що з'єднуються в одну, то така система виконуватиме операцію «АБО»: якщо хоча б один із вентилів ( $A$  або  $B$ ) відкритий, вода з крана  $C$  потече, тобто  $C = A \text{ «АБО» } B$  (рис. 16.7, б). На рис. 16.7, в показано систему, що виконує операцію «НІ»: якщо вентиль  $A$  закритий, то вода тече із крана  $B$ , якщо ж вентиль  $A$  відкритий, то вся вода тече з крана  $A$ , не доходячи до крана  $B$ , тобто  $B = \text{«НІ» } A$ .

В електроніці роль «електронних вентилів» виконує транзистор.★

### ★ 8 Що таке інтегральна мікросхема

Якісно новий етап розвитку електронної техніки розпочався з появою так званих *інтегральних мікросхем*. Ці складні системи прийшли на зміну величезним блокам перших ЕОМ.

*Інтегральна мікросхема* (інша назва — *мікрочип*) — це мікроелектронний пристрій з електронною схемою довільної складності, виготовлений на напівпровідниковому кристалі або плівці.

Сучасна інтегральна мікросхема об'єднує на декількох квадратних міліметрах тисячі транзисторів, діодів та інших напівпровідникових пристроїв.

Залежно від *функціонального призначення* інтегральні мікросхеми поділяють на *аналогові* та *цифрові*.

*Аналогові мікросхеми* призначені для перетворення та обробки сигналів, що змінюються за законом безперервної функції. Основним елементом аналогових мікросхем є транзистор. Аналогові інтегральні мікросхеми виконують функції підсилення, детектування, модуляції, генерації, фільтрації, перетворення аналогових сигналів і використовуються в аналого-цифрових вимірювальних приладах, підсилювачах низької і високої частот, відеопідсилювачах, генераторах, змішувачах та інших пристроях.

За допомогою *цифрових мікросхем* перетворюються та обробляються сигнали, що змінюються за законом дискретної функції. Окремим випадком цифрових мікросхем є логічні мікросхеми, що виконують операції з двійковим кодом, які описуються законами логічної алгебри. У цифрових інтегральних мікросхемах активні елементи працюють у ключовому режимі. Здебільшого їх застосовують в обчислювальних машинах.★

### ! Підбиваємо підсумки

Провідність напівпровідників зумовлена рухом вільних електронів (електронна провідність) і рухом дірок (діркова провідність). У чистому напівпровіднику електричний струм створюється однаковою



кількістю вільних електронів і дірок. Таку провідність називають власною провідністю напівпровідників.

У разі введення в 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 напівпровідник домішки з меншою валентністю (акцепторної домішки) дірок стає більше, ніж вільних електронів. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками *p*-типу.

Якщо напівпровідник має дві зони з різними типами провідності, то на межі цих зон утворюється *n-p*-перехід, який має односторонню провідність електричного струму. Здатність *n-p*-переходу пропускати струм практично тільки в одному напрямку використовують у пристроях, які називаються напівпровідниковими діодами.

Напівпровідники широко використовують у техніці, наприклад для виготовлення термісторів і фоторезисторів.

Напівпровідникові прилади з двома *n-p*-переходами називають транзисторами. Особливості будови транзистора дозволяють використовувати його як підсилювач сигналів і електронний ключ.

?

### Контрольні запитання

1. Чим напівпровідники відрізняються від металів?
2. Як у чистих напівпровідників з'являються вільні електрони?
3. Поясніть механізм діркової провідності.
4. У чому полягає власна провідність напівпровідників?
5. Чому опір напівпровідників дуже залежить від наявності домішок?
6. Яку домішку називають донорною?
7. Назвіть основні носії зарядів у напівпровідниках *n*-типу.
8. Яку домішку потрібно ввести, щоб одержати напівпровідник *p*-типу?
9. Як можна виготовити кристал з електронно-дірковим переходом?
10. Чому кристал напівпровідника з *n-p*-переходом має односторонню провідність?
- ★ 11. Дайте визначення транзистора.
12. Які типи транзисторів ви знаєте?
13. Чому база транзистора має бути вузькою? Чому сила струму в колекторі приблизно дорівнює силі струму в емітері?
- ★ 14. Де застосовують напівпровідники?
- ★ 15. Яку роль відіграють транзистори в роботі ЕОМ?
- ★ 16. Що таке інтегральна мікросхема?

## § 17. СТРУМ У ВАКУУМІ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

?!

У вакуумі відсутні заряджені частинки, а отже, він є діелектриком. Тобто для одержання електричного струму у вакуумі необхідно створити певні умови, які допоможуть одержати заряджені частинки. Які ж ці умови і що ж собою являє струм у вакуумі?

1

### Термоелектронна емісія

Щоб розібратися, що являє собою струм у вакуумі, необхідно визначитися з поняттям вакууму.

**Вакуум** — це стан газу за тиску менш ніж атмосферний. Розрізняють низький, середній та високий вакуум.

Коли кажуть про струм у вакуумі, то мають на увазі *високий вакуум*, тобто такий стан газу, за якого довжина вільного пробігу молекули (атома) суттєво більша за лінійні розміри посудини, в якій міститься газ.

Щоб у вакуумі існував струм, слід помістити у вакуум джерело вільних заряджених частинок, наприклад електронів. Найбільша



концентрація вільних електронів — у металах. Однак за кімнатної температури вони не можуть залишити метал, бо втримуються в ньому силами кулонівського притягання до позитивних йонів. Для подолання цих сил електрону необхідно витратити певну енергію.

*Енергію, яку необхідно витратити електрону, щоб залишити поверхню металу, називають роботою виходу.*

Якщо кінетична енергія електрона буде більшою або дорівнюватиме роботі виходу  $\left( \frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}} \right)$ , то він залишить поверхню металу та стане вільним.

*Процес випускання електронів із поверхні металів називають емісією.*

Залежно від того, як була передана електрону необхідна енергія, розрізняють кілька видів емісій. Один із них — *термоелектронна емісія*.

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

Оскільки нагрітій метал безперервно випускає електрони, біля його поверхні завжди існує хмара вільних електронів — *електронна хмара*, що має негативний заряд. Відповідно поверхня металу набуває позитивного заряду. Під впливом електричного поля, яке виникає між хмарою та поверхнею металу, деяка частина електронів повертається назад. 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, що поведінка електронів дуже нагадує поведінку молекул біля поверхні рідини, а електронна хмара асоціюється з насиченою парою коло поверхні рідини.

## 2 Що собою являє електричний струм у вакуумі

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

Для створення цих умов у балон поміщують два електроди (катод і анод) та відкачують із цього балона повітря. Катод нагрівають, використовуючи тонкий дротяний волосок із тугоплавкого металу (волосок розжарення), підключений до джерела струму. У результаті з поверхні катода вилітають електрони. Для збільшення їх емісії катод покривають шаром оксидів лужноземельних металів (барію, стронцію, калію та ін.). На катод подають негативний потенціал, а на анод — позитивний. Електрони, що вилетіли з катода, потрапляють в електричне поле між двома електродами й починають рухатися напрямлено, створюючи електричний струм.

*Електричний струм у вакуумі являє собою напрямлений рух вільних електронів, отриманих, наприклад, у результаті термоелектронної емісії.*



3

### Будова та принцип дії вакуумного діода

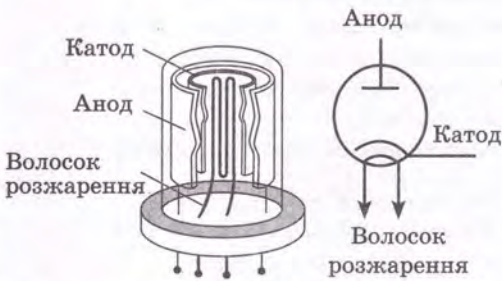


Рис. 17.1. Вакуумний діод: а — будова; б — схематичне позначення

Явище термоелектронної емісії лежить в основі принципу дії різних електронних приладів. Найпростіший з них — *вакуумний (ламповий) діод* (рис. 17.1). Цей прилад складається зі скляного балона, у якому містяться два електроди: катод і анод.

Очевидно: якщо подати на катод позитивний потенціал, а на анод — негативний, то електрони, що випаровуватимуться з катода, будуть відкидатися полем назад на катод і струму в колі не буде. Таким чином, вакуумний діод, як і напівпровідниковий, має *однобічну провідність*.

4

### Які властивості мають електронні пучки

Якщо в аноді електронної лампи створити отвір, то частина електронів, прискорених електричним полем, влетить у цей отвір і створить за анодом електронний пучок.

*Електронні пучки являють собою потік електронів, які швидко рухаються.*

*Властивості електронних пучків:* 1) викликають нагрівання тіл у разі потрапляння на їх поверхню; 2) викликають появу рентгенівського випромінювання в разі гальмування в речовині; 3) викликають світіння деяких речовин та матеріалів (так званих люмінофорів); 4) відхиляються електричним полем; 5) відхиляються магнітним полем.

Властивість 1 використовують під час плавлення надчистих металів у вакуумі, властивість 2 — у рентгенівських трубках, властивості 3–5 — в електронно-променевих трубках.

5

### Електронно-променева трубка

На явищі термоелектронної емісії базується принцип дії ще одного пристрою — *електронно-променевої трубки* — фізичного пристрою, який перетворює електричні сигнали на світлові (рис. 17.2).

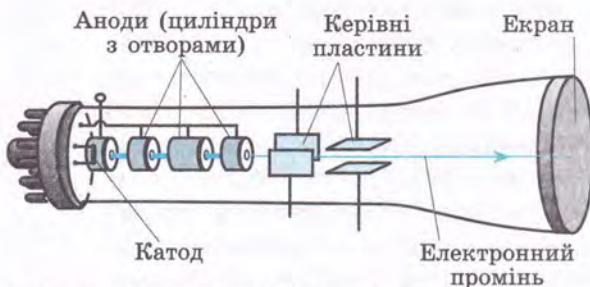


Рис. 17.2. Принципова будова електронно-променевої трубки

Електронно-променева трубка являє собою вакуумний балон, одна зі стінок якого слугує екраном. Екран покритий шаром люмінофора — речовини, що світиться, коли на неї потрапляє пучок електронів.

На протилежному від екрана кінці трубки розташована *електронна гармата*, призначена для формування



електронного променя. Електронна гармата складається з *катода*, *керівних електродів* і кількох розташованих один за одним *анодів*, що являють собою диски, вставлені в циліндри з невеликими отворами. Форма, розташування та потенціали анодів дібрані таким чином, що електронний пучок фокусується, збираючись на екрані практично в точку. Чим краще сфокусований пучок, тим чіткішим виходить зображення на екрані.

Між катодом і першим анодом створюється потужне електричне поле (різниця потенціалів може сягати кількох тисяч вольтів). Електрони, розігнані до великих швидкостей і сфокусовані у вузький пучок, потрапляють в електричне поле *керівних пластин* (або електромагнітів). Якщо напруга подається на вертикальні пластини, то електронний пучок відхиляється по горизонталі, якщо на горизонтальні — то по вертикалі. Таким чином, подаючи різну напругу на пластини, можна керувати електронним пучком. Оскільки маса електронів дуже мала, то вони практично миттєво реагують на зміну поля (електростатичного або магнітного, залежно від того, електричною чи магнітною є керівна система).

Екрани на електронно-променевої трубках (монітори) протягом багатьох років безперервно вдосконалювалися — збільшувалися їхня контрастність і колірна насиченість.

Прагнення зменшити габарити моніторів, зробити їх портативними привело до створення плоских дисплеїв.



### Підбиваємо підсумки

Для створення електричного струму у вакуумі необхідне джерело заряджених частинок, у ролі якого використовують металеві провідники. Енергію, яку має витратити електрон, щоб залишити поверхню металу, називають роботою виходу. Якщо кінетична енергія електрона

буде більшою або дорівнюватиме роботі виходу  $\left( \frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}} \right)$ , то він

залишає поверхню металу й стає вільним. Процес випускання електронів із поверхні металів називається емісією.

Термоелектронна емісія — процес випускання електронів нагрітими тілами.

Явище термоелектронної емісії набуло широкого застосування у вакуумних електронних приладах, наприклад у вакуумному діоді й електронно-променевої трубці.



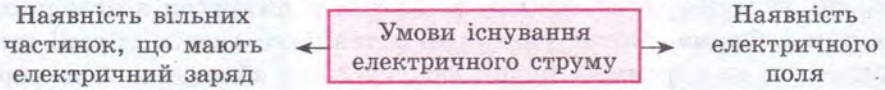
### Контрольні запитання

1. Що собою являє 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 вакуумний діод? 7. Якими є основні властивості електронних пучків? 8. Назвіть основні частини електронно-променевої трубки. Якими є їхні функції?

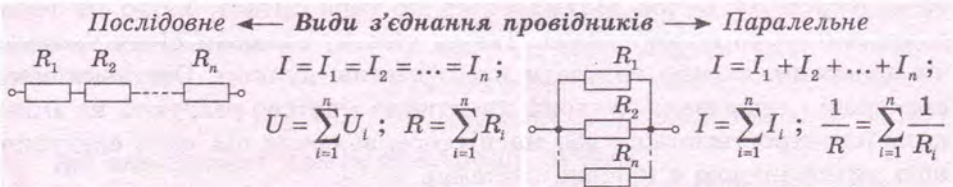


## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ 2 «ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ»

1. Вивчаючи розділ 2, ви згадали, що *електричний струм* — це напрямлений рух частинок, які мають електричний заряд, та переконалися, що для існування електричного струму в колі необхідне виконання *двох умов*:



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 та паралельного з'єднань споживачів*:



5. Ви познайомилися:

- із законом Ома для повного кола:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ ; із законом Ома для ділянки кола:  $I = \frac{U}{R}$ ;
- з правилами Кірхгофа:  $\sum_{k=1}^p I_k = 0$ ;  $\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i$ .

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

Робота струму	Потужність струму	Кількість теплоти
$A = UIt$	$P = UI$	$Q = I^2 Rt$

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

Електричний струм у різних середовищах				
↓ <b>Метали</b>	↓ <b>Рідини</b>	↓ <b>Гази</b>	↓ <b>Напівпровідники</b>	↓ <b>Вакуум</b>
Напрявлений рух вільних електронів $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$	Напрявлений рух вільних йонів Закони електродіфузії: 1. $m = kq = kIt$ ; 2. $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$	Напрявлений рух вільних йонів і електронів $\frac{m_e v^2}{2} \geq W_1$	Напрявлений рух вільних електронів і дірок	Напрявлений рух електронів $\frac{m_e v^2}{2} \geq A_{\text{вих}}$

8. Ви дізналися про *термоелектричні явища* та розглянули деякі приклади їх застосування в техніці.



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ 2 «ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ»

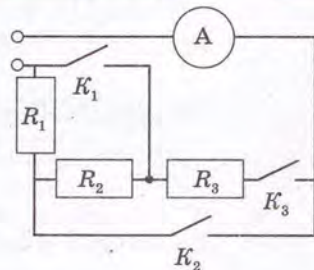
**Завдання 1.** Опір усіх резисторів на ділянці кола (див. рисунок) однаковий і дорівнює 20 Ом.

(2 бали) Обчисліть 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?

(5 балів) До ділянки кола прикладено напругу 120 В. Які ключі необхідно замкнути, щоб амперметр показував 12 А? Обґрунтуйте свою відповідь.



**Завдання 2.** Спіраль електроплитки виготовлена з ніхромового дроту перерізом  $0,15 \text{ мм}^2$  і довжиною 10 м. Плитка увімкнена в мережу напругою 220 В.

(2 бали) Обчисліть кількість теплоти, що виділиться в спіралі за 20 хв роботи.

(5 балів) Обчисліть об'єм води, узятої при температурі  $15^\circ\text{C}$ , який дана плитка може довести до кипіння за 20 хв. ККД плитки 80 %, питомий опір ніхрому  $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

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

(5 балів) Визначте силу струму в колі, падіння напруги у внутрішній частині кола та напругу на клеммах джерела.

★(3 бали) Обчисліть опір шунта, який необхідно приєднати до міліамперметра з межею вимірювання 10 мА, щоб цим приладом можна було виміряти силу струму в колі. Внутрішній опір міліамперметра 9,9 Ом.

**Завдання 4.** На рисунку наведено схему електричного кола, до складу якого входить електролітична ванна.

(1 бал) Як називаються вільні носії заряду в електролітах?

- а) позитивно заряджені йони;  
б) електрони;  
в) негативно заряджені йони;  
г) позитивно та негативно заряджені йони

★(3 бали) Визначте масу срібла, яке виділиться на електроді електролітичної ванни з розчином  $\text{AgNO}_3$ , якщо цю ванну послідовно з'єднати з ванною, зображеною на рисунку, і ввімкнути в те саме електричне коло. Маса міді, що виділилася при цьому, дорівнює 0,36 г.

**Завдання 5.** Сила струму, який проходить через вольфрамовий волосок лампи розжарювання, в момент вимкнення лампи в 12,5 разу перевищує силу робочого струму.

★(3 бали) Обчисліть температуру волоска лампи в робочому стані, якщо в момент увімкнення її температура становить  $20^\circ\text{C}$ .

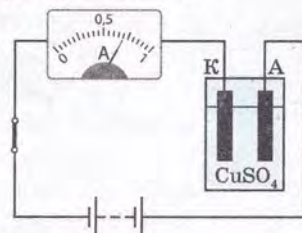
**Завдання 6.** При вмиканні неонові лампи в електричне коло в ній виникає газовий розряд.

(1 бал) Якого виду розряд відбувається в цій лампі?

- а) несамостійний; б) самостійний іскровий; в) самостійний дуговий; г) самостійний тліючий

★(3 бали) За якої напруги запалюється неонові лампа, якщо енергія йонізації атома Неону дорівнює 21,6 еВ, середня довжина вільного пробігу електронів у газі 1 мм, а відстань між електродами лампи 1 см?

Зверте ваші відповіді з наведеними наприкінці підручника. Позначте завдання, які ви виконали правильно, і полічіть суму балів. Потім цю суму розділіть на два (академічний рівень) або на три (профільний рівень). Одержане число відповідатиме рівню ваших навчальних досягнень.





# РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ

## § 18. МАГНІТНЕ ПОЛЕ СТРУМУ



Ще вчені Давньої Греції припускали, що магнітні й електричні явища пов'язані між собою, проте встановити їх зв'язок вдалося лише на початку XIX ст. Пригадаємо, хто першим помітив цей зв'язок, що таке магнітне поле, і введемо поняття фізичної величини, яка є силовою характеристикою магнітного поля.



### Хто й коли виявив зв'язок електрики та магнетизму

15 лютого 1820 р. данський фізик *Ганс Крістіан Ерстед* (1777–1851), демонструючи студентам досліди з нагріванням провідників електричним струмом, помітив, що *під час проходження струму магнітна стрілка, розташована поблизу провідника, відхиляється від напрямку «північ — південь»* (рис. 18.1). Це було перше безпосереднє підтвердження зв'язку електрики та магнетизму.

Французький математик і фізик *Андре Марі Ампер* (1775–1836) уперше почув про досліди Г. К. Ерстеда 4 вересня 1820 р. і вже за тиждень продемонстрував взаємодію двох паралельно розташованих провідників зі струмом (рис. 18.2) і взаємодію двох котушок, по яких проходить електричний струм. Аналізуючи результати дослідів, учений зробив висновок: провідники електрично нейтральні, тому їхнє притягання або відштовхування не може бути пояснене дією кулонівських сил — їхня поведінка є наслідком дії *магнітних сил*.

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

**Магнітне поле** — складова електромагнітного поля, що виявляється в дії на рухомі заряджені частинки (тіла) та створюється намагніченими тілами, змінним електричним полем і рухомими зарядженими частинками (тілами).

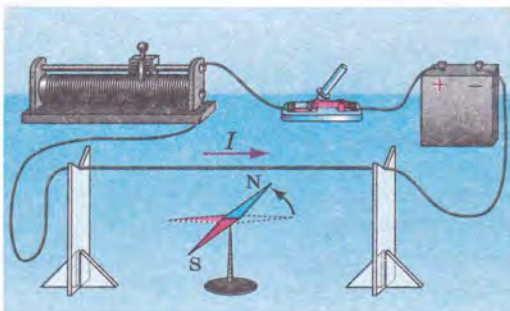


Рис. 18.1. Схема досліду Г. К. Ерстеда

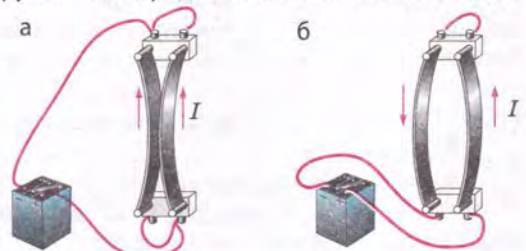


Рис. 18.2. Схема досліду А. Ампера. Якщо в двох паралельних провідниках течуть струми одного напрямку, ці провідники притягуються (а); якщо протилежних напрямків — відштовхуються (б)



## 2 Яка фізична величина є силовою характеристикою магнітного поля

З дослідів Ампера та визначення магнітного поля випливає, що магнітне поле чинить певну силову дію. Для введення силової характеристики магнітного поля згадаємо про силу Ампера.

Якщо прямий провідник, виготовлений із немагнітного матеріалу, підвісити на проводах між полюсами постійного магніту та пропустити по провіднику струм, то провідник відхилиться від початкового положення.

Причиною такого відхилення є сила, яка діє на провідник зі струмом з боку магнітного поля, — *сила Ампера*  $\vec{F}_A$  (рис. 18.3).

Збільшуючи чи зменшуючи силу струму  $I$  в провіднику або довжину  $l$  *активної частини провідника* (частини, що перебуває в магнітному полі), можна переконатися, що сила Ампера прямо пропорційна і силі струму, і довжині активної частини провідника, отже, прямо пропорційна їх добутку:  $F_A \sim Il$ . Змінюючи кут між провідником і лініями магнітного поля, можна довести, що сила Ампера є максимальною ( $F_{A \max}$ ), якщо провідник розташований перпендикулярно до ліній магнітного поля.

Оскільки  $F_{A \max} \sim Il$ , то 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 властивостей самого поля. Тому це відношення обрали за силову характеристику магнітного поля — вона одержала назву *магнітна індукція*.

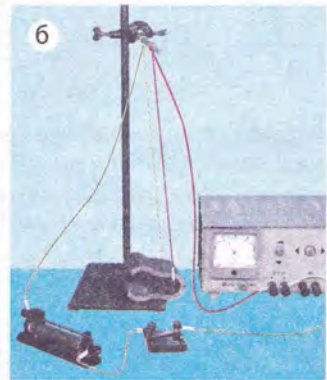
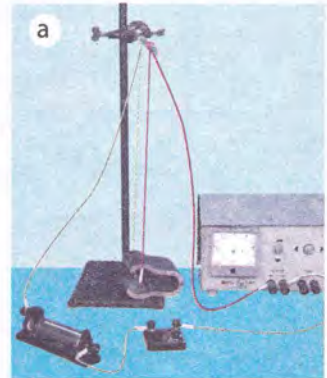
**Магнітна індукція**  $\vec{B}$  — це векторна фізична величина, що характеризує силову дію магнітного поля та чисельно дорівнює відношенню максимальної сили, з якою магнітне поле діє на розташований у цьому полі провідник зі струмом ( $F_{A \max}$ ), до добутку сили струму  $I$  в провіднику на довжину  $l$  активної частини провідника:

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

Одиниця магнітної індукції в СІ — **тесла** (Тл)\*.

1 Тл — це індукція такого однорідного магнітного поля, яке діє з максимальною силою 1 Н на провідник завдовжки 1 м, по якому тече струм 1 А;

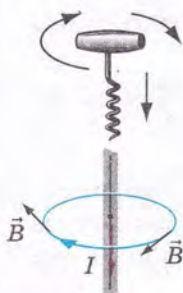
$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$



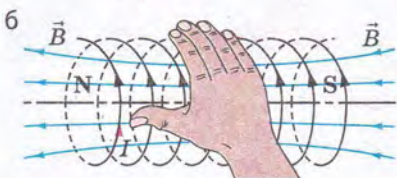
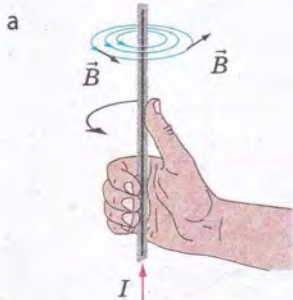
**Рис. 18.3.** Дослід, який демонструє дію магнітного поля на алюмінієвий провідник: а — у разі відсутності струму магнітне поле на провідник не діє; б — якщо по провіднику тече струм, провідник відхиляється внаслідок дії сили Ампера  $\vec{F}_A$

\* Названа на честь сербського фізика *Ніколи Тесли* (1856–1943).

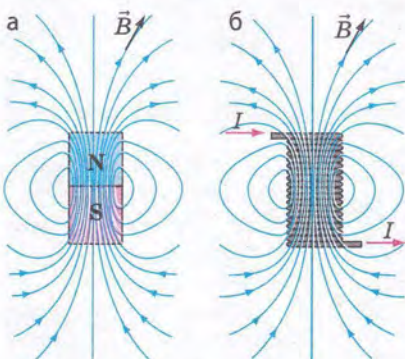




**Рис. 18.4.** Визначення напрямку вектора магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом за правилом свердлика



**Рис. 18.5.** Визначення напрямку вектора магнітного поля провідника зі струмом (а) і котушки зі струмом (б) за допомогою правил правої руки



**Рис. 18.6.** Лінії магнітної індукції магнітного поля штабового магніту (а) і котушки зі струмом (б)

### 3 Як визначити напрямок вектора магнітної індукції

Магнітна індукція — векторна величина, тому вона повністю визначена, якщо задані її значення та напрямок. За напрямок вектора магнітної індукції в даній точці магнітного поля обра-  
*но напрямок, у якому вказує північний кінець магнітної стрілки, встановленої в цій точці.*

*Напрямок вектора магнітної індукції магнітного поля провідника зі струмом визначають за допомогою правила свердлика або правил правої руки.*

#### Правило свердлика:

Якщо вкручувати свердлик за напрямком струму в провіднику, то напрямок обертання ручки свердлика вкаже напрямок вектора магнітної індукції магнітного поля струму (рис. 18.4).

#### Правила правої руки:

Якщо спрямувати відігнутий великий палець правої руки за напрямком струму в провіднику, то чотири зігнуті пальці вкажуть напрямок вектора магнітної індукції магнітного поля струму (рис. 18.5, а).

Якщо чотири зігнуті пальці правої руки спрямувати за напрямком струму в котушці, то відігнутий великий палець укаже напрямок вектора магнітної індукції магнітного поля всередині котушки (рис. 18.5, б).

### 4 Як графічно зображують магнітні поля

Магнітні поля графічно зображують за допомогою ліній магнітної індукції (ще їх називають лініями магнітного поля або магнітними лініями) (див. рис. 18.4–18.6).

**Лінії магнітної індукції** — умовні лінії, у кожній точці яких дотична збігається з лінією, вздовж якої напрямлений вектор магнітної індукції.

Лінії магнітної індукції домовлено креслити так, щоб їхня густина відображала значення модуля магнітної індукції магнітного поля: чим більшим є модуль магнітної індукції, тим густіше креслять лінії.



Зверніть увагу: лінії магнітної індукції завжди замкнені: *магнітне поле — це вихрове поле.*

Дивлячись на лінії магнітної індукції постійного штабового магніту та котушки зі струмом (див. рис. 18.6), можна помітити, що вони ідентичні. Зверніть увагу: і котушка зі струмом, і постійний магніт мають два полюси. *Лінії магнітної індукції виходять із північного полюса котушки або магніту і входять у південний.*

Картину магнітних ліній можна побачити, скориставшись залізними ошурками (рис. 18.7). У магнітному полі кожен шматочок заліза намагнітиться та зорієнтується певним чином. Рисунок, створений ланцюжками ошурок, відтворить картину ліній магнітної індукції.

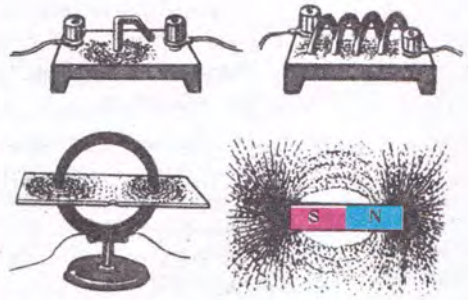


Рис. 18.7. Картини ліній магнітної індукції, отримані за допомогою залізнних ошурок

### 5 Яке поле називають однорідним

Магнітне поле називають *однорідним*, якщо в кожній його точці вектори магнітної індукції однакові.

Лінії магнітної індукції однорідного поля паралельні та розташовані на однаковій відстані одна від одної. Наприклад, *однорідним можна вважати* магнітне поле всередині *соленоїда\**, штабового магніту, між полюсами підковоподібного магніту.

На практиці частіше зустрічається *неоднорідне магнітне поле* — поле, вектори магнітної індукції якого мають різні значення та напрямки. Лінії магнітної індукції такого поля викривлені, і їхня густина є різною.

### ! Підбиваємо підсумки

Магнітне поле — це складова електромагнітного поля, яка виявляється в дії на рухомі заряджені частинки (тіла) та створюється намагніченими тілами, змінним електричним полем і рухомими зарядженими частинками (тілами).

Магнітна індукція  $\vec{B}$  — це векторна фізична величина, що характеризує силову дію магнітного поля та чисельно дорівнює відношенню максимальної сили, з якою магнітне поле діє на розташований у цьому полі провідник зі струмом ( $F_{A \max}$ ), до добутку сили струму  $I$  в провіднику на довжину  $l$  активної частини провідника:  $B = \frac{F_{A \max}}{Il}$ . Одиниця магнітної індукції в СІ — тесла;  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н/А} \cdot \text{м}$ .

Напрямок вектора магнітної індукції провідника зі струмом визначають за правилом свердлика та за правилами правої руки. Він збігається з напрямком, у якому вказує північний кінець магнітної стрілки.

\* Соленоїд — котушка, що має форму циліндра, довжина якого значно більша за діаметр.



Лінії магнітної індукції — умовні лінії, у кожній точці яких дотична збігається з лінією, уздовж якої напрямлений вектор магнітної індукції. Лінії магнітної індукції завжди замкнені — магнітне поле є вихровим.



**Контрольні запитання**

1. У чому полягає дослід Г. К. Ерстеда?
2. Дайте визначення магнітного поля.
3. Опишіть дослід на підтвердження того, що в магнітному полі на провідник зі струмом діє сила.
4. Дайте визначення магнітної індукції. Якою є її одиниця в СІ?
5. Які є способи визначення напрямку вектора магнітної індукції?
6. Що називають лініями магнітної індукції?
7. Чому магнітне поле є вихровим?
8. Яке магнітне поле називають однорідним? неоднорідним? Наведіть приклади.



**Вправа № 16**

1. Магнітне поле індукцією 2,1 мТл діє з максимальною силою 0,3 мН на провідник довжиною 2 см. Визначте силу струму в провіднику.
2. Укажіть напрямок вектора магнітної індукції в кожній точці, що позначена літерою (рис. 1).
3. Визначте полюси джерел струму (рис. 2).
- 4\*. Чи мають лінії магнітної індукції початок? кінець? Чи можуть вони перетинатись? дотикатись одна до одної? мати розрив? Відповідь поясніть.

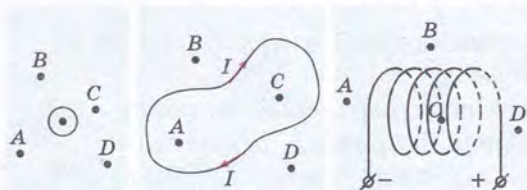


Рис. 1

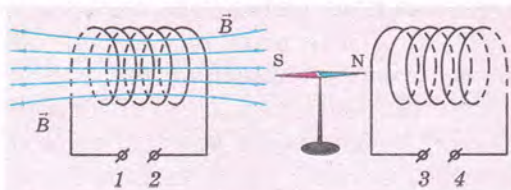


Рис. 2

**§ 19. СИЛА АМПЕРА. МОМЕНТ СИЛ, ЯКИЙ ДІЄ НА ПРЯМОКУТНУ РАМКУ ЗІ СТРУМОМ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ**



Магнітне поле діє на провідник зі струмом з певною силою — силою Ампера. На дії цієї сили ґрунтується робота багатьох електромеханічних систем. Згадаємо, як працюють такі системи, проте для початку доцільно з'ясувати, як знайти значення сили Ампера та чому магнітне поле чинить на рамку зі струмом орієнтуючу дію.



**Як визначають модуль і напрямок сили Ампера**

**Сила Ампера** — це сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом.

Відповідно до визначення магнітної індукції  $\left( B = \frac{F_{A \max}}{Il} \right)$  *максимальна сила Ампера* дорівнює:

$$F_{A \max} = BIl.$$

Сила Ампера залежить від орієнтації провідника відносно вектора магнітної індукції: магнітне поле не впливає на провідник зі струмом, вісь якого паралельна лініям магнітної індукції, натомість сила Ампера максимальна у випадку, коли вісь провідника перпендикулярна до ліній магнітної індукції. Тобто модуль сили Ампера залежить



тільки від проекції вектора магнітної індукції на вісь, перпендикулярну до осі провідника (рис. 19.1):  $B_{\perp} = B \sin \alpha$ , де  $\alpha$  — кут між вектором магнітної індукції і напрямком струму в провіднику.

З огляду на вищесказане можемо записати вираз для модуля сили Ампера — закон Ампера:

$$F_A = BIl \sin \alpha$$

**Напрямок сили Ампера** визначається за **правилом лівої руки**:

Якщо ліву руку розташувати так, щоб складова  $B_{\perp}$  вектора індукції магнітного поля входила в долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрямком струму в провіднику, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрямок сили Ампера (рис. 19.2).

Зверніть увагу: якщо провідник не прямолінійний, а (або) магнітне поле неоднорідне, то можна визначити сили Ампера, які діють на невеликі ділянки провідника, а потім геометричним додаванням розрахувати силу Ампера, що діє на провідник у цілому.

### ★ 2 Взаємодія струмів

Розглянемо докладніше взаємодію двох довгих паралельних прямолінійних провідників зі струмом —  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  (рис. 19.3).

Навколо кожного провідника існує магнітне поле, магнітна індукція якого прямо пропорційна силі струму в цьому провіднику ( $B_1 \sim I_1$ ,  $B_2 \sim I_2$ ). Кожний провідник перебуває в магнітному полі іншого провідника.

Визначимо напрямки магнітних ліній полів, створених провідником  $\Pi_1$  (сині позначки на рисунку) і провідником  $\Pi_2$  (червоні позначки)\*, та напрямок сили Ампера, яка діє на кожен провідник.

Відповідно до закону Ампера сила  $F_{21}$ , з якою магнітне поле провідника  $\Pi_1$  діє на провідник  $\Pi_2$ , прямо пропорційна силі струму  $I_2$  ( $F_{21} \sim I_2$ ) і магнітній індукції  $B_1$  ( $F_{21} \sim B_1$ ); магнітна індукція  $B_1$ , в свою чергу, прямо пропорційна силі струму  $I_1$  ( $B_1 \sim I_1$ ).

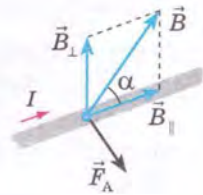


Рис. 19.1. Проекції вектора  $\vec{B}$  магнітної індукції:  $B_{\perp}$  — проекція на вісь, перпендикулярну до осі провідника;  $B_{\parallel}$  — проекція на вісь, паралельну осі провідника

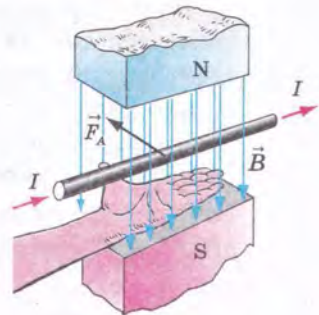


Рис. 19.2. Визначення напрямку сили Ампера  $\vec{F}_A$  за правилом лівої руки

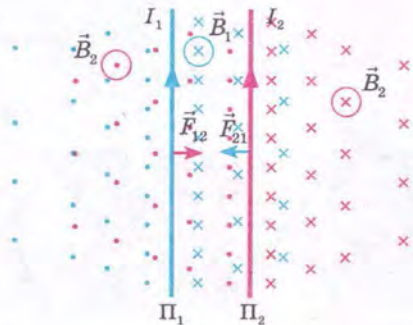


Рис. 19.3. Взаємодія двох провідників зі струмом:  $\vec{F}_{21}$  — сила, з якою магнітне поле  $\vec{B}_1$  провідника  $\Pi_1$  діє на провідник  $\Pi_2$ ;  $\vec{F}_{12}$  — сила, з якою магнітне поле  $\vec{B}_2$  провідника  $\Pi_2$  діє на провідник  $\Pi_1$

\* Нагадаємо: позначка «••» означає, що вектор магнітної індукції напрямлений до нас, а позначка «x» — від нас.



Таким чином, сила  $F_{21}$  прямо пропорційна як силі струму  $I_2$ , так і силі струму  $I_1$ , тобто прямо пропорційна добутковій силі струмів:  $F_{21} \sim I_1 I_2$ . Аналогічно  $F_{12} \sim I_1 I_2$ .

Остаточна формула для розрахунку сили взаємодії двох паралельних провідників довжиною  $l$  має вигляд:

$$F = \mu_0 \mu \frac{I_1 I_2 l}{2\pi R},$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  (генрі на метр) — магнітна стала;  $\mu$  — відносна магнітна проникність середовища;  $R$  — відстань між провідниками.★

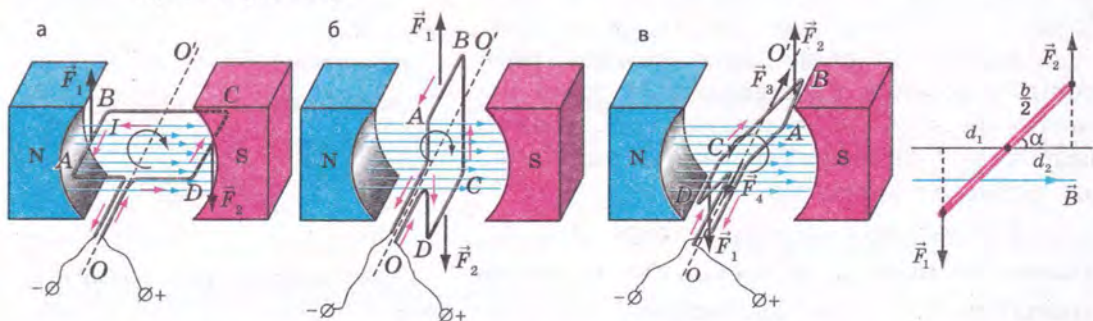
### 3 Як поводитиметься в магнітному полі рамка зі струмом

Візьмемо легку прямокутну рамку, що складається з одного витка дроту, і помістимо її в однорідне магнітне поле так, щоб вона могла легко обертатися навколо горизонтальної осі. Пропустимо по рамці електричний струм. Рамка повернеться (рис. 19.4, а) і, хитнувшись кілька разів, установиться так, як показано на рис. 19.4, б.

Скориставшись правилом лівої руки, визначимо напрямок сил Ампера, які діють на рамку в деякий момент часу (рис. 19.4, в). Бачимо, що сили Ампера  $\vec{F}_3$  і  $\vec{F}_4$ , які відповідно діють на сторони  $BC$  і  $AD$  рамки, напрямлені вздовж осі рамки, тому плечі цих сил, а отже, і їх моменти дорівнюють нулю\*. Сили Ампера  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , які відповідно діють на сторони  $AB$  і  $CD$  рамки, створюють моменти сил, напрямлені на поворот рамки навколо осі  $OO'$ . Сумарний момент сил, який діє на рамку, дорівнює:

$$M = M_{AB} + M_{CD} = F_1 d_1 + F_2 d_2,$$

де  $d_1 = d_2 = \frac{b}{2} \cos \alpha$  — плечі сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  ( $b$  — довжина сторони  $BC$ ,  $\alpha$  — кут між напрямком вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  і площиною рамки).



**Рис. 19.4.** Дослідження дії магнітного поля на рамку зі струмом: а — сили Ампера ( $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ ) повертають рамку  $ABCD$  за ходом годинникової стрілки; б — у положенні рівноваги сили Ампера не повертають рамку, а розтягують; в — сили Ампера повертають рамку проти ходу годинникової стрілки

\* Нагадаємо, що момент сили є добутком сили на плече. Плече сили — відстань від осі обертання до лінії дії сили.



Відповідно до закону Ампера  $F_1 = F_2 = BIa$ , де  $a$  — довжина сторони  $AB$  (і  $CD$ ). Отже:

$$M = BIa \cdot \frac{b}{2} \cos\alpha + BIa \cdot \frac{b}{2} \cos\alpha = BIab \cos\alpha = BIS \cos\alpha,$$

де  $S = ab$  — площа рамки.

**Момент  $M$  сил Ампера**, який діє на плоский замкнений контур, розташований в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку модуля магнітної індукції  $B$  поля на силу струму  $I$  в контурі, на площу  $S$  контуру і на косинус кута  $\alpha$  між вектором магнітної індукції та площиною контуру:

$$M = BIS \cos\alpha$$

Зверніть увагу:

1) якщо рамка розташована паралельно лініям магнітної індукції ( $\alpha = 0$ ), то момент сил, який діє на рамку, найбільший ( $M_{\max}$ ):  $M_{\max} = BIS$  (див. рис. 19.4, а);

2) якщо рамка розташована перпендикулярно до ліній магнітної індукції ( $\alpha = 90^\circ$ ), то  $\cos\alpha = 0$  і момент сил, який діє на рамку, дорівнює нулю. Це — положення стійкої рівноваги рамки (див. рис. 19.4, б).

#### 4 Як працює двигун постійного струму

Обертання рамки зі струмом у магнітному полі використовують в електричних двигунах — пристроях, в яких електрична енергія перетворюється на механічну.

Щоб рамка не зупинялась у положенні рівноваги та оберталась в одному напрямку, застосовують *колектор* — пристрій, який автоматично змінює напрямок струму в рамці. На рис. 19.5 зображено модель, за допомогою якої можна ознайомитися з принципом дії колектора. Власне колектор являє собою два провідних півкільця (1), до кожного з яких притиснута провідна щітка (2). Щітки слугують для підведення напруги від джерела струму (3) до рамки (4), яка розташована між полюсами магніту (5) та може обертатися навколо осі (6). Одну зі щіток з'єднують із позитивним полюсом джерела струму, другу — з негативним.

Після замикання кола рамка під дією сил Ампера починає повертатися за ходом годинникової стрілки. Півкільця колектора повертаються разом із рамкою, а щітки залишаються нерухомими, тому після проходження положення рівноваги до щіток будуть притиснуті вже інші півкільця. Напрямок струму в рамці зміниться на протилежний, а напрямок обертання рамки не зміниться (у цьому легко переконатися, визначивши напрямки сил Ампера).

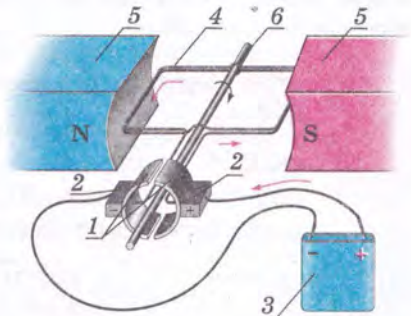


Рис. 19.5. Модель, яка демонструє принцип дії колектора



Отже, щоб зробити електричний двигун, потрібно мати: 1) постійний магніт або електромагніт; 2) провідний контур; 3) джерело струму; 4) колектор. Як це здійснюється на практиці, продемонстровано на рис. 19.6, 19.7.

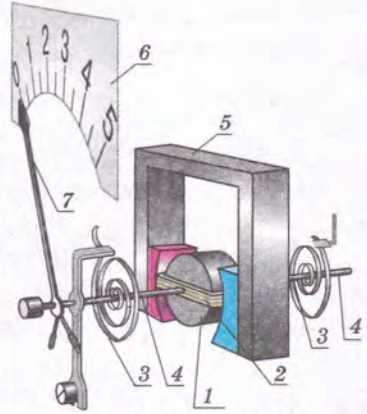
Орієнтуючу дію магнітного поля на рамку зі струмом використовують в *електровимірювальних приладах магнітоелектричної системи* — амперметрах і вольтметрах. Схему вимірювального механізму приладів цієї системи подано на рис. 19.8. ★



**Рис. 19.6.** Для підвищення потужності електродвигуна потрібно збільшити момент сили Ампера ( $M = BIS \cos \alpha$ ). Тому обмотку ротора виготовляють із великої кількості  $N$  витків дроту (кожний виток обмежує площу  $S_0$ ; загальна площа  $S = NS_0$ ); осердя надають спеціальної форми та виготовляють із феромагнітного матеріалу, збільшуючи в такий спосіб магнітну індукцію поля, яке пронизує обмотку



**Рис. 19.7.** Для забезпечення рівномірного обертання ротора використовують кілька обмоток, які намотують на спільне осердя



**Рис. 19.8.** Схема вимірювального механізму приладів магнітоелектричної системи: 1 — нерухоме осердя; 2 — рамка; 3 — спіральні пружини; 4 — півосі; 5 — магніт; 6 — шкала; 7 — стрілка

### 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** У вертикальному однорідному магнітному полі індукцією 0,50 Тл на двох тонких проводах горизонтально підвішений провідник завдовжки 20 см і масою 20 г. На який кут  $\beta$  від вертикалі відхилиться провідник, якщо сила струму в ньому дорівнює 2,0 А?

$\beta$  — ?

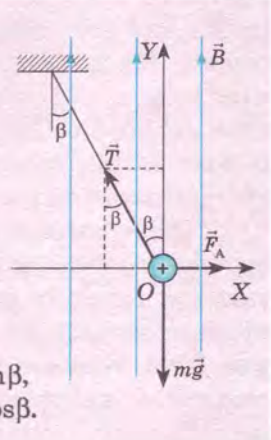
Дано:

$$\begin{aligned} B &= 0,50 \text{ Тл} \\ l &= 0,20 \text{ м} \\ m &= 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \\ I &= 2,0 \text{ А} \\ g &= 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \end{aligned}$$

*Аналіз фізичної проблеми.* На провідник діють три сили: сила тяжіння, сила натягу проводів та сила Ампера, напрямок якої визначимо за правилом лівої руки (див. рисунок).

*Пошук математичної моделі. Розв'язання.* Запишемо рівняння другого закону Ньютона у векторному вигляді та в проєкціях на осі координат:  $\vec{F}_A + m\vec{g} + \vec{T} = 0$ ;

$$\begin{cases} OX: F_A - T \sin \beta = 0, \\ OY: T \cos \beta - mg = 0; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F_A = T \sin \beta, \\ mg = T \cos \beta. \end{cases}$$





Поділивши перше рівняння системи на друге, маємо:  $\frac{F_A}{mg} = \operatorname{tg} \beta$ .

Відповідно до закону Ампера  $F_A = BIl \sin \alpha$ , де  $\sin \alpha = 1$ , оскільки  $\alpha = 90^\circ$  (провідник горизонтальний, а вектор магнітної індукції вертикальний). Остаточно маємо:  $\operatorname{tg} \beta = \frac{BIl}{mg}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[\operatorname{tg} \beta] = \frac{\text{Тл} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}} = \frac{\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = 1; \quad \{\operatorname{tg} \beta\} = \frac{0,50 \cdot 2,0 \cdot 0,20}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 10} = \frac{0,20}{0,20} = 1,$$

$$\operatorname{tg} \beta = 1 \Rightarrow \beta = 45^\circ.$$

**Відповідь:** провідник відхилиться від вертикалі на кут  $\beta = 45^\circ$ .

### ! Підбиваємо підсумки

Силу, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, називають силою Ампера. Модуль сили Ампера визначається за формулою  $F_A = BIl \sin \alpha$ , напрямок — за правилом лівої руки.

★ Два паралельні провідники зі струмом взаємодіють із силою, яка прямо пропорційна добуткові сил струмів і обернено пропорційна відстані між провідниками:  $F = \mu_0 \mu \frac{I_1 I_2}{2\pi R}$ . ★

На плоский замкнений контур зі струмом  $I$  та площею  $S$ , розташований в однорідному магнітному полі індукції  $B$ , діє обертальний момент сил:  $M = BIS \cos \alpha$  ( $\alpha$  — кут між вектором магнітної індукції та площиною контуру), завдяки якому рамка обертається.

На обертанні в магнітному полі рамки зі струмом ґрунтується дія електричних двигунів і приладів магнітоелектричної системи.

### ? Контрольні запитання

1. Дайте визначення сили Ампера. За якою формулою її розраховують? Як визначають її напрямок? ★ 2. Доведіть, що сила взаємодії двох паралельних провідників зі струмом прямо пропорційна добуткові сил струмів. 3. Виведіть формулу для визначення моменту сил, що діють на рамку зі струмом з боку магнітного поля. За якого положення рамки момент сил дорівнює нулю? є максимальним? Обґрунтуйте свою відповідь. 4. Опишіть принцип дії електричного двигуна постійного струму. ★ 5. Скориставшись рис. 19.8, опишіть будову та принцип дії вимірювальних приладів магнітоелектричної системи.

### ✏ Вправа № 17

- По провіднику завдовжки 60 см тече струм силою 1,2 А. Визначте найбільше та найменше значення сили Ампера, яка діє на провідник, за умов різних його положень в однорідному магнітному полі, індукція якого дорівнює 1,5 Тл.
- Визначте: напрямок сили Ампера (рис. 1); полюси магніту (рис. 2); напрямок струму в провіднику (рис. 3).

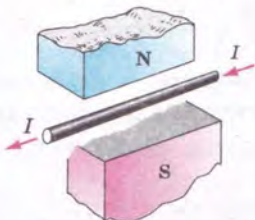


Рис. 1

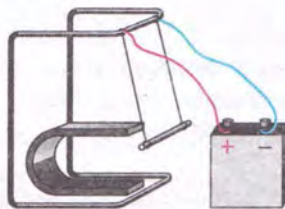


Рис. 2

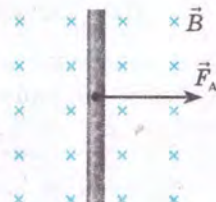


Рис. 3



3. Знайдіть момент сил, який діє на рамку площею  $20 \times 5,0$  (см), розташовану в однорідному магнітному полі індукцією  $0,6$  Тл, якщо сила струму в рамці дорівнює  $2,5$  А. Як ілюстрацію використайте рис. 19.4, а.
- 4\*. Горизонтальний провідник масою  $50$  г і довжиною  $20$  см може ковзати без тертя по двох вертикальних провідних стрижнях. Стрижні приєднані до джерела струму, ЕРС якого  $50$  В, а внутрішній опір становить  $2$  Ом. Перпендикулярно до площини руху прикладене постійне магнітне поле індукцією  $0,2$  Тл. Яким є опір провідника, якщо провідник перебуває в рівновазі? Опором стрижнів та з'єднувальних проводів знехтуйте.



В. Г. Бар'яхтар

#### ФІЗИКА ТА ТЕХНІКА В УКРАЇНІ

**Інститут магнетизму НАН і МОНмолодьспорт України** (Київ) Інститут магнетизму був створений у 1995 р. як установа, що поєднує в собі науково-дослідний інститут і вищий навчальний заклад для розв'язання проблем у галузі магнетизму, екології, а також для підготовки наукових кадрів.

*Наукові напрямки*, в яких працює інститут: магнітні плівки, магнітна гідродинаміка та хімічні реакції, фазові перетворення та магнітострикція, математична та теоретична фізика. За всіма цими напрямками інститут посів провідне місце в Україні та світі.

Роботи вчених інституту відзначені преміями НАНУ, п'ятьма Державними преміями УРСР та України, міжнародними преміями.

Очолює Інститут магнетизму Герой України, відомий фахівець у галузі твердого тіла та екології, академік НАНУ *Віктор Григорович Бар'яхтар*.

## § 20. ДІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РУХОМІ ЗАРЯДЖЕНІ ЧАСТИНКИ. СИЛА ЛОРЕНЦА

**?!** Рухомі електричні заряди не тільки створюють у навколишньому просторі магнітне поле, але й самі зазнають дії з боку магнітних полів. Про те, як розрахувати силу, з якою магнітне поле діє на заряджені частинки, що рухаються в магнітному полі, і від чого залежить характер їхнього руху, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

### 1 Як визначити силу Лоренца

**Сила Лоренца**  $\vec{F}_L$  — це сила, з якою магнітне поле діє на рухомі заряджені частинки\*.

Для визначення модуля сили Лоренца звернемося до формули для розрахунку сили Ампера — сили, що діє на провідник зі струмом з боку магнітного поля:  $F_A = BIl \sin \alpha$ .

За означенням сили струму  $I = \frac{|q|}{t}$ , де  $q$  — заряд, що пройшов через поперечний переріз провідника за час  $t$ . Через поперечний переріз провідника довжиною  $l$  протягом деякого інтервалу часу  $t$  проходить  $N$  частинок із зарядом  $q_0$  кожна, тобто

\* Названа на честь голландського фізика та математика *Гендріка Антона Лоренца* (1853–1928).



загальний заряд становить  $q = q_0 N$ . Таким чином, сила Ампера — сила, що діє на  $N$  заряджених частинок, — дорівнює:

$$F_A = B I l \sin \alpha = B \cdot \frac{|q_0| N}{t} \cdot l \sin \alpha = B |q_0| N \cdot \frac{l}{t} \cdot \sin \alpha = B |q_0| N v \sin \alpha, \text{ де } v = \frac{l}{t} —$$

середня швидкість руху заряджених частинок. Зрозуміло, що сила, яка діє на одну частинку, буде в  $N$  разів меншою. Отже, **модуль сили Лоренца**  $F_L$  дорівнює:

$$F_L = B |q_0| v \sin \alpha,$$

де  $B$  — магнітна індукція поля, у якому рухається частинка;  $q_0$  — заряд частинки;  $v$  — швидкість руху частинки;  $\alpha$  — кут між лінією руху частинки та лінією магнітного поля.

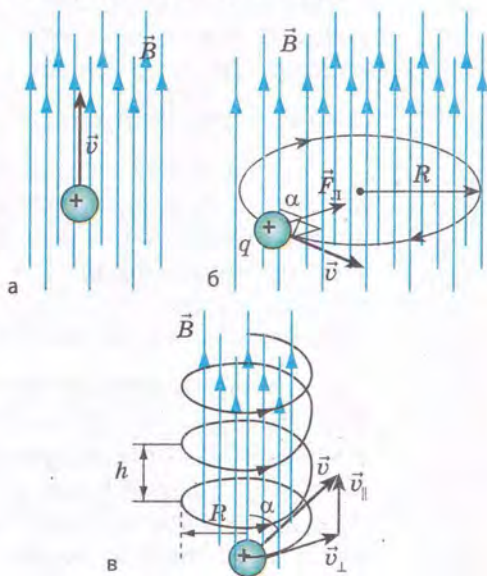
Напрямок сили Лоренца визначають за **правилом лівої руки**: Якщо розташувати ліву руку так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а напрямок чотирьох пальців збігався з напрямком швидкості руху позитивно зарядженої частинки (або був напрямлений протилежно напрямку швидкості руху негативно зарядженої частинки), то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрямок сили Лоренца.

## 2 Як рухаються заряджені частинки під дією сили Лоренца

Залежно від того, під яким кутом заряджена частинка влітає в магнітне поле і чи є магнітне поле однорідним, траєкторія руху частинки буде різною. Розглянемо *можливі випадки руху зарядженої частинки в однорідному магнітному полі*.

1. *Швидкість руху частинки напрямлена вздовж ліній магнітної індукції поля* (рис. 20.1, а). У цьому випадку кут  $\alpha$  між напрямком вектора  $\vec{v}$  швидкості та вектором  $\vec{B}$  магнітної індукції дорівнює нулю (або  $180^\circ$ ). Оскільки  $\sin \alpha = 0$ , то  $F_L = B |q_0| v \sin \alpha = 0$ . Отже, магнітне поле не діє на частинку, і, якщо немає інших сил, вона рухатиметься *рівномірно прямолінійно*.

2. *Швидкість руху частинки напрямлена перпендикулярно до ліній магнітної індукції поля* (рис. 20.1, б). У цьому випадку кут  $\alpha$  між напрямком вектора  $\vec{v}$  швидкості та вектором  $\vec{B}$  магнітної індукції дорівнює  $90^\circ$ , тому



**Рис. 20.1.** Рух зарядженої частинки в магнітному полі: а — швидкість  $\vec{v}$  руху частинки паралельна вектору  $\vec{B}$  магнітної індукції поля ( $\vec{v} \parallel \vec{B}$ ) — частинка рухається рівномірно прямолінійно; б — швидкість  $\vec{v}$  руху частинки перпендикулярна до вектора  $\vec{B}$  магнітної індукції поля ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ) — частинка рухається рівномірно по колу; в — швидкість  $\vec{v}$  руху частинки напрямлена під деяким кутом  $\alpha$  до вектора  $\vec{B}$  магнітної індукції поля — частинка рухається рівномірно по спіралі




$F_L = B|q_0|v \sin \alpha = B|q_0|v$ , бо  $\sin \alpha = 1$ . Згідно з правилом лівої руки в будь-якій точці траєкторії частинки сила Лоренца перпендикулярна до швидкості її руху, а отже, частинка рухатиметься *рівномірно по колу*. Відповідно до другого закону Ньютона  $F_L = ma_{\text{цн}}$ , де  $m$  — маса частинки. Тоді  $B|q_0|v = \frac{mv^2}{R}$ . Звідси знайдемо радіус  $R$  траєкторії руху частинки та період  $T$  її обертання:

$$B|q_0|v = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{B|q_0|}; \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi mv}{B|q_0|v} = \frac{2\pi m}{B|q_0|}.$$

Період обертання частинки не залежить від швидкості її руху та радіуса траєкторії.

3. Швидкість руху частинки напрямлена під деяким кутом  $\alpha$  до ліній магнітної індукції поля (рис. 20.1, в). У цьому випадку швидкість  $\vec{v}$  руху частинки можна розкласти на дві складові: перша складова ( $\vec{v}_{\parallel}$ ) напрямлена вздовж магнітних ліній поля, і її поле не змінює; друга складова ( $\vec{v}_{\perp}$ ) перпендикулярна до ліній поля, і сила Лоренца змінює її напрямок, викликаючи рух частинки по колу. Таким чином, траєкторія руху частинки — *спіраль*, крок  $h$  (відстань між сусідніми витками) якої визначається складовою  $\vec{v}_{\parallel}$ :

$$h = v_{\parallel}T, \text{ а радіус } R \text{ витка спіралі — складовою } \vec{v}_{\perp}: R = \frac{mv_{\perp}}{Bq}.$$

 Той факт, що період обертання частинки в однорідному магнітному полі не залежить від швидкості її руху та радіуса траєкторії, використовують у *циклотронах* — прискорювачах важких частинок (протонів, йонів). На русі зарядженої частинки в однорідному магнітному полі базується дія *мас-спектрометрів* — пристроїв, за допомогою яких можна вимірювати маси заряджених частинок.★

### 3 Учимося розв'язувати задачі

**3 Задача.** Під дією електричного поля електрон розганяється у вакуумі зі стану спокою і влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Яку індукцію має магнітне поле і яку прискорювальну різницю потенціалів пройшов електрон, якщо він описує коло радіусом  $6,0 \cdot 10^{-3}$  м за  $6,28 \cdot 10^{-9}$  с?

$B$  — ?  
 $\Delta\phi$  — ?

Дано:

$$q_0 = e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$v_0 = 0$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$T = 6,28 \cdot 10^{-9} \text{ с}$$

**Аналіз фізичної проблеми.** У задачі маємо справу з двома рухами: 1) спочатку — прискорений рух електрона в електричному полі; 2) потім — рівномірний рух електрона по колу в магнітному полі.

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

1) Під час руху електрона в електричному полі це поле виконує роботу  $A$ , тому кінетична енергія електрона збільшується:  $A = \Delta W_k$ , де

$$A = q\Delta\phi = e\Delta\phi; \quad \Delta W_k = W_k - W_{k0} = \frac{mv^2}{2}.$$



Таким чином,  $e\Delta\phi = \frac{mv^2}{2}$ , звідки  $\Delta\phi = \frac{mv^2}{2e}$  (1). Швидкість руху електрона визначимо, знаючи період  $T$  його обертання та радіус  $R$  траєкторії:  $T = \frac{2\pi R}{v} \Rightarrow v = \frac{2\pi R}{T}$  (2).

2) У магнітному полі під дією сили Лоренца електрон рухається по колу, отже, згідно з другим законом Ньютона  $F_{\text{Л}} = ma_{\text{дц}}$ .

Оскільки  $F_{\text{Л}} = B|q_0|v$ , а  $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{R}$ , маємо:  $B|q_0|v = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow B|e| = \frac{mv}{R}$ ,

звідки  $B = \frac{mv}{R|e|}$  (3).

Підставивши формулу (2) у формули (1) і (3), одержимо:

$$B = \frac{2\pi m}{T|e|}; \quad \Delta\phi = \frac{4\pi^2 R^2 m}{2eT^2}.$$

Визначимо значення шуканих величин:

$$[B] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл};$$

$$\{B\} = \frac{6,28 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{6,28 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,7 \cdot 10^{-3}, \quad B = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}.$$

$$[\Delta\phi] = \frac{\text{м}^2 \cdot \text{кг}}{\text{Кл} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} = \text{В}; \quad \{\Delta\phi\} = -\frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 36 \cdot 10^{-6} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,28^2 \cdot 10^{-18}} \approx -102,$$

$$\Delta\phi \approx -102 \text{ В}.$$

Знак «-» свідчить про те, що електрон рухається в бік зменшення потенціалу, що є цілком реальним.

**Відповідь:** індукція магнітного поля  $B = 5,7 \cdot 10^{-3}$  Тл; електрон пройшов прискорювальну різницю потенціалів  $\Delta\phi \approx -102$  В.

### ! Підбиваємо підсумки

Силу, з якою магнітне поле діє на рухому заряджену частинку, називають силою Лоренца. Модуль цієї сили визначається за формулою  $F_{\text{Л}} = B|q_0|v \sin \alpha$ , напрямком — за правилом лівої руки.

Якщо початкова швидкість руху частинки напрямлена паралельно лініям магнітної індукції поля, то частинка рухатиметься рівномірно прямолінійно; якщо перпендикулярно до цих ліній — рівномірно по колу радіусом  $R = \frac{mv}{B|q_0|}$ ; якщо під кутом — то рівномірно по спіралі.

### ? Контрольні запитання

1. Дайте визначення сили Лоренца. 2. За якою формулою визначають модуль сили Лоренца? Виведіть цю формулу. 3. Як визначити напрямок сили Лоренца, яка діє на позитивно заряджену частинку? на негативно заряджену частинку? 4. Як рухається частинка, якщо її початкова швидкість напрямлена паралельно лініям магнітної індукції? перпендикулярно до ліній магнітної індукції? під кутом до ліній магнітної індукції? 5. Виведіть формули для визначення радіуса траєкторії руху та періоду обертання частинки, якщо швидкість її руху перпендикулярна до вектора магнітної індукції поля.



**Вправа № 18**



Рис. 1

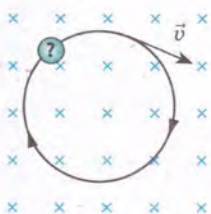


Рис. 2

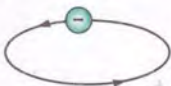
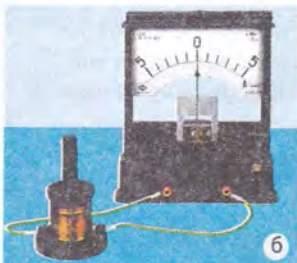
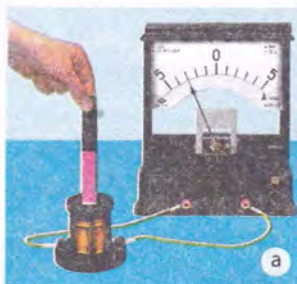


Рис. 3

1. Визначте: напрямок руху частинки (рис. 1); знак заряду частинки (рис. 2); напрямок магнітного поля, в якому рухається частинка (рис. 3).
2. Чому дві однойменно заряджені нерухомі частинки завжди відштовхуються, а рухомі можуть як відштовхуватися, так і притягуватися?
3. Існують різні види генераторів постійного струму. Робота одного з таких генераторів (МГД-генератора) базується на принципі поділу потоку плазми на два різнойменно заряджені потоки. Як ви гадаєте, як за допомогою магнітного поля можна одержати такий поділ?
4. Протон рухається в магнітному полі у вакуумі зі швидкістю  $3 \cdot 10^6$  м/с перпендикулярно до лінії магнітної індукції поля. Визначте силу, яка діє на протон, і радіус його орбіти. Магнітна індукція поля дорівнює 5,6 мТл і є постійною.
5. Електрон, почавши рух зі стану спокою і пройшовши різницю потенціалів 220 В, потрапляє в однорідне магнітне поле індукцією 5,0 мТл і рухається по круговій орбіті радіусом 1,0 см. Визначте масу електрона.
- ★ 6. Електрон влітає в однорідне магнітне поле під кутом  $60^\circ$  до лінії магнітної індукції і починає рухатися з періодом обертання 60 мкс по спіралі діаметром 10,0 см. Визначте швидкість руху електрона, магнітну індукцію поля та крок спіралі.

**§ 21. ДОСЛІДИ ФАРАДЕЯ. НАПРЯМОК ІНДУКЦІЙНОГО СТРУМУ**



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



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



**1 Як можна «перетворити магнетизм на електрику»**

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

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



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

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

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

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

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

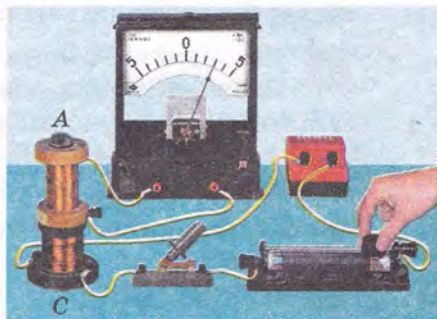


Рис. 21.2. Якщо розімкнути чи замкнути коло котушки С або змінити в ній силу струму, в котушці А виникне струм

## 2 Потік магнітної індукції

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

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

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

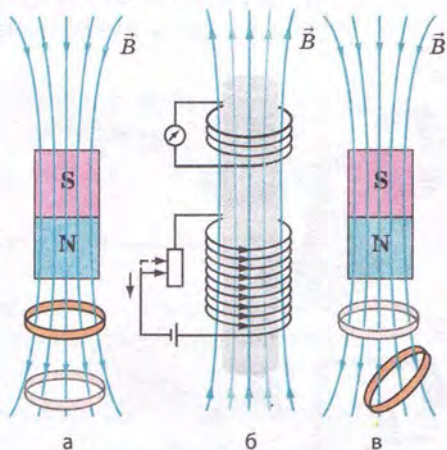


Рис. 21.3. Зміна кількості ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню, обмежену контуром (досліди Фарадея): а — дослід 1; б — дослід 2; в — дослід 3

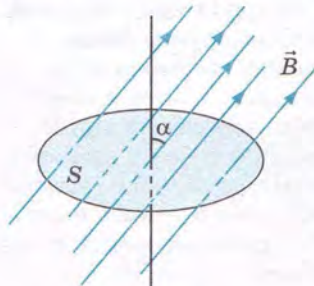


Рис. 21.4. До визначення магнітного потоку



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

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

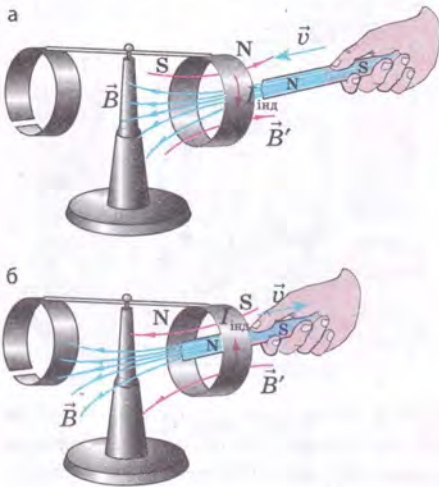
### 3 Коли виникає індукційний струм

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

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

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

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



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

### 4 Як визначити напрямок індукційного струму

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

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

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

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



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

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

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

### 5 Учимося розв'язувати задачі

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

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

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

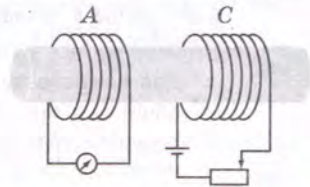


Рис. 1

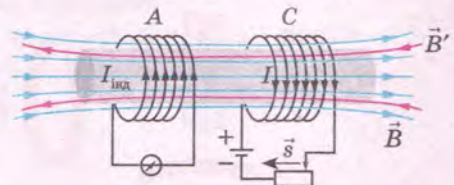


Рис. 2

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання*

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



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

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

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

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

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

### ! Підбиваємо підсумки

Потік магнітної індукції  $\Phi$  — це фізична величина, яка характеризує розподіл магнітного поля по поверхні, обмеженій замкненим контуром, і чисельно дорівнює добуткові магнітної індукції  $B$  на площу  $S$  поверхні та на косинус кута  $\alpha$  між вектором магнітної індукції і нормаллю до поверхні:  $\Phi = BS \cos \alpha$ . Одиниця потоку магнітної індукції в СІ — вебер (Вб);  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$ .

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

### ? Контрольні запитання

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

### ✎ Вправа № 19

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

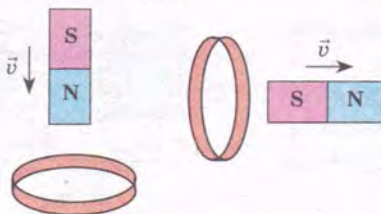


Рис. 1

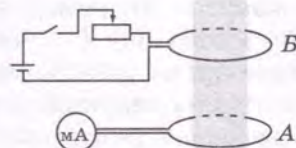


Рис. 2



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

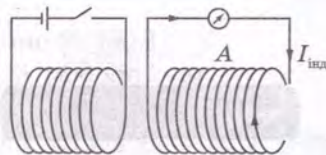


Рис. 3

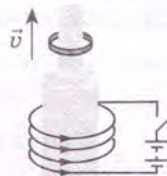


Рис. 4

## § 22. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

**?!** Ви довідалися, що під час зміни магнітного потоку, який пронизує замкнений контур, у контурі виникає індукційний струм, і встановили, як визначити його напрямок. З'ясуємо, чому виникає індукційний струм і як визначити його силу.

### 1 Закон електромагнітної індукції

Проаналізувавши результати дослідів Фарадея, ми, здавалося б, маємо певну суперечність із вивченим раніше. Справді, електричний струм у замкненому колі існує, якщо виконуються дві обов'язкові умови: наявність вільних заряджених частинок і наявність електричного поля. А от у розглянутих дослідах у колі котушки, замкненій на гальванометр, немає електричного поля, створеного електричними зарядами, проте струм є! Це може означати тільки одне: *під час зміни магнітного потоку, що пронизує провідний контур, у контурі виникають сторонні (не кулонівські) сили, які й переміщують електричні заряди по контуру, виконуючи при цьому роботу. У такому випадку робота сторонніх сил ( $A_{ст}$ ) з переміщення одиничного позитивного заряду називається електрорушійною силою індукції (ЕРС індукції)  $\mathcal{E}_{інд}$ :*

$$\mathcal{E}_{інд} = \frac{A_{ст}}{q}.$$

Експериментально встановлено, що ЕРС індукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує контур:  $\mathcal{E}_{інд} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

#### Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея):

Електрорушійна сила індукції в контурі чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує поверхню, обмежену цим контуром:

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

Знак «мінус» у законі Фарадея відбиває правило Ленца.



Відповідно до закону Ома сила індукційного струму  $I_{\text{інд}}$  в контурі з опором  $R$  дорівнює:

$$I_{\text{інд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{інд}}}{R}.$$

Зверніть увагу:

1) якщо магнітний потік змінюється нерівномірно, то слід розглядати дуже малий інтервал часу ( $\Delta t \rightarrow 0$ ); тоді  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  і закон електромагнітної індукції набуде вигляду:

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\Phi'(t)$$

2) якщо контур містить  $N$  витків проводу, то в кожному витку ЕРС індукції дорівнює:  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$ , тому сумарна ЕРС індукції становить:  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N\Phi'(t)$ .

## 2 Вихрове електричне поле

Звідки ж беруться сторонні сили, що діють на заряди в провіднику? У випадку, коли провідник є нерухомим відносно спостерігача, причина появи сторонніх сил — змінне магнітне поле. Річ у тім, що змінне магнітне поле завжди супроводжується появою в навколишньому просторі вихрового електричного поля — саме воно діє на вільні заряджені частинки в провіднику та надає їм напрямленого руху, створюючи таким чином індукційний струм.

Явище створення в просторі вихрового електричного поля змінним магнітним полем називають **явищем електромагнітної індукції**.

★ Зупинимось на деяких властивостях вихрового електричного поля.

1. Вихрове електричне поле, як і поле, створене електричними зарядами, виявляється в силіній дії на заряджені частинки, тому основною характеристикою цього поля є вектор напруженості  $\vec{E}$ .

2. На відміну від електростатичного поля лінії напруженості вихрового електричного поля є замкненими. Напрямок цих ліній можна визначити за допомогою лівої руки, якщо магнітна індукція магнітного поля, яке створює вихрове поле, збільшується (рис. 22.1, а), або за допомогою правої руки, якщо магнітна індукція магнітного поля зменшується (рис. 22.1, б).

3. На відміну від електростатичного поля робота вихрового електричного поля на замкненій траєкторії не дорівнює нулю, адже під час переміщення заряду вздовж замкненої лінії напруженості робота на всіх ділянках шляху має той самий знак. ★

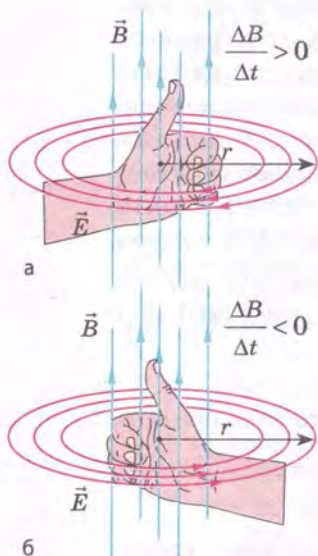


Рис. 22.1. Напрямок ліній напруженості вихрового електричного поля: а — магнітна індукція магнітного поля збільшується; б — магнітна індукція магнітного поля зменшується



★ **3 Де застосовують струми Фуко\***

**Струми Фуко** — вихрові індукційні струми, які виникають у провідниках при зміні магнітного потоку, що їх пронизує.

Якщо на шляху суцільної мідної пластини, що коливається, розташувати підковоподібний магніт, то в момент входження пластини в магнітне поле магніту вона практично зупиниться (рис. 22.2, а). Сповільнення руху пов'язане зі збудженням у пластині *струмів Фуко*, які (за правилом Ленца) створюють магнітне поле, що перешкоджає руху пластини. Чим більшим є опір провідника, тим меншою є сила струмів Фуко, що виникають (рис. 22.2, б).

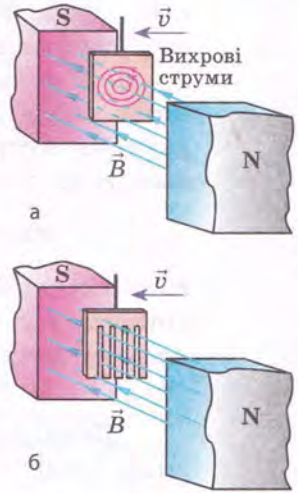
Дія струмів Фуко застосовується для демпфування\*\* рухливих частин гальванометрів, сейсмографів тощо. Теплову дію струмів Фуко використовують в індукційних печах для плавлення металів або для швидкого готування їжі. Провідник (метал або їжу) поміщують усередину котушки, по якій проїскають змінний струм високої частоти. Змінний струм створює змінне магнітне поле, яке спричиняє появу струмів Фуко в провіднику та його нагрівання.

Струми Фуко в осердях трансформаторів, роторах електричних генераторів та двигунів викликають непотрібне нагрівання та призводять до втрат енергії. Для ослаблення вихрових струмів опір таких деталей збільшують — їх виготовляють з листів сталі, розділених тонкими шарами діелектрика.★

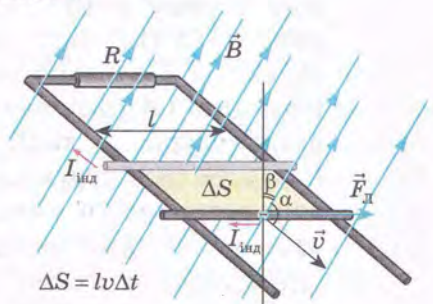
**4 ЕРС індукції в рухомих провідниках**

З'ясуємо природу *ЕРС індукції*, яка виникає в провіднику, що рухається в постійному магнітному полі.

Нехай металевий провідник довжиною  $l$  рухається в однорідному магнітному полі з деякою швидкістю  $\vec{v}$ , напрямленою під кутом  $\alpha$  до ліній індукції поля (рис. 22.3). На вільні заряди (у даному випадку електрони), що разом з провідником рухаються в магнітному полі, діє сила Лоренца  $\vec{F}_L$ . Під дією цієї сили відповідно до правила лівої руки електрони рухатимуться вздовж



**Рис. 22.2.** Суцільна мідна пластинка, що рухається між полюсами магніту, швидко зупиняється (а); швидкість руху мідного гребінця, що рухається між полюсами магніту, практично не змінюється (б)



**Рис. 22.3.** До виведення формули для розрахунку ЕРС індукції в провіднику, що рухається в магнітному полі

\* За ім'ям французького вченого *Леона Фуко* (1819–1868), який відкрив явище нагрівання металевих тіл, що обертаються в магнітному полі.

\*\* *Демпфування* — примусове гасіння коливань у динамічній системі внаслідок розсіювання енергії.



провідника. У результаті на одному кінці провідника з'явиться *надлишковий негативний заряд* (туди «прийшли» електрони), а на другому кінці — *позитивний заряд* (звідти «пішла» частина електронів). Якщо тепер провідник замкнути, то в замкненому колі виникне індукційний струм, *джерелом якого буде рухомий провідник, а сторонньою силою, яка виконує роботу всередині джерела, — сила Лоренца.*

За визначенням ЕРС індукції  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = \frac{A_{\text{ст}}}{|q|}$ , де  $A_{\text{ст}} = F_{\text{Л}}l$  — робота сили Лоренца з переміщення заряду від одного кінця провідника до другого. З огляду на те що  $F_{\text{Л}} = B|q|v\sin\alpha$ , маємо *формулу для розрахунку ЕРС індукції в рухомому провіднику:*

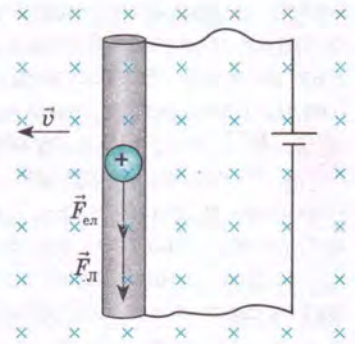
$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = Bv\sin\alpha$$

Дану формулу можна отримати й використовуючи закон Фарадея: зміна магнітного потоку  $\Delta\Phi = B\Delta S\cos\beta$ , де  $\Delta S = lv\Delta t$  — зміна площі контуру;  $\beta = 90^\circ - \alpha$  (див. рис. 22.3):  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{Blv\Delta t \cdot \cos(90^\circ - \alpha)}{\Delta t} = Bv\sin\alpha$ .

Таким чином, значення ЕРС індукції, яка виникає в рухомих і нерухомих провідниках, розраховується за одним законом — *законом Фарадея*, але фізичні причини виникнення сторонніх сил у цих випадках є різними. У випадку з рухомими провідниками сторонньою силою є сила Лоренца; у випадку з нерухомими провідниками сторонньою силою є сила, яка діє з боку вихрового електричного поля, що створюється змінним магнітним полем.

### 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** За допомогою гнучких провідів прямолінійний провідник завдовжки 60 см приєднаний до джерела постійного струму з ЕРС 12 В і внутрішнім опором 0,5 Ом (див. рисунок). Провідник рухається в однорідному магнітному полі індукцією 1,6 Тл зі швидкістю 12,5 м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначте силу струму в провіднику, якщо опір зовнішнього кола дорівнює 2,5 Ом.



$I$  — ?

Дано:

$$l = 0,6 \text{ м}$$

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

$$r = 0,5 \text{ Ом}$$

$$B = 1,6 \text{ Тл}$$

$$v = 12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 2,5 \text{ Ом}$$

*Аналіз фізичної проблеми.* Провідник рухається в магнітному полі, тому на заряди в провіднику діє сила Лоренца, напрямком якої визначимо за правилом лівої руки. На заряди в провіднику також діє сила з боку електричного поля джерела струму. Обидві сили «штовхають» заряди в одному напрямку (див. рисунок), тобто повна ЕРС кола  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{дж}} + \mathcal{E}_{\text{інд}}$ .

*Пошук математичної моделі. Розв'язання.* Силу струму в колі знайдемо, скориставшись законом Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}} + \mathcal{E}_{\text{інд}}}{R+r}$$

У рухомому провіднику ЕРС індукції  $\mathcal{E}_{\text{інд}} = Bv\sin\alpha$ .



Остаточного маємо:  $I = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}} + Bv \sin \alpha}{R + r}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[I] = \frac{B + T_{\text{л}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м}}{\text{Ом}} = \frac{B + \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м}}{\text{Ом}} = \frac{B + \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}}}{\text{Ом}} = \frac{B + \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}}{\text{Ом}} = \frac{B \cdot \text{А}}{B} = \text{А};$$

$$\{I\} = \frac{12 + 1,6 \cdot 12,5 \cdot 0,6}{2,5 + 0,5} = 8, \quad I = 8 \text{ А.}$$

**Відповідь:** сила струму в провіднику  $I = 8 \text{ А}$ .

### ! Підбиваємо підсумки

Під час зміни магнітного потоку, що пронизує контур, у контурі виникають сторонні сили. Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея): електрорушійна сила індукції в контурі чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує поверхню, обмежену цим контуром:  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$ .

Якщо контур містить  $N$  витків проводу, то сумарна ЕРС індукції  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N\Phi'(t)$ .

Змінне магнітне поле супроводжується появою в навколишньому просторі вихрового електричного поля. Явище створення в просторі електричного поля змінним магнітним полем називають явищем електромагнітної індукції.

Якщо провідник рухається в магнітному полі, то ЕРС індукції можна обчислити за формулою:  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = Bv \sin \alpha$ .

### ? Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон електромагнітної індукції. Якого вигляду набуде цей закон, якщо магнітний потік змінюється нерівномірно? якщо контур містить  $N$  витків проводу? 2. Чому в нерухомих провідниках, що розташовані в змінному магнітному полі, виникає індукційний струм? 3. Дайте визначення електромагнітної індукції. ★ 4. Назвіть основні властивості вихрового електричного поля. ★ 5. Що являють собою струми Фуко? Де їх застосовують? Як зменшують їхню негативну дію? 6. Яка природа ЕРС індукції в провіднику, що рухається в магнітному полі? Отримайте формулу для її визначення.

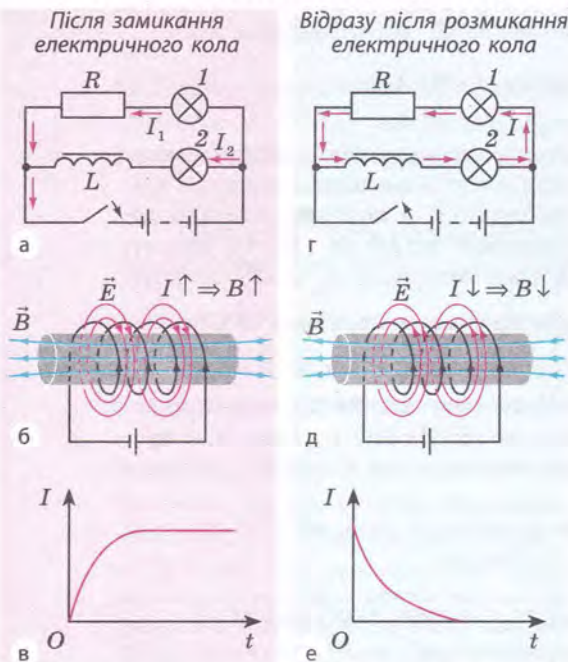
### ✍ Вправа № 20

1. Провідник завдовжки 20 см рухається в однорідному магнітному полі індукцією 25 мТл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Знайдіть ЕРС індукції в провіднику, якщо швидкість його руху 2,0 м/с.
2. Магнітний потік, що пронизує провідний контур опором 0,24 Ом, рівномірно змінився на 0,6 Вб так, що ЕРС індукції виявилася рівною 1,2 В. Визначте час зміни магнітного потоку та силу струму в провіднику.
3. Чому від удару блискавки іноді перегорять запобіжники навіть вимкненого з розетки електричного приладу?
4. Замкненому мідному проводу довжиною 2 м та площею поперечного перерізу 17 мм<sup>2</sup> надали форми квадрата та помістили в однорідне магнітне поле індукцією 50 мТл перпендикулярно до ліній індукції поля. Людина, взявшись за два протилежні кути квадрата, різко (за 0,2 с) випрямила провід, не розірвавши його. Визначте середню силу струму, яка виникла в провіді.





Вихрове електричне поле і, як наслідок, ЕРС індукції виникають у провіднику в разі зміни магнітного поля, в якому він перебуває. Таке поле може бути створене й самим провідником, якщо сила струму в ньому змінюється, причому провідник не може відрізнити «своє» поле від «чужого». З'ясуємо, які виникають ефекти, якщо провідник перебуває у «своєму» змінному магнітному полі.



### 1 У чому полягає явище самоіндукції

Складемо електричне коло (див. рис. 23.1, а, г). Після замкнення кола лампочка 1 спалахне практично відразу, а лампочка 2 — з помітним запізненням. Якщо коло розімкнути, то обидві лампочки загаснуть одночасно, однак у момент розімкнення їхня яскравість збільшиться. Чому ж так відбувається?

Відразу після замкнення кола сила струму в колі збільшується. Усередині котушки виникає змінне магнітне поле, магнітна індукція якого також збільшується. Змінне магнітне поле створює вихрове електричне поле, яке відповідно до правила Ленца буде напрямлене проти напрямку струму в котушці (рис. 23.1, б), тому струм у колі котушки (а отже, і в лампочці 2) зростатиме не відразу, а поступово\* (рис. 23.1, в).

**Явище самоіндукції** — явище виникнення вихрового електричного поля в провіднику, в якому тече змінний електричний струм.

Електрорушійну силу індукції, яка створюється в провіднику внаслідок зміни його власного магнітного поля, називають *електрорушійною силою самоіндукції*  $\mathcal{E}_i$ .

Після розімкнення кола також виникає вихрове електричне поле, яке в цьому випадку підтримує струм (рис. 23.1, д), і в результаті струм у колі котушки зникає не відразу, а зменшується поступово (рис. 23.1, е). У разі швидкого розімкнення кола ЕРС самоіндукції може бути значно більшою, ніж ЕРС джерела струму, тому лампочки яскраво спалахнуть.

\* У провідниках, які підводять струм до лампочки 1, також виникає вихрове електричне поле, але створена ним ЕРС самоіндукції є незначною.



Чому ж лампочки гаснуть одночасно? Річ у тім, що після розімкнення кола поле джерела «не працює». Але коло, що складається з двох лампочок і котушки, лишається замкненим. Струм у цьому колі підтримується тільки за рахунок вихрового електричного поля, що створюється в котушці, яка в цьому випадку слугує джерелом струму. Струм через котушку і лампочку 2 продовжує йти в тому самому напрямку, а напрямом струму в лампочці 1 змінюється на протилежний (див. рис. 23.1, з).

## 2 Що таке індуктивність

Явище самоіндукції — це окремий випадок явища електромагнітної індукції. Відповідно до закону Фарадея ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:

$$\mathcal{E}_{\text{is}} = \mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t). \quad (1)$$

Магнітний потік через поверхню, обмежену провідником, прямо пропорційний магнітній індукції магнітного поля, яке існує навколо провідника зі струмом ( $\Phi \sim B$ ), а ця магнітна індукція прямо пропорційна силі струму в провіднику ( $B \sim I$ ). Отже, *магнітний потік прямо пропорційний силі струму в провіднику:*

$$\Phi = LI, \quad (2)$$

де  $L$  — коефіцієнт пропорційності.

Зважаючи на формули (1) і (2), одержимо **закон самоіндукції**:

ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в провіднику:

$$\mathcal{E}_{\text{is}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad \text{або} \quad \mathcal{E}_{\text{is}} = -LI'(t) \quad (3)$$

Коефіцієнт пропорційності  $L$  називають *індуктивністю провідника*.

**Індуктивність  $L$**  — це фізична величина, яка характеризує електричні властивості провідника і чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції в разі зміни сили струму в провіднику на 1 ампер за 1 секунду:

$$L = \frac{|\mathcal{E}_{\text{is}}|}{\Delta I / \Delta t}$$

Одиниця індуктивності в СІ — **генрі (Гн)\***. Індуктивність провідника дорівнює 1 Гн, якщо в ньому виникає ЕРС самоіндукції 1 В у разі зміни сили струму на 1 А за 1 с:  $1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А/с}}$ .

Індуктивність провідника залежить від магнітних властивостей середовища, в якому розташований провідник, розмірів і форми провідника, але не залежить від сили струму в ньому. Наприклад,

\* На честь американського фізика Джозефа Генрі (1797–1878).



індуктивність соленоїда:  $L = \mu\mu_0 n^2 V$ , де  $\mu$  — магнітна проникність середовища;  $\mu_0$  — магнітна стала;  $n$  — кількість витків на одиницю довжини ( $n = \frac{N}{l}$ );  $V$  — об'єм соленоїда ( $V = Sl$ ).

Велику індуктивність мають обмотки генераторів та двигунів, тому під час вимкнення кола, коли швидкість зміни струму є великою, ЕРС самоіндукції може досягнути такого значення, що відбудеться пробій ізоляції.

**3 Чому можна стверджувати, що магнітне поле має енергію, і як її обчислити**

Розглянемо явище самоіндукції з погляду закону збереження енергії. Звідки береться енергія, за рахунок якої протягом певного часу після відключення джерела живлення підтримується електричний струм у колі? Очевидно, що ця енергія була раніше запасена у вигляді енергії магнітного поля.

Відразу після замкнення кола, коли струм починає зростати, в провіднику з'являється вихрове електричне поле, яке протидіє електричному полю джерела живлення. Джерело виконує додаткову роботу проти сил вихрового поля. Відповідно до закону збереження енергії  $\Delta W_m$  — енергія, яку накопичує магнітне поле за невеликий інтервал часу  $\Delta t$ , — дорівнює саме додатковій роботі, яку виконує джерело для створення струму:

$$\Delta W_m = -A_{ст} = -\mathcal{E}_{ис} q = -\mathcal{E}_{ис} I_{інд} \Delta t,$$

де  $A_{ст}$  — робота вихрового поля, яка дорівнює за модулем і протилежна за знаком додатковій роботі джерела живлення за інтервал часу  $\Delta t$ ;  $I_{інд}$  — середня сила струму в провіднику за інтервал часу  $\Delta t$ .

Оскільки  $\mathcal{E}_{ис} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ , маємо:  $\Delta W_m = L \frac{\Delta I}{\Delta t} I_{інд} \Delta t = LI_{інд} \Delta I$ .

Щоб знайти повну енергію  $W_m$  магнітного поля, звернемося до графіка залежності  $LI(I)$  (рис. 23.2). Енергія  $\Delta W_m$  чисельно дорівнює площі ділянки  $abcd$  зі сторонами  $LI_{інд}$  і  $\Delta I$  ( $\Delta I$  — зміна сили струму за інтервал часу  $\Delta t$ ). Повна енергія  $W_m$ , яку накопичує магнітне поле за час зростання сили струму від 0 до  $I$ , чисельно дорівнюватиме площі трикутника  $OBC$  зі сторонами  $I$  і  $LI$ :  $W_m = \frac{LI \cdot I}{2}$ . Отже,

повна енергія магнітного поля прямо пропорційна квадрату сили струму в провіднику:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

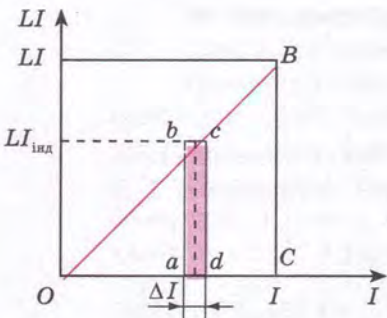


Рис. 23.2. До виведення формули для обчислення енергії магнітного поля



Зверніть увагу: індуктивність подібна до маси в механіці. Щоб зрушити тіло (надати йому швидкості), потрібно виконати роботу:

$$A = W_k = \frac{mv^2}{2};$$

чим більша маса тіла, тим більшу роботу треба виконати; під час гальмування тіло саме виконує роботу. Аналогічно для створення струму потрібно виконати роботу проти сил вихрового поля:

$$A = W_m = \frac{LI^2}{2};$$

чим більша індуктивність провідника, тим більшу роботу треба виконати; під час зменшення струму вихрове електричне поле саме виконує роботу.

#### 4 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Надпровідну котушку індуктивністю 5,0 Гн замикають на джерело струму з ЕРС 20 В і нехтовно малим внутрішнім опором. Вважаючи, що сила струму в котушці збільшується рівномірно, визначте час, за який сила струму досягне 10 А.

$t$  — ?

Дано:

$$R = 0$$

$$L = 5,0 \text{ Гн}$$

$$\mathcal{E}_{\text{дж}} = 20 \text{ В}$$

$$r = 0$$

$$I = 10 \text{ А}$$

*Аналіз фізичної проблеми. Пошук математичної моделі. Розв'язання.* Сила струму в котушці зростає поступово внаслідок явища самоіндукції.

Для розв'язання задачі скористаємося законом Ома для повного кола:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ , де  $\mathcal{E}$  — повна ЕРС кола, що в нашому випадку складається з ЕРС джерела та ЕРС самоіндукції:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{дж}} + \mathcal{E}_{\text{іс}}$ ; де  $\mathcal{E}_{\text{іс}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ .

Отже, закон Ома набуває вигляду:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}} - L \frac{\Delta I}{\Delta t}}{R+r}, \text{ або } I(R+r) = \mathcal{E}_{\text{дж}} - L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Оскільки  $(R+r) = 0$ , то  $\mathcal{E}_{\text{дж}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ , звідки  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}}}{L}$ , де  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  — швидкість зміни сили струму.

Струм у котушці змінюється рівномірно, тому час, за який він досягне значення 10 А, дорівнює:  $t = \frac{I}{\Delta I / \Delta t} = \frac{I}{\mathcal{E}_{\text{дж}} / L} = \frac{IL}{\mathcal{E}_{\text{дж}}}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[t] = \frac{A \cdot \text{Гн}}{\text{В}} = \frac{A \cdot \text{В}}{A/c \cdot \text{В}} = c; \quad \{t\} = \frac{10 \cdot 5,0}{20} = 0,25, \quad t = 0,25 \text{ с.}$$

**Відповідь:** час, за який струм у котушці досягне значення 10 А, становить  $t = 0,25 \text{ с}$ .

#### ! Підбиваємо підсумки

Явище самоіндукції — це явище виникнення вихрового електричного поля в провіднику, в якому тече змінний електричний струм.

Закон самоіндукції: ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в провіднику:  $\mathcal{E}_{\text{іс}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ;  $\mathcal{E}_{\text{іс}} = -LI'(t)$ .



Індуктивність  $L$  — це фізична величина, яка характеризує електричні властивості провідника та чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції в разі зміни сили струму в провіднику на 1 А за 1 с:  $L = \frac{|\mathcal{E}_{is}|}{\Delta I / \Delta t}$ .

Одиниця індуктивності в СІ — генрі (Гн).

Енергія магнітного поля прямо пропорційна квадрату сили струму в провіднику:  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ .



### Контрольні запитання

1. Опишіть дослід, який демонструє, що після замкнення кола, яке містить котушку індуктивності, струм наростає поступово. Чим зумовлене це явище?
2. Дайте визначення самоіндукції.
3. Сформулюйте закон самоіндукції.
4. Дайте визначення індуктивності.
5. Назвіть одиницю індуктивності в СІ, дайте її визначення.
6. Доведіть, що магнітне поле має енергію.
7. Виведіть формулу для обчислення енергії магнітного поля.
8. Проведіть аналогію між масою та індуктивністю.



### Вправа № 21

1. Чому для вимкнення кола з великою індуктивністю не користуються рубильником, а струм вимикають поступово, уводячи реостат?
2. За 0,1 с сила струму в котушці змінилась від 0 до 1,5 А. Визначте індуктивність котушки, якщо ЕРС самоіндукції в ній дорівнює 2 В. Вважайте, що сила струму змінювалась рівномірно.
3. Унаслідок зменшення сили струму в котушці від 10,0 до 4,0 А енергія магнітного поля котушки зменшилась на 16 Дж. Якою є індуктивність котушки?
4. Провідне кільце радіусом 2,0 см перебуває в магнітному полі електромагніта, магнітна індукція якого 0,32 Тл, а лінії індукції перпендикулярні до площини кільця. Кільце переводять у надпровідний стан. Визначте індуктивність кільця, якщо після вимкнення електромагніта сила струму в кільці дорівнюватиме 12 А.
- 5\*. Замкнена котушка опором 20 Ом та індуктивністю 0,01 Гн перебуває у змінному магнітному полі. Коли створюваний цим полем магнітний потік збільшився на 1,0 мВб, сила струму в котушці збільшилась на 0,05 А. Який заряд пройшов по котушці за цей час?

## § 24. МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИНИ. ДІА-, ПАРА- ТА ФЕРОМАГНЕТИКИ



Магнітне поле створюється не тільки рухомими електричними зарядами, але й намагніченими тілами. Засновник теорії магнетизму А. Ампер вважав, що магнітні властивості тіл зумовлені замкненими електричними струмами всередині цих тіл. Чи так це?



### 1 Як середовище впливає на магнітне поле

Ви вже знаєте, що напруженість електричного поля в середовищі завжди менша, ніж у вакуумі. Середовище чинить вплив і на магнітне поле: будь-яка речовина, поміщена в магнітне поле, намагнічується, тобто створює власне магнітне поле.

★ Фізична величина, яка характеризує явище намагнічування, називається *намагніченістю*  $J$ :



$$J = B - B_0 = \mu B_0 - B_0 = B_0(\mu - 1),$$

де  $B = \mu B_0$  — магнітна індукція магнітного поля в речовині;  $B_0$  — магнітна індукція магнітного поля у вакуумі;  $\mu$  — відносна магнітна проникність середовища.★

**Відносна магнітна проникність середовища  $\mu$**  — це фізична величина, яка характеризує магнітні властивості середовища та дорівнює відношенню магнітної індукції  $B$  магнітного поля в речовині до магнітної індукції  $B_0$  магнітного поля у вакуумі:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

За значенням відносної магнітної проникності речовини поділяють на *слабوماгнітні* та *сильномагнітні*. У *слабوماгнітних* речовин значення  $\mu$  незначно відрізняється від одиниці: якщо  $\mu \leq 1$ , такі речовини називають *діамагнетиками*; якщо  $\mu \geq 1$  — *парамагнетиками*. У *сильномагнітних* речовин значення  $\mu$  значно більше за одиницю ( $\mu \gg 1$ ), і їх називають *феромагнетиками*.

До *діамагнетиків* належать інертні гази (гелій, неон тощо), багато металів (золото, цинк, мідь, ртуть, срібло), молекулярний азот, вода та ін. Відносна магнітна проникність діамагнетиків не залежить від температури. Якщо діамагнітну речовину помістити в магнітне поле, то вона буде виштовхуватися з поля, тобто рухатися в бік зменшення магнітної індукції. Цікаво, що людина в магнітному полі поводиться як діамагнетик, бо майже на 70 % складається з води.

До *парамагнетиків* належать кисень, платина, алюміній, лужні, лужноземельні метали та ін. Відносна магнітна проникність парамагнетиків зменшується зі збільшенням температури. Якщо парамагнітну речовину помістити в магнітне поле, то вона буде втягуватися в поле, тобто рухатися в бік збільшення магнітної індукції.

До *феромагнетиків* належить порівняно невелика група речовин: залізо, нікель, кобальт, рідкоземельні речовини та ряд сплавів. Магнітна індукція магнітного поля всередині феромагнетиків у сотні й тисячі разів більша, ніж магнітна індукція зовнішнього магнітного поля, тобто поля, яке спричинило намагнічування. Феромагнетики, як і парамагнетики, втягуються в магнітне поле. При досягненні певної температури, яку називають *температурою Кюрі* (див. таблицю), феромагнітні властивості речовини зникають і вона стає парамагнетиком.

Феромагнітні матеріали, які легко намагнічуються, називають *м'якими магнітними матеріалами*. Вони застосовуються для виготовлення осердь електромагнітів, генераторів,

Температура Кюрі деяких речовин

Речовина	$T$ (К)
Co	1388
Fe	1043
MgOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	713
Ni	627
MnB	578
Gd	292
Au <sub>2</sub> MnAl	200



двигунів, трансформаторів, тобто пристроїв, осердя яких під час роботи постійно перемагнічуються.

Феромагнітні матеріали, на намагнічення (розмагнічення) яких потрібно витратити значну енергію і які залишаються намагніченими довгий час, називають *жорсткими магнітними матеріалами*. Вони застосовуються для виготовлення постійних магнітів, плівок для магнітного запису інформації тощо.



2

## Що таке магнітний момент

**Магнітний момент**  $\vec{p}_m$  — це векторна фізична величина, що чисельно дорівнює добуткові сили струму  $I$ , який тече по контуру, на площу  $S$  контуру:

$$p_m = IS$$

Напрямок вектора магнітного моменту визначають за *правилом правої руки* (або за *правилом свердлика*).

Невеликий виток зі струмом установлюється в магнітному полі таким чином, що напрямок магнітного моменту витка збігається з напрямком вектора  $\vec{B}_0$  магнітної індукції магнітного поля (рис. 24.1).

Частинки, які входять до складу атома (електрони, протони та нейтрони), мають *власні магнітні моменти*  $\vec{p}_m$ , причому вони не зумовлені наявністю струму, а є характеристикою частинки (так само як маса та електричний заряд). Власні магнітні моменти частинок створюють *власний магнітний момент атома або молекули*.

Атоми (молекули) *діамагнітних* речовин не мають власних магнітних моментів, намагніченість таких речовин пояснюється *наведеними магнітними моментами*, які створюються в частинках речовини під впливом зовнішнього магнітного поля і напрямлені проти магнітної індукції цього поля.

Атоми й молекули *парамагнітних* та *феромагнітних* речовин мають власні магнітні моменти. До того ж будь-яке *феромагнітне* тіло складається з *доменів* — макроскопічних ділянок із лінійними розмірами  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  см, в яких власні магнітні моменти сусідніх йонів паралельні один одному, а отже, домени мають *власну намагніченість*. Якщо парамагнітні або феромагнітні речовини помістити в магнітне поле, то частинки парамагнетика (або домени феромагнетика) починають орієнтуватися так, що їх магнітні моменти спрямовуються за напрямком зовнішнього магнітного поля (аналогічно тому, як орієнтується в магнітному полі виток зі струмом), — речовина намагнічується. ★

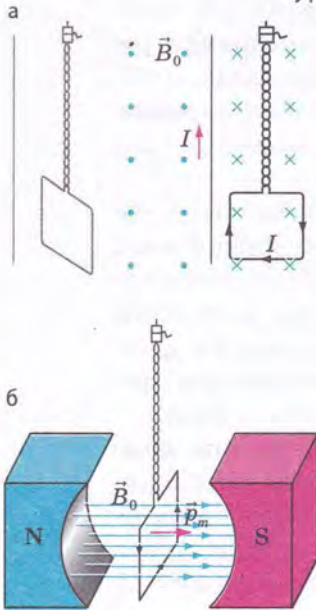


Рис. 24.1. Орієнтація витка зі струмом в магнітному полі провідника зі струмом (а); постійного магніту (б)



**! Підбиваємо підсумки**

Фізична величина, яка характеризує магнітні властивості середовища, називається відносною магнітною проникністю середовища:  $\mu = B/B_0$ .

За значенням  $\mu$  речовини поділяють на слабо- та сильномагнітні. У слабомагнітних речовин значення  $\mu$  незначно відрізняється від одиниці: якщо  $\mu < 1$ , то такі речовини називають діамагнетиками; якщо  $\mu > 1$  — парамагнетиками. У сильномагнітних речовин (феромагнетиків) значення  $\mu$  значно більше за одиницю ( $\mu \gg 1$ ).

**? Контрольні запитання**

1. Дайте визначення відносної магнітної проникності середовища. 2. Що таке намагніченість? 3. Наведіть приклади речовин, які є діамагнетиками, парамагнетиками та феромагнетиками. Як відбувається їх намагнічування? 4. Де застосовують м'які магнітні матеріали? жорсткі магнітні матеріали?

**§ 25. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ**

Електромагнітна взаємодія належить до чотирьох фундаментальних видів взаємодій, що існують у природі. Вона виявляється між частинками, які мають електричний заряд, і визначає структуру речовини (зв'язує електрони та ядра в атомах і атоми в молекулах), хімічні й біологічні процеси. Різні агрегатні стани речовини, сили пружності, тертя тощо так само визначаються електромагнітною взаємодією. *Електромагнітна взаємодія здійснюється за допомогою електромагнітного поля.*

**Що таке електромагнітне поле**

**Електромагнітне поле** — форма існування матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між зарядженими частинками.

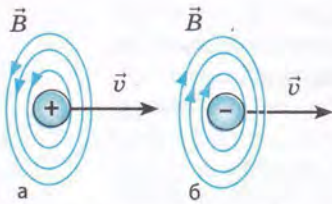
Умовно прийнято, що електромагнітне поле має дві складові (дві форми виявлення): *електричну*, яка характеризується впливом поля на рухомі та нерухомі заряджені частинки, і *магнітну*, яка характеризується впливом тільки на рухомі заряджені частинки. Згадаємо основні властивості складових електромагнітного поля.

**Електричне поле** — складова електромагнітного поля, яка характеризується дією на заряджену частинку із силою  $\vec{F}_{ел}$ , що прямо пропорційна заряду  $q$  частинки:  $\vec{F}_{ел} = q\vec{E}$ . Основною властивістю електричного поля є силовий вплив на заряджені частинки. Відповідно основною характеристикою електричного поля є **вектор напруженості  $\vec{E}$  електричного поля**.

Якщо взяти ебонітову паличку та потерти її об шматочок вовни, то паличка набуде електричного заряду і навколо неї виникне електричне поле. Отже, *джерелом електричного поля є електричний заряд* (будь-яка частинка, що має заряд, або заряджене тіло). Лінії напруженості електричного поля, створеного зарядом, починаються на позитивному заряді або в нескінченності й закінчуються на негативному заряді або в нескінченності (див. рис. 2.5, 2.6).

*Джерелом електричного поля є також змінне магнітне поле.* Лінії напруженості електричного поля, створеного змінним магнітним полем, замкнені (це поле є вихровим) й утворюють лівий гвинт із вектором магнітної індукції магнітного поля, якщо магнітна

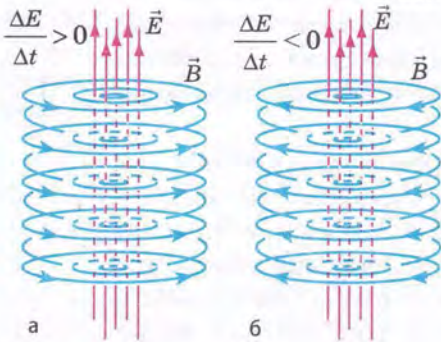




**Рис. 25.1.** Напрямок ліній магнітної індукції магнітного поля, створеного рухомою зарядженою частинкою: *a* — частинка має позитивний заряд; *б* — частинка має негативний заряд



**Рис. 25.2.** Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) — англійський фізик і математик, творець класичної електродинаміки, один із засновників статистичної фізики



**Рис. 25.3.** Напрямок ліній магнітної індукції магнітного поля: *a* — напруженість електричного поля збільшується; *б* — напруженість електричного поля зменшується

індукція збільшується (див. рис. 22.1, *a*), і правий гвинт, якщо магнітна індукція зменшується (див. рис. 22.1, *б*).

**Магнітне поле** — складова електромагнітного поля, яка характеризується дією на рухомі заряджені частинки із силою, модуль якої є прямо пропорційним заряду  $q$  та швидкості  $v$  руху частинки, а напрямком визначається за правилом лівої руки. (Ви вже знаєте, що ця сила має назву **сила Лоренца**:  $F_{л} = qv \sin \alpha$ .) Основною характеристикою магнітного поля є **вектор магнітної індукції  $\vec{B}$** .

**Джерела магнітного поля** — рухомі заряджені тіла й частинки та намагнічені тіла. Лінії магнітної індукції поля завжди замкнені (магнітне поле є вихровим) й утворюють правий гвинт із напрямком руху позитивно зарядженої частинки та лівий гвинт із напрямком руху негативно зарядженої частинки (рис. 25.1). Лінії магнітної індукції виходять з північного полюсу намагніченого тіла і входять у південний (див. рис. 18.6, *a*).

## 2 У чому полягає гіпотеза Максвелла

Намагаючись перекласти чіткою математичною мовою результати дослідів Фарадея та інших учених, видатний англійський фізик **Джеймс Клерк Максвелл** (рис. 25.2) припустив, що причиною виникнення електричного струму в дослідях Фарадея є наявність вихрового електричного поля, створеного змінним магнітним полем. Керуючись принципом симетрії, Максвелл висунув гіпотезу про те, що **й змінне електричне поле створює магнітне поле**.

Згодом ця гіпотеза одержала блискуче експериментальне підтвердження. Згідно з теорією Максвелла лінії магнітної індукції магнітного поля утворюють правий гвинт із вектором напруженості електричного поля, якщо напруженість електричного поля збільшується (рис. 25.3, *a*), і лівий — якщо напруженість поля зменшується (рис. 25.3, *б*).

Спираючись на той факт, що електричне поле породжується змінним магнітним полем, а магнітне поле — змінним електричним, Максвелл дійшов висновку: **електричне та магнітне поля не існують окремо, незалежно одне від одного, — існує єдине електромагнітне поле**.



На частинку, що має заряд  $q$  і рухається в електромагнітному полі, діє зведена сила Лоренца  $\vec{F}_{\text{зв}}$ , яку можна визначити за формулою:

$$\vec{F}_{\text{зв}} = \vec{F}_{\text{ел}} + \vec{F}_{\text{л}},$$

де  $\vec{F}_{\text{ел}}$  — електрична складова зведеної сили Лоренца;  $\vec{F}_{\text{л}}$  — магнітна складова зведеної сили Лоренца.

Електромагнітне поле має властивість *неперервності*: якщо в деяких точках  $A$  і  $B$  простору існує електромагнітне поле, то воно існує й у просторі між цими точками. Електромагнітне поле поширюється в просторі зі скінченною швидкістю, яка у вакуумі дорівнює швидкості поширення світла —  $3 \cdot 10^8$  м/с.

### 3 У чому відносність електричного і магнітного полів

Існування єдиного електромагнітного поля, а не окремих магнітного та електричного полів підтверджується тим фактом, що вияв у просторі тільки електричної або тільки магнітної складової поля залежить від вибору системи відліку (СВ).

Уявіть, що ви передали деякому тілу електричний заряд  $i$ , тримаючи це тіло в руках, йдете до свого товариша. Якби наші органи зору мали здатність завжди бачити електромагнітне поле, то ви бачили б тільки одну його складову — електричне поле, оскільки відносно вас заряд є нерухомим. Водночас ваш товариш бачив би як електричне, так і магнітне поле, тому що відносно нього заряд рухається.

Нехай тепер ваш товариш візьме в руки постійний магніт і понесе його до вас. Тепер він «бачитиме» тільки магнітне поле, ви ж — і магнітне, і електричне, оскільки відносно вас магнітне поле буде змінним. Водночас ви ніколи не знайдете СВ, відносно якої обидві складові електромагнітного поля зникли би, адже електромагнітне поле матеріальне. Це можна порівняти з розгляданням медалі. Ми ж не думаємо, що в неї немає зворотного боку. Є! Просто в деякий момент ми його не бачимо.

### ! Підбиваємо підсумки

Електромагнітне поле — форма існування матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між зарядженими частинками.

Умовно прийнято, що електромагнітне поле має дві складові — електричну (електричне поле), яка характеризується впливом поля як на рухомі, так і на нерухомі заряджені частинки, і магнітну (магнітне поле), яка характеризується впливом тільки на рухомі заряджені частинки. Електричне та магнітне поля не існують окремо, незалежно одне від одного; існує єдине електромагнітне поле.

### ? Контрольні запитання

1. Дайте визначення електромагнітного поля, назвіть його умовні складові.
2. Дайте визначення електричного поля. Яка фізична величина є його силовою характеристикою?
3. Назвіть джерела електричного поля. Що собою являють лінії напруженості поля, створеного кожним типом джерел? Як визначити їх напрямки?
4. Дайте визначення магнітного поля. Яка фізична величина є його силовою характеристикою?
5. Назвіть джерела магнітного поля. Що собою являють лінії магнітної індукції поля, створеного кожним типом джерел? Як визначити їх напрямки?
6. У чому полягає гіпотеза Дж. Максвелла?
7. Назвіть основні властивості електромагнітного поля.
8. Наведіть приклади, що підтверджують відносність електричного та магнітного полів.

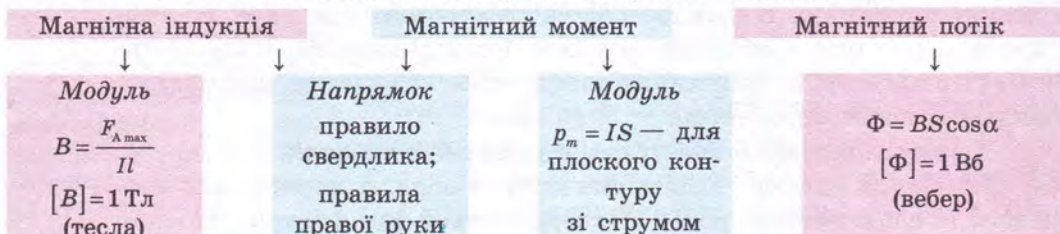


## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ 3 «ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ»

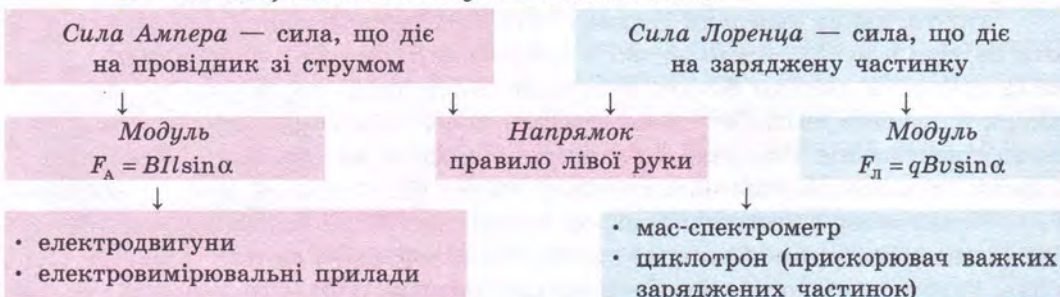
1. Вивчаючи розділ 3, ви поглибили свої знання про *магнітне поле*.

*Магнітне поле* — це складова електромагнітного поля, завдяки якій здійснюється взаємодія між зарядженими частинками або тілами, що рухаються

2. *Фізичні величини, які характеризують магнітне поле:*



3. *Сили, що діють з боку магнітного поля:*



4. Ви повторили досліди *Фарадея*, вивчили явище електромагнітної індукції  $\mathcal{E}_{\text{інд}}$  та його окремий випадок — явище самоіндукції.

*Явище електромагнітної індукції* — явище виникнення ЕРС індукції під час зміни магнітного потоку, який пронизує контур

$$\text{Закон Фарадея: } \mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$$

$$\text{Закон самоіндукції: } \mathcal{E}_{\text{са}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \text{ де } L \text{ — індуктивність; } [L] = \text{Гн (генрі)}$$

5. Ви дізналися, що напрямок індукційного струму визначається за *правилом Ленца*.

6. Ви встановили, що *енергія магнітного поля провідника зі струмом дорівнює*:  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ .

7. Ви дізнались, що електричне та магнітне поля — це *дві форми прояву* єдиного електромагнітного поля.

*Електромагнітне поле* — форма існування матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між зарядженими частинками







## РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

### § 26. КОЛИВАННЯ. ВИДИ КОЛИВАНЬ. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ КОЛИВАННЯ



У курсі фізики 10-го класу ви ознайомилися з одним із найпоширеніших видів рухів у природі — механічними коливаннями. Однак, окрім механічних, існують коливання зовсім іншої природи — електромагнітні. Хоча ці два явища — механічні та електромагнітні коливання — є різними за своєю природою, проте вони мають низку спільних характерних ознак і описуються однаковими математичними законами.



#### Види коливань та умови їх виникнення

**Коливання** — рухи або зміни стану, які точно чи приблизно повторюються з часом.

Існують різні види коливань. Одні коливання, наприклад рух поршня у двигуні внутрішнього згоряння або зміна сили струму в електричній мережі, можуть *відбуватися тільки під дією зовнішньої сили, що змінюється періодично*. Такі коливання називають *вимушеними*.

Інші коливання, які називають *вільними*, зумовлені дією *внутрішніх сил системи й виникають після того, як систему виведено зі стану рівноваги й надано самій собі*. Такими, наприклад, є коливання маятника, які виникають, якщо тягарець відхилити від положення рівноваги й відпустити; коливання в коливальному контурі, які виникають, якщо заряджений конденсатор замкнути на котушку.

Система тіл, у якій можуть виникати вільні коливання, називають **коливальною системою**.

Щоб у коливальній системі виникли вільні коливання, необхідне виконання двох умов: 1) системі має бути передано надлишкову енергію; 2) втрати енергії в системі мають бути незначними, інакше коливання швидко затухнуть або навіть не виникнуть.

Якщо в коливальній системі немає жодних втрат енергії, то коливання триватимуть як завгодно довго — їхня амплітуда з часом не змінюватиметься. Такі коливання називають *незатухаючими*.

Однак у будь-якій коливальній системі завжди є втрати енергії: під час механічних коливань енергія витрачається на долаття сил тертя, деформацію; під час електромагнітних — на нагрівання провідників, випромінювання електромагнітних хвиль та ін. У результаті амплітуда коливань із часом зменшується, і через певний проміжок часу, якщо немає надходжень енергії від зовнішнього джерела, коливання припиняються (затухають). Тому вільні коливання завжди є *затухаючими*.

Існують *коливальні системи, в яких незатухаючі коливання відбуваються внаслідок здатності системи самостійно регулювати*



надходження енергії від постійного джерела. Такі системи називаються *автоколивальними*, а процес незатухаючих коливань у таких системах — *автоколиваннями*.

## 2 Гармонічні коливання

Коли тіло здійснює механічні коливання, змінюються його положення в просторі (координата), швидкість і прискорення руху. У випадку електромагнітних коливань змінюються сила струму в колі, заряд і напруга на обкладках конденсатора, електрорушійна сила (ЕРС). Загальні закони коливального руху є досить складними й виходять за межі шкільного курсу фізики, тому ми розглядатимемо лише окремий випадок коливань — *гармонічні коливання*.

**Гармонічні коливання** — це коливання, під час яких фізична величина, що коливається, змінюється з часом за законом косинуса або синуса.

Рівняння гармонічних коливань має вигляд:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad \text{або} \quad x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

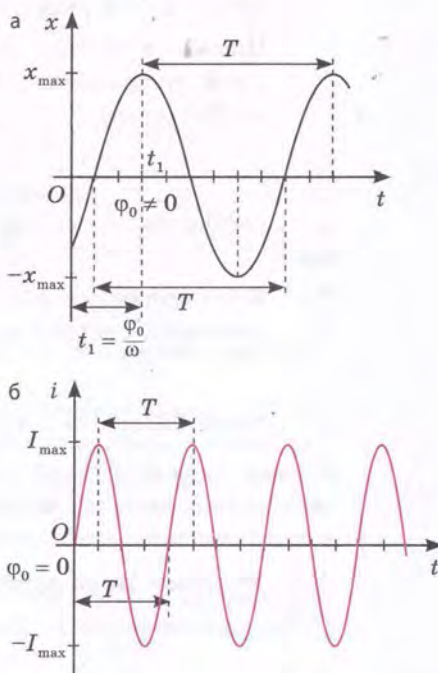
де  $x$  — значення змінної величини в даний момент часу  $t$ ;  $A$  — амплітуда коливань;  $\omega$  — циклічна частота;  $\varphi_0$  — початкова фаза коливань.

Графік залежності значення змінної величини від часу називають графіком коливань. Графік гармонічних коливань має вигляд кривої, яка в математиці називається синусоїдою або косинусоїдою (рис. 26.1). За графіком коливань, як і за рівнянням коливань, легко визначити основні характеристики коливань.

## 3 Які фізичні величини характеризують коливання

**Амплітуда коливань  $A$**  — це фізична величина, що характеризує коливання й дорівнює максимальному значенню змінної величини.

Амплітуда *вільних* коливань визначається початковими умовами, тобто тією енергією, яку було передано системі під час її виведення зі стану рівноваги. Одиниця амплітуди коливань визначається одиницею змінної величини. Наприклад, у механічних коливаннях амплітуду розуміють як максимальне зміщення:  $A = x_{\max}$  ( $[x_{\max}] = 1 \text{ м}$ ); можна говорити також про



**Рис. 26.1.** Графіки гармонічних коливань: *a* — графік залежності координати тіла від часу  $x(t) = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ ; *б* — графік залежності сили струму від часу  $I(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0)$ .  $x_{\max}$ ,  $I_{\max}$  — амплітуди коливань;  $T$  — період коливань;  $\varphi_0$  — початкова фаза коливань



амплітуду швидкості ( $[v_{\max}] = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ) і амплітуду прискорення. У випадку електромагнітних коливань говорять про амплітуду сили струму ( $[I_{\max}] = 1 \text{ А}$ ), амплітуду напруги ( $[U_{\max}] = 1 \text{ В}$ ) та ін.

**Період коливань**  $T$  — це фізична величина, що характеризує коливання й дорівнює мінімальному інтервалу часу, через який значення змінної величини повторюється, тобто часу, за який здійснюється одне повне коливання:

$$T = \frac{t}{N},$$

де  $t$  — час коливань;  $N$  — кількість повних коливань за цей час.  
Одиниця періоду коливань у СІ — **секунда** (с).

**Частота коливань** — це фізична величина, що характеризує коливання й кількісно дорівнює числу повних коливань, які здійснюються за одиницю часу:

$$\nu = \frac{N}{t}.$$

Одиниця частоти коливань у СІ — **герц** (Гц).

**Циклічна частота**  $\omega$  — це фізична величина, що характеризує коливання й кількісно дорівнює числу повних коливань, які здійснюються за  $2\pi$  секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

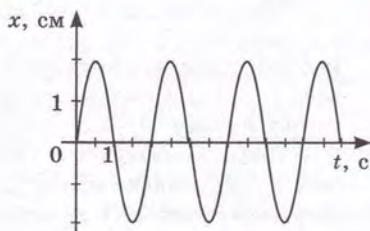
Одиниця циклічної частоти в СІ — **радіан на секунду** (рад/с або  $\text{с}^{-1}$ ).

**Фаза коливань**  $\varphi$  — це фізична величина, що характеризує стан коливальної системи в даний момент часу:

$$\varphi = \omega t + \varphi_0.$$

Фаза коливань визначається їх періодом (оскільки  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ), моментом часу  $t$ , у який фіксується значення змінної величини, та початковою фазою коливань  $\varphi_0$  — фазою коливань у момент початку відліку часу.

#### 4 Учимся розв'язувати задачі



**Задача.** За графіком коливань тіла на пружині, наведеним на рисунку: 1) визначте амплітуду, період, частоту й циклічну частоту коливань; 2) запишіть рівняння коливань та рівняння швидкості руху тіла; 3) знайдіть зміщення та швидкість руху тіла у фазі  $\frac{\pi}{6}$  рад.



*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання*

1) Із графіка визначимо:

а) амплітуду коливань (максимальне зміщення тіла):

$$x_{\max} = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м};$$

б) проміжок часу, за який здійснюється одне повне коливання, дорівнює 2 с, отже,  $T = 2 \text{ с}$ ;

$$\text{в) } \nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2} \text{ с}^{-1} = 0,5 \text{ Гц};$$

$$\text{г) } \omega = 2\pi\nu = 2\pi \cdot 0,5 \frac{1}{\text{с}} = \pi \text{ с}^{-1}.$$

2) У момент початку спостереження ( $t = 0$ ) тіло перебувало у стані рівноваги ( $x_0 = 0$ ), тому рівняння коливань має вигляд:  $x = x_{\max} \sin \omega t$ . Підставляючи значення  $x_{\max} = 0,02 \text{ м}$  і  $\omega = \pi \text{ с}^{-1}$  у рівняння коливань, маємо:  $x = 0,02 \sin \pi t$  (м).

Швидкість руху тіла дорівнює швидкості зміни його координати:

$$v(t) = x'(t) = (0,02 \sin \pi t)' = 0,02\pi \cos \pi t = 0,02\pi \sin \left( \pi t + \frac{\pi}{2} \right) \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

3) Якщо  $\varphi = \frac{\pi}{6}$ , то  $x(t) = x_{\max} \sin \varphi = 0,02 \sin \frac{\pi}{6} = 0,01$  (м);

$$v(t) = 0,02\pi \cos \frac{\pi}{6} \approx 0,054 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

*Відповідь:* 1)  $x_{\max} = 0,02 \text{ м}$ ;  $T = 2 \text{ с}$ ;  $\nu = 0,5 \text{ Гц}$ ;  $\omega = \pi \text{ с}^{-1}$ ;

2)  $x = 0,02 \sin \pi t$  (м);  $v = 0,02\pi \cos \pi t$   $\left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ ; 3) зміщення у фазі  $\frac{\pi}{6}$ :

$$x = 1 \text{ см}; \text{ швидкість руху у фазі } \frac{\pi}{6}: v = 5,4 \left( \frac{\text{см}}{\text{с}} \right).$$

### Підбиваємо підсумки

Коливання — рухи або зміни стану, які точно чи приблизно повторюються з часом.

За умовами існування розрізняють коливання: вільні, які відбуваються під дією внутрішніх сил системи; вимушені, які відбуваються під дією зовнішньої сили, що періодично змінюється; автоколивання, які існують у системі за рахунок надходження енергії від постійного джерела, за умови що надходження енергії регулюється самою системою.

Коливання, амплітуда яких не змінюється з часом, називаються незатухаючими. Коливання, амплітуда яких із часом зменшується, називаються затухаючими.

Коливання, під час яких фізична величина, що коливається, змінюється з часом за законом косинуса (або синуса), називають гармонічними коливаннями. Рівняння гармонічних коливань має вигляд:  $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$  або  $x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ , де  $x$  — значення змінної величини в даний момент часу  $t$ ;  $A$  — амплітуда коливань;  $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$  — циклічна частота;  $\omega t + \varphi_0 = \varphi$  — фаза коливань;  $\varphi_0$  — початкова фаза коливань.





**Контрольні запитання**

1. Дайте визначення коливань. 2. Які коливання називаються вільними? вимушеними? автоколиваннями? Наведіть приклади. 3. Які умови необхідні для виникнення вільних коливань? 4. Які коливання називають затухаючими? незатухаючими? Наведіть приклади. 5. Назвіть основні фізичні величини, які характеризують коливальний рух. Дайте їх визначення. 6. Які коливання називають гармонічними? Запишіть рівняння гармонічних коливань. 7. Який вигляд має графік гармонічних коливань?



**Вправа № 22**

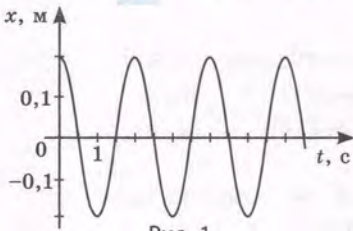


Рис. 1

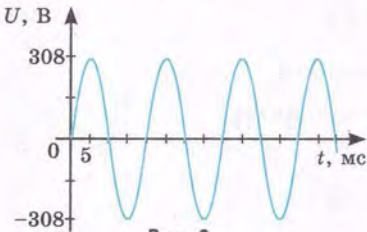


Рис. 2

1. Запишіть рівняння гармонічних коливань сили струму в електричній лампі розжарювання, якщо амплітуда коливань сили струму 0,5 А, а період коливань 0,02 с. У момент початку спостереження сила струму в лампі максимальна.
2. Тіло на пружині здійснює 3 коливання за секунду. Максимальне відхилення тіла від положення рівноваги 0,8 см. Запишіть рівняння гармонічних коливань, якщо в момент початку спостереження тіло перебувало в положенні рівноваги.
3. Рівняння коливань деякого тіла має вигляд:  

$$x = 0,02 \cos\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{4}\right)$$
 (м). Визначте: а) амплітуду, період і частоту коливань цього тіла; б) фазу коливань, координату і швидкість руху тіла через 1 с після початку спостереження.
4. На рис. 1 і 2 наведено графіки гармонічних коливань. Для кожного випадку: а) визначте амплітуду, період і частоту коливань; б) запишіть рівняння коливань.

**§ 27. ВІЛЬНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ В ІДЕАЛЬНОМУ КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ**



Сучасне суспільство вже неможливо уявити без швидкого обміну інформацією, хоча лише кілька років тому більшість із нас обходилася без мобільного телефону та мобільного Інтернету. І не так вже й давно — понад століття тому — винайшли радіо, лише півстоліття минуло відтоді, як у наше життя ввійшло телебачення. Усі ці досягнення техніки ґрунтуються на передачі та прийманні радіосигналів. Сьогодні ви познайомитеся з фізичним пристроєм, який є обов'язковою частиною більшості радіопередавачів і радіоприймачів.



**1 Чому і як відбуваються електромагнітні коливання у коливальному контурі**

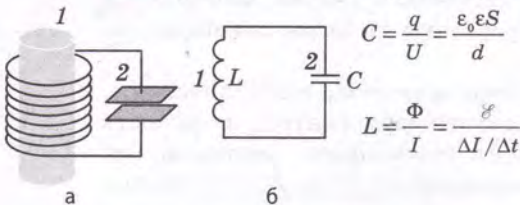


Рис. 27.1. Модель (а) та електрична схема (б) коливального контуру: 1 — котушка індуктивності; 2 — конденсатор

**Коливальний контур** — це фізичний пристрій, що складається з послідовно з'єднаних конденсатора й котушки індуктивності (рис. 27.1).

Коливальний контур є коливальною системою, тобто в ньому можуть виникати вільні електромагнітні коливання. Розглянемо механізм цих коливань.



Щоб у коливальному контурі виникли вільні коливання, системі необхідно передати енергію, наприклад зарядити конденсатор (рис. 27.2). З'єднаємо конденсатор із джерелом постійного струму з вихідною напругою  $U_{\max}$ . На обкладках конденсатора накопичиться певний електричний заряд  $q_{\max}$ , а між обкладками виникне електричне поле, енергія якого дорівнює:

$$W_{\text{ел. макс}} = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{q_{\max}^2}{2C}.$$

Якщо після зарядки конденсатор замкнути на котушку індуктивності (рис. 27.3, а), то під дією електричного поля конденсатора вільні заряджені частинки в контурі почнуть рухатися напрямлено. У контурі виникне електричний струм  $i$ , а конденсатор почне розряджатися (рис. 27.3, б).

Електричний струм завжди створює магнітне поле. Особливо сильним це поле є всередині котушки. Оскільки сила струму, що проходить через котушку, збільшується, то магнітна індукція створеного струмом магнітного поля теж збільшується. Змінне магнітне поле породжує вихрове електричне поле, яке в цьому випадку напрямлене протилежно струму, тому сила струму зростає поступово. Поступово зменшується й заряд  $q$  на обкладках конденсатора.

Таким чином, протягом першої чверті періоду енергія електричного поля конденсатора перетворюється на енергію магнітного поля котушки. Повна енергія коливального контуру дорівнюватиме:

$$W = W_{\text{ел}} + W_{\text{м}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2},$$

де  $q$  — заряд конденсатора в деякий момент часу;  $i$  — сила струму в котушці.

У той момент, коли конденсатор повністю розрядиться (рис. 27.3, в),

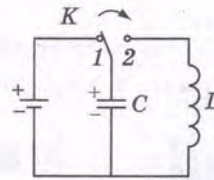


Рис. 27.2. Конденсатор заряджається, якщо ключ перебуває в положенні 1. Якщо ключ перевернути в положення 2, коливальний контур замкнеться і в ньому виникнуть електромагнітні коливання

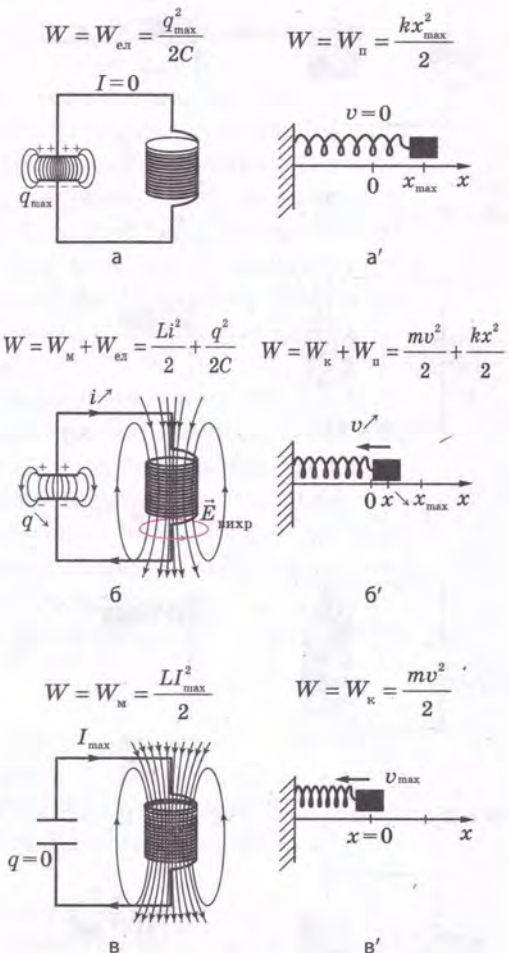
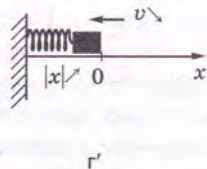
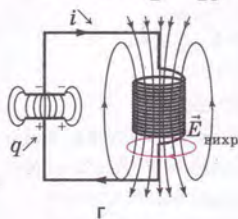


Рис. 27.3. Механізм вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі (а-з) і вільних механічних коливань тягарця на пружині (а'-з') [див. також с. 156]

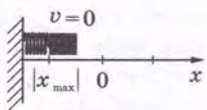
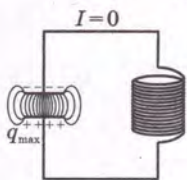


$$W = W_m + W_{\text{ел}} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} \quad W = W_k + W_n = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$$



$$W = W_{\text{ел}} = \frac{q_{\text{max}}^2}{2C}$$

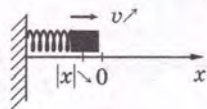
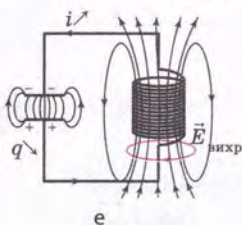
$$W = W_k = \frac{mv^2}{2}$$



а

а'

$$W = W_m + W_{\text{ел}} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} \quad W = W_k + W_n = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$$

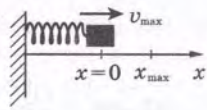
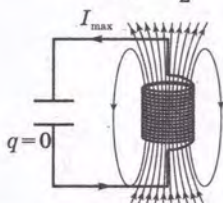


б

б'

$$W = W_m = \frac{Li^2}{2}$$

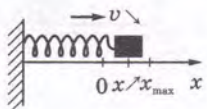
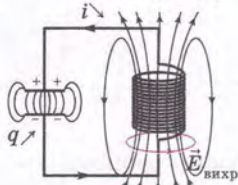
$$W = W_k = \frac{mv^2}{2}$$



в

в'

$$W = W_m + W_{\text{ел}} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} \quad W = W_k + W_n = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$$



г

г'

енергія електричного поля дорівнюватиме нулю ( $W_{\text{ел}} = 0$ ), сила струму досягне максимального значення  $I_{\text{max}}$ , а повна енергія коливального контуру дорівнюватиме:

$$W = W_{\text{м. max}} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}$$

Незважаючи на те що заряд на обкладках конденсатора перетворився на нуль, струм одразу не припиниться й не змінить свого напрямку. Як тільки сила струму в котушці почне зменшуватися, зменшиться і магнітна індукція  $B$  магнітного поля, що пронизує котушку, тому виникає вихрове електричне поле, яке в цьому випадку підтримує струм. Заряджені частинки продовжують рух у тому самому напрямку, і конденсатор *перезаряджається* — заряд на його обкладках змінюється на протилежний (рис. 27.3, б).

Отже, протягом другої чверті періоду енергія магнітного поля котушки перетворюється на енергію електричного поля конденсатора.

Конденсатор перезаряджати- меться, доки сила струму не досягне нуля ( $i = 0$ ). Енергія магнітного поля котушки в цей момент теж дорівнюватиме нулю ( $W_m = 0$ ), а енергія електричного поля конденсатора набуде максимального значення (рис. 27.3, в).

Наступну половину періоду характер зміни електричного заряду на обкладках конденсатора й характер зміни сили струму в контурі будуть такими самими, тільки у зворотному напрямку (рис. 27.3, г-з). Коли заряд на обкладках конденсатора досягне максимального значення (див. рис. 27.3, а), завершиться одне повне коливання.

Рис. 27.3. [Закінчення]



## 2 Що таке ідеальний коливальний контур

Якби не було втрат енергії, амплітуда коливань у коливальному контурі залишалася б незмінною, й коливання були б незатухаючими.

Фізична модель, що являє собою коливальний контур, у якому відсутні втрати енергії, називається **ідеальним коливальним контуром**, а коливання в ідеальному коливальному контурі — **власними коливаннями**.

Закон збереження енергії для ідеального коливального контуру можна записати так:

$$W_{\text{ел. max}} = W_{\text{ел}} + W_{\text{м}} = W_{\text{м. max}} \quad \text{або} \quad \frac{q_{\text{max}}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}.$$

## 3 Аналогія між вільними електромагнітними і механічними коливаннями

Якщо порівняти вільні електромагнітні коливання в коливальному контурі (див. рис. 27.3,  $a-z$ ) і механічні коливання тіла на пружині (див. рис. 27.3,  $a'-z'$ ), то можна помітити, що коливання різної природи підпорядковуються схожим закономірностям: за відсутності опору або тертя коливання є незатухаючими; під час коливань відбувається періодичне перетворення енергії (енергія електричного поля  $\leftrightarrow$  енергія магнітного поля; потенціальна енергія  $\leftrightarrow$  кінетична енергія); періодично змінюються значення фізичних величин, що характеризують стан коливальної системи.

Зверніть увагу: *коливання схожі за закономірностями, а не за природою*. Наприклад, якщо однією з причин механічних коливань є інертність тіла, яка характеризується його масою, то однією з причин електромагнітних коливань є вихрове електричне поле, яке характеризується ЕРС самоіндукції. *Саме завдяки вихровому полю, а не інертності електрони продовжують рух у попередньому напрямку*. Маса й вільний пробіг електронів є настільки малими, що без ЕРС самоіндукції струм практично миттєво припинився б і конденсатор ніколи б не перезарядився.

## 4 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Ідеальний коливальний контур складається з конденсатора ємністю  $0,4 \text{ мкФ}$  і котушки індуктивністю  $1,0 \text{ мГн}$ . Конденсатор зарядили до напруги  $100 \text{ В}$  і замкнули на котушку. Визначте електричну енергію, передану конденсатору, та максимальну силу струму в котушці.

$W_{\text{ел. max}}$  — ?

$I_{\text{max}}$  — ?

Дано:

$$C = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$L = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$U_{\text{max}} = 100 \text{ В}$$

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.* Скористаємося законом збереження енергії для ідеального коливального контуру:  $W_{\text{ел. max}} = W_{\text{м. max}}$ , (1)

$$\text{де } W_{\text{ел. max}} = \frac{CU_{\text{max}}^2}{2}, \text{ а } W_{\text{м. max}} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}. \quad (2)$$



З формул (1) і (2) маємо:  $I_{\max} = \sqrt{\frac{2W_{\text{м.мах}}}{L}} = \sqrt{\frac{2W_{\text{ел.мах}}}{L}}$ .

Визначимо значення шуканих величин:

$$[W_{\text{ел.мах}}] = \Phi \cdot V^2 = \frac{\kappa_{\text{л}}}{V} \cdot V^2 = \kappa_{\text{л}} \cdot V = \kappa_{\text{л}} \cdot \frac{Дж}{\kappa_{\text{л}}} = Дж,$$

$$\{W_{\text{ел.мах}}\} = \frac{0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2}{2} = 0,2 \cdot 10^{-2}, \quad W_{\text{ел.мах}} = 2 \text{ мДж};$$

$$[I_{\max}] = \sqrt{\frac{Дж}{Гн}} = \sqrt{\frac{Дж}{В \cdot \frac{с}{А}}} = \sqrt{\frac{Дж \cdot А}{\kappa_{\text{л}} \cdot с}} = \sqrt{\frac{А \cdot \kappa_{\text{л}}}{с}} = \sqrt{\frac{А \cdot А \cdot с}{с}} = А,$$

$$\{I_{\max}\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-2}}{1,0 \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{4} = 2, \quad I_{\max} = 2 \text{ А}.$$

**Відповідь:** енергія, передана конденсатору,  $W_{\text{ел.мах}} = 2$  мДж; максимальна сила струму в котушці  $I_{\max} = 2$  А.



### Підбиваємо підсумки

Коливальний контур — це фізичний пристрій, що складається з послідовно з'єднаних конденсатора й котушки індуктивності.

Якщо обкладкам конденсатора коливального контуру передати електричний заряд, то в контурі виникнуть вільні електромагнітні коливання — періодична зміна заряду на обкладках конденсатора й сили струму в котушці. Аналогічно тому, як під час вільних механічних коливань відбувається перетворення потенціальної енергії пружини на кінетичну енергію тіла і навпаки, так і під час вільних електромагнітних коливань енергія електричного поля конденсатора перетворюється на енергію магнітного поля котушки і навпаки.

Фізична модель, що являє собою коливальний контур, у якому відсутні втрати енергії, називається ідеальним коливальним контуром. Вільні електромагнітні коливання в ідеальному коливальному контурі є незатухаючими. Закон збереження енергії для ідеального коливального контуру має вигляд:

$$W_{\text{ел.мах}} = W_{\text{ел}} + W_{\text{м}} = W_{\text{м.мах}} \quad \text{або} \quad \frac{q_{\text{мах}}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_{\text{мах}}^2}{2}.$$



### Контрольні запитання

1. Назвіть основні елементи коливального контуру. 2. Опишіть процес вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі. Значення яких фізичних величин змінюються під час цього процесу? 3. Чому після повного розрядження конденсатора струм через котушку не припиняється? 4. Які перетворення енергії відбуваються під час електромагнітних коливань у коливальному контурі? 5. Що таке ідеальний коливальний контур? 6. Запишіть закон збереження енергії для ідеального коливального контуру.



### Вправа № 23

1. Ідеальний коливальний контур складається з конденсатора ємністю 1,0 мкФ і котушки індуктивністю 10 мГн. Який максимальний заряд на обкладках конденсатора, якщо максимальна сила струму в котушці становить 100 мА?



2. Максимальне (амплітудне) значення сили струму в коливальному контурі 1,2 мА, а амплітудне значення заряду на обкладках конденсатора 30 нКл. Визначте індуктивність котушки, якщо ємність конденсатора 200 пФ.
3. Конденсатор ємністю 2,0 мкФ зарядили до напруги 10 В і замкнули на котушку індуктивністю 600 мкГн. Знайдіть: а) максимальну енергію магнітного поля котушки; б) максимальну силу струму в котушці; в) силу струму в котушці в той момент, коли напруга на обкладках конденсатора зменшилась до 6,0 В.
- 4\*. Установіть, які фізичні величини, що характеризують електромагнітні коливання в коливальному контурі, аналогічні наведеним фізичним величинам, що характеризують коливання тіла на пружині. Заповніть таблицю.

Тіло на пружині	Коливальний контур	Тіло на пружині	Коливальний контур
Маса $m$		Прискорення $a = v'(t)$	
Жорсткість $k$		Коефіцієнт тертя $\mu$	
Сила $F$		Потенціальна енергія $W_n$	
Зміщення $x$		Кінетична енергія $W_k$	
Швидкість $v = x'(t)$			

## § 28. ПЕРІОД ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ У КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ



Абсолютна шкала температур, поширення хвиль по поверхні рідини, гравітаційний розігрів зір, електромагнітні коливання, вдосконалений морський компас, ехолот безперервної дії, кабель, точний гальванометр. І десятирічний студент університету. Ви, напевно, вже здогадалися, що все це поєднує одне ім'я — Вільям Томсон (лорд Кельвін). У 1853 р. Вільям Томсон вивів формулу залежності періоду власних коливань контуру від його ємності та індуктивності. Цю формулу будемо виводити й ми.



### 1 Як розрахувати період власних коливань коливального контуру

Оскільки коливання — періодичні процеси, однією з основних фізичних величин, що їх характеризують, є період. Нагадаємо, що період коливань тіла на пружині обчислюється за формулою:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Якщо ви правильно склали таблицю аналогій (вправа № 23, завдання 4), то отримали, що маса  $m$  тіла в механічній коливальній системі аналогічна індуктивності  $L$  котушки, а жорсткість  $k$  пружини — величині, оберненій до ємності конденсатора, тобто  $\frac{1}{C}$ . Отже, скориставшись методом аналогій, можемо записати формулу для розрахунку періоду власних електромагнітних коливань у коливальному контурі — формулу Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$



## 2 Чому формула Томсона є наслідком закону збереження енергії

Доведемо, що формула Томсона, яку ми отримали методом аналогій, є справедливою. Скористаємось такими фактами.

1) За означенням сила струму дорівнює швидкості зміни заряду:

$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ . Сила струму в коливальному контурі постійно змінюється, тому в даний момент часу  $t$  сила струму дорівнює:  $i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'(t)$ .

Відповідно, швидкість зміни сили струму дорівнює:  $i'(t) = q''(t)$ .

2) Коливальний контур ідеальний, тому його повна енергія не змінюється з часом:  $\frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \text{const}$ .

Знайдемо похідні від правої й лівої частин останнього рівняння:

$\left(\frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}\right)' = (\text{const})'$ . Скориставшись правилами знаходження похідних, отримаємо:

$$\frac{1}{2C}(q^2)' + \frac{L}{2}(i^2)' = 0 \Rightarrow \frac{1}{2C}(2q \cdot q') + \frac{L}{2}(2i \cdot i') = 0 \Rightarrow \frac{1}{C} \cdot q \cdot q' + L \cdot i \cdot i' = 0.$$

Враховуючи, що  $i = q'$ , а  $i' = q''$ , маємо:

$$\frac{1}{C} \cdot q \cdot q' + L \cdot q' \cdot q'' = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{C} \cdot q + L \cdot q'' = 0.$$

Звідси:

$$q'' = -\frac{1}{CL} \cdot q. \quad (1)$$

Рівняння (1) є диференціальним рівнянням другого порядку, розв'язком якого, як відомо з математики, є функція косинуса (синуса). Дійсно, якщо  $q = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ , то  $q' = -q_{\max} \omega \sin(\omega t + \varphi_0)$ , а  $q'' = -q_{\max} \omega \cdot \omega \cos(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ , тобто

$$q'' = -\omega^2 q. \quad (2)$$

Таким чином, заряд на обкладках конденсатора ідеального коливального контуру змінюється за гармонічним законом, і рівняння коливань заряду має вигляд:

$$q = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

де  $q_{\max}$  — амплітудне значення заряду на обкладках конденсатора;  $\omega$  — циклічна частота коливань;  $\varphi_0$  — початкова фаза коливань.

Порівнюючи вирази (1) і (2), маємо:  $\omega^2 = \frac{1}{CL}$ , тобто  $\omega = \frac{1}{\sqrt{CL}}$ .

Оскільки період коливань  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , то одержимо **формулу Томсона**:

$$T = 2\pi\sqrt{CL}$$



Зверніть увагу:

1) якщо в момент початку спостереження заряд на обкладках конденсатора максимальний, то рівняння коливань заряду має вигляд  $q = q_{\max} \cos \omega t$ , а графік коливань заряду являє собою косинусоїду (рис. 28.1);

2) сила струму пов'язана із зарядом на обкладках конденсатора співвідношенням:

$$\begin{aligned} i(t) &= q'(t) = -q_{\max} \omega \sin \omega t = -I_{\max} \sin \omega t = \\ &= I_{\max} \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned}$$

де  $I_{\max} = q_{\max} \omega$  — амплітудне значення сили струму в контурі.

Коливання сили струму в контурі випереджають коливання заряду на обкладках конденсатора на фазу  $\frac{\pi}{2}$ , тобто на чверть пе-

ріоду  $\left( \varphi = \omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \right)$  (див. рис. 28.1).

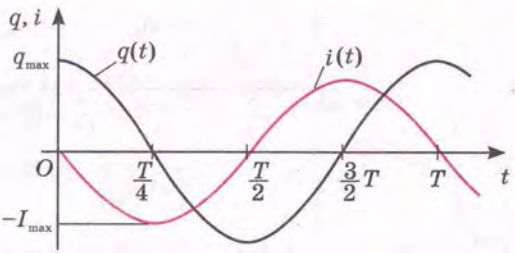


Рис. 28.1. Графіки електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі:  $q(t)$  — графік залежності заряду на обкладках конденсатора від часу;  $i(t)$  — графік залежності сили струму в контурі від часу

### ★ 3 Яким є період вільних коливань у реальному коливальному контурі

У реальних коливальних контурах завжди є певні втрати енергії.

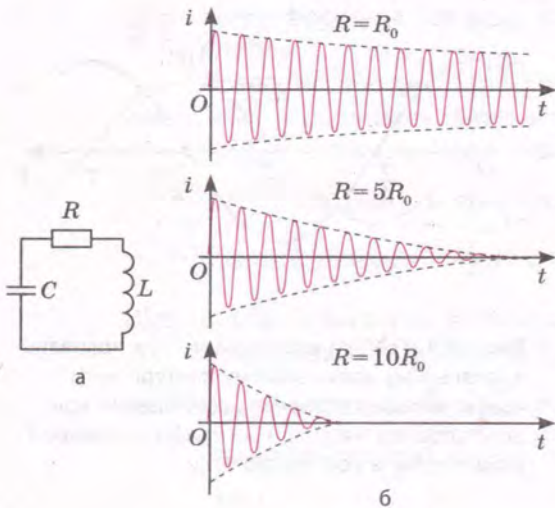
1) Енергія витрачається на нагрівання провідників під час проходження струму. Чим вищою є частота електромагнітних коливань у контурі, тим сильніше нагріваються провідники. Річ у тім, що для змінного струму має місце так званий *скін-ефект*: струм високої частоти проходить не по всьому об'єму провідника, а тільки по тонкому шару на його поверхні, у результаті площа перерізу, по якому йде струм, зменшується, і опір зростає. Чим вищою є частота, тим тонший робочий шар.

2) Діелектрик між обкладками конденсатора теж нагрівається, оскільки змінне електричне поле викликає коливання молекул діелектрика. До того ж діелектрики не є ідеальними ізоляторами, тому конденсатор частково розряджається не через котушку, а безпосередньо через діелектрик.

3) Нагріваються феромагнітні осердя, що їх використовують для збільшення індуктивності котушок, оскільки в них виникають струми Фуко. Деяка частина енергії витрачається і на перемагнічування осердь.

4) Енергія витрачається на випромінювання електромагнітних хвиль.





**Рис. 28.2.** Затухаючі електромагнітні коливання в реальному коливальному контурі: а — електрична схема; б — графіки залежності сили струму від часу  $i(t)$ : чим більший опір  $R$  контуру, тим швидше затухають коливання

Усі ці втрати умовно вважають втратами в деякому активному опорі  $R$  (рис. 28.2, а). Наявність активного опору приводить до того, що амплітуда сили струму в контурі поступово зменшується і коливання припиняються. Таким чином, *вільні електромагнітні коливання в реальному коливальному контурі є затухаючими* (рис. 28.2, б). Якщо опір  $R$  великий, то коливання навіть не почнуться.

Використовуючи елементи математичного аналізу, можна довести, що для затухаючих електромагнітних коливань формула Томсона набуває вигляду:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}$$

Отже, чим більше активний опір  $R$  контуру, тим більшим є період коливань.★

**4 Учимся розв'язувати задачі**

**Задача.** Максимальна напруга на обкладках конденсатора ідеального коливального контуру досягає 1,0 кВ. Визначте період електромагнітних коливань у контурі, якщо за амплітудного значення сили струму 1,0 А енергія магнітного поля в контурі становить 1,0 мДж.

$T$  — ?

Дано:

$U_{\max} = 1,0 \cdot 10^3$  В

$I_{\max} = 1,0$  А

$W_{\text{м.макс}} = 1,0 \cdot 10^{-3}$  Дж

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Для визначення періоду електромагнітних коливань скористаємося формулою Томсона  $T = 2\pi\sqrt{CL}$  і законом збереження енергії:

$$W_{\text{ел.макс}} = W_{\text{м.макс}} \quad (*)$$

Оскільки  $W_{\text{ел.макс}} = \frac{CU_{\max}^2}{2}$ , а  $W_{\text{м.макс}} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$ , то, перемноживши ці рівності та враховуючи рівність (\*), отримаємо:

$$W_{\text{ел.макс}} \cdot W_{\text{м.макс}} = \frac{CU_{\max}^2}{2} \cdot \frac{LI_{\max}^2}{2} \text{ або } W_{\text{м.макс}}^2 = \frac{CLU_{\max}^2 I_{\max}^2}{4}$$

Звідси  $CL = \frac{4W_{\text{м.макс}}^2}{U_{\max}^2 I_{\max}^2}$ , отже,  $\sqrt{CL} = \frac{2W_{\text{м.макс}}}{U_{\max} I_{\max}}$ .

Остаточнo маємо:  $T = 4\pi \frac{W_{\text{м.макс}}}{U_{\max} I_{\max}}$ .



Визначимо значення шуканої величини:

$$[T] = \frac{Дж}{В \cdot А} = \frac{Дж \cdot Кл}{Дж \cdot А} = \frac{А \cdot с}{А} = с; \{T\} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 10^3 \cdot 1,0} \approx 13 \cdot 10^{-6}, T = 13 \text{ мкс.}$$

**Відповідь:** період електромагнітних коливань у контурі  $T = 13$  мкс.



### Підбиваємо підсумки

Заряд на обкладках конденсатора ідеального коливального контуру змінюється за гармонічним законом:  $q = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$ . Коливання сили струму в контурі випереджають за фазою коливання заряду на обкладках конденсатора на фазу  $\frac{\pi}{2}$ :  $i(t) = q'(t) = -I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0)$ .

Період власних електромагнітних коливань у коливальному контурі визначається за формулою Томсона:  $T = 2\pi\sqrt{CL}$ .

★ За наявності опору формула Томсона набуває вигляду:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \star$$



### Контрольні запитання

- Отримайте формулу Томсона, скориставшись механічною аналогією електромагнітних коливань.
- Отримайте формулу Томсона, скориставшись законом збереження енергії.
- Запишіть рівняння залежності  $q(t)$  для ідеального коливального контуру. Назвіть фізичні величини, що входять у рівняння.
- Отримайте рівняння залежності  $i(t)$ .
- Який вигляд має графік коливань: заряду на обкладках конденсатора? сили струму в контурі? ★
- Чому електромагнітні коливання в реальному коливальному контурі є згасаючими? ★
- Запишіть формулу для визначення періоду вільних електромагнітних коливань у реальному коливальному контурі.



### Вправа № 24

- Чи зміняться, і якщо зміняться, то як, період і частота вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, опір якого є нехтовно малим, якщо ємність конденсатора збільшити у 2 рази, а індуктивність котушки зменшити у 8 разів? ★ Чи зміниться результат, якщо опором контуру знехтувати не можна?
- Чому дорівнює період власних електромагнітних коливань у коливальному контурі, індуктивність якого дорівнює 1,5 мГн, а ємність — 15 мкФ? Як зміниться результат, якщо приєднати ще три такі самі конденсатори: а) паралельно конденсатору; б) послідовно з конденсатором?
- Електричний заряд на обкладках конденсатора коливального контуру змінюється за законом:  $q = 0,01 \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot 10^6 t\right)$ . Ємність конденсатора 400 пФ. Визначте: 1) початкову фазу й циклічну частоту коливань у контурі; 2) період і частоту коливань; 3) амплітудні значення заряду та сили струму; 4) індуктивність котушки; 5) енергію електричного поля конденсатора та енергію магнітного поля котушки через  $t = 2$  мкс після початку спостереження.



## § 29. ОБЕРТАННЯ РАМКИ В ОДНОРІДНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ. ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ



Коли ви вмикаєте вдома світло, кімната осягається рівним яскравим світлом. Навіть якщо придивитися до волоска лампи розжарювання, то не помітно, що його світіння змінюється. Чому ж струм, який іде по волоску розжарювання лампи, ми називаємо змінним?

1

### Змінний електричний струм

**Вимушені електромагнітні коливання** — незатухаючі коливання заряду, напруги, сили струму й інших фізичних величин, викликані електрорушійною силою, що періодично змінюється:

$$e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

де  $e$  — значення ЕРС у даний момент часу (миттєве значення ЕРС);  $\mathcal{E}_{\max}$  — амплітудне значення ЕРС;  $\omega$  — циклічна частота змінної ЕРС (рис. 29.1).

Яскравим прикладом вимушених коливань є *змінний електричний струм*.

**Змінний електричний струм** — електричний струм, сила якого змінюється за гармонічним законом:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

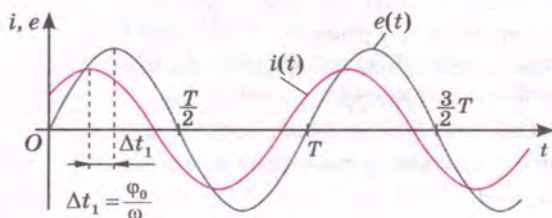


Рис. 29.1. Графіки залежності від часу змінної ЕРС  $e(t)$  та сили змінного струму  $i(t)$ .  $\varphi_0$  — зсув фаз між коливаннями сили струму та ЕРС

де  $i$  — миттєве значення сили струму;  $I_{\max}$  — амплітудне значення сили струму;  $\omega$  — циклічна частота змінного струму, що збігається з частотою змінної ЕРС;  $\varphi_0$  — зсув фаз між коливаннями струму та ЕРС.

На відміну від постійного, змінний струм увесь час періодично змінює своє значення й напрямок (див. рис. 29.1).

2

### Як одержати змінну ЕРС

Джерело електричної енергії, що створює ЕРС, яка періодично змінюється, називають **генератором змінного струму**.

Генератором змінного струму може слугувати, наприклад, дрітjana рамка, яка обертається в однорідному магнітному полі індукцією  $\vec{B}$  з деякою постійною кутовою швидкістю  $\omega$  (рис. 29.2, а). Доведемо, що за цих умов у рамці індукватиметься змінна ЕРС, що буде змінюватися за гармонічним законом.

За означенням магнітний потік  $\Phi$ , що пронизує рамку, обчислюється за формулою:

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



Нехай у момент початку відліку часу  $t_1$  площина рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції (рис. 29.2, а, положення 1), тобто кут між нормаллю до площини рамки та вектором магнітної індукції дорівнює нулю ( $\alpha_0 = 0$ ). Якщо рамку обертати в магнітному полі, то кут  $\alpha$  буде змінюватися за законом:  $\alpha = \omega t$ . Отже, відповідно змінюватиметься і магнітний потік:

$$\Phi = BS \cos \omega t.$$

Згідно із законом Фарадея в рамці виникне ЕРС індукції:

$$e(t) = -\Phi'(t) = -(BS \cos \omega t)' = -(-BS\omega \sin \omega t) = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

де  $\mathcal{E}_{\max} = BS\omega$  — амплітудне значення ЕРС індукції.

ЕРС індукції досягатиме максимального значення в моменти часу  $t_2$  і  $t_4$ , коли рамка буде розташована вздовж ліній магнітної індукції, тобто  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 29.2, а, положення 2 і 4), і перетворюватиметься на нуль у моменти часу  $t_1, t_3, t_5$ , коли рамка буде перпендикулярною до ліній магнітної індукції, тобто  $\alpha = 0$  (рис. 29.2, а, положення 1, 3, 5).

Якщо рамка містить не один, а  $N$  витків дроту, то ЕРС індукції дорівнюватиме:

$$e(t) = -N\Phi'(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

де  $\mathcal{E}_{\max} = NBS\omega$  — амплітудне значення ЕРС.

### 3 Як одержати змінний струм

Якщо до дротяної рамки, що обертається в магнітному полі, за допомогою спеціальних контактів підключити активне навантаження (наприклад, лампу розжарювання), то електричне коло буде замкнено, і в колі виникне змінний електричний струм. Джерелом струму в колі слугуватиме обертова рамка, а споживачем — лампа.

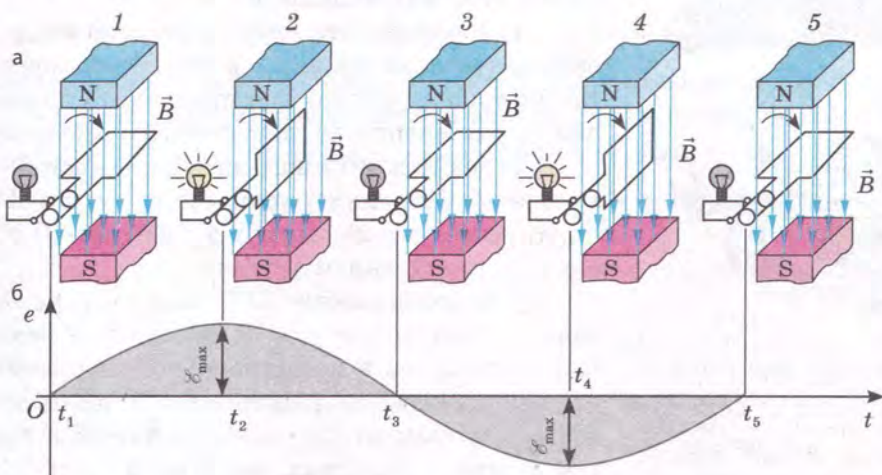


Рис. 29.2. Створення змінної ЕРС індукції в рамці, яка обертається у магнітному полі постійного магніту: а — зміна магнітного потоку, що пронизує рамку; б — графік залежності ЕРС від часу  $e(t)$



Згідно із законом Ома сила струму в лампі змінюватиметься за законом:

$$i(t) = \frac{e}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_{\max} \sin \omega t}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t,$$

де  $R$  — опір активного навантаження,  $r$  — опір джерела (рамки),

$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r}$  — амплітудне значення сили струму.

Оскільки струм змінний, волосок лампи має розжарюватись періодично. Однак, якщо частота зміни струму є досить великою, око людини не буде вловлювати змін розжарення, що ми й спостерігаємо в побутовій електричній мережі.

Зверніть увагу: в колах, що містять ємність та індуктивність, фази коливань сили струму та ЕРС не збігаються (див. рис. 29.1), тому в загальному випадку миттєве значення сили струму обчислюється за формулою:

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0).$$

#### 4 Генератори змінного струму

Найпростіший індукційний генератор змінного струму (рис. 29.3) являє собою металеве осердя, в пази якого вкладено обмотку. Кінці обмотки з'єднані з кільцями, до кожного з яких притиснута щітка для відведення напруги до споживача.

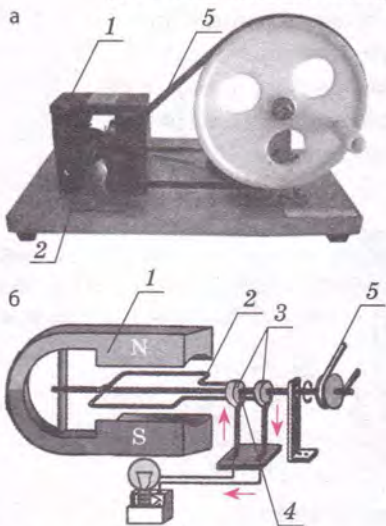


Рис. 29.3. Зовнішній вигляд (а) і будова (б) найпростішого генератора змінного струму: 1 — постійний магніт (електромагніт), який слугує статором; 2 — обертова дрютяна рамка, яка слугує ротором; 3 — кільця; 4 — щітки; 5 — ремінь приводу

Осердя з обмоткою обертається в магнітному полі нерухомого постійного магніту або електромагніту. Обертову частину генератора називають *ротором*, нерухому частину — *статором*.

Однак генератор такої конструкції має низку суттєвих недоліків:

1) у разі зняття струмів високої напруги виникає сильне іскріння в рухливих контактах (кільце — щітка), що призводить до значних втрат енергії та передчасного зношення;

2) частота змінного струму є досить великою (у більшості країн світу  $\nu = 50$  Гц), отже, ротор має обертатися з частотою 50 об/с, що важко здійснити технічно.

Для одержання ЕРС індукції не має значення, що слугуватиме ротором — рамка, яка обертається в магнітному полі нерухомого електромагніту, чи електромагніт, який обертається всередині нерухомої рамки. І в тому, і в іншому випадках магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється. Проте сила струму в обмотках електромагніту значно менша за силу струму, який віддає генератор



у зовнішнє коло. Тому в сучасних потужних генераторах (рис. 29.4) ротором є електромагніт, що являє собою великий циліндр, у пази якого вкладено обмотку. До обмотки ротора через колектор подається напруга від джерела постійного струму — збуджувача. Обмотки статора, в яких створюється ЕРС індукції, вкладають у пази нерухомого порожнистого важкого металевго циліндра, виготовленого, як і осердя електромагніту, з листової сталі (для зменшення струмів Фуко). Обмотку статора легко ізолювати, від неї простіше відвести значний струм у зовнішнє коло.

Швидкість обертання ротора можна зменшити, якщо використати електромагніт, що має декілька пар магнітних полюсів. Частота  $\nu$  змінного струму, який виробляє генератор, пов'язана з частотою обертання ротора генератора  $\nu_{\text{мех}}$  співвідношенням:

$$\nu = p \nu_{\text{мех}},$$

де  $p$  — кількість пар магнітних полюсів генератора.

### 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Рамка площею  $100 \text{ см}^2$ , що містить 60 витків проводу, рівномірно обертається з частотою  $120 \text{ об/хв}$  в однорідному магнітному полі індукцією  $0,025 \text{ Тл}$ . У момент початку відліку часу площина рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції. а) Запишіть рівняння залежності магнітного потоку, який пронизує рамку, від часу; б) визначте значення ЕРС індукції в рамці через  $\frac{1}{24}$  с після початку спостереження; в) знайдіть максимальну силу струму в рамці, якщо рамка приєднана до активного навантаження опором  $25 \text{ Ом}$ , а опір рамки  $5 \text{ Ом}$ .

$\Phi(t) - ?$

$e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) - ?$

$I_{\text{max}} - ?$

Дано:

$S = 0,01 \text{ м}^2$

$N = 60$

$n = 2 \text{ с}^{-1}$

$B = 0,025 \text{ Тл}$

$t = \frac{1}{24} \text{ с}$

$R = 25 \text{ Ом}$

$r = 5 \text{ Ом}$

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання*

а) Під час обертання рамки магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за законом:  $\Phi(t) = BS \cos \omega t$ , де  $\omega = 2\pi n$  — кутова швидкість обертання рамки.

б) Внаслідок зміни магнітного потоку в рамці виникає ЕРС індукції:  $e(t) = -N\Phi'(t)$ . Миттєве значення ЕРС можна знайти, підставивши в рівняння залежності  $e(t)$  відповідне значення  $t$ .

в) Згідно із законом Ома максимальне значення сили індукційного струму дорівнює:  $I_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{max}}}{R+r}$ .

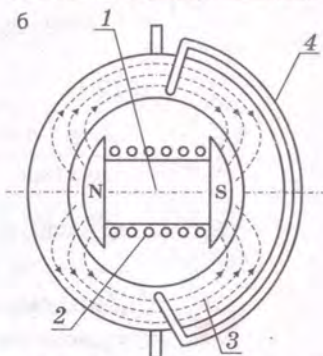


Рис. 29.4. Зовнішній вигляд турбогенератора (а) і структурна схема чотириполюсного генератора (б): 1 — осердя ротора; 2 — обмотка ротора; 3 — осердя статора; 4 — обмотка статора



Визначимо значення шуканих величин:

$$[\omega] = \text{с}^{-1}; \quad \{\omega\} = 2\pi \cdot 2 = 4\pi, \quad \omega = 4\pi \text{ с}^{-1};$$

$$[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб}, \quad \Phi(t) = 0,025 \cdot 0,01 \cos 4\pi t = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t \text{ (Вб)};$$

$$e(t) = -60 \cdot (2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t)' = 60 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 4\pi \cdot \sin 4\pi t \approx 0,19 \sin 4\pi t \text{ (В)};$$

$$e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) = 0,19 \sin\left(4\pi \cdot \frac{1}{24}\right) = 0,19 \sin \frac{\pi}{6} = 0,19 \cdot 0,5 = 0,095 \text{ (В)},$$

$$\mathcal{E}_{\max} = 0,19 \text{ В};$$

$$[I_{\max}] = \frac{\text{В}}{O_{\text{М}} + O_{\text{М}}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = \text{А}; \quad \{I_{\max}\} = \frac{0,19}{25+5} \approx 0,006, \quad I_{\max} = 0,006 \text{ А} = 6 \text{ мА}.$$

$$\text{Відповідь: а) } \Phi(t) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t \text{ (Вб); б) } e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) = 0,095 \text{ В; в) } I_{\max} = 6 \text{ мА}.$$



### Підбиваємо підсумки

Вимушеними електромагнітними коливаннями називають незатухаючі коливання напруги та сили струму в колі, викликані ЕРС, що змінюється періодично:  $e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$ . Прикладом вимушених електромагнітних коливань є змінний електричний струм, сила якого змінюється за гармонічним законом:  $i = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0)$ .

У провідній рамці площею  $S$ , яка обертається в однорідному магнітному полі індукцією  $B$  з деякою постійною кутовою швидкістю  $\omega$ , індукується змінна ЕРС:  $e(t) = -N\Phi'(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$ , де  $N$  — кількість витків у рамці.

Якщо до обертової рамки приєднати активне навантаження опором  $R$ , то в колі виникне змінний електричний струм:

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t, \quad \text{де } r \text{ — опір рамки.}$$

Змінний електричний струм виробляють генератори змінного струму — джерела електричної енергії, які створюють ЕРС, що періодично змінюється.



### Контрольні запитання

1. Дайте визначення вимушених електромагнітних коливань.
2. Який струм називається змінним?
3. Чому в рамці, що обертається в магнітному полі, виникає змінна ЕРС?
4. Чи залежить, і якщо залежить, то як, максимальне значення змінної ЕРС від кутової швидкості обертання рамки? площі рамки? кількості витків у рамці? опору рамки?
5. Чому в рамці, якщо її замкнути, виникає струм? Від яких чинників залежить сила цього струму? Що в такому колі є джерелом струму?
6. Опишіть будову найпростішого генератора змінного струму. Чому такі типи генераторів не набули широкого застосування?
7. Опишіть будову й основні особливості сучасних генераторів змінного струму.



### Вправа № 25

1. У момент часу, коли площа рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції, магнітний потік, що пронизує рамку, є максимальним. Чому ж у цей момент ЕРС індукції дорівнює нулю?



2. У рамці, що має 50 витків проводу й рівномірно обертається в однорідному магнітному полі, потік магнітної індукції змінюється за законом:  $\Phi(t) = 2,0 \cdot 10^{-3} \cos 314t$ . Рамка опором 2 Ом замкнена на активний опір 10 Ом. Запишіть рівняння залежностей  $e(t)$  та  $i(t)$ . Знайдіть: а) значення ЕРС в рамці через 5,0 мс після початку спостереження; б) максимальну силу струму в рамці; в) силу струму через 1,0 мс після початку спостереження.
3. Дротяна прямокутна рамка розмірами  $20 \times 30$  см, що має 20 витків мідного дроту діаметром 1 мм, перебуває в однорідному магнітному полі індукцією 0,5 Тл. Рамку замикають на резистор опором 6,6 Ом і надають обертання з частотою 10 об/с. Визначте максимальну силу струму, що виникає в рамці.
4. Скільки пар магнітних полюсів мають ротори генераторів Дніпрогесу, якщо, здійснюючи 83,3 об/хв, вони виробляють струм стандартної частоти (50 Гц)?
- 5\*. Складіть план проведення експерименту з визначення магнітної індукції поля, в якому обертається рамка зі струмом.

## § 30. АКТИВНИЙ ОПІР У КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ. ДІЮЧІ ЗНАЧЕННЯ СИЛИ СТРУМУ Й НАПРУГИ



Миттєве значення сили змінного струму постійно змінюється — періодично перетворюється на нуль, періодично досягає максимуму. Чому ж тоді ми кажемо, наприклад: «Сила струму в спіралі електричної лампи 0,27 А» або «Сила струму в нагрівальному елементі праски 7,3 А»? З'ясуємо, про яке ж значення змінного струму йдеться.

### 1 Який опір називають активним

Вивчаючи постійний струм, ви дізналися, що всі провідники (за винятком надпровідників) мають електричний опір. Провідники чинять опір і змінному струму, однак у колах змінного струму, на відміну від постійного, існують різні види опорів, які відрізняються своєю фізичною природою. Їх можна поділити на дві групи — *активні* і *реактивні* опори.

Елемент електричного кола має **активний опір**  $R$ , якщо під час проходження по ньому електричного струму частина електричної енергії перетворюється на внутрішню:  $Q = I^2 R t$ .

Будь-який елемент електричного кола змінного струму (з'єднувальні проводи, нагрівальні елементи, обмотки двигунів, генераторів і трансформаторів та ін.), як і у випадку постійного струму, має активний опір (ми називали його просто опір).

Нехай електричне коло складається зі з'єднувальних проводів, навантаження з малою індуктивністю і значним активним опором  $R$  та джерела змінного струму (рис. 30.1, а), напруга на виході якого змінюється за гармонічним законом:

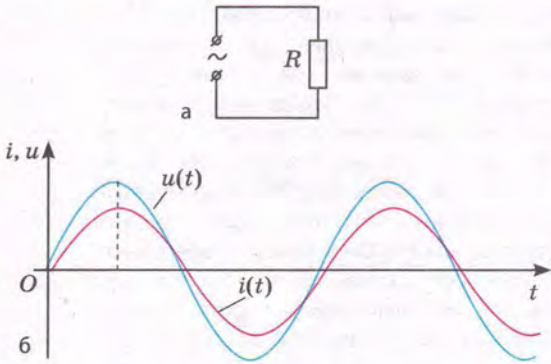
$$u(t) = U_{\max} \sin \omega t.$$

Згідно із законом Ома сила струму в колі теж змінюється за гармонічним законом:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{U_{\max} \sin \omega t}{R} = I_{\max} \sin \omega t,$$

де  $I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}$ .





**Рис. 30.1.** Активний опір у колі змінного струму: а — електрична схема кола; б — графіки залежностей від часу сили струму  $i(t)$  та напруги  $u(t)$ . Сила струму і напруга одночасно досягають максимальних значень і одночасно перетворюються на нуль

В елементах електричного кола, що мають тільки активний опір, коливання сили струму і напруги збігаються за фазою (рис. 30.1, б).

**2 Як визначити діючі значення сили струму й напруги**

Оцінювати дію змінного струму за миттєвим значенням сили струму незручно — вона безперервно змінюється. Не можна для цього використати й середнє значення сили струму, оскільки її середнє за період значення дорівнює нулю (див. рис. 30.1, б). Тому дію змінного струму прийнято оцінювати за діючим значенням сили струму.

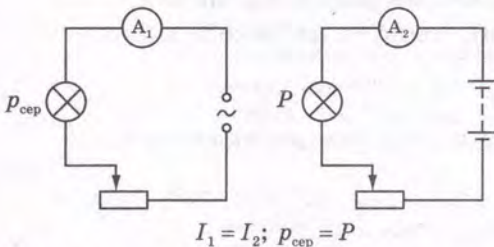
**Діюче значення сили змінного струму  $I$**  дорівнює силі такого постійного струму, який протягом певного часу виділяє в провіднику таку саму кількість теплоти, що й даний змінний струм.

Припустимо, що ми маємо дві однакові лампи опором  $R$  кожна. Одну з ламп приєднали до джерела постійного струму, другу — до джерела змінного струму (рис. 30.2). Якщо сила постійного струму дорівнює діючому значенню сили змінного струму, то обидві лампи світитимуть з однаковим розжаренням. Це означає, що *середнє значення потужності змінного струму дорівнює потужності постійного струму*:  $p_{\text{сеп}} = P$ .

Потужність постійного струму можна обчислити за формулою:  $P = I^2 R$ .

Знайдемо середнє значення потужності змінного струму. На нескінченно малому проміжку часу силу струму можна вважати незмінною, тому миттєву потужність також можна обчислити за формулою:  $p = i^2 R$ , де  $i = I_{\text{max}} \sin \omega t$ . Звідси

$$p = I_{\text{max}}^2 R \sin^2 \omega t = I_{\text{max}}^2 R \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2} - \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2} \cos 2\omega t.$$



**Рис. 30.2.** До введення поняття «діюче значення сили струму»

Із графіка залежності миттєвої потужності змінного струму від часу (рис. 30.3) бачимо, що середнє за період значення потужності дорівнює:

$$P_{\text{сеп}} = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2}.$$

Оскільки  $P = p_{\text{сеп}}$ , маємо:

$$I^2 R = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2}.$$



Звідси діюче значення сили змінного струму дорівнює:

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

Аналогічно діюче значення змінної напруги дорівнює:

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

На практиці для характеристики параметрів змінного струму використовують саме діючі значення сили струму й напруги.

Наприклад, коли кажуть, що напруга в мережі змінного струму становить 220 В, а сила струму в колі 25 А, це означає, що діюче значення напруги в мережі 220 В, а діюче значення сили струму дорівнює 25 А. Амперметри і вольтметри змінного струму вимірюють саме діючі значення сили струму й напруги.

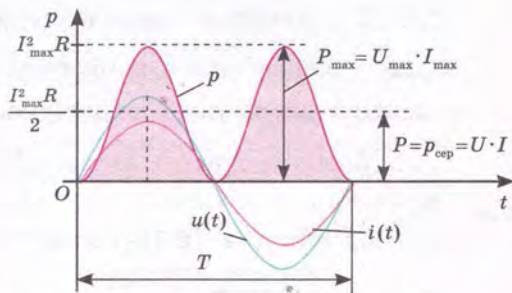


Рис. 30.3. Активний опір у колі змінного струму: графік залежності потужності (активної) від часу  $p(t)$

### 3 Реактивний опір у колі змінного струму

Конденсатор і котушка індуктивності, введені в коло змінного струму, чинять додатковий опір струму. Цей опір називається *реактивним*, оскільки на його додання не витрачається енергія джерела. Чверть періоду котушка й конденсатор забирають енергію від джерела, наступну чверть періоду повертають енергію до джерела.

**Індуктивний опір провідника  $X_L$**  — це фізична величина, що характеризує опір провідника електричному струму, викликаний дією ЕРС самоіндукції:  $X_L = \omega L$ , де  $\omega$  — циклічна частота змінного струму;  $L$  — індуктивність провідника.

**Ємнісний опір  $X_C$**  — це фізична величина, що характеризує здатність конденсатора протидіяти змінному струму:  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ , де  $\omega$  — циклічна частота змінного струму;  $C$  — ємність конденсатора.

**Повний опір кола**, що містить активний, індуктивний і ємнісний опори, обчислюють за формулою:  $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ .

Різницю  $\omega L - \frac{1}{\omega C}$  називають *реактивним опором*.

Якщо до кола змінного струму приєднана *тільки котушка індуктивності* з дуже малим активним опором, а ємність відсутня, то внаслідок дії вихрового електричного поля сила струму відстає за фазою від напруги на  $\frac{\pi}{2}$ .

Якщо до кола змінного струму приєднаний *тільки конденсатор*, а активний опір є нехтовно малим, сила струму випереджає за фазою напругу на  $\frac{\pi}{2}$ .



У загальному випадку зсув фаз  $\varphi$  між силою струму та напругою визначається за формулою:  $\cos\varphi = \frac{R}{Z}$ , де  $R$  і  $Z$  — активний і повний опори кола відповідно.

Зверніть увагу: якщо  $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ , то сила струму відстає за фазою від напруги ( $\varphi < 0$ ); якщо  $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ , то сила струму випереджає за фазою напругу ( $\varphi > 0$ ).

Активна потужність  $P$  змінного струму залежить від діючих значень сили струму  $I$  і напруги  $U$  та від різниці фаз між силою струму і напругою:  $P = UI \cos\varphi$ , де  $\cos\varphi$  — коефіцієнт потужності. ★

### ! Підбиваємо підсумки

Елемент електричного кола має активний опір  $R$ , якщо під час проходження по ньому електричного струму частина електричної енергії перетворюється на внутрішню:  $Q = I^2 R t$ .

Якщо електричне коло має тільки активний опір  $R$ , а напруга на виході джерела струму змінюється за гармонічним законом  $u = U_{\max} \sin \omega t$ , то сила струму в колі теж змінюється за гармонічним законом:  $i = I_{\max} \sin \omega t$ , де  $I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}$ . При цьому коливання сили струму і напруги збігаються за фазою.

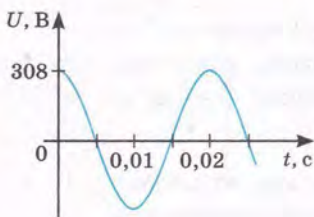
Оцінювати дію змінного струму прийнято за діючими значеннями сили струму і напруги:  $I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$ ,  $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$ .

### ? Контрольні запитання

1. Які основні види опорів існують у колах змінного струму? Дайте їхні визначення. 2. Як пов'язані сила струму і напруга в колі з активним опором? 3. Що називають діючим значенням сили струму? 4. Як розрахувати діючі значення сили струму й напруги? ★ 5. Наведіть формулу для розрахунку індуктивного опору. Від яких чинників він залежить? ★ 6. Дайте визначення ємнісного опору. Від яких чинників він залежить? ★ 7. Чому дорівнює різниця фаз за наявності тільки індуктивного опору? тільки ємнісного опору? ★ 8. Чому дорівнює повний опір кола? ★ 9. Як розрахувати потужність у колі змінного струму?

### ✎ Вправа № 26

- В освітлювальних колах змінного струму застосовують напруги 220 В і 127 В. На які напруги має бути розрахована ізоляція в цих колах?
- На ділянці кола з активним опором 900 Ом сила струму змінюється за законом:  $i = 0,5 \sin 100\pi t$  (А). Визначте: діючі значення сили струму й напруги; потужність, яка виділяється на ділянці; напругу, на яку має бути розрахована ізоляція провідів. Запишіть рівняння залежності  $u(t)$ .
- На рисунку наведено графік залежності напруги в мережі від часу. За який час закипить вода в чайнику, що містить 1,5 л води, якщо опір нагрівального елемента чайника 20 Ом, ККД чайника 72 %, а початкова температура води 20 °С?





## § 31. ВИМУШЕНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ В КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ. РЕЗОНАНС



У курсі фізики 10-го класу ви вже ознайомились із проявом резонансу в механіці. Збіг законів, що описують механічні та електромагнітні коливання, дозволяє зробити висновок, що резонанс можливий і в електричному колі, підключеному до джерела зовнішньої напруги, що періодично змінюється. Про те, коли і як проявляється резонанс в електромагнітних коливальних системах, ви дізнаєтесь із цього параграфа.



### Які умови виникнення резонансу в електричному колі

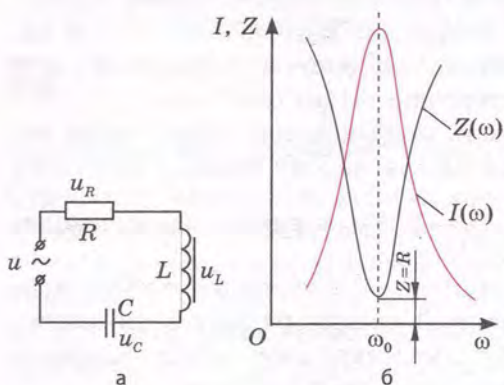
Складемо електричне коло з послідовно з'єднаних конденсатора й котушки індуктивності. Як вам уже відомо, в такій системі можуть існувати *вільні затухаючі електромагнітні коливання*, власна частота яких визначається за формулою Томсона:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

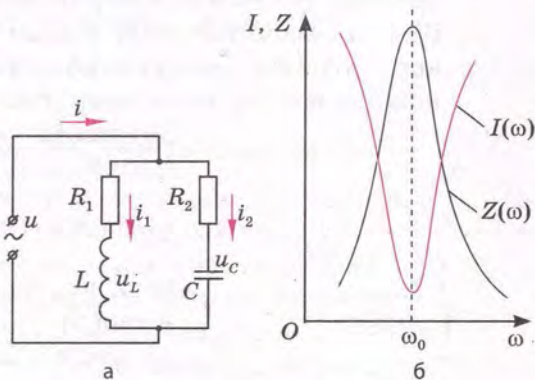
З'єднаємо систему з джерелом змінної напруги, наприклад генератором. ЕРС генератора створюватиме в контурі змінний електричний струм, частота якого збігатиметься з частотою зміни ЕРС, отже, в контурі виникнуть *вимушені електромагнітні коливання*.

Якщо змінювати ємність конденсатора або індуктивність котушки, змінюючи тим самим власну частоту коливань системи, то можна помітити, що:

1) у разі наближення власної частоти коливальної системи до частоти зміни зовнішньої ЕРС амплітуда вимушених коливань сили струму у проводах, що ведуть до генератора, буде *збільшуватись*, якщо генератор підключено до системи *послідовно* (рис. 31.1), і *зменшуватись* у випадку *паралельного підключення* генератора (рис. 31.2);

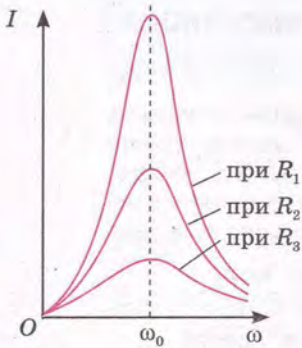


**Рис. 31.1.** Резонанс напруг: а — електрична схема кола; б — графіки залежностей діючого значення сили струму  $I$  в підвідних проводах та повного опору кола  $Z$  від циклічної частоти  $\omega$  зміни напруги на джерелі струму.  $\omega_0$  — власна частота коливань системи



**Рис. 31.2.** Резонанс струмів: а — електрична схема кола; б — графіки залежностей діючого значення сили струму  $I$  в підвідних проводах та повного опору кола  $Z$  від циклічної частоти  $\omega$  зміни напруги на джерелі струму.  $\omega_0$  — власна частота коливань системи





**Рис. 31.3.** Графіки залежності діючого значення сили струму  $I$  в підвідних проводах від циклічної частоти  $\omega$  зміни напруги на джерелі за різних активних опорів  $R$  кола ( $R_1 < R_2 < R_3$ ).  $\omega_0$  — власна частота коливань системи

2) чим більшим є активний опір контуру, тим слабше виражений стрибок амплітуди коливань сили струму; якщо активний опір великий, то стрибок амплітуди практично не спостерігається (рис. 31.3).

Явище різкого збільшення амплітуди вимушених коливань сили струму в електромагнітній коливальній системі з малим активним опором у випадку, коли частота зміни зовнішньої ЕРС збігається з власною частотою коливань системи, називається **резонансом напруг**.

Явище різкого зменшення амплітуди вимушених коливань сили струму у випадку, коли частота зміни зовнішньої ЕРС збігається з власною частотою коливань системи, називається **резонансом струмів**.

Отже, резонанс виникає за таких умов:

1) частота зміни зовнішньої ЕРС збігається з власною частотою

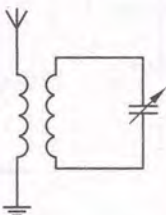
коливань електромагнітної коливальної системи:  $\nu_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  (тут

$\nu_{\text{рез}}$  — резонансна частота);

2) активний опір системи є малим.

## 2 Застосування резонансу

Резонанс напруг широко застосовується в радіотехніці — саме на явищі електричного резонансу ґрунтується техніка радіоприйому. Численні теле- й радіостанції випромінюють електромагнітні хвилі, які збуджують в антені радіоприймача змінні струми різних частот. Щоб із безлічі коливань виділити коливання потрібної частоти, й використовують електричний резонанс. Для цього індуктивно з антеною пов'язують коливальний контур (рис. 31.4).



**Рис. 31.4.** Схема приймання та виділення радіосигналів потрібної частоти за допомогою резонансу. Стрілка конденсатора вказує на те, що ємність конденсатора можна змінювати

Змінюючи ємність конденсатора (настроюючи радіоприймач), змінюють власну частоту коливань

контуру  $\left(\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\right)$ . Коли власна частота коли-

вань контуру збігається з частотою електромагнітної хвилі, на якій працює радіостанція, настає резонанс напруг: амплітуда вимушених коливань потрібної частоти різко збільшується.

В електротехніці в деяких випадках резонанс може завдати великої шкоди. Якщо електричне коло розраховане на роботу за відсутності резонансу, то виникнення останнього може спричинити аварію: від дуже сильних струмів можуть



розігрітися проводи, через високі резонансні напруги може пробити ізоляцію. Коли електричні коливання були ще недостатньо вивчені, такі аварії траплялися доволі часто. Нині існують прийоми, які дозволяють запобігти резонансу.

### ! Підбиваємо підсумки

Явище різкого збільшення амплітуди вимушених коливань сили струму в електромагнітній коливальній системі з малим активним опором у випадку, коли частота зміни зовнішньої ЕРС збігається з власною частотою коливань системи, називається резонансом напруг.

★ Явище зменшення амплітуди вимушених коливань сили струму у випадку, коли частота зміни зовнішньої ЕРС збігається з власною частотою коливань системи, називається резонансом струмів.★

Чим меншим є активний опір електричного кола, тим гостріше виражений резонанс.

### ? Контрольні запитання

1. Які електромагнітні коливання називають вимушеними? 2. Дайте визначення резонансу напруг; ★ резонансу струмів. 3. Назвіть умови виникнення резонансу. 4. За якою формулою визначається резонансна частота? 5. Наведіть приклади застосування електричного резонансу. ★ 6. Чому резонанс струмів іноді називають антирезонансом?

## § 32. ТРАНСФОРМАТОР



Однією з основних переваг електричної енергії є те, що її можна передавати на великі відстані, наприклад, за допомогою проводів. Але під час передавання енергії неминучі її втрати, зокрема на нагрівання. Згідно із законом Джоуля — Ленца кількість теплоти, що виділяється в провідниках, дорівнює:  $Q = I^2 R t$ . Отже, зменшити втрати енергії на нагрівання можна, зменшивши: 1) опір проводів; 2) силу струму. Розглянемо, як ці можливості реалізують на практиці.



### 1 Чому напругу необхідно змінювати

Активний опір проводу визначається матеріалом, з якого він виготовлений, його довжиною та площею поперечного перерізу:  $R = \frac{\rho l}{S}$ . Отже, для зменшення опору проводів слід зменшити питомий опір матеріалу або збільшити площу поперечного перерізу проводу.

Збільшення площі поперечного перерізу призводить до значного збільшення маси проводів і, як наслідок, додаткових витрат матеріалу на виготовлення проводів, опор ліній електропередач тощо. Можна зменшити питомий опір, замінивши сталевий провід алюмінієвим, що й роблять для передавання електроенергії на великі відстані. Але це не розв'язує проблеми повністю, оскільки передавання значної потужності  $P = UI$  за відносно невеликої напруги потребує досить великої сили струму.

Якщо ту саму потужність передавати за великої напруги (відповідно, за малої сили струму), то втрати енергії значно зменшуються.

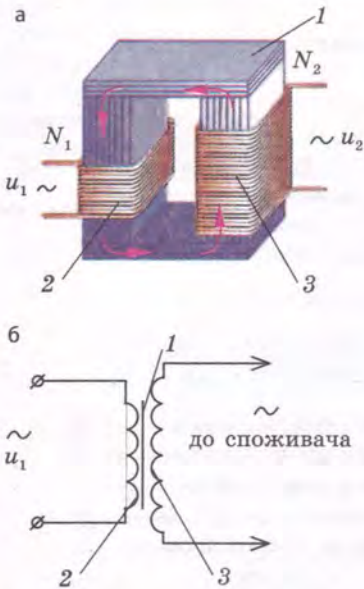


Наприклад, збільшення напруги в 10 разів приведе до зменшення сили струму в 10 разів, отже, кількість теплоти, що виділиться в провіднику під час передавання, зменшиться в 100 разів.

Саме тому *перед тим, як передавати енергію на великі відстані, потрібно підвищувати напругу. І навпаки: після того як енергія дійшла до споживача, напругу потрібно знижувати.* Таке змінення напруги здійснюється за допомогою *трансформаторів*.

**2 Як побудований трансформатор і який принцип його дії**

**Трансформатор** (від лат. *transformo* — перетворюю) — електромагнітний пристрій, що перетворює змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги за незмінної частоти.



**Рис. 32.1.** Будова (а) та схематичне позначення (б) найпростішого (однофазного) трансформатора: 1 — осердя, 2 — первинна обмотка трансформатора; 3 — вторинна обмотка трансформатора

Найпростіший трансформатор складається зі сталевого замкненого *осердя* (магнітопроводу) і двох *обмоток* (рис. 32.1). Осердя виготовлене з тонких пластин трансформаторної сталі, обмотки — з ізольованого проводу. До однієї з обмоток, яка називається *первинною* і має  $N_1$  витків проводу, подається електрична енергія від джерела змінного струму. До другої обмотки — *вторинної*, яка має  $N_2$  витків проводу, підключають споживачі електричної енергії.

Принцип дії трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Якщо первинна обмотка трансформатора підключена до джерела змінного струму, то струм  $i_1$ , який йде по її витках, утворює в замкненому осерді змінний магнітний потік  $\Phi$ . Пронизуючи витки первинної та вторинної обмоток, змінний магнітний потік створює ЕРС самоіндукції  $e_1$  в первинній обмотці та ЕРС індукції  $e_2$  у вторинній обмотці.

Згідно із законом електромагнітної індукції ЕРС індукції  $e$ , індукована в кожному витку первинної та вторинної обмоток трансформатора, дорівнює:

$$e = -\Phi'(t).$$

Первинна обмотка має  $N_1$  витків проводу, вторинна —  $N_2$ , отже,  $e_1 = -N_1\Phi'(t)$  і  $e_2 = -N_2\Phi'(t)$  відповідно. Оскільки ЕРС створюється тим самим магнітним потоком, то різниця фаз між ЕРС індукції первинної та вторинної обмоток дорівнює нулю. Тому в будь-який момент часу

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2},$$

де  $\mathcal{E}_1$  і  $\mathcal{E}_2$  — діючі значення ЕРС відповідно в первинній і вторинній обмотках.



З іншого боку:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1 \Phi'(t)}{-N_2 \Phi'(t)} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Таким чином, відношення діючих значень ЕРС, індукованих у первинній і вторинній обмотках трансформатора, дорівнює відношенню кількості витків в обмотках:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Величину  $k$  називають **коефіцієнтом трансформації**.

Трансформатор називається **понижувальним**, якщо коефіцієнт трансформації більший за одиницю ( $k > 1$ ). В понижувальних трансформаторах вторинна обмотка містить менше витків проводу, ніж первинна.

Трансформатор називається **підвищувальним**, якщо коефіцієнт трансформації менший за одиницю ( $k < 1$ ). В підвищувальних трансформаторах вторинна обмотка містить більше витків проводу, ніж первинна.

### 3 Холостий хід роботи трансформатора

Розглянемо, як працює трансформатор, вторинна обмотка якого розімкнена, тобто трансформатор не навантажений (рис. 32.2). Робота ненавантаженого трансформатора називається **холостим ходом**.

Первинна обмотка трансформатора підключена до джерела змінного струму, напруга на виході якого  $u_1$ . Під час проходження струму в обмотці виникає ЕРС самоіндукції  $e_1$ . Падіння напруги на первинній обмотці дорівнює:  $i_1 r_1 = u_1 + e_1$ , де  $r_1$  — опір обмотки, який будемо вважати нехтовно малим. Отже, в будь-який момент часу  $u_1 \approx -e_1$ , тому для діючих значень напруги та ЕРС маємо рівність:  $U_1 \approx \mathcal{E}_1$ .

По вторинній обмотці струм не йде (обмотка розімкнена), тому напруга на кінцях вторинної обмотки дорівнює ЕРС індукції:  $u_2 + e_2 = 0$ ,  $u_2 = -e_2$ , відповідно  $U_2 = \mathcal{E}_2$ .

Таким чином, у режимі холостого ходу виконується рівність:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Якщо кількість витків у первинній обмотці більша, ніж у вторинній ( $k > 1$ ), то трансформатор понижує напругу ( $U_1 > U_2$ ). І навпаки: якщо кількість витків у первинній обмотці менша, ніж у вторинній ( $k < 1$ ), то трансформатор підвищує напругу ( $U_1 < U_2$ ). Добираючи співвідношення між кількістю витків у первинній та вторинній обмотках, можна підвищувати або понижувати напругу в потрібну кількість разів.

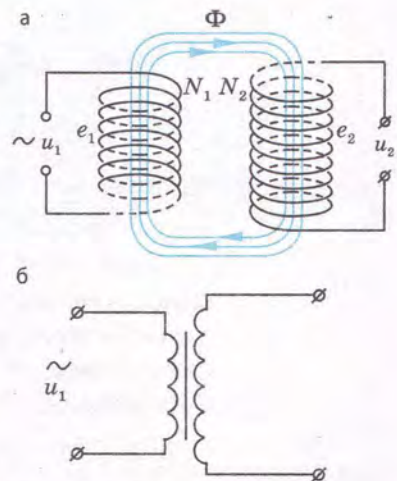


Рис. 32.2. Холостий хід роботи трансформатора: а — схема установки; б — електрична схема

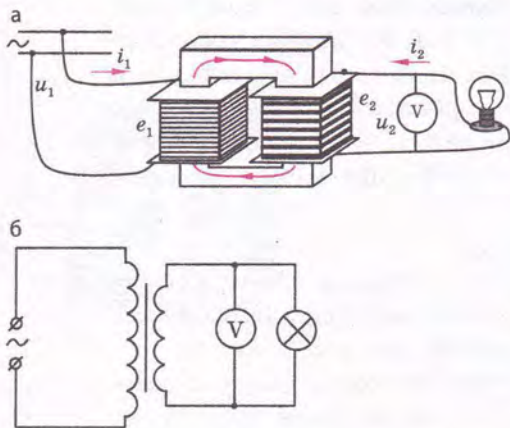


Зверніть увагу:

1) *трансформатор не може здійснити перетворення напруги постійного струму*, оскільки в цьому випадку магнітний потік не змінюється й ЕРС індукції не виникає;

2) *трансформатор не можна підключати до джерела постійного струму*: опір первинної обмотки є малим, тому сила струму в ній зросте настільки, що трансформатор нагріється й вийде з ладу.

#### 4 Як працює навантажений трансформатор



**Рис. 32.3.** Робота навантаженого трансформатора: а — зовнішній вигляд установки; б — електрична схема

Якщо вторинну обмотку трансформатора замкнути на навантаження, то в ній виникне електричний струм (рис. 32.3). Цей струм викличе зменшення магнітного потоку в осерді і, як наслідок, зменшення ЕРС самоіндукції в первинній обмотці. У результаті сила струму в первинній обмотці збільшиться, і магнітний потік зросте до попереднього значення. Чим більшими є сила струму у вторинній обмотці й потужність, яка віддається споживачу, тим більшими є струм у первинній обмотці й потужність, яка споживається від джерела.

Зазвичай втрати енергії в трансформаторі є малими, тому можна вважати, що потужності в первинній і вторинній обмотках приблизно однакові:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2.$$

Це означає, що сила струму в підвищувальному трансформаторі більша в первинній обмотці ( $U_1 < U_2 \Rightarrow I_1 > I_2$ ), а в понижувальному — у вторинній обмотці ( $U_1 > U_2 \Rightarrow I_2 > I_1$ ).

#### 5 Як підвищити ККД трансформатора

У трансформаторі, як і в будь-якому іншому технічному пристрої, існують певні втрати енергії.

Відношення потужності, яку трансформатор віддає споживачу електричної енергії, до потужності, яку трансформатор споживає з електричної мережі, називається **коефіцієнтом корисної дії трансформатора**:

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}.$$

Основні втрати енергії в трансформаторі й технічні прийоми, які використовують для зменшення цих втрат, наведені в таблиці.



**Втрати енергії в трансформаторі**

**Способи зменшення втрат енергії**

Виділення теплоти внаслідок проходження електричного струму в обмотках

Обмотки трансформатора виготовляють із високоякісної міді з досить великою площею поперечного перерізу. Зі збільшенням сили струму збільшується кількість теплоти, що виділяється в обмотках, тому обмотки нижчої напруги виготовляють із проводів більшого діаметра

Виділення теплоти внаслідок виникнення струмів Фуко в осерді, яке перебуває у змінному магнітному полі

Осердя виготовляють із набірних пластин, тим самим збільшуючи його опір і зменшуючи силу струмів Фуко

Випромінювання енергії у вигляді електромагнітних хвиль

Осердя роблять замкненим і такої форми, яка не сприяє випромінюванню електромагнітних хвиль

Втрати енергії на перемагнічування осердя

Осердя виготовляють із трансформаторної сталі, яка легко перемагнічується

Деякі трансформатори завдяки своїй конструкції мають ККД до 99 %.

**6 Застосування трансформаторів**

Підвищувальні трансформатори розташовують поблизу генераторів змінного струму, встановлених на електричних станціях, що дозволяє здійснювати передавання електроенергії на далекі відстані за високих напруг (більше 500 кВ), завдяки чому втрати енергії в проводах значно зменшуються.

У місцях споживання електроенергії встановлюють понижувальні трансформатори, в яких висока напруга, що подається від високовольтних ліній електропередач, знижується до порівняно невеликих значень, за яких працюють споживачі електричної енергії (рис. 32.4, 32.5).

Окрім систем передавання й розподілу електроенергії, трансформатори застосовують у випрямних пристроях, у лабораторіях, для живлення радіоапаратури, приєднання електровимірювальних приладів до кіл високої напруги, електрозварювання тощо.



Рис. 32.4. Трансформаторна підстанція поблизу міста



Рис. 32.5. Схема передавання та розподілу енергії в електричній мережі



**7** Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Первинна обмотка трансформатора, яка містить 1500 витків проводу, підключена до кола змінного струму напругою 220 В. Визначте кількість витків у вторинній обмотці, якщо вона має живити коло з напругою 6,3 В за сили струму 1,5 А. Навантаження активне, опір вторинної обмотки 0,20 Ом. Опором первинної обмотки знехтувати.

$N_2$  —?

Дано:

$$U_1 = 220 \text{ В}$$

$$U_2 = 6,3 \text{ В}$$

$$I_2 = 1,5 \text{ А}$$

$$N_1 = 1500$$

$$r_2 = 0,20 \text{ Ом}$$

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.* За будь-якого режиму роботи трансформатора:  $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$  (1).

Оскільки опір первинної обмотки є нехтовно малим, то  $U_1 = \mathcal{E}_1$  (2). Коло вторинної обмотки є замкненим, джерелом електричної енергії в ньому є вторинна обмотка з активним опором, тому згідно із законом Ома:  $I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{R + r_2}$ .

Звідси  $\mathcal{E}_2 = I_2(R + r_2) = I_2R + I_2r_2 = U_2 + I_2r_2$  (3). Підставляючи вирази (2) і (3) у формулу (1), маємо:  $\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2r_2} \Rightarrow N_2 = N_1 \frac{U_2 + I_2r_2}{U_1}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[N_2] = \frac{\text{В} + \text{А} \cdot \text{Ом}}{\text{В}} = \frac{\text{В} + \text{А} \cdot \frac{\text{В}}{\text{А}}}{\text{В}} = 1; \{N_2\} = \frac{1500(6,3 + 1,5 \cdot 0,20)}{220} = 45, N_2 = 45.$$

*Аналіз результатів.* Трансформатор понижувальний ( $U_1 > U_2$ ), тобто вторинна обмотка має містити менше витків, ніж первинна. Отже, отриманий результат цілком реальний.

*Відповідь:* кількість витків у вторинній обмотці  $N_2 = 45$ .

**!** Підбиваємо підсумки

Трансформатор — електромагнітний пристрій, що перетворює змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги за незмінної частоти. Він складається зі сталевого замкненого осердя й двох розташованих на ньому обмоток.

У будь-якому режимі роботи відношення діючих значень ЕРС, індукованих у первинній і вторинній обмотках трансформатора, дорівнює відношенню кількості витків в обмотках:  $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$ , де  $k$  — коефіцієнт трансформації. Якщо  $k > 1$ , то трансформатор понижувальний; якщо  $k < 1$  — підвищувальний.

У режимі холостого ходу виконується рівність:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$ .

ККД трансформатора визначається співвідношенням:  $\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$ .

**?** Контрольні запитання

1. У чому перевага електричної енергії над іншими видами енергії? 2. Назвіть основні способи зменшення втрат енергії під час її передавання. 3. Що таке трансформатор? Яка його будова? На якому явищі ґрунтується його дія? 4. Опишіть фізичні процеси, що відбуваються в трансформаторі в режимі холостого



ходу; в режимі навантаження. 5. Як визначити коефіцієнт трансформації? 6. Який трансформатор називається понижувальним? підвищувальним? Де їх застосовують? 7. Які основні втрати енергії існують у трансформаторі? Як їх зменшити? 8. Як визначити ККД трансформатора?

**Вправа № 27**

1. На рис. 32.3 зображено лампу, приєднану через трансформатор до мережі змінного струму. Який це трансформатор — підвищувальний чи понижувальний? Чому вторинна обмотка виготовлена з більш товстого дроту, ніж первинна?
2. Первинна обмотка трансформатора містить 1000 витків проволу, вторинна — 3500 витків. У режимі холостого ходу напруга на вторинній обмотці дорівнює 105 В. Яка напруга подається на трансформатор? Яким є коефіцієнт трансформації?
3. Потужність, яку споживає трансформатор, становить 90 Вт, напруга на вторинній обмотці 12 В. Якою є сила струму у вторинній обмотці, якщо ККД трансформатора 75 %?
4. Трансформатор із коефіцієнтом трансформації 5 приєднаний до мережі змінного струму напругою 220 В. Визначте опір вторинної обмотки трансформатора, якщо напруга на ній дорівнює 42 В, а сила струму 4,0 А. Опором первинної обмотки знехтувати.
- 5\*. Чому трансформатор гуде? Яка основна частота звукових коливань, якщо трансформатор підключений до промислової мережі?

**§ 33. ГЕНЕРАТОР НЕЗАТУХАЮЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ**



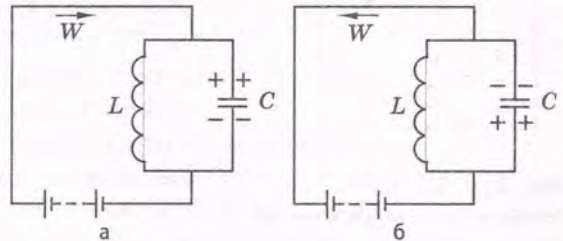
Останнім часом величезного поширення набули способи передавання інформації за допомогою електромагнітних хвиль. Як ми з'ясуємо пізніше, джерелами радіохвиль можуть бути тільки високочастотні незатухаючі електромагнітні коливання. У цьому параграфі ви ознайомитеся із пристроєм, у якому створюються такі коливання, й згадаєте, з яких елементів складаються автоколивальні системи.



**Як у коливальному контурі отримати незатухаючі коливання**

Змінний електричний струм, створюваний генераторами, є низькочастотним і тому не придатний для потреб радіотехніки. Високочастотні електромагнітні коливання виникають у коливальному контурі, але, як вам уже відомо, в реальному контурі вони швидко затухають. Щоб коливання не затухали, потрібно поповнювати енергію контуру, наприклад заряджаючи конденсатор від джерела постійного струму.

Але якщо джерело буде весь час підключене до конденсатора, то конденсатор лише обмінюватиметься енергією з джерелом (рис. 33.1). Щоб цього не відбувалося, контур має бути підключеним до джерела тільки в ті інтервали часу, коли обкладка конденсатора, яка приєднана до позитивного полюса джерела струму, заряджена позитивно. Під час коливань знак заряду на



**Рис. 33.1.** Коливальний контур, який весь час підключений до джерела постійного струму: *a* — половину періоду енергія надходить у конденсатор; *b* — половину періоду енергія повертається до джерела



обкладках періодично змінюється, отже, ключ має замикати й розмикати коло з частотою, що дорівнює частоті електромагнітних коливань контуру, тобто кілька мільйонів разів за секунду. Замикати з такою частотою механічний ключ неможливо, тому в ролі ключа в радіотехніці використовують *транзистор* (див. § 16), провідні властивості якого можуть змінюватися практично миттєво.



Рис. 33.2. Основні елементи автоколивальної системи

**Генератор незатухаючих електромагнітних коливань** — це автоколивальна система, в якій енергія джерела постійного струму перетворюється на енергію електромагнітних коливань, частота яких дорівнює частоті коливань коливального контуру, що є частиною цієї системи.

Як і в будь-якій автоколивальній системі (рис. 33.2), у транзисторному генераторі можна виділити чотири характерні елементи:

- 1) елемент, у якому можуть відбуватися вільні коливання, — *коливальний контур*;
- 2) джерело енергії — *джерело постійного струму*;
- 3) регулювальний елемент — *транзистор*;
- 4) пристрій зворотного зв'язку — *котушка зв'язку*  $L_{зв}$ , яка індуктивно пов'язана з котушкою  $L_k$  коливального контуру (рис. 33.3).

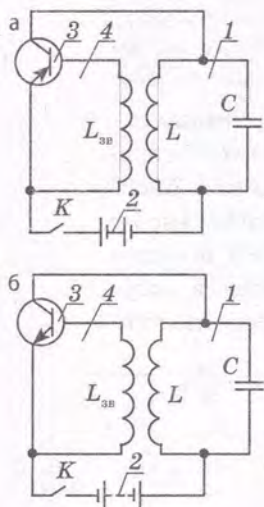


Рис. 33.3. Електричні схеми генераторів незатухаючих коливань на транзисторах  $p-n-p$ -типу (а) і  $n-p-n$ -типу (б): 1 — коливальний контур; 2 — джерело постійного струму; 3 — транзистор; 4 — котушка зв'язку

## 2 Як працює генератор незатухаючих електромагнітних коливань на транзисторі

Нехай в момент замикання кола заряд на обкладках конденсатора максимальний, а обкладка, що заряджена позитивно, з'єднана з колектором (рис. 33.4, а). Протягом *першої чверті періоду* конденсатор розряджається через котушку  $L_k$ , а сила струму в цій котушці збільшується ( $i \uparrow$ ). Змінний електричний струм створює змінне магнітне поле, яке, у свою чергу, створює вихрове електричне поле, що в цьому випадку напрямлене проти струму. Під дією вихрового електричного поля в котушці зв'язку  $L_{зв}$  виникає індукційний струм  $i_5$ , напрямком якого збігається з напрямком електричного поля. У результаті на базі підтримується від'ємний потенціал відносно емітера (на базу з емітера надходять електрони). Перехід



«емітер — база» є прямим, тому дірки потрапляють на базу й далі в коло колектора (рис. 33.4, а'). Транзистор відкритий, енергія від джерела надходить через транзистор у коливальний контур.

Протягом *другої чверті періоду* (рис. 33.4, б) конденсатор перезаряджається, з колектором з'єднана негативно заряджена обкладка конденсатора, а сила струму в котушці  $L_k$  зменшується. Вихрове електричне поле в цей інтервал часу напрямлене за напрямком струму, тому струм  $i_0$  у котушці зв'язку  $L_{зв}$  напрямлений від емітера до бази, і на базі виникає додатний потенціал відносно емітера (рис. 33.4, б'). Перехід «емітер — база» стає оберненим, дірки не потрапляють на базу та в коло колектора. Транзистор закритий, енергія не повертається до джерела.

Протягом *третьої чверті періоду* (рис. 33.4, в) з колектором знову з'єднана негативно заряджена обкладка конденсатора, але конденсатор розряджається, сила струму в котушці  $L_k$  збільшується, тому вихрове електричне поле напрямлене проти струму. Індукційний струм  $i_0$  у котушці зв'язку  $L_{зв}$  напрямлений від емітера до бази, тому на базі підтримується додатний потенціал відносно емітера (рис. 33.4, в'). Перехід «емітер — база» обернений, транзистор залишається закритим, і енергія не повертається до джерела.

Протягом *четвертої чверті періоду* (рис. 33.4, г) конденсатор перезаряджається, з колектором уже з'єднана позитивно заряджена обкладка конденсатора. Сила струму в котушці  $L_k$  зменшується, тому вихрове електричне поле підтримує струм. Індукційний струм  $i_0$  напрямлений від бази до емітера, і на базі створюється від'ємний

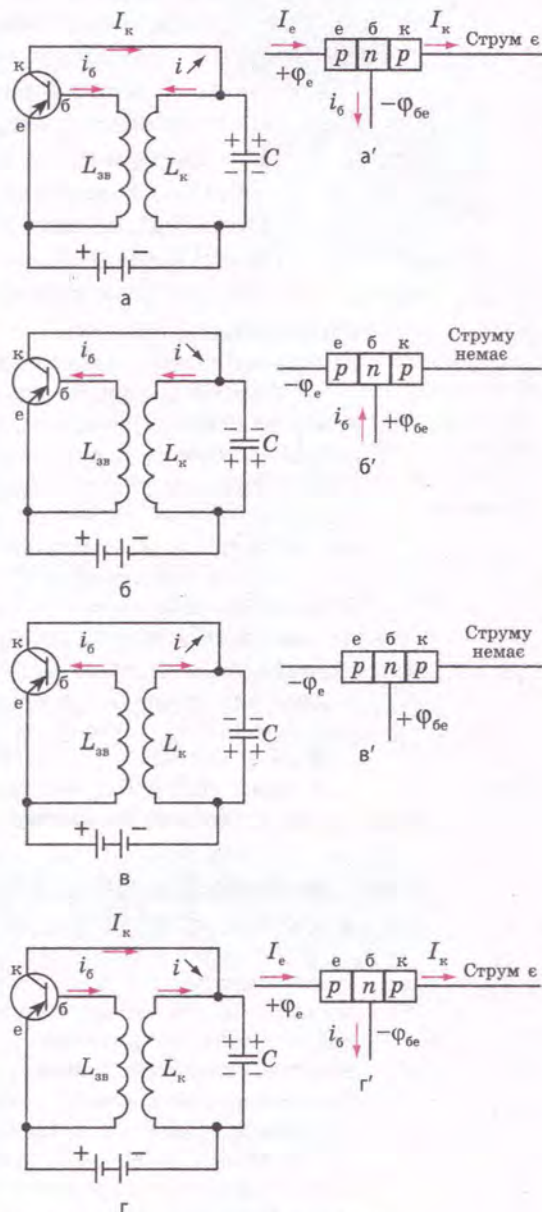


Рис. 33.4. Принцип дії генератора незатухаючих електромагнітних коливань на транзисторі



потенціал відносно емітера (рис. 33.4, з'). Перехід «емітер — база» стає прямим, транзистор — відкритим, і енергія надходить у коливальний контур.

Таким чином, коливальний контур підключений до джерела струму лише в ті інтервали часу, коли енергія надходить у коливальний контур. При цьому енергія електричного поля в конденсаторі збільшується, амплітуда коливань у коливальному контурі зростає. Однак збільшення амплітуди коливань у контурі не триває необмежено: щойно втрати енергії в коливальному контурі компенсуються надходженням енергії від джерела струму, зростання амплітуди припиниться.

### ! Підбиваємо підсумки

Генератор незатухаючих електромагнітних коливань — це автоколивальна система, в якій енергія джерела постійного струму перетворюється на енергію електромагнітних коливань, частота яких дорівнює частоті коливань коливального контуру, що є частиною цієї системи.

Транзисторний генератор як автоколивальна система має чотири характерні елементи: 1) елемент, у якому можуть відбуватися вільні коливання, — *коливальний контур*; 2) джерело енергії — *джерело постійного струму*; 3) регульовальний елемент — *транзистор*; 4) пристрій зворотного зв'язку — *катушка зв'язку  $L_{зв}$* , яка індуктивно пов'язана з катушкою  $L_k$  коливального контуру.

### ? Контрольні запитання

1. Дайте визначення генератора незатухаючих електромагнітних коливань. Опишіть його будову. 2. Назвіть основні елементи генератора як автоколивальної системи. 3. Яку роль у генераторі незатухаючих електромагнітних коливань відіграє транзистор? 4. Поясніть принцип дії генератора. 5. Чому дорівнює частота електромагнітних коливань, що відбуваються в генераторі?

## § 34. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ. ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ДОСЛІДИ ГЕРЦА



Електромагнітні хвилі теоретично передбачив Дж. Максвелл. Проаналізувавши всі відомі на той час закони електродинаміки, він дійшов висновку, що змінне магнітне поле породжує електричне поле, а змінне електричне поле породжує магнітне. Розрахунки, здійснені Максвеллом, показали, що *коливні електричне й магнітне поля можуть відриватися від провідників, які їх породжують, і рухатися через вакуум зі швидкістю  $3 \cdot 10^8$  м/с*. На жаль, Максвелл не дожив до експериментального підтвердження своїх розрахунків. Тільки через 15 років після створення Максвеллом теорії електромагнітного поля і через 7 років після смерті Максвелла Генріх Герц (рис. 34.1) продемонстрував випромінювання і приймання електромагнітних хвиль. Саме про електромагнітні хвилі та їхні властивості йдеться в цьому параграфі.

### 1 Як утворюється електромагнітна хвиля

Якщо прив'язану на нитці заряджену кульку вивести зі стану рівноваги й відпустити, то кулька розпочне коливальний рух, а електричне поле в просторі, що оточує кульку, буде періодично змінюватися. Згідно з теорією Максвелла змінне електричне поле створить змінне магнітне поле, яке, у свою чергу, створить змінне електричне, і т. д.



Якщо пропускати по провіднику змінний струм, то навколо провідника періодично змінюватиметься магнітне поле. Змінне магнітне поле створить змінне електричне поле, яке, у свою чергу, створить змінне магнітне, і т. д.

*Теоретично і в тому, і в іншому випадках ми одержимо поширення коливань електромагнітного поля. Як відомо, поширення в просторі коливань речовини або поля називається хвилею. Тобто можна сказати, що ми одержимо електромагнітну хвилю.*

**Електромагнітна хвиля** — це процес поширення в просторі електричних і магнітних полів, що періодично змінюються.

Джерелом хвилі в першому випадку буде коливне заряджене тіло, у другому — провідник, по якому тече змінний струм.

Проте реальну електромагнітну хвилю створить тільки змінний струм, але і її енергія буде настільки малою, що хвиля навряд чи подолає відстань, яка дорівнює розміру кімнати. Річ у тім, що енергія електромагнітної хвилі пропорційна частоті в четвертому степені ( $W \sim \nu^4$ ), тому джерелом електромагнітної хвилі може бути тільки пристрій, у якому створюються електромагнітні коливання високої частоти.

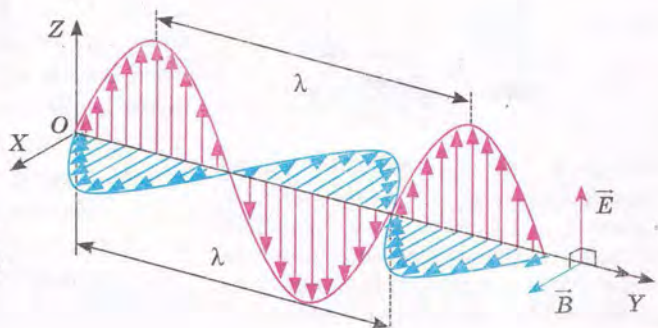


**Рис. 34.1.** Генріх Рудольф Герц (1857–1894) — німецький фізик, один із засновників електродинаміки. Експериментально довів існування електромагнітних радіохвиль (1886–1889); встановив тотожність радіохвиль та світлових хвиль; відкрив зовнішній фотоефект (1887)

## 2 Які фізичні величини характеризують електромагнітну хвилю

Електромагнітна хвиля як процес поширення електромагнітного поля насамперед характеризується вектором напруженості  $\vec{E}$  та вектором магнітної індукції  $\vec{B}$ . Будь-яка хвиля періодична і в часі, і в просторі, тому ці величини періодично змінюються і з часом, і зі зміною відстані від джерела хвилі.

За теорією Максвелла вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  перпендикулярні як до напрямку поширення хвилі, так і один до одного, при цьому вони одночасно досягають максимального значення й одночасно перетворюються на нуль (рис. 34.2). Отже, електромагнітна хвиля — це поперечна хвиля.



**Рис. 34.2.** Зміни вектора напруженості  $\vec{E}$  електричного поля та вектора індукції  $\vec{B}$  магнітного поля під час поширення електромагнітної хвилі в напрямку осі  $OY$



Зверніть увагу: те, що електромагнітна хвиля є поперечною, не означає, що в просторі є якісь горби й западини. Уздовж напрямку поширення хвилі та в даній точці простору відбуваються плавні зміни напруженості та магнітної індукції електромагнітного поля.

Електромагнітна хвиля, як і механічна, характеризується періодом і частотою коливань, довжиною та швидкістю поширення.

**Швидкість поширення електромагнітної хвилі** — це відстань, на яку поширюється електромагнітна хвиля за одиницю часу:  $v = \frac{s}{t}$ .

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі є сталою й дорівнює швидкості світла у вакуумі:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

**Довжина хвилі  $\lambda$**  — це відстань, на яку поширюється електромагнітна хвиля за час, що дорівнює періоду; або: відстань між двома найближчими точками в просторі, в яких коливання вектора напруженості (вектора магнітної індукції) відбуваються однаково (див. рис. 34.2).

Довжина хвилі пов'язана зі швидкістю її поширення формулою хвилі:  $c = \frac{\lambda_0}{T} = \lambda_0 \nu$  — для вакууму;  $v = \lambda \nu$  — для середовища.

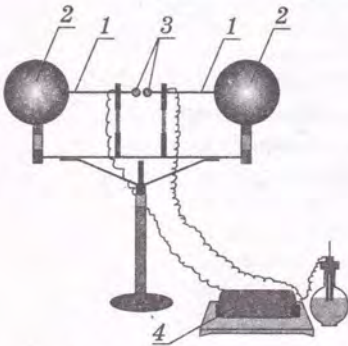
*Електромагнітні хвилі переносять енергію.* \*Якщо перпендикулярно до напрямку поширення хвилі розташувати майданчик площею  $S$ , то за інтервал часу  $\Delta t$  через майданчик буде перенесена енергія:

$$W_{\text{ем}} = (w_e + w_m)V = (w_e + w_m)Sl = (w_e + w_m)vS\Delta t,$$

де  $l = v\Delta t$  — відстань, на яку поширилась хвиля за час  $\Delta t$ ;  $w_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$ ,

$w_m = \frac{\mu_0 \mu B^2}{2}$  — об'ємні густини електричної й магнітної енергій відповідно.

В будь-якій точці простору:  $w_e = w_m$ .



**Рис. 34.3.** Вібратор Герца: 1 — мідні стрижні діаметром 5 мм і завдовжки 1,3 м кожен; 2 — цинкові сфери діаметром 30 см; 3 — латунні кульки діаметром 3 см, між якими залишався іскровий проміжок у 7–7,5 мм; 4 — джерело високої напруги

### 3 Досліди Герца з вивчення властивостей електромагнітних хвиль

Вважають, що першим електромагнітні хвилі отримав Г. Герц у 1888 р., сконструювавши для цього випромінювач, названий згодом «вібратором Герца» (рис. 34.3). Коли обидві латунні кульки заряджали до високої різниці потенціалів, між ними проскакувала іскра (коливальний характер якої вже було доведено), і у докільля випромінювалась електромагнітна хвиля.

Щоб уловлювати випромінювані хвилі, Герц зробив резонатор (рис. 34.4). Змінюючи розмір іскрового проміжку, вчений настроював резонатор на частоту коливань



вібратора. У ті моменти, коли між кульками вібратора відбувався розряд, в іскровому проміжку резонатора проскакували ледь помітні іскорки, які можна було побачити в лупу (рис. 34.5).

Герц не тільки одержав електромагнітні хвилі, а й вивчив їхні властивості.

Учений звернув увагу на те, що *електромагнітні хвилі відбиваються від провідних предметів*. На стіні лабораторії він укріпив цинковий екран розмірами 4×2 м, створив за допомогою сферичного дзеркала та вібратора пучок електромагнітних хвиль і спрямував їх під певним кутом до цинкового екрана. Так Герц встановив, що *кут відбивання дорівнює куту падіння* (рис. 34.6).

Для вивчення *заломлення* електромагнітних хвиль учений виготовив асфальтову призму заввишки 1,5 м і масою 1,2 т. Помістивши призму між вібратором і резонатором, він помітив, що іскра в резонаторі зникла. Іскроутворення відновлювалося в разі переміщення резонатора до основи призми (рис. 34.7).

Герц також встановив, що електромагнітні хвилі огинають перешкоди, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі, тобто довів *дифракцію* електромагнітних хвиль. Переміщуючи резонатор між вібратором і екраном, Герц спостерігав посилення і послаблення іскри, довівши тим самим *інтерференцію* електромагнітних хвиль\*.

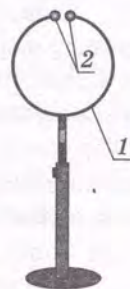


Рис. 34.4. Резонатор Герца: 1 — дротяне незамкнене кільце діаметром 70 см; 2 — латунні кульки діаметром 3 см із малим регульованим іскровим проміжком

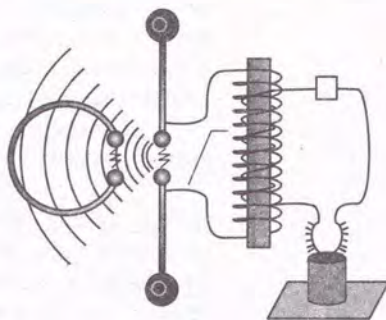


Рис. 34.5. Схема досліду Герца з одержання та реєстрації електромагнітних хвиль



Рис. 34.6. Дослід Герца з вивчення відбивання електромагнітних хвиль: а — зовнішній вигляд установки; б — схема досліду

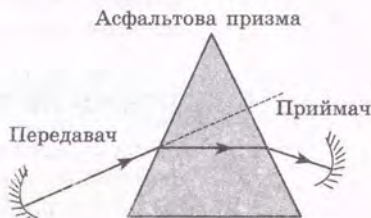


Рис. 34.7. Схема досліду Герца з вивчення заломлення електромагнітних хвиль

\* Докладно з явищами дифракції, інтерференції та поляризації хвиль ви познайомитесь під час вивчення оптики.



Повертаючи між вібратором і резонатором ґратку з мідних дротів, натягнутих на дерев'яну раму паралельно один одному, Герц помітив, що іскри в резонаторі зовсім зникали, коли дротини ґратки були паралельними вібратору й резонатору. «Очевидно,— писав щодо цього Герц,— ґратка пропускає лише ту складову вектора напруженості  $\vec{E}$ , яка перпендикулярна до напрямку її дротин». Хвилі з певним напрямком коливань називають *поляризованими*, отже, Герц довів *поляризацію* електромагнітних хвиль.

Підсумовуючи свої досліді, Герц писав: «...описані досліді доводять ідентичність світла, теплових променів і електродинамічного хвильового руху».

### ! Підбиваємо підсумки

Електромагнітною хвилею називається процес поширення в просторі електричних і магнітних полів, що періодично змінюються.

Вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$ , які характеризують електромагнітну хвилю, перпендикулярні як до напрямку поширення хвилі, так і один до одного, при цьому вони одночасно досягають максимального значення й одночасно перетворюються на нуль. Електромагнітна хвиля — це поперечна хвиля.

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі є сталою й дорівнює швидкості світла  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Досліді Герца показали, що електромагнітні хвилі відбиваються від провідника, заломлюються на межі з діелектриком, можуть інтерферувати, огинати перешкоди, їх можна поляризувати. При цьому відбивання, заломлення, інтерференція й дифракція електромагнітних хвиль відбуваються за такими самими законами, що й для світла. Таким чином, Герц підтвердив висновок Максвелла про електромагнітну природу світла.

### ? Контрольні запитання

1. Дайте визначення електромагнітної хвилі. 2. Опишіть механізм утворення електромагнітної хвилі. 3. Від яких чинників залежить енергія електромагнітної хвилі? 4. До якого виду хвиль належить електромагнітна хвиля? Відповідь обґрунтуйте. 5. Які фізичні величини характеризують електромагнітну хвилю? Як вони між собою пов'язані? 6. Опишіть будову приладів, за допомогою яких Герц створював та вловлював електромагнітні хвилі. 7. Які властивості електромагнітних хвиль було встановлено в ході дослідів Герца? Опишіть ці досліді.

## § 35. ПРИНЦИПИ РАДІОТЕЛЕФОННОГО ЗВ'ЯЗКУ



Відкриття Герца виявилось стартом для створення засобів бездротового зв'язку. Видатний англійський фізик Вільям Крукс (1832–1919) у статті про досліді Герца писав: «Тут розкривається дивовижна можливість телеграфувати без проводів, телеграфних стовпів, кабелів і всіляких інших дорогих сучасних пристроїв». Проте, як були реалізовані ці можливості, ви й дізнаєтесь із цього параграфа.



### 1 Для чого потрібна антена

Щоб здійснити передавання та приймання електромагнітних хвиль, які несуть звукову та оптичну інформацію, потрібно розв'язати низку проблем, а саме:



- 1) створити високочастотні електромагнітні коливання;
- 2) накласти на високочастотні коливання звукову і (або) оптичну інформацію;
- 3) забезпечити випромінювання електромагнітних хвиль у навколишнє середовище;
- 4) забезпечити приймання електромагнітних хвиль;
- 5) зняти з прийнятого високочастотного сигналу звукову і (або) оптичну інформацію та відтворити її.

Зупинимося на розв'язанні цих проблем.

Як нам відомо, досить велику енергію мають тільки високочастотні електромагнітні коливання ( $W \sim v^4$ ). Незатухаючі високочастотні коливання виникають у коливальному контурі генератора електромагнітних коливань (див. § 33).

Але звичайний (закритий) коливальний контур майже не випромінює електромагнітних хвиль у навколишнє середовище. Річ у тім, що електричне поле конденсатора майже повністю зосереджене між його обкладками, а найсильніше магнітне поле — всередині котушки індуктивності.

Щоб коливальний контур випромінював електромагнітні хвилі в навколишнє середовище, потрібно перейти від закритого коливального контуру до відкритого. Цього можна досягти, наприклад розсуваючи пластини конденсатора (рис. 35.1). Замінивши верхню обкладку конденсатора проводом, розташованим якнайвище над поверхнею землі, і заземливши нижню обкладку, одержимо *антену* — пристрій для приймання та передавання електромагнітних хвиль (рис. 35.1, г).

Для передавання сигналів антену індуктивно пов'язують із коливальним контуром генератора електромагнітних коливань (рис. 35.2). Параметри антени добирають таким чином, щоб власні частоти електромагнітних коливань антени і контуру збіглися, тоді антена резонуватиме з контуром, і в ній виникнуть коливання досить великої амплітуди.

Електромагнітні коливання, збуджені в антені, створюють електромагнітні хвилі, які поширюються навсідч. Якщо на шляху електромагнітних хвиль зустрінеться провідник, то вони збудять у провіднику змінний електричний струм, частота якого дорівнюватиме частоті коливань хвилі. Пристрої, у яких під дією електромагнітних хвиль збуджуються струми високої частоти, називаються *приймальними антенами*.

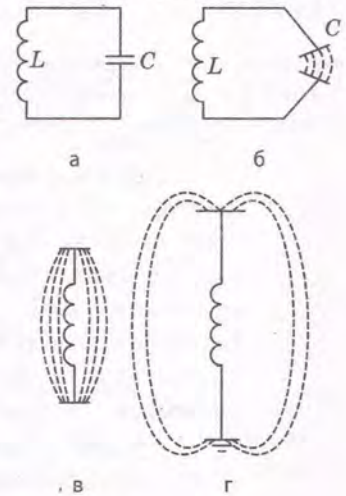


Рис. 35.1. Перехід від закритого коливального контуру (а, б) до відкритого (в); антена (г)

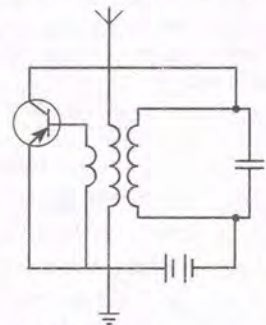


Рис. 35.2. Електрична схема найпростішого радіопередавача — пристрою для створення і передавання електромагнітних хвиль



## 2 З якою метою і як здійснюється модуляція

Ми одержали високочастотні електромагнітні хвилі і навіть можемо передати інформацію, наприклад, кодом Морзе, перериваючи коливання в генераторі за допомогою телеграфного ключа (рис. 35.3). Саме такими були перші телеграми, надіслані бездротовим телеграфом. Однак набагато важливіше й цікавіше передати мовлення, музику, зображення.

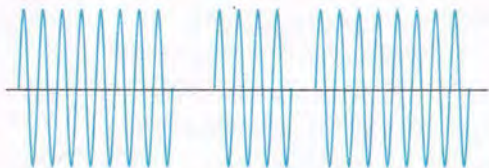


Рис. 35.3. Радіотелеграфний сигнал: складається з короткочасних і більш тривалих імпульсів електромагнітних хвиль

Здавалося б, усе не так складно: достатньо за допомогою мікрофона перевести звукові коливання в коливання електричного струму. Але передати такі сигнали неможливо щонайменше з двох причин: 1) вони мають низьку частоту і, відповідно, малу енергію; 2) їхня частота постійно змінюється (від 20 до 16 000 Гц), тому немає можливості використати резонанс.

Виникає проблема. Електромагнітні коливання в генераторі високочастотні, вони створюють електромагнітні хвилі, які мають високу енергію, завдяки чому їх легко передавати на великі відстані, але ці коливання не несуть звукової інформації. Електромагнітні коливання, які створює звукова хвиля в мікрофоні, несуть звукову інформацію, але створені ними хвилі мають малу енергію і швидко затухають. Отже, *потрібно створити сигнал, що був би високочастотним і водночас ніс звукову інформацію.*

Процес змінення параметрів (амплітуди, частоти, початкової фази) високочастотних електромагнітних коливань із частотами набагато меншими, ніж частота самої хвилі, називається **модуляцією**.

Хвиля зі зміненими параметрами називається *модульованою*. Частота вихідної (немодульованої) високочастотної хвилі називається *частотою-носієм*, частота зміни параметрів — *частотою модуляції*.

Якщо в процесі модуляції змінюється амплітуда високочастотних коливань, то одержимо *амплітудно-модульовані коливання* (рис. 35.4, а), якщо змінюється частота — *частотно-модульовані коливання* (рис. 35.4, б).

Для одержання амплітудно-модульованих коливань до кола генератора високої частоти підключають джерело змінної напруги низької частоти, наприклад вторинну обмотку трансформатора, первинна обмотка якого пов'язана з мікрофоном (рис. 35.5). Під дією низькочастотної напруги, яка змінюється зі звуковою частотою, змінюється і напруга, що подається від джерела на коливальний контур генератора. Відповідно, з частотою звуку змінюється й амплітуда коливань сили струму в генераторі.

Зверніть увагу: для якісного передавання інформації частота-носієй має бути в багато разів вищою за частоту модуляції.



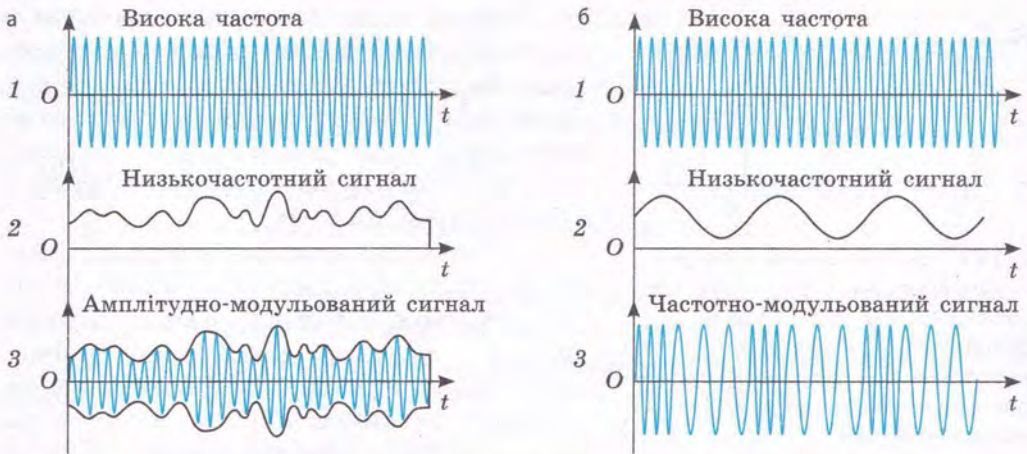


Рис. 35.4. Отримання амплітудно-модульованого (а) і частотно-модульованого (б) сигналів: 1 — графік електромагнітних коливань високої частоти-носія; 2 — графік електромагнітних коливань моделюючої низької (звукової) частоти; 3 — графік модульованих електромагнітних коливань

### 3 Як розшифрувати модульований сигнал, або Що таке детектування

Електромагнітні хвилі збуджують у приймальній антені коливання тієї самої частоти, що й частота хвилі. Але тут знову виникають проблеми: 1) в антену надходять коливання від різних радіостанцій (на щастя, кожна радіостанція працює на своїй частоті); 2) одержаний сигнал є високочастотним і не може безпосередньо викликати коливання мембран навушників або гучномовця.

Як ми вже говорили, коливання певної частоти можна виділити за допомогою резонансу (див. § 31), індуктивно пов'язавши з приймальною антеною коливальний контур, власну частоту якого можна змінювати.

Щоб із модульованих високочастотних коливань виділити низькочастотний складник, використовують пристрій з *однобічною провідністю* — *детектор*. Детектором може слугувати напівпровідниковий діод. Якщо підключити діод послідовно з джерелом модульованих коливань, то одержимо пульсуючий струм, оскільки діод пропускатиме струм тільки в одному напрямку (рис. 35.6, а).

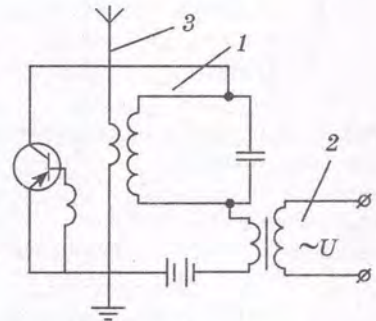


Рис. 35.5. Електрична схема найпростішого радіопередавача з пристроєм для амплітудної модуляції: 1 — генератор незатухаючих електромагнітних коливань високої частоти; 2 — звуковий трансформатор; 3 — передавальна антена

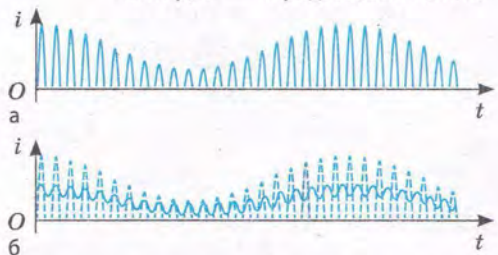
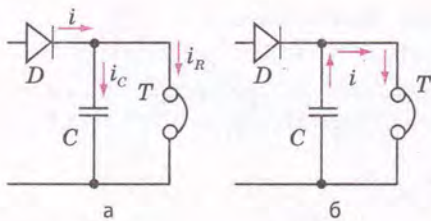
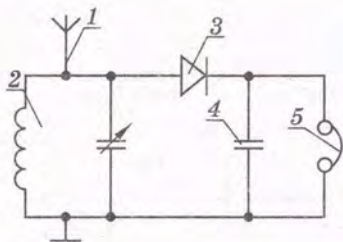


Рис. 35.6. Графік коливань сили струму: а — після проходження детектора; б — після проходження фільтра





**Рис. 35.7.** Принцип роботи фільтра: а — діод пропускає струм, струм розгалужується: одна частина йде на зарядження конденсатора, друга — через навантаження; б — діод не пропускає струм, конденсатор розряджається через навантаження



**Рис. 35.8.** Електрична схема найпростішого радіоприймача: 1 — приймальна антена; 2 — коливальний контур; 3 — кристалічний детектор (діод); 4 — конденсатор фільтра; 5 — навушники

Якщо пульсуючий струм пропускати через *фільтр* — систему, що складається з конденсатора й корисного навантаження (рис. 35.7), то пульсації струму, який проходить через навантаження, згладжуються, і ми одержуємо струм звукової частоти (рис. 35.6, б).

Отже, найпростіший радіоприймач (рис. 35.8) складається з приймальної антени, коливального контуру змінної частоти, детектора (роль якого найчастіше виконує діод), конденсатора й корисного навантаження, у якому електромагнітні коливання низької частоти перетворюються на механічні (звукові) коливання.

#### 4 Принципи радіотелефонного зв'язку

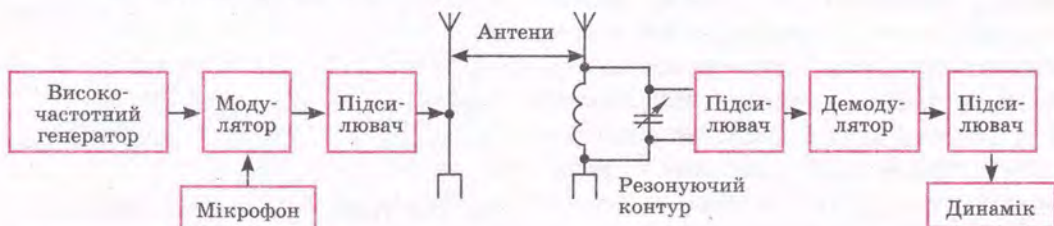
Найпростіший детекторний радіоприймач працює на енергії прийнятих електромагнітних хвиль. Очевидно, що цієї енергії недостатньо, щоб відтворити досить чіткий і голосний звуковий сигнал, тому в реальних радіоприймачах і радіопередавачах сигнал проходить через цілий каскад посилень (рис. 35.9).

*Основні етапи одержання й перетворення радіосигналу:*

1) генератор незатухаючих електромагнітних коливань створює високочастотні коливання, частота яких дорівнює власній частоті коливань коливального контуру: 
$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$$
;

2) високочастотні коливання модулюються коливаннями низької частоти;

3) одержані модульовані коливання підсилюються й подаються на передавальну антену, яка випромінює електромагнітні хвилі в навколишній простір;



**Рис. 35.9.** Принципова схема сучасного радіотелефонного зв'язку



4) досягши приймальної антени, електромагнітні хвилі збуджують у ній високочастотні коливання тієї самої частоти, що й коливання, випромінювані радіопередавачем ( $\nu_2 = \nu_1$ );

5) ці коливання викликають електромагнітні коливання в резонуючому контурі:  $\nu_{\text{рк}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} = \nu_2$ ;

6) слабкі високочастотні коливання підсилюються й подаються в детектор;

7) після проходження через детектор і фільтр із модульованих коливань виділяються коливання низької частоти;

8) коливання низької частоти посилюються і перетворюються на звук.

## 5 Поняття про телебачення

Принципова схема одержання і приймання телевізійного сигналу мало відрізняється від принципової схеми радіотелефонного зв'язку, але має низку особливостей.

1) Телевізійний сигнал несе набагато більше інформації, ніж радіотелефонний. У телепередавачі коливання частоти-носія модулюються як звуковим сигналом, так і відеосигналом, що надходить від відеокамери. Відеокамера робить 50 знімків за секунду. Інформація з матриці відеокамери зчитується по рядках: спочатку зчитуються непарні рядки, потім через  $1/50$  с — парні (вже з іншого «знімка»). Сукупність рядків, що зчитуються кожену  $1/50$  с, називається полем. Два послідовно зчитаних поля утворюють телевізійний кадр. Таким чином, кожний наступний кадр відділений від попереднього часовим інтервалом в  $1/25$  с. Зчитаний сигнал разом зі звуковим сигналом модулює високочастотні коливання. У зв'язку з тим що телевізійний сигнал несе великий обсяг інформації, частота-носії телевізійного сигналу в багато разів вища за частоту-носії радіотелефонного сигналу. Тому телевізійні станції працюють тільки в діапазоні ультракоротких радіохвиль.

2) У телевізійному приймачі високочастотний модульований сигнал розділяється на три сигнали: сигнал зображення (який, у свою чергу, ділиться на три сигнали — для червоного, зеленого й синього кольорів), сигнал звукового супроводу й керуючий сигнал. Керуючий сигнал подається на керуюче магнітне поле; посилені сигнали зображення — на електроди, які змінюють яскравість електронних пучків; посилений звуковий сигнал — на динамік.

## 6 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте довжину електромагнітної хвилі у вакуумі, на яку настроєний коливальний контур радіоприймача, якщо при максимальному заряді конденсатора  $2,0 \cdot 10^{-8}$  Кл максимальна сила струму в контурі досягає 1,0 А.



$\lambda$  — ?

Дано:

$q_{\max} = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$

$I_{\max} = 1,0 \text{ А}$

$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання

Довжина електромагнітної хвилі пов'язана зі швидкістю її поширення формулою хвилі

$$c = \lambda \nu, \text{ звідки } \lambda = \frac{c}{\nu} = cT \quad (1).$$

Для знаходження періоду коливань  $T$  скористаємося формулою Томсона та законом збереження енергії:  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ ;  $W_{\text{ел. макс}} = W_{\text{м. макс}}$ ,

де  $W_{\text{ел. макс}} = \frac{q_{\max}^2}{2C}$ ,  $W_{\text{м. макс}} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$ . Таким чином,  $\frac{q_{\max}^2}{2C} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$ .

Звідси  $LC = \frac{q_{\max}^2}{I_{\max}^2}$ , отже,  $T = 2\pi \frac{q_{\max}}{I_{\max}} \quad (2)$ . Підставивши вираз (2)

у вираз (1), знайдемо довжину хвилі:  $\lambda = 2\pi c \frac{q_{\max}}{I_{\max}}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[\lambda] = \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{А}} = \frac{\text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{с} \cdot \text{А}} = \text{м}; \quad \{\lambda\} = 6,28 \cdot 3,0 \cdot 10^8 \cdot \frac{2,0 \cdot 10^{-8}}{1,0} \approx 38, \quad \lambda \approx 38 \text{ м}.$$

**Відповідь:** коливальний контур радіоприймача настроєний на хвилю довжиною близько 38 м.**! Підбиваємо підсумки**

Для того щоб здійснити передавання й приймання електромагнітних хвиль, що несуть звукову та оптичну інформацію, потрібно:

1) створити високочастотні електромагнітні коливання (за допомогою генератора електромагнітних коливань);

2) накласти на високочастотні коливання звукову та оптичну інформацію (досягається модуляцією високочастотних коливань коливаннями нижчої частоти);

3) забезпечити випромінювання електромагнітних хвиль у навколишнє середовище (за допомогою передавальної антени);

4) забезпечити приймання електромагнітних хвиль (за допомогою приймальної антени та резонуючого коливального контуру);

5) зняти з прийнятого високочастотного сигналу звукову та оптичну інформацію (за допомогою детектора та фільтра).

**? Контрольні запитання**

1. Чому для передавання радіосигналів потрібно використовувати високочастотні електромагнітні коливання? 2. Як створюють незатухаючі високочастотні електромагнітні коливання? 3. Чому закритий коливальний контур практично не випромінює електромагнітні хвилі? 4. Що таке антена? 5. Як одержати радіосигнал, який був би високочастотним і ніс звукову інформацію? 6. Назвіть основні частини радіоприймача та їхнє призначення. 7. Поясніть механізм демодуляції. 8. У чому подібність і відмінність передавання й приймання телевізійного та радіотелефонного сигналів?

**Вправа № 28**

- Чому висока частота коливань, що використовується в радіозв'язку, називається носієм?
- Чому дорівнює довжина хвилі, яку випромінює радіостанція, що працює на частоті 4,5 МГц?



3. Відкритий коливальний контур випромінює електромагнітні хвилі довжиною 150 м. Яку ємність має конденсатор контуру, якщо індуктивність котушки 1,0 мГн? Активним опором контуру знехтувати.
4. У якому діапазоні довжин хвиль працює радіопередавач, якщо ємність конденсатора його коливального контуру може змінюватися від 60 до 240 пФ, а індуктивність котушки дорівнює 50 мкГн?

## § 36. ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ. СТІЛЬНИКОВИЙ ЗВ'ЯЗОК. СУПУТНИКОВЕ ТЕЛЕБАЧЕННЯ

?

На зорі розвитку радіо для зв'язку застосовувалися хвилі в основному від 1 до 30 км. Хвилі, коротші за 100 метрів, узагалі вважалися непридатними для далекого зв'язку. Однак зараз короткі й ультракороткі хвилі набули найбільшого поширення. З'ясуємо, в чому їхня перевага.

1

### Частотні діапазони радіохвиль

**Радіохвилі** — електромагнітні хвилі довжиною від 100 км (3 кГц) до 0,1 мм (3 ТГц).

Міжнародними угодами весь спектр радіохвиль, які застосовуються в радіозв'язку, поділено на діапазони (таблиця).

Діапазони частот

Найменування діапазону частот	Діапазон частот	Найменування діапазону хвиль	Діапазон довжин хвиль
Дуже низькі частоти (ДНЧ)	3–30 кГц	Міріаметрові	100–10 км
Низькі частоти (НЧ)	30–300 кГц	Кілометрові	10–1 км
Середні частоти (СЧ)	0,3–3 МГц	Гектометрові	1–0,1 км
Високі частоти (ВЧ)	3–30 МГц	Декаметрові	100–10 м
Дуже високі частоти (ДВЧ)	30–300 МГц	Метрові	10–1 м
Ультрависокі частоти (УВЧ)	0,3–3 ГГц	Дециметрові	1–0,1 м
Надвисокі частоти (НВЧ)	3–30 ГГц	Сантиметрові	10–1 см
Крайньо високі частоти (КВЧ)	30–300 ГГц	Міліметрові	10–1 мм
Гіпервисокі частоти (ГВЧ)	0,3–3 ТГц	Дециміліметрові	1–0,1 мм

2

### Яких змін зазнають радіохвилі в процесі поширення

Радіохвилі поширюються у вакуумі зі швидкістю  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. У повітрі швидкість поширення радіохвиль трохи менша. Якщо хвилі падають на діелектрик, вони частково відбиваються, частково заломлюються; якщо на провідник — відбиваються; у будь-якому разі — частково поглинаються.

Проходячи поблизу поверхні землі, радіохвилі поступово слабшають. Це пов'язано з тим, що електромагнітні хвилі збуджують поблизу поверхні землі мікроструми, на що й витрачається частина енергії. Чим більша частота хвилі, тим більше енергії витрачається. Оскільки радіовипромінювання поширюється в усі боки, то чим далі від передавача перебуває приймач, тим меншою є об'ємна густина енергії, отже, тим менше енергії потрапляє в приймальну антену.



### 3 Які особливості поширення довгих, середніх і коротких хвиль

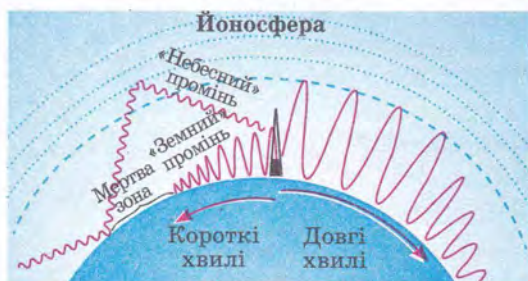


Рис. 36.1. Поширення довгих і коротких радіохвиль

*Середні хвилі* (хвилі довжиною від 100 м до 1 км) поширюються в межах 1 тис. км, оскільки можуть відбиватися тільки від йоносфери. Радіопередачі на середніх хвилях краще приймаються вночі, коли підвищується відбивна здатність йоносферного шару.

*Короткі хвилі* (від 10 до 100 м), відбившись від йоносфери, повертаються до Землі, відбиваються від поверхні Землі, знову спрямовуються до йоносфери, де знову відбиваються, і т. д. Так, багаторазово відбиваючись, радіохвиля може кілька разів обійти земну кулю (див. рис. 36.1).

З'ясовано, що висота, на якій радіохвиля відбивається від йоносфери, залежить насамперед від довжини хвилі. Чим коротша хвиля, тим більшою є висота, на якій вона відбивається, отже, тим більшою є «мертва зона». Ця залежність справджується лише для середніх і коротких хвиль. Для ультракоротких хвиль йоносфера є прозорою — хвилі пронизують її наскрізь і йдуть у космічний простір.

### 4 Які особливості поширення ультракоротких хвиль і в чому їхні переваги

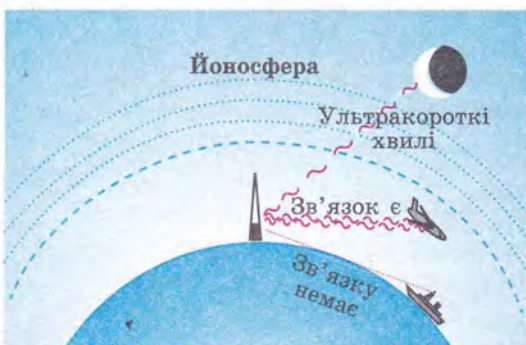


Рис. 36.2. Поширення ультракоротких радіохвиль

Хвилі діапазону від 1 до 10 км називаються *довгими*. Радіопередачі довгохвильових станцій можна приймати на відстані до кількох тисяч кілометрів, оскільки довгі хвилі здатні огинати земну поверхню (рис. 36.1). Тому багато міжнародних радіостанцій ведуть мовлення на довгих хвилях. Саме з цієї причини даний діапазон хвиль виділений для морської навігації.

Радіохвилі ДВЧ-діапазону своїми властивостями більше нагадують світлові промені. Вони практично не відбиваються від йоносфери, дуже незначно огинають нерівності земної поверхні й поширюються в межах прямої видимості (рис. 36.2), тому дальність поширення ультракоротких хвиль є невеликою. Але в цьому є певна перевага для радіозв'язку. Оскільки хвилі цього діапазону поширюються в межах прямої видимості, то можна розташовувати радіостанції на відстані 150–200 км



одна від одної без взаємного впливу, що дозволяє різним станціям багато разів використовувати ту саму частоту.

За своїми властивостями радіохвилі УВЧ- і НВЧ-діапазонів ще ближчі до світлових променів. Серед їхніх властивостей є одна дуже цікава й важлива: *такі радіохвилі можна посилати вузькими пучками*, фокусуючи за допомогою параболічних антен. Можливість фокусувати високочастотні радіохвилі забезпечила їхнє широке застосування в радіолокації, зв'язку, супутниковому телебаченні. Річ у тім, що *вузький промінь менше розсіюється*, що дозволяє застосовувати менш потужні передавачі; *його простіше приймати*; до того ж *напрявлене випромінювання створює менше перешкод* іншим системам зв'язку.

### 5 Чому зв'язок за допомогою мобільних телефонів називають стільниковим

Особливості хвиль ультракороткого діапазону, а саме: можливість випромінювання вузьким пучком, поширення в зоні прямої видимості, невелика дальність поширення поблизу поверхні землі — забезпечили їх застосування в так званому *стільниковому зв'язку*.

Для стільникового зв'язку використовують електромагнітні хвилі частотою від 450 до 2000 МГц. Головна його особливість полягає в тому, що загальна зона покриття (зона прийому частот, у діапазоні яких працює оператор) ділиться на комірки (стільники). Кожна комірка перекривається окремою базовою станцією. Комірки, частково перекриваючись, утворюють мережу.

**Стільниковий зв'язок** — один із видів мобільного радіозв'язку, в основі якого лежить стільникова мережа.

Основні складники стільникової мережі — це стільникові телефони та базові станції, які працюють у тому самому частотному діапазоні. Спеціальне обладнання дозволяє визначити місцезнаходження абонентів і забезпечити зв'язок у випадку їх переміщення. Увімкнений стільниковий телефон, прослуховуючи ефір, знаходить сигнал базової станції, після чого посилає станції свій ідентифікаційний код. Телефон і станція підтримують постійний радіоконтакт, періодично обмінюючись пакетами. Якщо телефон виходить із поля дії базової станції, він налагоджує зв'язок з іншою.

Стільникові мережі різних операторів з'єднані одна з одною, а також зі стаціонарною телефонною мережею. Це дозволяє абонентам одного оператора робити дзвінки абонентам іншого оператора, а також телефонувати з мобільних апаратів на стаціонарні й навпаки.

### 6 У чому перевага супутникового телебачення

Особливості ультракоротких радіохвиль (практично не відбиваються від іоносфери, їхня енергія помітно втрачається тільки поблизу поверхні землі, їх можна спрямувати вузьким пучком) забезпечили їх застосування в *супутниковому телебаченні*.



**Супутникове телебачення** — система передавання телевізійного сигналу від передавального центру до споживача через штучний супутник Землі, розташований на геостаціонарній навколосемній орбіті над екватором.



Рис. 36.3. Принцип супутникового телебачення

Нагадаємо, що супутник, який перебуває на геостаціонарній орбіті, обертається над екватором зі швидкістю Землі й ніби «висить» в одній точці. Принцип роботи супутникового телебачення такий. Із центральної керуючої станції на супутник передається височастотний сигнал. Передавач, установлений на супутнику, передає цей сигнал на Землю, що дозволяє покрити досить велику територію. Приймальне обладнання складається із супутникової тарілки, конвертора, що знижує частоту прийнятого сигналу, і приймача (ресивера) (рис. 36.3).

Перевагою супутникового телебачення є те, що можна приймати сотні й тисячі телевізійних каналів, перебуваючи за тисячі кілометрів від передавальних телевізійних центрів.

Незважаючи на те що супутник «висить» нижче від йоносферного шару, можливості супутникового телебачення були б сильно обмежені, якби йоносфера не була прозорою, оскільки посланий на супутник сигнал частково відбивався б атмосферою і створював серйозні перешкоди.

## 7 Що таке радіолокація

Можливість спрямувати ультракороткі хвилі вузьким пучком (сфокусувати промінь) використовується і в радіолокації.

**Радіолокація** (від лат. *radius* — промінь і *locatio* — розміщення) — галузь науки й техніки, предметом якої є спостереження за допомогою радіотехнічних методів за різними об'єктами, їх виявлення, розпізнавання, визначення їхнього місцезнаходження.

У радіолокації використовують ультракороткі електромагнітні хвилі частотою від 100 до 1000 МГц. Радіолокаційний пристрій — *радар* — складається з передавальної та приймальної частин. Принцип дії радіолокатора є таким (рис. 36.4). Від потужного радіопередавача за допомогою параболічної антени посиляється імпульс гостронапрявленої радіохвилі. Досягнувши цілі, радіохвиля відбивається від неї й повертається назад. Відбита хвиля вловлюється тією самою антеною й реєструється приймачем, який має додатковий вимірювальний пристрій — *індикатор*. Оскільки відбитий радіосигнал набагато слабший за посланий, то приймач має дуже високу чутливість, тому



під час посилення імпульсу його відключають від передавача.

Радіосигнали, які посилає радіолокатор, являють собою короткочасні (тривалістю мільйонні частки секунди), але дуже потужні імпульси радіохвиль. Щойно імпульс послано, антенний перемикач вимикає передавач і водночас вмикає приймач. Імпульси йдуть через рівні проміжки часу, причому паузи між імпульсами в сотні разів триваліші за самі імпульси. У цілому звичайний радіолокатор протягом години лише кілька секунд посилає радіосигнали, а решту часу «слухає» радіовідлуння.

Відстань  $s$  до об'єкта визначається часом  $t$  проходження радіоімпульсу до цілі й назад. Оскільки швидкість поширення електромагнітних хвиль у повітрі практично дорівнює швидкості поширення світла  $c$  у вакуумі, то:

$$s = \frac{ct}{2}.$$

На екрані індикатора, який нагадує екран телевізора, за допомогою спеціальної шкали спостерігач безпосередньо бачить, чому дорівнює відстань до об'єкта (рис. 36.5).

Якщо об'єкт перебуває на малій відстані від радара, то відбитий сигнал може надійти раніше, ніж закінчиться час випромінювання імпульсу, антенний перемикач не встигне ввімкнути приймач, і об'єкт не буде виявлено. Тому *мінімальну відстань виявлення об'єкта* можна визначити зі співвідношення:

$$s_{\min} = \frac{ct}{2},$$

де  $t$  — тривалість імпульсу.

Якщо об'єкт перебуває на дуже великій відстані від радара, то відбитий сигнал може надійти вже після посилення наступного імпульсу. Тому *максимальну відстань виявлення об'єкта* можна визначити зі співвідношення:

$$s_{\max} = \frac{ct_0}{2} = \frac{c}{2\nu_0},$$

де  $\nu_0$  — частота посилення імпульсу (не плутати з частотою коливань випромінюваного сигналу).



Рис. 36.4. Принципова схема роботи радіолокаційного пристрою



Рис. 36.5. У моменті посилення й приймання радіоімпульсу на екрані індикатора з'являються «сплески»: біля нульової позначки і біля позначки, що відповідає відстані до об'єкта. З рисунка видно, що один об'єкт перебуває на відстані 30 км, другий — 97 км




Зверніть увагу: збільшуючи проміжок часу між імпульсами, ми не зможемо досягти якої завгодно великої дальності виявлення об'єктів: у цьому випадку вона буде обмежена кривизною земної поверхні.

Радіолокація набула дуже широкого застосування в багатьох галузях життя людини. Без радіолокації неможливо обійтися, наприклад, у таких сферах:

1) метеорологічне забезпечення польотів, керування повітряним рухом, радіолокаційне забезпечення посадки повітряних суден і космічних апаратів, виявлення повітряних цілей, панорамний огляд поверхні, розпізнавання державної належності літальних апаратів;

2) визначення рельєфу поверхні морів і океанів, картографування берегової лінії, спостереження за біологічними явищами, проведення льодової розвідки;

3) визначення швидкості руху автотранспорту. Спосіб такого визначення ґрунтується на ефекті Доплера.

 **Ефект Доплера** — *явище змінення частоти хвиль, які реєструє приймач, викликане рухом їхнього джерела і (або) рухом приймача.*

Прояв ефекту Доплера є таким. Коли джерело хвиль наближається до приймача, частота хвиль, що їх реєструє приймач, збільшується. При цьому чим швидше наближається джерело, тим вища частота хвиль, що сприймаються. А коли джерело віддаляється від приймача, частота хвиль, що їх реєструє приймач, зменшується.

На ефекті Доплера ґрунтується дія радарів, що дозволяють визначати порушників правил дорожнього руху, які перевищують швидкість. Пістолет-радар випромінює радіохвильовий сигнал, який відбивається від металевого кузова машини, що рухається. Назад на радар сигнал надходить уже з доплерівським зміщенням частоти, значення якого залежить від швидкості руху машини. Зіставляючи частоти вихідного та вхідного сигналів, прилад автоматично обчислює й виводить на екран значення швидкості руху машини. ★

### Підбиваємо підсумки

За однакової природи здатність радіохвиль до поширення значною мірою залежить від довжини хвилі. Кожна ділянка радіодіапазону застосовується там, де найкраще можуть бути використані її переваги.

Особливо широкого застосування останнім часом набули хвилі ультракороткого діапазону, оскільки за допомогою спеціальних антен їх можна спрямувати вузьким пучком, який менше розсіюється, що дозволяє використовувати менш потужні передавачі. Ультракороткі радіохвилі застосовують у стільниковому зв'язку, супутниковому телебаченні й радіолокації.

Стільниковий зв'язок — один із видів мобільного радіозв'язку, в основі якого лежить стільникова мережа.



Супутникове телебачення — система передавання телевізійного сигналу від передавального центру до споживача через штучний супутник Землі.

Радіолокація — виявлення й визначення місцезнаходження об'єктів за допомогою радіохвиль.

?

### Контрольні запитання

1. Яких змін зазнають хвилі під час поширення? 2. Чому, коли радіохвилі проходять поблизу поверхні Землі, їхня енергія зменшується? 3. На які відстані можуть поширюватися довгі хвилі? Чому? 4. У чому основна перевага ультракоротких хвиль? 5. Що таке стільниковий зв'язок? Які принципи його роботи? 6. У чому переваги супутникового телебачення? Як організований супутниковий зв'язок? 7. Що таке радіолокація? 8. Опишіть принцип роботи радіолокаційної станції. 9. Якими чинниками обмежена відстань, на якій імпульсний радіолокатор здатен виявити об'єкт? 10. У яких сферах життя людини радіолокація набула застосування? ★ 11. У чому полягає ефект Доплера?

### ФІЗИКА ТА ТЕХНІКА В УКРАЇНІ



*В. М. Яковенко*

**Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України** (Харків) (ІРЕ) створений у 1955 р. на базі відділу радіофізики Харківського фізико-технічного інституту АН УРСР. У цьому відділі працювали творці першого радянського радіолокатора О. Я. Усиков, С. Я. Брауде, І. Д. Трутень, І. С. Тургенєв.

Серед напрямків діяльності ІРЕ: радіофізика, електроніка, фізика твердого тіла, дистанційне зондування природного середовища Землі, акустичний моніторинг донної поверхні морів, використання СВЧ-електроніки та ін. Ученими ІРЕ було передбачено та виявлено низку нових фізичних ефектів, зокрема аномальне проникнення електромагнітного поля в метали; розвинено кілька нових наукових напрямків (плазма в напівпровідниках, нелінійні явища радіохвиль).

Нині інститут очолює *Володимир Мефодійович Яковенко*, академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України.

## § 37. ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ В ПРИРОДІ Й ТЕХНІЦІ

?!

Радіохвилі, що використовуються в радіотехніці, — це лише частина великого спектра електромагнітних хвиль. За радіохвилями (в бік зменшення довжини) йдуть теплові, або інфрачервоні, промені, потім вузька ділянка хвиль видимого світла, далі — спектр ультрафіолетових, рентгенівських і гамма-променів. Розглянемо, що спільного й відмінного мають різні види електромагнітного випромінювання.

1

### Що ми називаємо спектром електромагнітних хвиль

**Спектр (шкала) електромагнітних хвиль** — неперервна послідовність частот і довжин електромагнітних хвиль, що існують у природі.

За способом випромінювання хвиль, що належать до тієї чи іншої ділянки спектра, розрізняють: *низькочастотне випромінювання*



й радіохвилі; інфрачервоне випромінювання, видиме світло й ультрафіолетове випромінювання; рентгенівське випромінювання; гамма-випромінювання (рис. 37.1).

Принципової відмінності між окремими ділянками спектра немає: всі ці види випромінювань являють собою електромагнітні хвилі, мають однакову швидкість поширення, яка дорівнює швидкості світла, і породжуються зарядженими частинками, що рухаються прискорено.

Розглянемо спектр електромагнітних хвиль докладніше.

## 2 Особливості випромінювання та властивості радіохвиль

**Низькочастотне випромінювання** (наддовгі радіохвилі) виникають, наприклад, навколо провідників, по яких тече змінний струм, і поблизу генераторів електричного струму. Оскільки енергія цих хвиль є дуже малою, то вони можуть поширюватися на невеликі відстані й серйозно не впливають на живі організми, в тому числі на людину. Однак у безпосередній близькості від ліній електропередач (або інших потужних джерел) енергія радіохвиль є досить великою, і тривале перебування в цій зоні небажане. Експерименти, проведені на кроликах, показали, що півгодинний вплив низькочастотних електромагнітних коливань викликає у кроликів почастішання кіркового ритму і збільшення амплітуди коливань напруги на нейронах мозку.

**Радіохвилі** від наддовгих із довжиною понад 10 км до ультракоротких і мікрохвиль із довжиною менш ніж 0,1 мм породжуються змінним електричним струмом.

Ми вже говорили про застосування електромагнітних хвиль радіодіапазону. Вони набули значного поширення й зробили життя людини набагато комфортнішим. Однак ані дрібні організми, ані великі тварини, ані люди не мають спеціальних рецепторів, які б сприймали радіочастотні електромагнітні хвилі. Ми не відчуваємо їх, хоча вони й впливають на загальний стан людей і тварин, причому чим коротші хвилі, тим виразніше реагують на них організми (рис. 37.2).

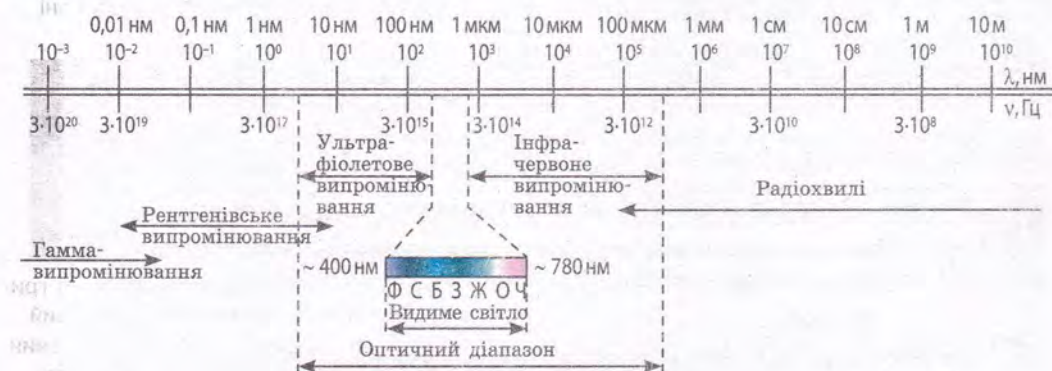


Рис. 37.1. Шкала електромагнітних хвиль



Слід звернути увагу й на негативний вплив потужних електромагнітних хвиль на здоров'я людини. Наприклад, медики стверджують, що стільниковий телефон — це небезпечне джерело електромагнітного випромінювання, оскільки він перебуває надзвичайно близько від мозку та очей людини, до того ж випромінює електромагнітні хвилі великої потужності. Поглинаючись тканинами головного мозку, зоровими та слуховими аналізаторами, хвилі передають їм енергію. З часом це призводить до порушення нервової, ендокринної й серцево-судинної систем. Це підтвердили експерименти, проведені на щурах.



Рис. 37.2. Метрові радіохвилі викликають збудження у мавп: вони повертають голову в бік їхнього джерела

### 3 Інфрачервоне випромінювання

Між радіохвилями та видимим світлом лежить ділянка інфрачервоного (теплого) випромінювання, довжина хвилі якого від 740 нм до 1–2 мм. Теплове випромінювання виникає внаслідок зіткнення атомів і молекул у газах, рідинах або твердих тілах. Зіткнення викликає збудження атомів, яке приводить до випромінювання атомами електромагнітних хвиль частотою вищою, ніж частота хвиль, створених електричним струмом. Інтенсивність інфрачервоного випромінювання збільшується зі збільшенням температури тіла.

Людське око не здатне бачити цієї частини спектра, ми можемо тільки відчувати тепло. Але багато представників фауни мають спеціальні пристосування — своєрідні живі «прилади нічного бачення», які здатні сприймати інфрачервоні промені (рис. 37.3, 37.4).

З усього спектра інфрачервоне випромінювання найбільш споріднене з організмом людини та корисне для нього. Хвилі довжинами приблизно від 7 до 14 мкм, які відповідають випромінюванню самого людського тіла, чинять на організм людини дивовижно корисну дію. Найвідоміше природне джерело таких хвиль на Землі — це Сонце, а найвідоміше штучне — піч, і кожна людина обов'язково відчувала на собі їхній сприятливий вплив.

Інфрачервоні діоди й фотодіоди застосовуються в пультах дистанційного керування, системах автоматики, охоронних системах тощо. Ці промені не відволікають уваги людини завдяки тому, що невидимі. Інфрачервоні випромінювачі застосовують і в промисловості для сушіння лакофарбових поверхонь, зерна, крупи та ін.



Рис. 37.3. Глибководні кальмари, крім звичайних, мають ще термоскопічні очі, які розташовані на хвості й вловлюють інфрачервоні промені



Рис. 37.4. Американська гризмуча змія має надчутливий термолокатор, розташований у лицевій ямці між очима та ніздрями рептилії



**4 Видиме світло та ультрафіолетове випромінювання**

За високих температур атоми й молекули починають випромінювати видиме світло (довжина хвилі від 380 до 760 нм) та ультрафіолетове випромінювання (довжина хвилі від 200 до 380 нм).

Із властивостями видимого випромінювання ви докладно ознайомитесь під час вивчення оптики. Тут звернемо увагу лише на такий факт. Атоми випускають видиме світло, як і інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання, у збудженому стані. Проте кожен атом, подібно до коливального контуру, може випромінювати тільки хвилі певних частот (щоправда, коливальний контур випромінює електромагнітні хвилі тільки однієї частоти). Атом також поглинає світло, причому поглинає хвилі лише тих частот, які може випромінювати. Тут ми знову бачимо аналогію з радіохвилями: коливальний контур радіоприймача найкраще поглинає ті хвилі, частота яких дорівнює власній частоті коливань контуру. Це ще раз підтверджує однакову природу всього спектра електромагнітних хвиль.

Ультрафіолетове випромінювання, на відміну від видимого світла та інфрачервоного випромінювання, має високу хімічну активність, тому у великих дозах воно негативно впливає на людину. Земна атмосфера частково затримує ультрафіолетові хвилі: промені, коротші за 290 нм (жорсткий ультрафіолет), затримуються у верхніх шарах атмосфери озоном, а довгохвильове випромінювання поглинається вуглекислим газом, водяною паром і озоном.

Щоб знизити ймовірність сонячного опіку та розвитку раку шкіри, медики рекомендують не перебувати на сонці між 10 і 13 годинами, коли сонячне випромінювання найбільш інтенсивне. Немовлят віком до 6 місяців рекомендують повністю уберігати від впливу прямого сонячного випромінювання. Проте в невеликих кількостях ультрафіолетове випромінювання добре впливає на людину: воно сприяє виробленню вітаміну D, зміцнює імунну систему, стимулює низку важливих життєвих функцій в організмі.

Зверніть увагу: в оптичній частині спектра стають суттєвими явища, зумовлені атомною будовою речовини, тому, крім хвильових, виявляються квантові властивості\* випромінювання.

**5 Рентгенівське й гамма-випромінювання**

Ще вищими за частотою на шкалі електромагнітних хвиль є *рентгенівські промені* (довжина хвилі порядку 0,1 нм). Рентгенівське випромінювання виникає внаслідок гальмування швидких заряджених частинок (електронів, протонів та ін.), а також у результаті процесів, що відбуваються всередині електронних оболонок атомів.

Найбільш широко рентгенівське випромінювання застосовується в медицині. Проходячи крізь досліджуваний об'єкт і потрапляючи на фотоплівку, рентгенівське випромінювання відтворює на ній

\* Докладно з квантовими властивостями світла ви познайомитесь під час вивчення оптики.



внутрішню структуру об'єкта. Кісткові тканини менш прозорі для рентгенівського випромінювання, ніж тканини, з яких складаються шкіра та внутрішні органи людини, тому на рентгенограмі кістки позначаються світлішими ділянками (рис. 37.5). Рентгенівська зйомка використовується також у промисловості (для виявлення тріщин у литті, пластмасах і гумах); у хімії (для аналізу сполук); у фізиці (для дослідження структури кристалів).

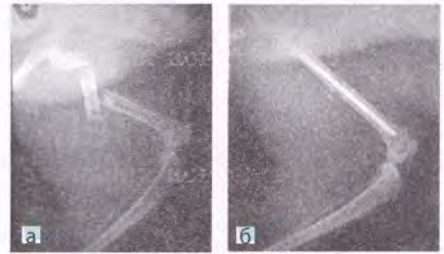


Рис. 37.5. Рентгенівські знімки переломи лапки кота: а — до операції; б — після операції

Рентгенівське випромінювання чинить руйнівну дію на клітини організму, тому застосовувати його потрібно надзвичайно обережно.

**Гамма-випромінювання** (довжина хвилі менше 0,05 нм) випускають збуджені атомні ядра під час ядерних реакцій, радіоактивних перетворень атомних ядер і перетворень елементарних частинок.

Гамма-випромінювання використовується у дефектоскопії (для виявлення дефектів усередині деталей); радіаційній хімії (наприклад, у процесі полімеризації); сільському господарстві й харчовій промисловості (для стерилізації харчів); медицині (для стерилізації приміщень, променева терапія). На організми гамма-випромінювання чинить мутагенний та канцерогенний вплив.

Зверніть увагу: у ділянці рентгенівського й гамма-випромінювання на перший план виступають квантові властивості електромагнітного випромінювання.

### **!** Підбиваємо підсумки

Спектр (шкала) електромагнітних хвиль — неперервна послідовність частот і довжин електромагнітних хвиль, що існують у природі.

За способом випромінювання та приймання хвиль, що належать до тієї чи іншої ділянки спектра, розрізняють: низькочастотне випромінювання й радіохвилі (створюються змінним електричним струмом); інфрачервоне випромінювання, видиме світло й ультрафіолетове випромінювання (випускаються збудженими атомами); рентгенівське випромінювання (створюється під час швидкого гальмування заряджених частинок); гамма-випромінювання (випускається збудженими атомними ядрами).

Усі види випромінювань являють собою електромагнітні хвилі, отже, поширюються в просторі зі швидкістю світла. Зі збільшенням частоти (зменшенням довжини) хвилі збільшується проникна здатність електромагнітного випромінювання, і поступово на перший план виступають квантові властивості випромінювання.

### **?** Контрольні запитання

1. Назвіть відомі вам види електромагнітних випромінювань. 2. Що спільного між усіма видами електромагнітних випромінювань? У чому їх відмінність? 3. Як змінюються властивості електромагнітного випромінювання зі збільшенням його частоти? 4. Наведіть приклади застосування різних видів випромінювань. 5. Як уникнути негативного впливу деяких видів електромагнітного випромінювання на здоров'я людини?




# ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ 4 «ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ»

1. Вивчаючи розділ 4, ви дізналися про електромагнітні коливання.

## Електромагнітні коливання

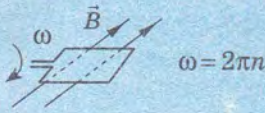
Вільні коливання  
в колі з конденсатором і індуктивністю



$q = q_{\max} \cos \omega t$   
 $i = -I_{\max} \sin \omega t$   
 $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$   
 Формула Томсона:  
 для ідеального контуру:  
 $T = 2\pi \sqrt{LC}$ ;  
 для реального контуру:  
 $T = 2\pi \sqrt{LC + \frac{L^2}{C}}$

### Вимушені коливання

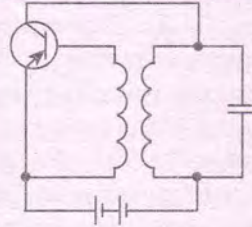
#### Змінний струм



$\omega = 2\pi n$   
 $\Phi = BS \cos 2\pi n t$   
 $i = -2\pi NBS n \cos 2\pi n t$   
 Діючі значення:  
 сили струму —  $I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$ ;  
 напруги —  $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$   
 $P = UI \cos \varphi$ , де  $\cos \varphi$  — коефіцієнт потужності  
 Індуктивний опір  $X_L = \omega L$   
 Ємнісний опір  $X_C = \frac{1}{\omega C}$   
 Активний опір  $R = \rho \frac{l}{S}$   
 Повний опір  $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$

### Автоколивання

Коливання в генераторі незатухаючих коливань



- Джерело енергії — акумулятор
- Коливальна система — коливальний контур
- Замикальний пристрій — транзистор
- Зворотний зв'язок — індуктивний

2. Під час вивчення вимушених електромагнітних коливань ви дізналися, що в разі збігу власної частоти коливань із частотою зовнішньої змінної напруги в колі виникає резонанс.

$$\text{Резонанс: } \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

3. Ви познайомилися з будовою та принципом роботи трансформатора і фізичними величинами, які його характеризують.

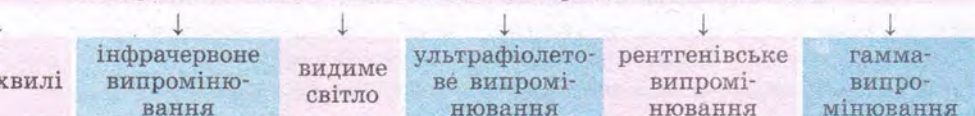
Коефіцієнт трансформації  $k = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{N_1}{N_2}$   
 — понижувальний трансформатор  
 — підвищувальний трансформатор

#### ККД трансформатора

$$\eta = \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2}$$

6. Ви познайомилися з електромагнітними хвилями, їхніми властивостями та особливостями поширення в просторі.

Електромагнітні хвилі  $c = \lambda \nu$  — поширення в просторі електричних і магнітних полів, які періодично змінюються









### § 38. РОЗВИТОК УЯВЛЕНЬ ПРО ПРИРОДУ СВІТЛА



Світло відіграє надзвичайно важливу роль у нашому житті. Так, до 80 % інформації про навколишній світ людина одержує за допомогою зору. У цьому розділі ми будемо вивчати саме науку про світло — оптику (*від грец.  $\text{ὀπτική}$  — поява або погляд*).

*Оптика* — розділ фізики, що вивчає явища, пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль видимого діапазону та з їхньою взаємодією з речовиною. Останнім часом до об'єктів вивчення оптики також відносять електромагнітні хвилі інфрачервоного та ультрафіолетового діапазонів.



#### 1 Якими були ранні уявлення про природу світла

Перші уявлення про природу світла виникли ще в Давній Греції та Єгипті. Серед безлічі теорій того часу були і зовсім примітивні, і дуже близькі до сучасних. Наприклад, деякі вчені давнини вважали, що з очей виходять тонкі щупальця, які осягають предмети, внаслідок чого й виникають зорові відчуття. Близькою до сучасних можна вважати теорію Демокріта, який уявляв світло як потік частинок, що мають певні фізичні властивості, за винятком кольору, відчуття якого є наслідком входження світла в око.

Ми не будемо розглядати численні теорії світла, більшість із яких до того ж не витримали перевірки часом. Зупинимось лише на двох основних, які виникли наприкінці XVII ст. майже одночасно. Це *корпускулярна* теорія І. Ньютона і *хвильова* теорія нідерландського фізика Крістіана Гюйгенса (1629–1695).



#### 2 У чому сутність корпускулярної теорії світла Ньютона

Згідно з *корпускулярною теорією Ньютона* світло — це потік частинок (*корпускул*), що випускаються світними тілами, причому рух світлових корпускул підпорядковується законам механіки. Так, відбиття світла Ньютон пояснював пружним відбиванням корпускул від поверхні, на яку падає світло, а заломлення світла — зміною швидкості корпускул внаслідок їх притягування до частинок заломного середовища.

Але корпускулярна теорія приводила до хибного висновку, що швидкість світла в середовищах є більшою, ніж у вакуумі. До того ж ця теорія не могла пояснити, чому світлові пучки, перетинаючись у просторі, не впливають один на одного.

Тим не менше експериментальні дослідження світла, здійснені Ньютоном, аж до XIX ст. були поза всякими порівняннями, а його монографія «Оптика», яку було опубліковано у 1704 р., стала основним джерелом для написання всіх підручників того часу. Ньютону належить *теорія кольору*, відповідно до якої *біле світло є сумішшю всіх кольорів, а предмети здаються кольоровими, оскільки відбивають одні складові білого кольору більш інтенсивно, ніж інші*.



### 3 У чому сутність хвильової теорії Гюйгенса

«Трактат про світло» Гюйгенса, опублікований у 1690 р., ввійшов в історію науки як перша наукова праця з *хвильової оптики*.

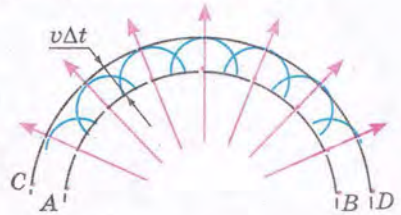
Згідно з *хвильовою теорією Гюйгенса* світло — це хвилі, що поширюються у світовому ефірі — гіпотетичному пружному середовищі, яке заповнює весь світовий простір, а також проміжки між дрібними частинками тіл. Вважаючи світло поздовжньою механічною хвилею, Гюйгенс обґрунтував явища відбивання й заломлення світла, принцип незалежності світлових променів, частково розглянув питання кольору. Вчений сформулював принцип поширення світлової хвилі, відомий сьогодні як *принцип Гюйгенса*.

#### Принцип Гюйгенса:

Кожна точка середовища, до якої дійшли коливання, сама стає джерелом вторинних хвиль.

Сукупність усіх точок простору, яких досягає світлова хвиля в певний момент часу, називають *хвильовою поверхнею* (*хвильовим фронтом*). Промені, що задають напрямок поширення хвилі, перпендикулярні до хвильової поверхні. Знаючи положення хвильової поверхні в момент часу  $t$ , можна, користуючись принципом Гюйгенса, знайти її положення в наступний момент часу  $t + \Delta t$  (рис. 38.1).

Хвильова теорія світла була підтримана такими видатними вченими, як М. В. Ломоносов і Л. Ейлер, однак, незважаючи на це, до кінця XVIII ст. загально визнаною залишалася корпускулярна теорія Ньютона. Так тривало до початку XIX ст., поки не з'явилися роботи англійського фізика *Томаса Юнга* (1773–1829) й французького фізика *Огюстена Жана Френеля* (1788–1827), які, досліджуючи світло, спостерігали явища, характерні лише для хвиль: явище огинання світлом перешкод (дифракція) та явище посилення й послаблення світла при накладанні світлових пучків (інтерференція). З того часу в науці стала превалювати хвильова теорія Гюйгенса.



**Рис. 38.1.** Визначення форми хвильового фронту за допомогою принципу Гюйгенса:  $AB$  — положення хвильового фронту в момент часу  $t$ ;  $CD$  — положення хвильового фронту в момент часу  $t + \Delta t$ ;  $v$  — швидкість поширення хвилі

### 4 \* Як виміряли швидкість поширення світла

Важливу роль у з'ясуванні природи світла відіграло дослідне визначення швидкості його поширення.

Першим швидкість світла зміг виміряти данський астроном *Олаф Кристенсен Ремер* (1644–1710) у 1676 р. Спостерігаючи за супутником Юпітера Іо, він помітив, що супутник входить у тінь Юпітера через кожні 42 год 28 хв (рис. 38.2). Але протягом півроку, коли



**Рис. 38.2.** Астрономічний метод Ремера щодо вимірювання швидкості світла



Земля, обертаючись навколо Сонця, віддалялася від Юпітера, затемнення супутника відбувалося з дедалі більшим запізненням. Ремер дійшов висновку, що таке запізнення пояснюється збільшенням відстані, яку долає світло, поширюючись від супутника до Землі. Знаючи діаметр орбіти Землі та час запізнення, вчений визначив швидкість світла.

Швидкість світла вимірювали й у межах земної поверхні. Щоб з'ясувати ідею подібних вимірювань, розглянемо метод, який застосував американський учений *Альберт Абрахам Майкельсон* (1852–1931).

Для проведення досліду Майкельсон вибрав дві гірські вершини в Каліфорнії, відстань між якими була ретельно виміряна (рис. 38.3). На вершині гори Маунт-Вільсон було встановлено джерело світла (1), від якого світло, проходячи крізь щілину (2), падало на призму (3) з 8 дзеркальними гранями. Відбившись від грані, світло потрапляло на систему дзеркал (4), розташовану на горі Сан-Антоніо, поверталася до призми й, відбившись від її іншої грані, потрапляло в зорову трубу (5). Коли за допомогою двигуна дзеркальній призмі надавали обертального руху, зображення джерела світла в зоровій трубці зникало й знову з'являлося за певної швидкості обертання призми.



Рис. 38.3. Схема досліду Майкельсона з вимірювання швидкості світла

Зрозуміло, що таке могло відбутися тільки за умови, що за час проходження світла до дзеркала й назад призма поверталася на  $1/8$  оберту. Знаючи кількість обертів призми за секунду та відстань між вершинами, Майкельсон визначив, що швидкість світла дорівнює  $(299\,796 \pm 4)$  км/с.

За допомогою сучасної лазерної техніки швидкість світла у вакуумі визначена з точністю до 1,2 м/с:  $c = (299\,792\,458 \pm 1,2)$  м/с.

### Якими є сучасні уявлення про природу світла

У 60-х роках XIX ст. Дж. Максвелл створив теорію електромагнітного поля, одним з наслідків якої було встановлення можливості існування електромагнітних хвиль. За розрахунками, швидкість поширення електромагнітних хвиль дорівнювала швидкості світла. На основі своїх теоретичних досліджень Максвелл дійшов висновку, що *світло — це окремий випадок електромагнітних хвиль*. Після дослідів Г. Герца (див. § 34) жодних сумнівів щодо *електромагнітної природи світла* не залишилось.

Електромагнітна теорія світла дозволила пояснити багато оптичних явищ, однак уже на початку XX ст. з'ясувалося, що цієї теорії недостатньо для пояснення явищ, які виникають під час взаємодії світла з речовиною. До них насамперед належать процеси поглинання й випромінювання світла, явище фотоефекту та ін. Ці явища можна пояснити тільки з позицій квантової теорії світла, згідно з якою світло випромінюється, поширюється та поглинається речовиною не



безперервно, а скінченними порціями — квантами. Кожний окремий квант світла має властивості частинки, а сукупність квантів поводить подібно до хвилі. Така двоїста природа світла (та й будь-якої частинки) отримала назву *корпускулярно-хвильовий дуалізм*. У сучасній фізиці квантові уявлення не суперечать хвильовим, а поєднуються на основі квантової механіки й квантової електродинаміки.

### ! Підбиваємо підсумки

Оптика — розділ фізики, що вивчає явища, пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль видимого діапазону та з їхньою взаємодією з речовиною. Корпускулярна теорія Ньютона розглядала світло як потік частинок, які випускає світне тіло, а властивості частинок описувала за допомогою законів класичної механіки. Хвильова теорія Гюйгенса розглядала світло як механічні хвилі, що поширюються у світовому ефірі, який заповнює весь простір.

Згідно із сучасною квантовою теорією світло — це потік квантів, причому для опису їхніх властивостей використовуються закони не класичної, а квантової механіки. Сучасна хвильова теорія розглядає світло як електромагнітну хвилю.

Існування двох протилежних теорій про природу світла (корпускулярної та хвильової) зумовлене двоїстою природою світла — корпускулярно-хвильовим дуалізмом.

### ? Контрольні запитання

**1.** Що являє собою світло відповідно до гіпотези Демокріта? **2.** Хто є засновником корпускулярної теорії світла? Які її основні положення? **3.** Які оптичні явища не можна було описати в межах корпускулярної теорії світла? **4.** Хто є засновником хвильової теорії світла? Які її основні положення? Які недоліки? **5.** Чому у встановленні природи світла значну роль відіграло визначення швидкості поширення світла? Як її було визначено? **6.** Які сучасні уявлення про природу світла? **7.** У чому сутність корпускулярно-хвильового дуалізму?

## § 39. ВІДБИВАННЯ СВІТЛА. ЗАКОН ВІДБИВАННЯ СВІТЛА. ПЛОСКЕ ДЗЕРКАЛО

?! У Козьми Прутоква є афоризм: «Якщо в тебе запитано буде: що корисніше — сонце чи місяць? — відповідай: місяць. Тому що сонце світить удень, коли й без того видно, а місяць — уночі». А чи можна назвати Місяць джерелом світла? Зрозуміло, що ні. Ми бачимо його, оскільки він відбиває світло, джерелом якого є Сонце. Вважають, що закон відбивання світла, як і закон його прямолінійного поширення, встановив ще Платон у 430 р. до н. е. Згадаємо закон відбивання світла і доведемо його, користуючись принципом Гюйгенса.

### 1 Що таке геометрична оптика

**Геометрична оптика** — це розділ оптики, що вивчає закони поширення світла в прозорих середовищах\* і принципи побудови зображень в оптичних системах без урахування хвильових властивостей світла.

\* *Прозоре середовище* — це середовище, в якому світлова хвиля без помітного зменшення енергії може проходити відстані, що істотно перевищують довжину хвилі.



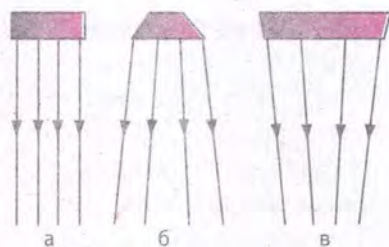


Рис. 39.1. Схематичне зображення світлових пучків за допомогою світлових променів: а — паралельний світловий пучок; б — розбіжний світловий пучок; в — збіжний світловий пучок



Рис. 39.2. Пучки світла, що проходять крізь гілки дерев

Лінія, вздовж якої поширюється потік світлової енергії, називається **світловим променем**.

Світловий промінь — суто геометричне поняття, його використовують для схематичного зображення *світлових пучків* (рис. 39.1). Саме зі світловими пучками ми маємо справу в реальному житті (рис. 39.2). І хоча під час описання світлових явищ інколи говорять: «промінь світла падає», «заломлення променя» тощо, але мається на увазі саме пучок світла (падаючий, заломлений та ін.), напрямком якого заданий цим променем.

В основу геометричної оптики покладено низку простих законів, установлених експериментально, а саме:

- **закон прямолінійного поширення світла** — в однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно;
- **закон незалежного поширення світла** — окремі пучки світла не впливають один на одного й поширюються незалежно;
- **закопи відбивання і заломлення світла**.

★ Узагальненням усіх законів геометричної оптики є **принцип найменшого часу**, названий на честь французького математика *П'єра де Ферма* (1601–1665) **принципом Ферма**:

Поширення світла з однієї точки до іншої відбувається таким шляхом, проходження якого вимагає мінімального часу порівняно з будь-якими іншими шляхами між цими точками.

Мінімальною відстанню між двома точками є довжина відрізка прямої, що сполучає ці точки. Отже, з принципу Ферма випливає закон прямолінійного поширення світла в однорідному середовищі. Цей принцип дозволяє з математичною точністю розв'язувати будь-які задачі про поширення світла як в однорідному, так і в неоднорідному середовищах★.

## 2 Як формулюється закон відбивання світла

Якщо на дзеркало, закріплене в центрі оптичної шайби, спрямувати вузький пучок світла так, щоб він давав на поверхні шайби світлу смужку, то побачимо, що відбитий пучок також дасть на поверхні шайби світлу смужку (рис. 39.3).

Задамо напрямком пучка світла, який падає, променем  $SO$ . Цей промінь називають *падаючим променем*. Промінь  $OK$ , який задає напрямком відбитого пучка світла, називають *відбитим променем*.



діння променя постави-  
 $OB$  до поверхні дзерка-  
 світло. Звернемо увагу на  
 промінь, відбитий про-  
 куляр лежать в одній  
 ній поверхні шайби.

ки 7-го класу ви знаєте,  
 ений падаючим проме-  
 яром, поставленим до  
 ля з точки падіння про-  
 кутом падіння світла;  
 й відбитим променем  
 , — кутом відбивання.

джерело світла й вимі-  
 ня й відбивання світла,  
 ся в тому, що вони що-  
 ми.

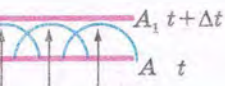
**Відбивання світла:**

ючий, промінь відбитий  
 яр до поверхні відбиван-  
 ний із точки падіння про-  
 в одній площині; кут від-  
 а дорівнює куту падіння.

дбивання світла впли-  
 світлових променів:  
 омінь спрямувати шля-  
 меня, то відбитий про-  
 падаючого (рис. 39.4).

**Доведення закону відбивання світла**

ання світла можна отримати, скориставшись прин-  
 Для цього розглянемо плоску хвилю (рис. 39.5),  
 у поділу двох середовищ (рис. 39.6). Напрямок



льова поверхня  
 бою площину (хви-  
 , перпендикулярні  
 дручника), а промені,  
 поширення хвилі,  
 лу

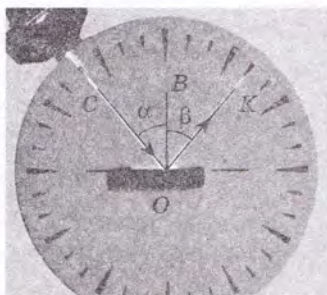


Рис. 39.3. Встановлення законів від-  
 бивання світла за допомогою оптичної  
 шайби:  $\alpha$  — кут падіння,  $\beta$  — кут від-  
 бивання

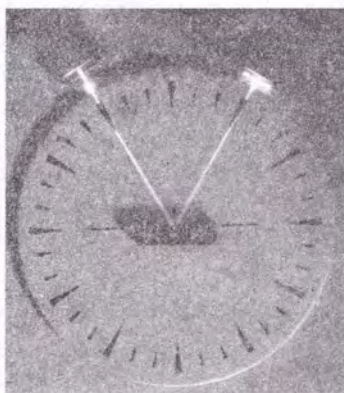


Рис. 39.4. Демонстрація оборотності  
 світлових променів: промінь, відбитий  
 від дзеркала, йде шляхом падаючого

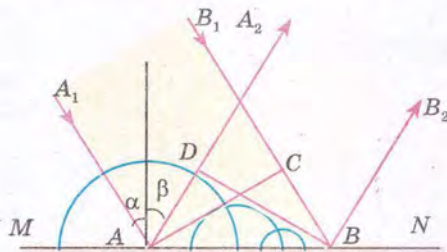


Рис. 39.6. Відбивання плоскої хвилі від плоскої  
 поверхні  $MN$ : хвильова поверхня падаючої хви-  
 лі — площина  $AC$ , відбитої хвилі — площина  $DB$ ;  
 $\alpha$  — кут падіння,  $\beta$  — кут відбивання



поширення хвилі задамо променями  $A_1A$  і  $B_1B$ , які паралельні один одному та перпендикулярні до хвильової поверхні  $AC$ .

Різні ділянки хвильової поверхні досягають відбиваючої межі  $MN$  неодночасно: збудження коливань у точці  $A$  почнеться раніше, ніж у точці  $B$ , на час  $\Delta t = \frac{CB}{v}$ , де  $v$  — швидкість поширення

хвилі. У момент, коли хвиля досягне точки  $B$ , вторинна хвиля з центром у точці  $A$  вже пошириться на певну відстань і являтиме собою півсферу радіуса  $r = AD = v\Delta t = CB$ . Вторинні хвилі, збуджені в точках, розташованих між точками  $A$  і  $B$ , теж являтимуть собою півсфери, але меншого радіуса. Обвідною вторинних хвиль (хвильова поверхня відбитої хвилі) є площина  $DB$ , дотична до сферичних поверхонь. Промені  $AA_2$  і  $BB_2$ , що перпендикулярні до хвильової поверхні  $DB$ , зададуть напрямок поширення відбитої хвилі.

У прямокутних трикутниках  $ABD$  і  $BAC$  гіпотенуза  $AB$  спільна, катет  $AD$  дорівнює катету  $CB$ , отже, ці трикутники рівні, тоді  $\angle DBA = \angle CAB$ . Водночас  $\angle \alpha = \angle CAB$ ,  $\angle \beta = \angle DBA$  як кути з відповідно перпендикулярними сторонами. Отже, кут падіння  $\alpha$  дорівнює куту відбивання  $\beta$ . Крім того, як випливає з побудови, *падаючий промінь, промінь відбитий і перпендикуляр, поставлений із точки падіння до поверхні відбивання, лежать в одній площині*. Таким чином, ми вивели закон відбивання світла на основі принципу Гюйгенса.

#### 4 Дифузне та дзеркальне відбивання світла

Ми бачимо тіла навкруги нас лише тоді, коли в наше око потрапляють пучки світла. Але більшість тіл, що нас оточують, не є джерелами світла — ми бачимо їх тому, що вони відбивають світло, яке падає на поверхню цих тіл від якого-небудь джерела. Розрізняють *дзеркальне* та *дифузне* (розсіяне) відбивання світла.

Якщо на дифузно відбиваючу поверхню падає паралельний пучок світлових променів, то внаслідок різного нахилу окремих ділянок відбиваючої поверхні відбиті промені поширюються в будь-якому напрямку (рис. 39.7, *а*). Тому ми можемо бачити освітлений предмет із будь-якого боку. Більшість поверхонь відбиває світло дифузно.

Якщо паралельний пучок світлових променів, що падає на плоску поверхню поділу двох середовищ, після відбивання від поверхні залишається паралельним, то таке відбивання називається дзеркальним (рис. 39.7, *б*), а сама поверхня — *плоским дзеркалом*. Правила побудови зображень у плоскому дзеркалі ви вивчали в 7-му класі (рис. 39.8).

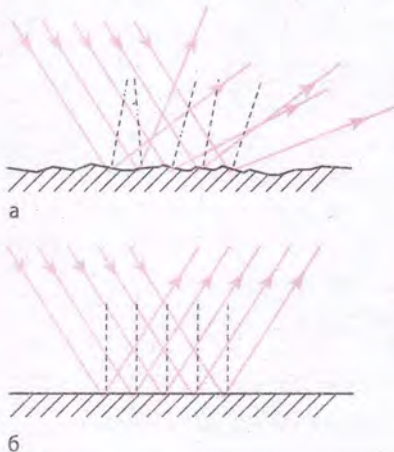


Рис. 39.7. Відбивання світла: *а* — дифузне (розсіяне), *б* — дзеркальне



Чим більш гладенькою є поверхня, тем менше розсіюється світло, тому, наприклад, ми не бачимо поверхню чистого дзеркала — бачимо лише уявні зображення предметів у ньому.

### 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Два плоских прямокутних дзеркала утворюють двогранний кут  $150^\circ$ . На відстані 10 см від лінії дотику дзеркал і на однаковій відстані від кожного з них розташоване точкове джерело світла. Визначте відстань між уявними зображеннями джерела світла у дзеркалах.



**Рис. 39.8.** Зображення в плоскому дзеркалі: а — предмета, б — точки  $S$ . Зображення є уявним і симетричним предмету або точці відносно поверхні дзеркала

$l$  — ?

Дано:

$$\alpha = 150^\circ$$

$$d = 10 \text{ см}$$

*Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі, розв'язання.* Згадавши, що точка та її зображення симетричні відносно поверхні дзеркала, побудуємо зображення джерела  $S$  у кожному із дзеркал (рисунок).

Оскільки  $SA \perp ON$  і  $SB \perp OM$ , то  $\angle BSA = \angle \beta$  як кути з відповідно перпендикулярними сторонами, причому  $\beta = 180^\circ - \alpha$  (1). Прямокутні трикутники  $SBO$  і  $SAO$  рівні: вони мають спільну гіпотенузу  $SO$  та рівні катети ( $SB = SA$  за умовою задачі). Отже,  $\angle OSA = \angle OSB = \frac{\beta}{2}$ ;  $SB = SA = SO \cos \frac{\beta}{2} = d \cos \frac{\beta}{2}$  (2).

Сполучивши точки  $S_1$  і  $S_2$ , отримаємо два рівні прямокутні трикутники  $SKS_1$  і  $SKS_2$ .

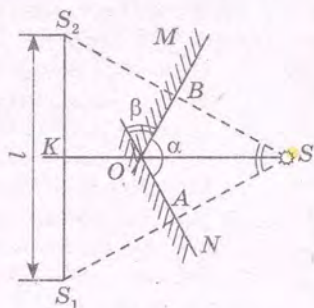
Звідси  $l = S_1S_2 = 2S_1K = 2SS_1 \sin \frac{\beta}{2}$ , де  $SS_1 = 2SA$ . Враховуючи рівності (1)

і (2), остаточно маємо:  $l = 2 \cdot 2d \cos \frac{\beta}{2} \sin \frac{\beta}{2} = 2d \sin \beta = 2d \sin(180^\circ - \alpha)$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$l = 2 \cdot 10 \text{ см} \cdot \sin(180^\circ - 150^\circ) = 10 \text{ см}.$$

**Відповідь:** відстань між зображеннями  $l = 10$  см.



### Підбиваємо підсумки

Геометрична оптика — розділ оптики, який вивчає закони поширення світла в прозорих середовищах і принципи побудови зображень в оптичних системах без урахування хвильових властивостей світла.

Світловий промінь — це лінія, вздовж якої поширюється потік світлової енергії.



В основі геометричної оптики лежать чотири закони: 1) закон прямолінійного поширення світла (в однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно); 2) закон незалежного поширення світла (окремі пучки світла не впливають один на одного й поширюються незалежно); 3) закон відбивання світла (промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до поверхні відбивання, поставлений із точки падіння променя, лежать в одній площині; кут відбивання дорівнює куту падіння); 4) закон заломлення світла. Ці закони дозволяють описати поширення світла в різних оптичних системах.



### Контрольні запитання

1. Що є об'єктом вивчення геометричної оптики?
2. Дайте визначення світлового променя.
3. Сформулюйте закони: прямолінійного поширення світла; незалежного поширення світла; відбивання світла. Наведіть приклади, які їх ілюструють.
- ★ 4. Сформулюйте та поясніть принцип Ферма.
- ★ 5. Дайте визначення кута падіння; кута відбивання.
6. Опишіть дослід, за допомогою якого можна переконатись у справедливості закону відбивання світла.
7. У чому полягає властивість оборотності світлових променів?
8. Доведіть закон відбивання світла, користуючись принципом Гюйгенса.
9. Чому ми бачимо тіла, які нас оточують?
10. Яке відбивання світла називається дзеркальним? дифузним?
11. Які характеристики має зображення предмета в плоскому дзеркалі?



### Вправа № 29

1. Як має бути розташоване око, щоб через невелику щілину в паркані можна було бачити якомога більше предметів? Відповідь поясніть.
2. Кут між падаючим і відбитим променями становить  $80^\circ$ . Чому дорівнює кут падіння променя?
3. Сонячний промінь відбивається від поверхні озера. Кут між падаючим променем і горизонтом удвічі більший, ніж кут між падаючим і відбитим променями. Чому дорівнює кут падіння променя?
4. Промінь, напрямлений горизонтально, падає на вертикальний екран. Коли на шляху променя розташували плоске дзеркало, світлова пляма на екрані змістилася вгору на 20 см. Визначте кут падіння променя на дзеркало, якщо відстань від дзеркала до екрана 40 см.
5. Дерево, освітлене сонячними променями, відкидає тінь завдовжки 25 м. Стийка футбольних воріт, висота якої 2,44 м, відкидає тінь завдовжки 2,0 м. Знайдіть висоту дерева.

## § 40. ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА



Рис. 40.1. Заломлення світла



Коли ми, стоячи на березі водойми, намагаємося визначити на око її глибину, вона завжди здається меншою, ніж є насправді. Ложка або соломинка у склянці з водою здається нам зламаною на межі повітря і води. Якщо дивитись на предмети крізь скляний глечик, то вони здаються викривленими (рис. 40.1). Як ви вже знаєте, всі ці явища пояснюються заломленням світла. Згадаємо його причину та встановимо закон заломлення світла.



## 1 У чому причина заломлення світла

Якщо пучок світла падає на межу поділу двох прозорих середовищ, то частина світлової енергії повертається в перше середовище, утворюючи відбитий пучок світла, а частина — проходить через межу в друге середовище, утворюючи пучок світла, який, як правило, змінює напрямок (рис. 40.2).

Зміну напрямку поширення світла в разі його проходження через межу поділу двох середовищ називають **заломленням світла**.

Промінь, що задає напрямок заломленого пучка світла, називають **заломленим променем**. Кут, утворений заломленим променем і перпендикуляром до межі поділу двох середовищ, поставленим із точки падіння променя, називається **кутом заломлення**.

Кількісний закон, що описує заломлення світла, був установлений експериментально лише в 1621 р. голландським природознавцем Віллебрордом Снелліусом (1580–1626) і отримав назву **закону Снелліуса**. Одержимо цей закон за допомогою принципу Гюйгенса.

## 2 Встановлення закону заломлення світла на основі принципу Гюйгенса

Розглянемо плоску хвилю, що падає на межу поділу  $MN$  двох середовищ (рис. 40.3). Напрямок поширення хвилі задамо променями  $A_1A$  і  $B_1B$ , паралельними один одному та перпендикулярними до хвильової поверхні  $AC$ . Зрозуміло, що спочатку поверхні  $MN$  досягне промінь  $A_1A$ . Промінь  $B_1B$  досягне її через час  $\Delta t = \frac{CB}{v_1}$ , де  $v_1$  — швидкість світла у першому середовищі. У момент, коли вторинна хвиля в точці  $B$  тільки починає збуджуватися, хвиля від точки  $A$  вже пошириться у другому середовищі на відстань  $AD = v_2 \Delta t$ , де  $v_2$  — швидкість світла у другому середовищі. Провівши площину  $BD$ , дотичну до всіх вторинних хвиль, одержимо хвильову поверхню заломленої хвилі.

Розглянемо прямокутні трикутники  $ACB$  і  $ADB$ . У трикутнику  $ACB$  кут  $CAB$  дорівнює

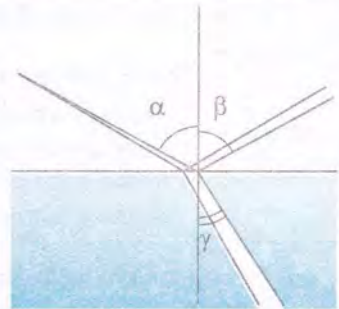


Рис. 40.2. Спостереження заломлення світла за допомогою оптичної шайби:  $\alpha$  — кут падіння;  $\beta$  — кут відбивання;  $\gamma$  — кут заломлення

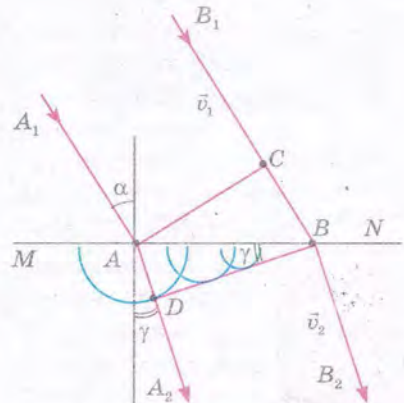


Рис. 40.3. Заломлення плоскої хвилі на плоскій межі поділу  $MN$ : хвильова поверхня падаючої хвилі — площина  $AC$ , заломленої хвилі — площина  $BD$ ;  $\alpha$  — кут падіння,  $\gamma$  — кут заломлення



куту падіння  $\alpha$  (як кути з відповідно перпендикулярними сторонами), отже,  $CB = AB \sin \alpha$ . Враховуючи, що  $CB = v_1 \Delta t$ , знайдемо  $AB$ :

$$AB = \frac{v_1}{\sin \alpha} \Delta t \quad (1).$$

Аналогічно в трикутнику  $ADB$  кут  $ABD$  дорівнює

$$\text{куту заломлення } \gamma, \text{ отже, } AD = AB \sin \gamma. \text{ Враховуючи, що } AD = v_2 \Delta t, \text{ знайдемо } AB: AB = \frac{v_2}{\sin \gamma} \Delta t \quad (2).$$

Прирівнявши вирази (1) і (2), маємо:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$ , де  $n_{21}$  — стала величина, яка не залежить від кута падіння світла.

### Закон заломлення світла (закон Снелліуса):

Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу середовищ, поставлений із точки падіння променя, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для двох даних середовищ є величиною сталою:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}.$$

3

### Що характеризує показник заломлення

Фізична величина  $n_{21}$ , яка входить у математичний запис закону заломлення світла, називається *відносним показником заломлення*, або показником заломлення другого середовища відносно першого. Відносний показник заломлення зазначає, у скільки разів швидкість світла  $v_1$  у першому середовищі більша (менша) за швидкість світла  $v_2$  у другому середовищі:  $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$ .

Саме зміна швидкості поширення світла в разі його переходу з одного прозорого середовища в інше є причиною заломлення світла.

Прийнято говорити про *оптичну густину середовища*: чим меншою є швидкість світла в середовищі, тим більшою є його оптична густина. Так, повітря має більшу оптичну густину, ніж вакуум, оскільки в повітрі швидкість світла дещо менша, ніж у вакуумі. Оптична густина води менша за оптичну густину алмазу, оскільки швидкість світла у воді більша, ніж в алмазі. Зазвичай швидкість світла в середовищі порівнюють з його швидкістю у вакуумі. Фізичну величину, яка зазначає, у скільки разів швидкість світла в середовищі менша, ніж у вакуумі, називають *абсолютним показником заломлення середовища*.

**Абсолютний показник заломлення середовища  $n$**  — це фізична величина, яка характеризує оптичну густину середовища і дорівнює відношенню швидкості  $c$  світла у вакуумі до швидкості  $v$  світла в середовищі:

$$n = \frac{c}{v}$$



Абсолютний показник заломлення залежить від фізичного стану середовища (температури, густини та ін.) і від властивостей світлової хвилі, тобто її довжини (або частоти) (див. § 34). Тому в таблицях зазвичай указують стан середовища і довжину світлової хвилі або середній показник для даного діапазону довжин хвиль (таблиця).

Зверніть увагу: відносний показник заломлення дорівнює  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ , де  $n_1$  і  $n_2$  — абсолютні показники заломлення першого та другого середовищ.

#### 4 Повне відбивання світла

Розглянемо докладніше випадок, коли світло переходить із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною. У цьому випадку  $n_2 < n_1$ , тому згідно із законом заломлення світла  $\sin \alpha < \sin \gamma$ . Отже, кут заломлення  $\gamma$  завжди більший, ніж кут падіння  $\alpha$ .

Подивимось, як змінюватиметься кут заломлення світлового пучка в разі збільшення кута його падіння. Для цього схематично зобразимо падіння пучка світла на поверхню поділу середовищ, поступово збільшуючи кут падіння (рис. 40.4) і пам'ятаючи, що світло завжди частково відбивається від межі поділу середовищ. Ми бачимо, що заломлений пучок світла наближається до межі поділу двох середовищ, при цьому його яскравість зменшується, а яскравість відбитого пучка світла, навпаки, збільшується. При певному куті падіння  $\alpha_0$ , коли кут заломлення досягає  $90^\circ$ , заломлений пучок світла зникає, а весь падаючий пучок світла повертається в перше середовище — світло повністю відбивається. Зрозуміло, що в разі подальшого збільшення кута падіння ( $\alpha > \alpha_0$ ) заломлення світла не спостерігатиметься.

Явище, за якого заломлення світла відсутнє, тобто світло повністю відбивається від середовища з меншою оптичною густиною, називається **повним внутрішнім відбиванням**.

**Граничний кут повного внутрішнього відбивання**  $\alpha_0$  — це найменший кут падіння, при якому настає повне внутрішнє відбивання.

*Абсолютний показник заломлення  $n$  (середній для променів видимого діапазону)*

Речовина	$n$
Повітря	1,003
Лід	1,31
Вода	1,33
Етиловий спирт	1,36
Бензин	1,50
Скло	1,52
Кварц	1,54
Алмаз	2,42

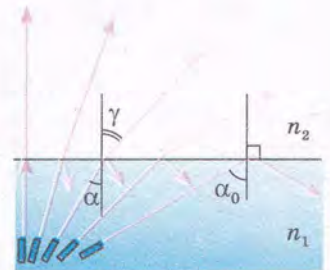


Рис. 40.4. Світло падає із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною



За законом заломлення світла  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}$ , отже, при  $\gamma = 90^\circ$ :

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}.$$

### 5 Де застосовують явище повного відбивання світла

Повне відбивання світла знайшло застосування в оптичній техніці. Наприклад, в багатьох оптичних приладах потрібно змінювати напрямок поширення світлових пучків із мінімальними втратами енергії на поверхнях оптичних деталей. З цією метою застосовують так звані призми повного відбивання (рис. 40.5).

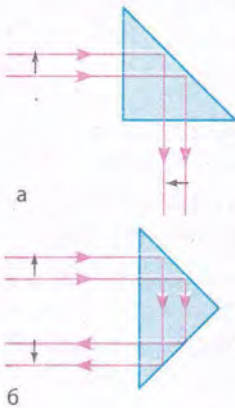


Рис. 40.5. Хід променів світла в поворотній (а) та оборотній (б) призмах повного відбивання

Найбільш інтенсивно явище повного відбивання світла використовують при створенні волоконних оптичних систем. Якщо в торець суцільної скляної трубки спрямувати пучок світла, то після багаторазового відбивання світло вийде на її протилежному кінці (рис. 40.6). Це відбудеться незалежно від того, якою буде трубка — вигнутою чи прямою. Тому перші світловоди (гнучкі нитки, що проводять світло на основі повного внутрішнього відбивання) стали використовувати для підсвічування важкодоступних місць: світловий пучок спрямовується на один кінець світловода, а другий кінець освітлює потрібне місце. Цю технологію використовують у медицині для дослідження внутрішніх органів (ендоскопія), у техніці, зокрема для визначення дефектів усередині моторів без їх розбирання.

Однак найбільше світловоди поширені як кабелі для передачі інформації. Волоконно-оптичний кабель є набагато дешевшим і легшим за стандартний мідний, він практично не змінює своїх властивостей під впливом навколишнього середовища, дозволяє передавати більше інформації тощо. Сьогодні волоконно-оптичні лінії зв'язку стрімко витісняють традиційні.

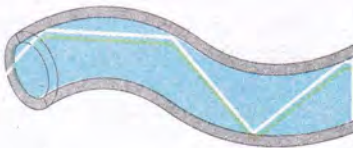


Рис. 40.6. Хід променя світла у світловоді

### 6 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** У дно водойми глибиною 2,5 м вбито стовп так, що його верхня частина піднімається над поверхнею води на 1,0 м. Обчисліть довжину тіні стовпа на дні водойми, якщо висота сонця над горизонтом  $30^\circ$ .



$L = ?$ 

Аналіз фізичної проблеми

Дано:

$H = 2,5 \text{ м}$

$h = 1,0 \text{ м}$

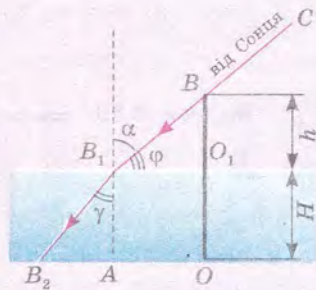
$\varphi = 30^\circ$

$n = 1,33$

Виконаємо пояснювальний рисунок. У точці  $B_1$  на межі поділу повітря і води прямолінійність поширення променя  $CB$  порушується. Отже, тінь від стовпа на дні водойми дорівнюватиме довжині відрізка  $OB_2$ :

$$OB_2 = B_2A + AO = B_2A + B_1O_1.$$

Таким чином, необхідно: 1) використовуючи закон прямолінійного поширення світла, знайти положення точки  $B_1$ ; 2) використовуючи закон заломлення, знайти напрямок поширення променя  $B_1B_2$ ; 3) скориставшись прямолінійністю поширення світла у воді, визначити положення точки  $B_2$ . Будемо вважати, що показник заломлення води відносно повітря дорівнює абсолютному показнику заломлення води.



*Побудова математичної моделі, розв'язання.* Довжина тіні стовпа на дні водойми дорівнює:  $L = B_2A + B_1O_1$  (\*). Із прямокутного трикутника  $BO_1B_1$ :  $B_1O_1 = BO_1 \operatorname{ctg} \varphi = h \operatorname{ctg} \varphi = 1,0 \text{ м} \cdot \operatorname{ctg} 30^\circ = 1,73 \text{ м}$ .

Кут падіння  $\alpha$  променя  $BB_1$  дорівнює:  $\alpha = 90^\circ - \varphi = 60^\circ$ .

За законом заломлення світла:  $\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n} = \frac{\sin 60^\circ}{1,33} = \frac{0,866}{1,33} = 0,651$ .

Отже,  $\gamma \approx 41^\circ$ . Із прямокутного трикутника  $B_2AB_1$ :  $B_2A = B_1A \operatorname{tg} \gamma = H \operatorname{tg} \gamma = 2,5 \text{ м} \cdot \operatorname{tg} 41^\circ = 2,17 \text{ м}$ .

З урахуванням співвідношення (\*) маємо:  $L = 2,17 \text{ м} + 1,73 \text{ м} = 3,9 \text{ м}$ .

*Відповідь:* довжина тіні стовпа на дні водойми  $L = 3,9 \text{ м}$ .

### ! Підбиваємо підсумки

Зміна напрямку поширення світла в разі його проходження через межу поділу двох прозорих середовищ називається заломленням світла. Заломлення світла підпорядковується закону Снелліуса: промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу середовищ, поставлений із точки падіння променя, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для двох даних середовищ є величиною сталою:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$ , де  $n_{21}$  — відносний показник заломлення, який зазначає, у скільки разів швидкість світла  $v_1$  у першому середовищі відрізняється від швидкості світла  $v_2$  у другому середовищі.

Якщо при переході світла з одного середовища в інше швидкість світла зменшується, то говорять, що світло перейшло із середовища з меншою оптичною густиною в середовище з більшою оптичною густиною, і навпаки.

Якщо світло переходить із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною, то в разі досягнення певного граничного кута падіння спостерігається повне внутрішнє відбивання світла.





**Контрольні запитання**

1. Які явища ми спостерігаємо, коли світло проходить через межу поділу двох середовищ? 2. Який кут називається кутом заломлення? 3. Доведіть закон заломлення світла, користуючись принципом Гюйгенса, та сформулюйте цей закон. 4. У чому причина заломлення світла? 5. Який фізичний зміст відносного та абсолютного показників заломлення світла? 6. За яких умов на межі двох середовищ може спостерігатися повне внутрішнє відбивання? 7. Що таке кут повного внутрішнього відбивання? Як він пов'язаний із показником заломлення? 8. Наведіть приклади застосування повного внутрішнього відбивання світла.



**Вправа № 30**

1. Перенесіть рис. 1 у зошит. Вважаючи, що середовище 1 має більшу оптичну густину, ніж середовище 2, для кожного випадку схематично побудуйте падаючий або заломлений промінь, позначте кути падіння й заломлення.

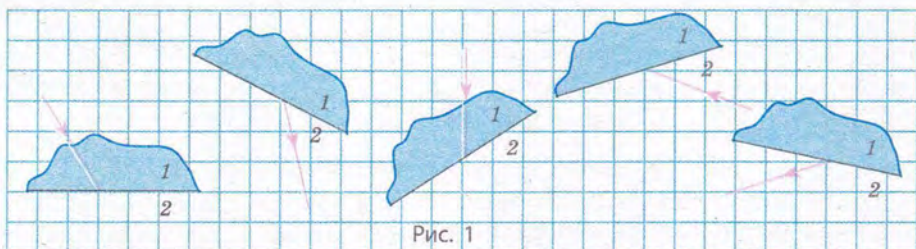


Рис. 1

2. Визначте швидкість світла: в алмазі; у воді; у льоді.
3. Визначте кут повного внутрішнього відбивання для межі поділу середовищ: вода — повітря; алмаз — вода; скло — вода.
4. Світло падає з повітря на поверхню деякої прозорої речовини під кутом  $45^\circ$ . Визначте абсолютний показник заломлення цієї речовини, якщо заломлене світло поширюється під кутом  $60^\circ$  до поверхні поділу середовищ.
5. Обчисліть товщину  $d$  скляної плоскопаралельної пластинки (рис. 2), після проходження якої світловий промінь зміщується на відстань  $l=4$  мм. Кут падіння світла на пластинку  $\alpha=45^\circ$ .
6. Визначте діаметр світлої круглій плями на поверхні води в басейні, якщо лампа, яка утворює цю пляму, розташована на глибині 2,4 м. Світло від лампи поширюється в усіх напрямках.
7. Промінь світла, що падає на бічну грань рівнобічної призми із заломлюючим кутом  $\theta$ , після заломлення йде паралельно основі призми (рис. 3). Після виходу з призми він виявляється відхиленням від початкового напрямку на кут  $\phi$ . Знайдіть показник заломлення речовини, з якої виготовлена призма.

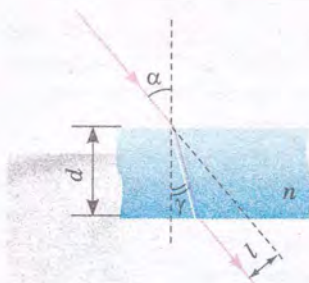


Рис. 2



Рис. 3



## § 41. ЛІНЗИ. ПОБУДОВА ЗОБРАЖЕНЬ, ЯКІ ДАЄ ТОНКА ЛІНЗА

?!

Ви вже знаєте, що заломлення світла використовується в лінзах. Правила побудови зображень, отримуваних за допомогою лінз, відомі ще із Середньовіччя. Так, одними з перших, використовуючи лінзи, голландський оптик Захарій Янсен у 1590 р. сконструював мікроскоп, а в 1609 р. Галілео Галілей винайшов телескоп. Отже, згадаємо основні характеристики лінз.

### 1 Що таке лінза

**Лінза** (сферична) — прозоре тіло, обмежене з двох боків сферичними поверхнями (зокрема, одна з поверхонь може бути площиною).

За формою лінзи поділяють на *опуклі* та *увігнуті* (рис. 41.1).

Якщо товщина лінзи  $d$  в багато разів менша за радіуси  $R_1$  і  $R_2$  сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, то таку лінзу називають *тонкою* (рис. 41.2). Далі, говорячи про лінзу, ми матимемо на увазі тонку лінзу.

Пряма, яка проходить через центри сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, називається *головною оптичною віссю лінзи*. Точку лінзи, яка розташована на головній оптичній осі і через яку промені світла проходять, не змінюючи свого напрямку, називають *оптичним центром лінзи*.

Лінза є *збиральною*, якщо паралельні промені, пройшовши крізь неї, перетинаються в одній точці. Цю точку називають *дійсним фокусом збиральної лінзи* (рис. 41.3).

Лінза є *розсіювальною*, якщо паралельні промені після проходження крізь неї виходять розбіжним пучком. Продовження променів збираються в одній точці на фокальній площині лінзи. Цю точку називають *уявним фокусом розсіювальної лінзи* (рис. 41.4).

Точку  $F$ , в якій збираються промені, паралельні головній оптичній осі лінзи, називають *головним фокусом лінзи*.

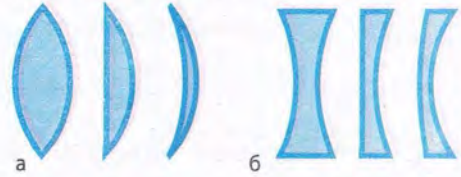


Рис. 41.1. Різні види лінз у розрізі: а — опуклі лінзи (двоопукла, плоско-опукла, увігнуто-опукла); б — увігнуті лінзи (двоувігнута, плоско-увігнута, опукло-увігнута)

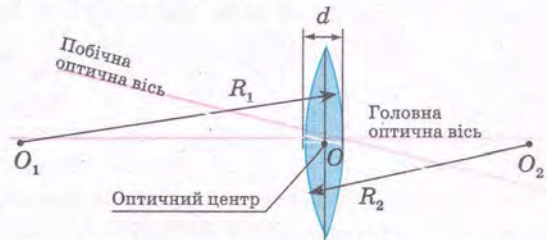


Рис. 41.2. Тонка сферична лінза:  $d \ll R_1$ ,  $d \ll R_2$

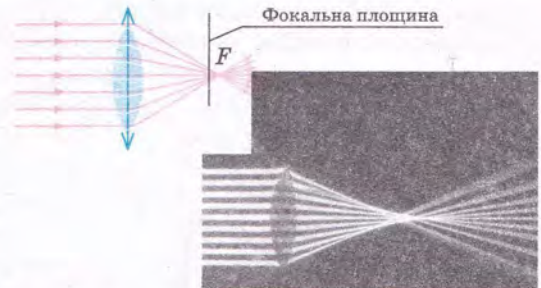


Рис. 41.3. Хід променів у збиральній лінзі. Точка  $F$  — дійсний головний фокус лінзи



Рис. 41.4. Хід променів у розсіювальній лінзі. Точка  $F_1$  — уявний фокус лінзи



## 2 Які фізичні величини характеризують лінзу

**Фокусна відстань лінзи  $F$**  — відстань від оптичного центра лінзи до її головного фокуса\*.

Одиниця фокусної відстані лінзи в СІ — метр (м). Фокусну відстань збиральної лінзи вважають додатною ( $F > 0$ ), а розсіювальної — від'ємною ( $F < 0$ ).

Очевидно, що чим сильніші заломлювальні властивості лінзи, тим меншою є її фокусна відстань.

**Оптична сила лінзи  $D$**  — фізична величина, яка характеризує заломлювальні властивості лінзи та обернена до її фокусної відстані:

$$D = \frac{1}{F}$$

Одиниця оптичної сили — діоптрія (дптр). 1 діоптрія — це оптична сила такої лінзи, фокусна відстань якої дорівнює 1 м.

Якщо лінза збиральна, то її оптична сила є додатною, якщо розсіювальна — від'ємною. Наприклад, якщо оптична сила лінз в одних окулярах +3 дптр, а в інших -3 дптр, це означає, що в перших окулярах стоять збиральні лінзи, а в других — розсіювальні.

\* Оптичну силу лінзи визначають за формулою:

$$D = \left( \frac{n_n}{n_{\text{сеп}}} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

де  $n_n$ ,  $n_{\text{сеп}}$  — абсолютні показники заломлення відповідно матеріалу лінзи та середовища, в якому перебуває лінза;  $R_1$  і  $R_2$  — радіуси сферичних поверхонь, що обмежують лінзу. Для опуклої поверхні  $R$  беруть зі знаком «+», для увігнутої — зі знаком «-», для плоскої —  $R = \infty$ .

Аналіз формули свідчить: якщо  $n_n > n_{\text{сеп}}$ , то опукла лінза є збиральною, а увігнута — розсіювальною; якщо  $n_n < n_{\text{сеп}}$ , то опукла лінза є розсіювальною, а увігнута — збиральною.

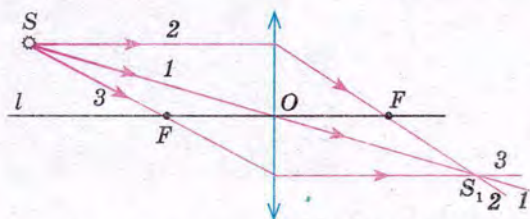


Рис. 41.5. Три найпростіші у побудові промені: 1 — промінь, що проходить через оптичний центр  $O$  (не заломлюється); 2 — промінь, паралельний головній оптичній осі  $l$  (після заломлення в лінзі йде через фокус); 3 — промінь, що проходить через фокус  $F$  (після заломлення в лінзі йде паралельно головній оптичній осі)

## 3 Як побудувати зображення предмета, що дає тонка лінза

Розглянемо спочатку, як побудувати зображення точки  $S$ , що отримується за допомогою лінзи. Для цього необхідно знайти точку перетину  $S_1$  променів, що виходять із точки  $S$  та проходять крізь лінзу. Оскільки в точці  $S_1$  перетинаються всі промені, що виходять із точки  $S$ , то для побудови зображення достатньо двох

\* Надалі головний фокус лінзи будемо називати фокусом лінзи.



променів (будь-яких із трьох, показаних на рис. 41.5). Точка  $S_1$  буде дійсним зображенням точки  $S$ , якщо в точці  $S_1$  перетинаються саме промені, що виходять із точки  $S$  та заломлюються в лінзі. Точка  $S_1$  буде уявним зображенням точки  $S$ , якщо в точці  $S_1$  перетинаються продовження променів, що виходять із точки  $S$ .

Зобразимо схематично предмет стрілкою  $AB$  і віддалимо його від лінзи на відстань більше  $2F$  (рис. 41.6, а). Спочатку побудуємо зображення точки  $B$ , для чого скористаємося двома променями (промені 1 і 2). Після заломлення в лінзі вони перетнуться в точці  $B_1$ . Отже, точка  $B_1$  є дійсним зображенням точки  $B$ . Для побудови зображення точки  $A$  проведемо перпендикуляр із точки  $B_1$  на головну оптичну вісь  $l$ . Точка  $A_1$  перетину перпендикуляра й осі  $l$  і є зображенням точки  $A$ . Отже,  $A_1B_1$  — зображення предмета  $AB$ , одержане за допомогою лінзи. Ми бачимо: якщо предмет розташований за подвійним фокусом збиральної лінзи, то його зображення, одержане за допомогою лінзи, є зменшеним, перевернутим, дійсним. Таке зображення виходить, наприклад, на сітківці ока або на матриці фотоапарата.

На рис. 41.6, б показано побудову зображення предмета  $AB$ , одержаного за допомогою збиральної лінзи, у випадку, коли предмет розташований між фокусом і лінзою. Таким чином, розміри та вид зображення, одержаного за допомогою збиральної лінзи, залежать від відстані між предметом і лінзою.

Побудова зображень предмета, одержаних за допомогою розсіювальної лінзи (рис. 41.7), показує, що розсіювальна лінза завжди дає уявне, зменшене, пряме зображення предмета.

Ми часто стикаємося із ситуацією, коли предмет значно більший, ніж лінза

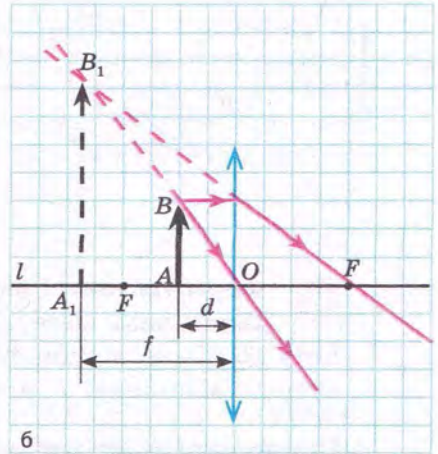
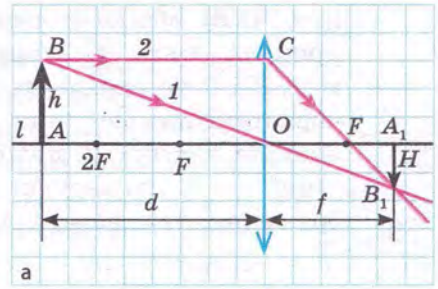


Рис. 41.6. Побудова зображення  $A_1B_1$  предмета у збиральній лінзі: а — предмет  $AB$  розташований за подвійним фокусом; б — предмет  $AB$  розташований між фокусом і лінзою, зображення предмета є збільшеним, прямим, уявним

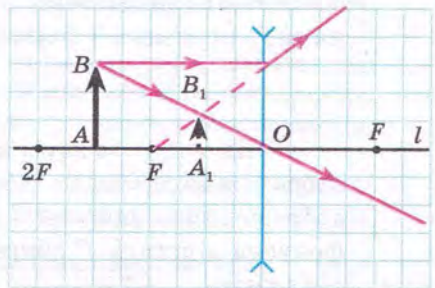


Рис. 41.7. Побудова зображення  $A_1B_1$  предмета  $AB$ , розташованого між фокусом і подвійним фокусом розсіювальної лінзи



(рис. 41.8), або коли частина лінзи закрита непрозорим екраном (наприклад, лінза об'єктива фотоапарата). На рис. 41.8 видно, що промені 2 і 3 не проходять крізь лінзу, але їх, як і раніше, можна використати для побудови зображення. Оскільки реальні промені, що вийшли з точки  $B$ , після заломлення в лінзі перетинаються в одній точці —  $B_1$ , то «зручні промені», за допомогою яких будується зображення, теж перетиналися б у точці  $B_1$ .

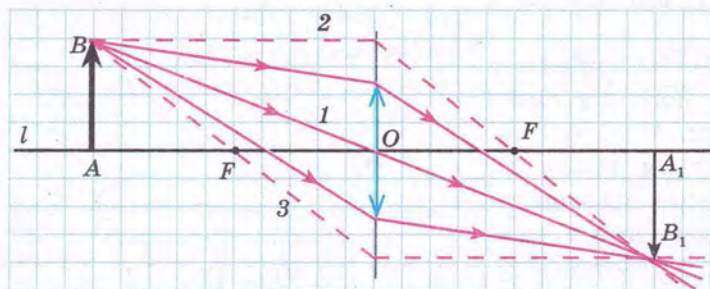


Рис. 41.8. Побудова зображення  $A_1B_1$  предмета  $AB$  у випадку, коли предмет є значно більшим за лінзу

4

#### Формула тонкої лінзи. Лінійне збільшення лінзи

Встановимо математичну залежність між відстанню  $d$  від предмета до лінзи, відстанню  $f$  від зображення предмета до лінзи і фокусною відстанню  $F$  лінзи. Для цього скористаємося рис. 41.6, а.

Прямокутні трикутники  $FOC$  і  $FA_1B_1$  подібні, тому  $\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FA_1}$  або

$$\frac{h}{H} = \frac{F}{f - F}. \quad (1)$$

Прямокутні трикутники  $ABO$  і  $A_1B_1O$  подібні, отже,  $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AO}{A_1O}$  або

$$\frac{h}{H} = \frac{d}{f}. \quad (2)$$

Приврівнявши праві частини рівнянь (1) і (2), маємо:  $\frac{F}{f - F} = \frac{d}{f}$ ;

$Ff = df - dF$ ;  $df = Ff + dF$ . Поділивши обидві частини останньої рівності на  $dfF$ , отримуємо **формулу тонкої лінзи**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

Під час розв'язування задач слід мати на увазі: відстань  $f$  (від зображення предмета до лінзи) потрібно брати зі знаком «-», якщо зображення є уявним, і зі знаком «+», якщо зображення є дійсним; фокусна відстань  $F$  збиральної лінзи є додатною, а розсіювальної — від'ємною.

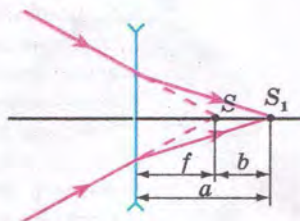
Відношення лінійного розміру  $H$  зображення предмета до розміру  $h$  самого предмета називається **лінійним збільшенням  $\Gamma$  лінзи**:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$



## 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** На розсіювальну лінзу падає збіжний пучок променів (рисунок). Після заломлення в лінзі промені перетинаються в точці, розташованій на відстані  $a$  від лінзи. Якщо лінзу прибрати, то точка перетину променів переміститься ближче до місця, де перебувала лінза, на відстань  $b$ . Визначте фокусну відстань лінзи.



*Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі, розв'язання*

Скористаємося оборотністю світлових променів. Тоді точка  $S_1$ , у якій збігаються промені за наявності лінзи, відіграє роль джерела світла, з якого промені йдуть розбіжним пучком; а точка  $S$ , у якій збігаються промені за відсутності лінзи, відіграє роль уявного зображення. Враховуючи, що  $f$  потрібно брати зі знаком «-», запишемо формулу тонкої лінзи:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$ , або  $F = \frac{df}{f-d}$ .

З рисунка бачимо, що  $d = a$ ,  $f = a - b$ , отже,

$$F = \frac{a(a-b)}{(-b)} = \frac{a(b-a)}{b}.$$

*Аналіз результату*

Оскільки за умовою задачі  $b < a$ , то вираз  $(b-a)$  є від'ємним, тому від'ємною є і фокусна відстань ( $F < 0$ ), що відповідає розсіювальній лінзі.

Відповідь:  $F = \frac{a(b-a)}{b}$ .

## Підбиваємо підсумки

Прозоре тіло, обмежене з двох боків сферичними поверхнями, називають лінзою. Лінзи бувають збиральними і розсіювальними, а за формою — опуклими і ввігнутими.

Лінза називається збиральною, якщо паралельні промені, що падають на неї, після заломлення в лінзі перетинаються в одній точці. Ця точка називається дійсним фокусом лінзи.

Лінза називається розсіювальною, якщо паралельні промені, що падають на неї, після заломлення в лінзі йдуть розбіжним пучком. Точка, в якій перетинаються продовження цих заломлених променів, називається уявним фокусом лінзи.

Фізична величина, що характеризує заломлювальні властивості лінзи та є оберненою до її фокусної відстані, називається оптичною силою лінзи:  $D = \frac{1}{F}$ . Оптична сила лінзи вимірюється в діоптріях (дптр).

Відстань  $d$  від предмета до лінзи, відстань  $f$  від зображення предмета до лінзи і фокусна відстань  $F$  пов'язані формулою тонкої

лінзи:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ .





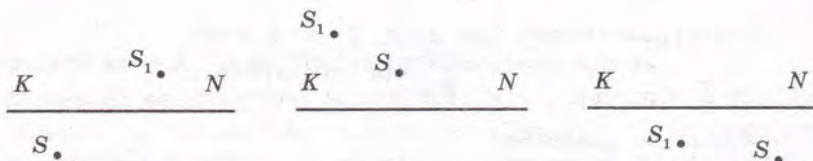
**Контрольні запитання**

1. Що називають лінзою? 2. Які види лінз вам відомі? 3. Чим розсіювальна лінза відрізняється від збиральної? 4. Що називають дійсним фокусом лінзи? 5. Чому фокус розсіювальної лінзи називають уявним? 6. Яку фізичну величину називають оптичною силою лінзи? За якою формулою вона визначається? 7. Оптичну силу якої лінзи взято за одиницю? 8. Які промені використовують для побудови зображення, одержуваного за допомогою лінзи? 9. Від чого залежать характеристики зображень, одержуваних за допомогою лінз? 10. Які фізичні величини пов'язує формула тонкої лінзи? Якого правила слід дотримуватися, застосовуючи цю формулу?



**Вправа № 31**

1. У склі є порожнина у вигляді двоопуклої лінзи. Яка це лінза — збиральна чи розсіювальна? Відповідь обґрунтуйте.
2. На рисунку показано головну оптичну вісь  $KN$  лінзи, світну точку  $S$  та її зображення  $S_1$ . Перенесіть рисунок у зошит і за допомогою відповідних побудов визначте для кожного випадку розташування оптичного центра та фокусів лінзи, тип лінзи й вид зображення.



3. Предмет розташований на відстані 1 м від лінзи, а його уявне зображення — на відстані 25 см від лінзи. Визначте оптичну силу лінзи. Яка це лінза — збиральна чи розсіювальна?
4. Для отримання зображення предмета в натуральну величину його помістили на відстані 25 см від лінзи. Визначте оптичну силу лінзи. Яка це лінза — збиральна чи розсіювальна?
5. Якщо предмет розташований на відстані 36 см від збиральної лінзи, то висота його зображення 10 см, а якщо на відстані 24 см — то висота його зображення 20 см. Визначте фокусну відстань лінзи та висоту предмета.

**§ 42. ОПТИЧНІ СИСТЕМИ. КУТ ЗОРУ**



Органом зору людини є око — одна з найдосконаліших і водночас найпростіших оптичних систем. Як же влаштоване око? Чому деякі люди погано бачать і як скоригувати їхній зір? Чому одні предмети ми бачимо добре, а інші погано? Що таке кут зору, чому його потрібно збільшувати і як це зробити? Про все це ви дізнаєтесь із цього параграфа.



**Як і чому ми бачимо**

**Оптична система** — сукупність оптичних елементів, створена для формування пучків світлових променів або для одержання зображень.

Розрізняють природні (біологічні) і штучні оптичні системи. Прикладом біологічної оптичної системи є око (рис. 42.1). Око людини має форму кулі діаметром приблизно 2,5 см. Ззовні око вкрите



щільною непрозорою оболонкою — склерою. Передня частина склери переходить у прозору рогову оболонку — рогівку, що діє як збиральна лінза й забезпечує 75 % здатності ока заломлювати світло.

Із внутрішнього боку склери вкрита судинною оболонкою, що складається з кровоносних судин, які живлять око. У передній частині ока судинна оболонка переходить у райдужну оболонку, яка має круглий отвір — зіницю. Зіниця звужується в разі посилення інтенсивності світла й розширюється в разі ослаблення.



Рис. 42.1. Будова ока

Здатність ока пристосовуватися до різної яскравості спостережуваних предметів називають **адаптацією**.

За зіницею розташований *кришталік*, який являє собою двоопуклу лінзу. Кришталік завдяки скріпленям із ним м'язам може змінювати свою кривизну, а отже, й оптичну силу.

Здатність кришталіка змінювати свою кривизну в разі зміни відстані до розглядуваного предмета називають **акомодацією**.

В утворенні зображення також бере участь *склисте тіло* — прозора драглиста маса, що заповнює простір між кришталіком і сітківкою. Світло, яке потрапляє на поверхню ока, заломлюється в рогівці, кришталіку та склистому тілі. У результаті на сітківці утворюється дійсне, перевернуте, зменшене зображення предмета (рис. 42.2).

Якщо людина дивиться на досить віддалені предмети, в її око потрапляють паралельні промені. У цьому випадку око найбільш розслаблене. Чим ближче розташований предмет, тим сильніше напружується око.

Найменшу відстань, на якій око бачить предмет, практично не напружуючись, називають **відстанню найкращого зору  $D$** .

Для людини з нормальним зором ця відстань дорівнює приблизно 25 см ( $D=25$  см). У такої людини фокус оптичної системи ока у спокійному (ненапруженому) стані розташований на сітківці, тобто паралельні промені, що потрапляють в око, після заломлення

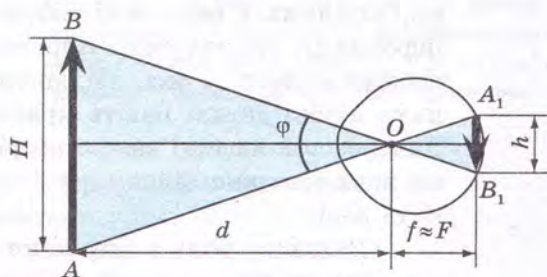
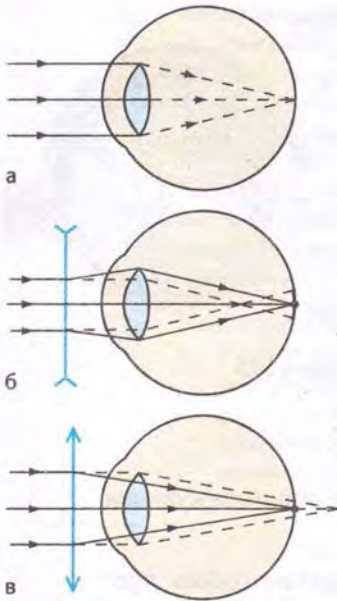


Рис. 42.2. Схема отримання зображення  $A_1B_1$  предмета  $AB$  на сітківці ока:  $O$  — оптичний центр оптичної системи ока;  $F$  — фокусна відстань;  $\varphi$  — кут зору





**Рис. 42.3.** Зображення віддалених предметів на сітківці ока: *a* — для людини з нормальним зором; *b* — у разі короткозорості; *в* — у разі далекозорості. Пунктирними лініями показано хід променів через око за відсутності окулярів, суцільними — за наявності окулярів

збираються на сітківці (рис. 42.3, *a*). Оптична сила нормального ока становить приблизно 58,5 дптр, що відповідає фокусній відстані 1,71 см.

У разі *короткозорості* фокус оптичної системи ока в ненапруженому стані розташований перед сітківкою (рис. 42.3, *b*), тому зображення предметів на сітківці є розмитим. Відстань найкращого зору в цьому випадку менша за 25 см, тому короткозора людина, щоб роздивитися предмет, наближає його до очей. Короткозорість коригується носінням окулярів із розсіювальними лінзами.

У разі *далекозорості* фокус оптичної системи ока в ненапруженому стані розташований за сітківкою (рис. 42.3, *в*), і зображення предметів на сітківці також є нечітким, розмитим. Відстань найкращого зору в цьому випадку більша, ніж 25 см, тому, роздивляючись предмет, людина віддаляє його від очей. Далекозорість коригується носінням окулярів зі збиральними лінзами.

## 2 Що таке кут зору й для чого потрібно його збільшувати

Розмір зображення  $h$  предмета на сітківці визначається *кутом зору* — кутом з вершиною в оптичному центрі ока, утвореним променями, напрямленими на крайні точки предмета:

$$\varphi = \frac{H}{d} = \frac{h}{F},$$

де  $d$  — відстань від предмета до оптичного центра ока (див. рис. 42.2);  $H$  — розмір предмета.

Зі збільшенням кута зору розмір зображення на сітківці збільшується, тому збільшується кількість світлочутливих клітин сітківки, задіяних у створенні зображення, а відповідно, й обсяг зорової інформації про предмет. Короткозора людина, розглядаючи предмет, наближає його до ока, збільшуючи кут зору, тому вона може розрізнити дрібні деталі навіть краще, ніж людина з нормальним зором. Далекозорій людині важко розрізнити дрібні деталі предмета, оскільки вона повинна віддаляти його від ока, а це зумовлює зменшення кута зору.

Важливу роль в одержанні зорової інформації про предмет відіграє також *роздільна здатність ока*. Дві точки зображення сприймаються роздільно, якщо потрапляють на дві різні світлочутливі клітини ока. *Роздільна здатність ока* визначається *мінімальним кутом зору*  $\varphi_0$ , під яким дві точки ще видно роздільно. Середній мінімальний кут зору становить близько 1 кутової мінута ( $\varphi_0 \approx 1'$ ) —



це дуже маленький кут, під яким відрізок завдовжки 1 см розглядається на відстані 34 м від ока. Зі зменшенням освітленості роздільна здатність ока зменшується.

Для того щоб детально роздивитись предмет, треба збільшити кут зору. Це досягається за допомогою оптичних приладів, які за призначенням можна поділити на дві групи: 1) прилади для розглядання дуже дрібних предметів (луна, мікроскоп), які ніби збільшують розглядуваний предмет; 2) прилади для розглядання віддалених об'єктів (зорова труба, бінокль, телескоп), які ніби наближають предмет, що розглядається.

Відношення кута зору  $\varphi$ , отриманого за допомогою оптичного приладу, до кута зору  $\varphi_0$  неозброєного ока на відстані найкращого зору називається **кутовим збільшенням приладу**  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0} \quad (1)$$

### ★ 3 Як збільшити кут зору за допомогою лупи

Найпростішим збільшувальним приладом є *луна* — короткофокусна двоопукла лінза, зроблена зі скла або пластмаси.

Нехай невеликий предмет  $AB$  висотою  $h$  розташований на відстані найкращого зору від ока (рис. 42.4). Предмет видно під кутом:

$$\varphi_0 = \frac{h}{D}. \quad (2)$$

Щоб збільшити кут зору, можна наблизити предмет до ока, перемістивши його в положення  $A'B'$ , але в цьому випадку предмет перебуватиме надто близько до ока. А можна скористатися луною. Якщо під час розглядання предмета через луну його уявне зображення  $A_1B_1$  перебуватиме на відстані найкращого зору, то кут зору буде збільшеним, а око — ненапруженим. З рис. 42.4 бачимо, що

$$\varphi \approx \frac{h}{F}. \quad (3)$$

Підставляючи формули (2) і (3) у формулу (1), отримуємо формулу для визначення кутового збільшення лупи:

$$\gamma = \frac{D}{F}$$

Чим менша фокусна відстань лупи, тим значніше збільшення вона дає. На практиці лупи з фокусною відстанню менше 2 см не застосовують, оскільки такі короткофокусні лінзи вносять серйозні

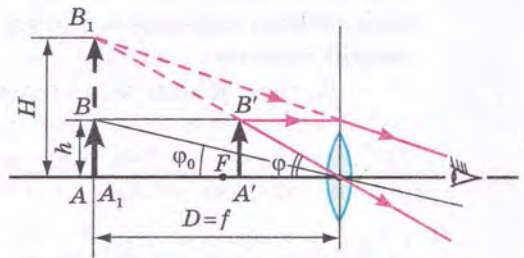


Рис. 42.4. Збільшення кута зору за допомогою лупи:  $h$  — висота предмета;  $H$  — висота зображення;  $f$  — відстань від зображення до лінзи;  $F$  — фокусна відстань;  $\varphi_0$  і  $\varphi$  — початковий і збільшений кути зору відповідно



викривлення в отримувани зображення. Саме тому найбільше кутове збільшення найкращих луп — від 5 до 10.



#### 4 Інші прилади для збільшення кута зору

У багатьох наукових і технічних дослідженнях навіть десятикратне збільшення об'єкта є недостатнім. У таких випадках використовують оптичні *мікроскопи*, що являють собою комбінацію двох короткофокусних систем — *об'єктива* й *окуляра* (рис. 42.5).

Кутове збільшення мікроскопа дорівнює:

$$\gamma = \frac{D\delta}{F_{об} F_{ок}},$$

де  $D=25$  см — відстань найкращого зору;  $\delta$  — довжина тубуса мікроскопа;  $F_{об}$  і  $F_{ок}$  — фокусні відстані об'єктива та окуляра відповідно.

Добираючи реальні значення  $F_{об}$ ,  $F_{ок}$  і  $\delta$ , можна одержати кутове збільшення від 500 до 1000. Це граничне значення, яке не може бути більшим через хвильові властивості світла.

Для спостереження віддалених об'єктів (планет, зір) в астрономії використовують *телескопи*, які бувають двох основних видів: 1) *рефлектори* — *відбиваючі телескопи*, принцип дії яких ґрунтується на використанні дзеркального, відбиваючого об'єктива (рис. 42.6); 2) *рефрактори* — *лінзові телескопи*, в яких, як і в мікроскопі, використовуються дві системи лінз (рис. 42.7), однак, на відміну від мікроскопа, спостережуваний об'єкт перебуває на практично нескінченній відстані.

Кутове збільшення телескопа-рефрактора дорівнює:

$$\gamma = \frac{F_{об}}{F_{ок}}$$

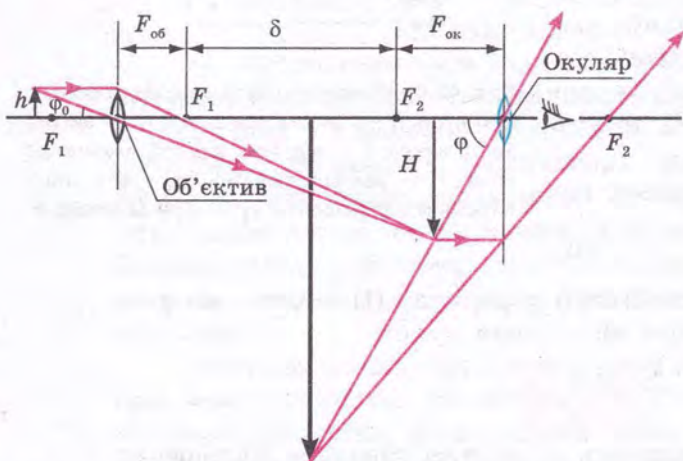


Рис. 42.5. Хід променів у мікроскопі:  $F_1$  — фокуси об'єктива;  $F_2$  — фокуси окуляра

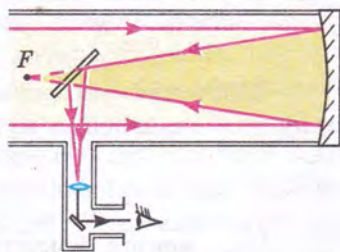


Рис. 42.6. Хід променів у телескопі-рефлекторі



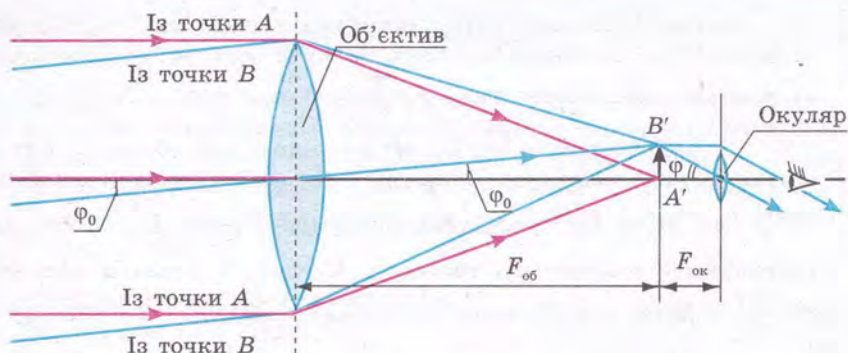


Рис. 42.7. Хід променів у телескопі-рефракторі

### ★ 5 Деякі недоліки зображень, отриманих в оптичних системах

Зображення, що їх отримують за допомогою реальних оптичних систем, мають низку недоліків, найбільш суттєвими з яких є: *сферична та хроматична аберації, астигматизм* та ін.

Причина *сферичної аберації* полягає в тому, що промені, які вийшли з однієї точки предмета, після проходження крізь оптичну систему збігаються не в одній точці, тому зображення точки має вигляд невеликої плями, тобто розмивається (див. фото на рис. 41.3).

*Хроматична аберація* виникає тому, що під час проходження крізь лінзу промені з різними довжинами хвиль, що входять до складу білого світла, заломлюються по-різному, внаслідок чого зображення точки в лінзі має вигляд райдужної плями.

*Астигматизм* — порушення подібності між предметом і його зображенням. Внаслідок астигматизму зображення предметів, віддалених від головної оптичної осі лінзи, мають викривлену поверхню.

Майже всі дефекти оптичних систем можна усунути, використовуючи додаткові лінзи, але повне усунення всіх недоліків неможливе. Тому залежно від призначення приладу усувають найбільш шкідливий дефект.★

### ! Підбиваємо підсумки

Оптична система — сукупність оптичних елементів, створена для формування пучків світлових променів або для одержання зображень. Прикладом біологічної оптичної системи є око.

Кут зору — кут з вершиною в оптичному центрі ока, утворений променями, які напрямлені на крайні точки предмета:  $\varphi = \frac{H}{d}$ . Кут зору характеризує розмір зображення і, як наслідок, обсяг зорової інформації про предмет, одержуваної оком. Роздільна здатність ока визначається мінімальним кутом зору, при якому дві точки зображення сприймаються роздільно.



Кутове збільшення  $\gamma$  — відношення кута зору  $\phi$ , отриманого за допомогою оптичного приладу, до кута зору  $\phi_0$  неозброєного ока на відстані найкращого зору:  $\gamma = \frac{\phi}{\phi_0}$ .

★ Найпростішою оптичною системою, що збільшує кут зору, є лупа — короткофокусна збиральна лінза. Кутове збільшення лупи:  $\gamma = \frac{D}{F}$ , де  $D = 25$  см — відстань найкращого зору. Більш складними системами є мікроскоп і телескоп. Кутове збільшення мікроскопа:  $\gamma = \frac{D\delta}{F_{об}F_{ок}}$ . Кутове збільшення телескопа-рефрактора:  $\gamma = \frac{F_{об}}{F_{ок}}$ .

Зображення, що їх отримують за допомогою реальних оптичних систем мають низку недоліків: сферична та хроматична аберації, астигматизм тощо, які зазвичай усувають за допомогою додаткових лінз. ★



### Контрольні запитання

1. Опишіть будову людського ока та призначення його окремих оптичних елементів. 2. Як змінюється діаметр зіниці в разі зменшення освітленості? 3. Чому людина з нормальним зором може однаково чітко бачити як далеко, так і близько розташовані предмети? 4. Який дефект зору називається короткозорістю? Як його можна скоригувати? 5. Який дефект зору називається далекозорістю? Як його можна скоригувати? 6. Що називається кутом зору? 7. Що таке роздільна здатність ока? Чим вона визначається? 8. Що таке кутове збільшення? 9. Яке призначення лупи? мікроскопа? телескопа? Як визначити їх кутове збільшення?



### Вправа № 32

- Шафа заввишки 180 см розташована на відстані 2 м від спостерігача. Який розмір її зображення на сітківці? Під яким кутом зору видно шафу? Оптична сила ока 58,5 дптр.
- Визначте оптичну силу лупи, яка дає 6-кратне збільшення.
- ★ Збільшення мікроскопа дорівнює 500. Визначте оптичну силу об'єктива, якщо фокусна відстань окуляра 5 см, а довжина тубуса — 20 см.
- ★ Фокусна відстань окуляра телескопа 2,5 см. Визначте оптичну силу його об'єктива, якщо телескоп дає 40-кратне збільшення.

### ФІЗИКА ТА ТЕХНІКА В УКРАЇНІ

#### Інститут фізики НАН України (Київ)

Інститут фізики (ІФ) створено у 1929 р. на базі кафедри Київського політехнічного інституту. Засновником і першим директором ІФ був академік О. Г. Гольдман. Учені інституту зробили вагомий внесок у розвиток багатьох напрямів сучасної фізичної науки, зокрема металофізики, фізики напівпровідників, теоретичної фізики, ядерної фізики, прикладної оптики та голографії. З кінця 60-х років ХХ ст. ІФ є безперечним лідером у галузях оптики, нелінійної оптики, лазерної фізики.



Л. П. Яценко

На базі ІФ створено низку науково-дослідних підрозділів та організацій, зокрема Інститут металофізики, Інститут фізики напівпровідників, Інститут теоретичної фізики, Інститут ядерних досліджень, Інститут прикладної оптики. Роботи науковців ІФ відзначені Ленінською премією (1966 р.), більш ніж 10 преміями СРСР, УРСР, України, міжнародними преміями. У 2009 р. члену-кореспонденту НАН України М. С. Соскіну Міжнародною Комісією з оптики було присуджено премію ім. Галілео Галілея.

Нині Інститут фізики очолює видатний вчений, член-кореспондент НАН України Леонід Петрович Яценко.



## § 43. ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА. СПЕКТРОСКОП

?

Ще в давнину було помічено, що промінь білого світла, пройшовши крізь скляну призму, стає розбіжним кольоровим. Якщо поставити на шляху променя, що пройшов крізь призму, екран, то на екрані буде видно райдужну смужку. Вважалося, що причина появи смужки криється у властивості призми забарвлювати білий колір. Чи так це насправді, з'ясував у 1665 р. І. Ньютон, провівши серію цікавих дослідів.

### 1 Досліди Ньютон з розкладання білого світла у спектр

Джерелом світла в дослідах Ньютон слугував невеликий отвір у віконниці, що освітлювалася сонцем. Коли перед отвором встановлювалася призма, на протилежній стіні замість круглої світлої плями з'являлась різнокольорова смужка, яку Ньютон назвав *спектром*. На смужці, як і у веселці, Ньютон виділив *сім кольорів*: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий (рис. 43.1).

Розмістивши лінзу на шляху різнокольорових пучків, що вийшли з призми, Ньютон знову отримав на екрані незабарвлену світлу пляму. Далі вчений за допомогою отвору виділяв з широкого різнокольорового пучка променів вузькі монохроматичні (однокольорові) пучки світла і знову спрямовував їх на призму. Пучки відхилялися призмою, але вже не розкладалися у спектр (рис. 43.2).

Результати цих дослідів дозволили Ньютону зробити такі висновки: 1) призма не фарбує біле світло, а розкладає його у спектр; 2) пучок білого світла складається з багатьох різнокольорових пучків; 3) показник заломлення певного середовища для променів різного кольору є різним.

### 2 Що таке дисперсія світла

Згідно з хвильовою теорією світла *колір світла визначається частотою електромагнітної хвилі, якою є світло*. Найменшу частоту має червоне світло, найбільшу — фіолетове (таблиця). Аналізуючи досліди Ньютон та спираючись на хвильову теорію світла, робимо висновок: *показник заломлення світла залежить від частоти світлової хвилі*. Для більшості середовищ абсолютний показник заломлення зростає зі збільшенням частоти світла.

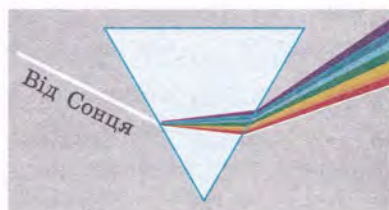


Рис. 43.1. Розкладання білого світла у спектр під час проходження крізь призму. Найбільше заломлюються фіолетові промені, найменше — червоні

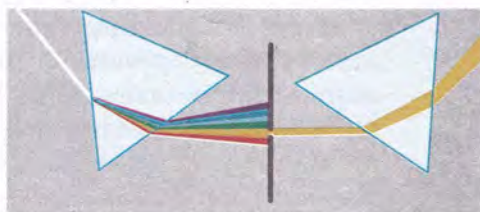


Рис. 43.2. Дослід Ньютон: після проходження крізь другу призму монохроматичний промінь відхиляється, але не розкладається у спектр



Якщо розкладання світла у спектр, зумовлене залежністю абсолютного показника заломлення середовища від частоти світлової хвилі, називається **дисперсією світла**.

### Спектральні кольори та їхні характеристики

Колір світла	Частота світла, ТГц	Довжина хвилі у вакуумі, нм
Червоний	480–400	625–740
Оранжевий	510–480	590–625
Жовтий	530–510	565–590
Зелений	600–530	500–565
Блакитний	620–600	485–500
Синій	680–620	440–485
Фіолетовий	790–680	380–440

Зверніть увагу: під час переходу з одного середовища в інше швидкість  $v$  поширення світла змінюється, але частота  $\nu$  світлової хвилі, а отже, і колір світла залишаються незмінними. Тому згідно з формулою хвилі ( $v = \lambda\nu$ ) змінюється довжина  $\lambda$  світлової хвилі. Під час переходу в середовище з більшою оптичною густиною довжина хвилі, як і її швидкість, зменшується:  $n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ .

### 3 Для чого потрібен спектроскоп і як він побудований

Випромінюване будь-яким джерелом світло, як правило, має складну будову. Сукупність частот світлових хвиль, що містяться у випромінюванні будь-якої речовини, називається *спектром випромінювання цієї речовини*. Для кожної речовини в газоподібному стані спектр випромінювання є унікальною характеристикою, що не збігається з жодною іншою речовиною. Саме на цій унікальності ґрунтується **спектральний аналіз** — метод визначення хімічного складу речовини за її спектром.

Спектральний склад світла вивчають за допомогою *спектральних апаратів*. Розглянемо будову одного з них (рис. 43.3), принцип дії якого заснований на дисперсії світла. Такий апарат складається з трьох основних частин: коліматора, призми й зорової труби (або лінзи та екрана).

*Коліматор* являє собою вузьку трубку, на одному кінці якої розташована ширма зі щілиною 1, яка перебуває у фокусі збиральної

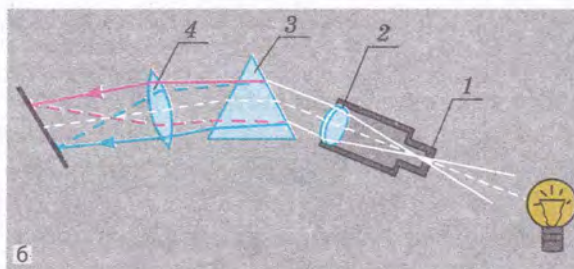


Рис. 43.3. Дисперсійний спектральний апарат: а — зовнішній вигляд; б — будова та принцип дії



лінзи 2. Вузький паралельний пучок світла від коліматора спрямовується на *призму* 3. Оскільки кожній частоті світла (кожному кольору) відповідає власний показник заломлення, то після заломлення з призми виходять монохроматичні паралельні пучки, кожний з яких відхиляється на власний кут.

Якщо пучки фокусуються збиральною лінзою 4 на фотопластині або екрані, такий прилад називається *спектрографом*. Якщо замість лінзи і екрана використовується зорова труба — маємо справу зі *спектроскопом*.

#### **4** Чому навколишній світ є різнокольоровим

Колір того чи іншого тіла, яке ми спостерігаємо, визначається частотою хвиль, що потрапляють в наше око *після взаємодії світла з матеріалом*, з якого складається тіло, а саме *поглинанням і розсіюванням* світла.

*Розсіювання світла* — це явище перетворення світла матеріальним середовищем, яке супроводжується зміною напрямку поширення світла й проявляється як невласне світіння середовища.

*Поглинання світла* — зменшення інтенсивності світла, що проходить через матеріальне середовище.

*Колір тіла визначається його властивістю відбивати (розсіювати) світлові хвилі тієї чи іншої частоти (довжини)*. Якщо тіло освітлюється білим світлом і відбиває всі падаючі світлові хвилі, то воно здаватиметься нам білим; якщо тіло відбиває хвилі переважно синього кольору, а інші поглинає — то синім. Якщо тіло майже повністю поглинає падаюче світло, то воно здаватиметься чорним. До того ж *колір тіла залежить від характеристики світлової хвилі, що його освітлює*. Наприклад, якщо тіло, яке має властивість відбивати переважно сине світло, освітлюється монохроматичним червоним світлом, то воно практично не відбиватиме світло і здаватиметься чорним. Таким чином, колір речовини залежить від характеристики падаючого світла, а отже, *поняття кольору в темряві позбавлене будь-якого змісту*.

Особливий інтерес являє розсіювання світла на малих частинках, розміри яких значно менші за довжину хвилі, наприклад розсіювання сонячного світла в атмосфері Землі на малих флуктуаціях густини повітря. Відповідно до *закону Релея* в розсіяному світлі переважає короткохвильове світло, а в прохідному (тобто такому, що пройшло через середовище) — довгохвильове. Природне біле світло від Сонця містить хвилі всього видимого спектра, короткохвильова частина якого відповідає синьо-блакитним кольорам, а довгохвильова — жовто-червоним кольорам. Отже, атмосфера краще розсіює синьо-блакитну частину спектра, а жовто-червону пропускає. Саме тому небо блакитне (розсіяне світло), а призахідне Сонце має жовто-червоний колір (прохідне світло).



**!** Підбиваємо підсумки

Дисперсія світла — явище розкладання світла у спектр, зумовлене залежністю абсолютного показника заломлення середовища і швидкості світла в ньому від частоти світлової хвилі. Для більшості середовищ показник заломлення зростає зі збільшенням частоти світла.

Спектральний склад світла досліджується за допомогою спектральних апаратів.

Колір світлової хвилі визначається довжиною хвилі. Біле сонячне світло містить увесь спектр довжин хвиль видимого електромагнітного випромінювання. Усе різноманіття кольорів, які мають тіла навколо нас, зумовлене їхньою здатністю відбивати хвилі певної частини оптичного спектра, а також спектральним складом світла, що падає на предмет.

**?** Контрольні запитання

1. Опишіть досліди Ньютона з вивчення дисперсії світла.
2. Чим визначається колір світла?
3. Дайте визначення дисперсії.
4. Які характеристики світлової хвилі змінюються під час переходу з одного середовища в інше?
5. Опишіть будову та принцип дії дисперсійних спектральних апаратів.
6. Що означає фраза: «М'яч червоний»?
7. Яким ви побачите білий аркуш паперу, якщо освітити його червоним світлом? Чи зміниться відповідь, якщо взяти аркуш кольорового паперу?
8. Чому колір неба є блакитним?

**§ 44. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА**

**?!** Для будь-якого хвильового руху характерні явища інтерференції та дифракції. Оскільки світло має хвильову природу, можна спостерігати й інтерференцію світла. Слід зазначити, що одним з перших це явище на практиці застосував Ньютон, хоча йому так і не вдалося пояснити його причину, адже з позицій корпускулярної теорії світла, прихильником якої був учений, це було неможливо. Отже, дізнаємось, що це за явище і в чому його причина.

**1** Характеризуємо хвильові властивості світла

Для будь-яких хвиль виконується принцип суперпозиції, тобто, якщо в певну точку простору надходять хвилі від декількох джерел, то ці хвилі накладаються одна на одну. За певних умов унаслідок такого накладання в деяких точках простору може відбуватися посилення коливань, а в деяких — послаблення.

**Інтерференція** — явище накладання хвиль, унаслідок якого в певних точках простору спостерігається стійке в часі посилення або послаблення результуючих коливань.

З'ясуємо, що означає це явище для світла. Оскільки світло має електромагнітну природу, то при поширенні світлової хвилі в кожній точці простору, де поширюється хвиля, відбувається періодична зміна напруженості та магнітної індукції електромагнітного поля. Якщо через деяку точку простору поширюються дві світлові хвилі, то напруженості полів векторно додаються. Результуюча напруженість характеризуватиме світлову енергію, що надходить в дану точку.



Чим більша напруженість, тим більшою є енергія, що надходить. Так само додаються і вектори магнітної індукції.

У випадку, коли напрямки напруженостей полів двох світлових хвиль збігаються, результуюча напруженість збільшується, і в точці спостерігається максимальне збільшення освітленості. І навпаки, коли напруженості полів напрямлені протилежно, результуюча напруженість зменшується, і світло гаситиметься світлом.

Зверніть увагу: під час інтерференції енергія не зникає — відбувається її перерозподіл у просторі.

Для того щоб в певних точках простору весь час могло відбуватися посилення або послаблення результуючих коливань, необхідне виконання двох умов, які називаються **умовами когерентності хвиль**: 1) хвилі повинні мати однакову частоту; 2) різниця початкових фаз  $\Delta\phi$  цих хвиль має бути постійною.

Хвилі, які відповідають умовам когерентності, називають **когерентними хвилями**.

## 2 За яких умов утворюються максимум і мінімум інтерференції

Розглянемо дві когерентні світлові хвилі, які надходять у довільну точку  $M$ , розташовану на відстані  $d_1$  від джерела  $S_1$  і на відстані  $d_2$  від джерела  $S_2$ . Відстань  $\Delta d = d_1 - d_2$  називається геометричною різницею ходу хвиль (рис. 44.1).

Якщо хвилі відходять від джерел  $S_1$  і  $S_2$  в однакових фазах, а різниця ходу  $\Delta d = 0$ , то в точку  $M$  хвилі надходять також в однакових фазах. У цьому випадку в точці  $M$  весь час відбуваються електромагнітні коливання зі збільшеною амплітудою (рис. 44.2), отже, спостерігається **максимум освітленості**. Те саме відбуватиметься і при  $\Delta d \neq 0$  за умови, що на відрізок  $\Delta d$  укладається будь-яке ціле число довжин хвиль (парне число півхвиль).

**Умова максимуму:** в даній точці простору весь час відбувається посилення результуючих світлових коливань, якщо геометрична різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять в цю точку, дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль):

$$\Delta d_{\max} = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2},$$

де  $\lambda$  — довжина світлової хвилі у середовищі,  $k$  — ціле число.

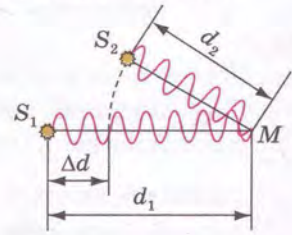


Рис. 44.1. Геометрична різниця ходу двох хвиль



Рис. 44.2. У точках інтерференційних максимумів коливання посилюють одне одне:  $A = A_1 + A_2$ , де  $A_1, A_2$  — амплітуди вихідних коливань,  $A$  — амплітуда результуючих коливань





Рис. 44.3. У точках інтерференційних мінімумів коливання послаблюють одне одне:  $A = A_1 - A_2$

**Умова мінімуму:** в даній точці простору весь час відбувається послаблення результуючих світлових коливань, якщо геометрична різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять в цю точку, дорівнює непарному числу півхвиль:

$$\Delta d_{\min} = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$$

Зверніть увагу: під час розв'язування задач слід враховувати, що довжина  $\lambda$  світлової хвилі у середовищі менша за довжину  $\lambda_0$  світлової хвилі у вакуумі в  $n$  разів:  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ , де  $n$  — абсолютний показник заломлення середовища.

### 3 Як спостерігати інтерференцію світла

Ви добре знаєте, що якщо в кімнаті ввімкнути додаткове джерело світла, то освітленість посилиться в будь-якій точці кімнати (інтерференція не спостерігатиметься). Річ у тім, що *спостерігати інтерференційну картину від двох незалежних джерел світла (за винятком лазерів) неможливо*. Причина в тому, що атоми джерел випромінюють світло незалежно один від одного окремими «цугами» («обривками хвиль») довжиною до 3 м, тривалість імпульсу — порядку  $10^{-8}$  с. Фази «цугів», випромінених окремими атомами, і площина коливань вектора напруженості хаотично змінюються. Отже, інтерференційна картина від двох незалежних джерел світла змінюється кожну  $10^{-8}$  с. Через інерційність зору людина не може помітити настільки швидкі процеси (зорові відчуття на стітківці зберігаються протягом 0,1 с).

✍️ Для одержання когерентних джерел світла вдаються до штучного прийому: пучок світла від одного джерела  $S$  (рис. 44.4) розділяють на два (або більше) пучки світлових хвиль. Ці хвилі когерентні (випромінюються

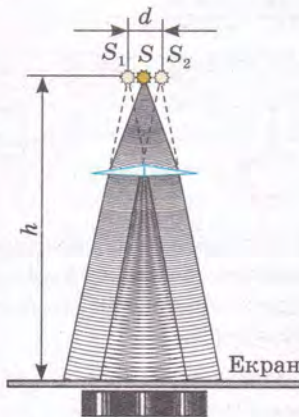


Рис. 44.4. Схема розділення пучка світла на два когерентні пучки за допомогою біпризми Френеля:  $S$  — джерело світла;  $S_1$  і  $S_2$  — вторинні когерентні джерела світла; у реальному досліді  $d \ll h$  (1 мм — 3 м)



тим самим джерелом світла) і мають деяку різницю ходу (йдуть до екрана різними шляхами). Якщо різниця ходу для певної точки екрана дорівнює парному числу півхвиль, то в цій точці спостерігається максимум освітленості, якщо непарному — мінімум освітленості. Отже, на екрані створюється інтерференційна картина: чергування світлих і темних смуг у разі монохроматичного джерела світла або чергування райдужних смуг у разі джерела білого світла. ★

**4** Інтерференція на тонких плівках.  
★ Кільця Ньютона ★

Із проявами інтерференції світла в природі ми найчастіше зустрічаємось тоді, коли світло падає на тонку прозору плівку (рис. 44.5). Світлова хвиля частково відбивається від зовнішньої поверхні плівки (хвиля 1), частково проходить через плівку і, відбившись від її внутрішньої поверхні, повертається в повітря (хвиля 2). Оскільки хвиля 2 проходить більшу відстань, ніж хвиля 1, то між ними існує різниця ходу. Обидві хвилі когерентні, оскільки створені одним джерелом, тому в результаті їх накладання спостерігається стійка інтерференційна картина. Якщо хвиля 2 відстає від хвилі 1 на парне число півхвиль, то спостерігається посилення світла (максимум інтерференції), якщо на непарне — послаблення (мінімум інтерференції). Саме інтерференцією світла зумовлений переливчастий колір багатьох комах (рис. 44.6).

Біле світло поліхроматичне, воно складається з хвиль різної довжини, тому для посилення світла різного кольору потрібна різна товщина плівки. Отже, якщо плівка має різну товщину і освітлюється білим світлом, то вона виявиться райдужно забарвленою (райдужні мильні плівки, райдужна масляна плівка на поверхні води). Крім того, різниця ходу хвиль у тонкій плівці залежатиме від кута падіння світла на плівку (зі збільшенням кута падіння різниця ходу збільшується).

З інтерференцією світла на плівці пов'язана поява інтерференційної картини у вигляді концентричних кілець, що отримали назву кільця Ньютона (рис. 44.7).

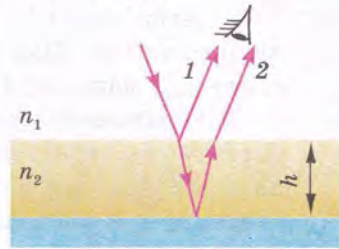


Рис. 44.5. Розділення пучка світла на два когерентні пучки на тонкій плівці

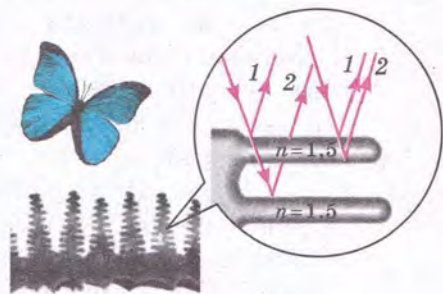


Рис. 44.6. Розділення пучка світла на два когерентні пучки на крильцях метелика

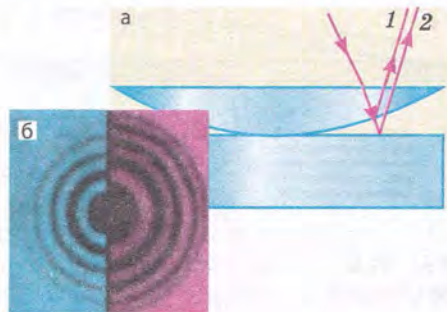


Рис. 44.7. Розділення пучка світла на два когерентні пучки на повітряному проміжку між лінзою та скляною пластиною (а); кільця Ньютона (б)



Роль плівки у цьому випадку виконує повітряний проміжок між скляною поверхнею лінзи і скляною ж пластиною. Якщо освітлювати лінзу монохроматичним світлом, то спостерігається чергування світлих і темних кілець, причому радіуси кілець залежатимуть від довжини хвилі світла. Якщо ж лінзу освітити білим світлом, то кільця виявляться спектрально забарвленими. ★

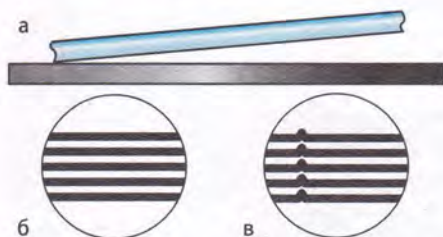
### 5 Застосування інтерференції

Інтерференцію на тонких плівках застосовують для *просвітлення оптики*. Цей метод був відкритий українським фізиком Олександром Смакулою (1900–1983) у 1935 р.

В оптичних системах, які містять кілька лінз, унаслідок відбиття може втрачатися до 40 % енергії світла. Щоб знизити втрати, на поверхню лінз наносять тонку плівку, показник заломлення якої менший, ніж показник заломлення матеріалу лінзи. Товщину плівки добирають таким чином, щоб різниця ходу між променями, відбитими від зовнішньої та внутрішньої поверхонь плівки, дорівнювала півхвилі. У цьому випадку у відбитому світлі виконується умова мінімуму, отже, відбиті промені гаситимуться, і через лінзу проходитиме більше світла.

Але одна плівка не може забезпечити гасіння хвиль всіх довжин, тому товщину плівки добирають так, щоб повне гасіння за нормального падіння відбувалося для хвиль середньої частини спектра, до яких найбільш чутливе око людини. Якщо треба забезпечити гасіння в широкому діапазоні довжин хвиль, використовують багатошарові плівки.

За допомогою інтерференції *оцінюють якість шліфування поверхні виробу*. Для цього між поверхнею зразка і дуже гладенькою еталонною пластиною створюють повітряний прошарок. На тонкому повітряному клині між зразком і пластиною утворюється інтерференційна картина у вигляді світлих і темних смуг. Якість шліфування визначають за формою смуг: наявність нерівності навіть порядку  $10^{-8}$  м призводить до викривлення інтерференційних смуг (рис. 44.8).



**Рис. 44.8.** Перевірка якості шліфування за допомогою інтерференції (а); якщо зразок гладенький, то інтерференційні смуги паралельні (б); якщо ж на поверхні зразка є подряпина — інтерференційні смуги викривлені в бік збільшення товщини повітряного клину (в)

Для точних вимірювань коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів, коефіцієнтів заломлення речовин, для вияву досить малих концентрацій домішок у газах та рідинах і т. д. використовують *інтерферометри* — надточні вимірювальні прилади, принцип дії яких ґрунтується на явищі інтерференції світла.

★ Як приклад розглянемо будову інтерферометра Майкельсона (рис. 44.9). Він складається з двох дзеркал  $M_1$  і  $M_2$ , напівпрозорої пластини  $P_1$  та прозорої пластини  $P_2$ . Світло від джерела падає на пластину  $P_1$ , де розділяється на два



пучки: пучок 1 відбивається в напрямку до дзеркала  $M_1$ , пучок 2 поширюється в напрямку до дзеркала  $M_2$ . Відбиті від дзеркал пучки потрапляють в зорову трубу. Оскільки обидві хвилі когерентні, то око спостерігача побачить інтерференційні смуги. Якщо необхідно виміряти, наприклад, коефіцієнт заломлення деякої речовини, її розташовують на шляху променя 1 або 2, внаслідок чого інтерференційні смуги зміщуються. За цим зміщенням визначають коефіцієнт заломлення.★

Серед різноманітних практичних застосувань інтерференції світла одним з найцікавіших є **голографія** (від грец. ὅλος — повний і γράφω — пишу).

Сутність голографії полягає в *записуванні повної оптичної інформації про предмет, тобто інформації не тільки про амплітуду світлової хвилі, а й про її фазу*. Річ у тім, що хвиля, відбита будь-яким тілом, містить інформацію не лише про його освітленість, а й про положення тіла та взаємне розташування його частин: чим далі від оптичної системи перебуває предмет або його частина, тим довше поширюється світло й тим більшою буде його фаза.

Якщо об'єкт спостереження освітити монохроматичним і просторово когерентним світловим пучком, то хвилі, відбиті від далеких від оптичної системи та близьких до неї ділянок об'єкта, накладаючись, створюють інтерференційну картину — *голограму*, яку записують на фотопластинці. Голографічне зображення предмета жодною мірою не відповідає його зовнішньому вигляду. Але після відновлення зображення з голограми можна побачити просторове зображення тіла. Цікаво, що *зображення предмета з голограми можна відновити за будь-якою, навіть невеликою її частиною*.★

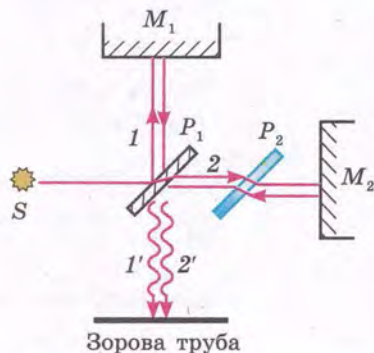


Рис. 44.9. Схема будови інтерферометра Майкельсона

## 6 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте товщину плівки на поверхні лінзи, якщо плівка розрахована на максимальне гасіння світлової хвилі довжиною 555 нм (див. рис. 44.5). Абсолютний показник заломлення плівки 1,231.

$h$  — ?

Дано:

$n = 1,231$

$\lambda_0 = 555$  нм

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.* Хвилі, відбиті від зовнішньої та внутрішньої поверхонь плівки, мають гасити одна одну, тому різниця їхнього ходу відповідатиме умові мінімуму:  $\Delta d_{\min} = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$ .

Оскільки в процесі просвітлення оптики намагаються використовувати якомога тонші плівки, то найменша

товщина плівки відповідатиме умові:  $\Delta d_{\min} = \frac{\lambda}{2}$ .



Довжина хвилі у плівці менша за довжину хвилі у вакуумі в  $n$  разів:  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ .

Плівки розраховують для *нормально* падаючого світла, тому різниця ходу дорівнює подвійній товщині плівки:  $\Delta d_{\min} = 2h$ .

$$\text{Остаточо маємо: } 2h = \frac{\lambda_0}{2n} \Rightarrow h = \frac{\lambda_0}{4n}.$$

$$\text{Визначимо значення шуканої величини: } h = \frac{555 \text{ нм}}{4 \cdot 1,231} \approx 113 \text{ нм}.$$

*Відповідь:* товщина плівки  $h = 113$  нм.

### ! Підбиваємо підсумки

Для світла, як і для будь-яких інших хвиль, характерне явище інтерференції — явище накладання хвиль, унаслідок якого в певних точках простору спостерігається стійке в часі посилення або послаблення результуючих коливань.

Стійку інтерференційну картину можна спостерігати лише у випадку когерентних хвиль, тобто таких, які мають однакову частоту і постійну різницю початкових фаз. Одержати когерентні світлові хвилі можна, якщо пучок світла від одного монохроматичного джерела розділити на два пучки, які спрямовуються різними шляхами, а потім знову збираються.

Умова інтерференційних максимумів: геометрична різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль):

$$\Delta d_{\max} = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Умова інтерференційних мінімумів: геометрична різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль:  $\Delta d_{\min} = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$ .

На практиці інтерференцію використовують для просвітлення оптики; перевірки якості шліфування поверхонь виробів і якості виготовлення лінз; здійснення точних вимірювань; отримання голографічних зображень.

### ? Контрольні запитання

1. Що таке інтерференція хвиль? 2. Які хвилі називають когерентними? 3. Назвіть умови максимуму й мінімуму інтерференції. 4. Чому в оптичному діапазоні важко створити джерела когерентних хвиль? ★ 5. У чому полягає фізична сутність приладів для спостереження інтерференції світла? 6. Чому тонкі плівки мають райдужне забарвлення? ★ 7. Опишіть пристрій для спостереження кілець Ньютона. 8. Як за допомогою інтерференції перевірити якість шліфування поверхонь виробів? 9. У чому полягає ефект просвітлення оптики? ★ 10. Опишіть будову інтерферометра Майкельсона. ★ 11. У чому відмінність голограми від звичайної фотографії?

### ✎ Вправа № 33

1. Поясніть появу райдужних смуг при отриманні інтерференційної картини за допомогою біпризми Френеля. Чому центральний інтерференційний максимум у цьому випадку репрезентований смугою білого світла?



2. У деяку точку простору надходять когерентні світлові хвилі з геометричною різницею ходу  $1,2 \text{ мкм}$ . Довжина хвиль у вакуумі  $600 \text{ нм}$ . Визначте, посилення чи послаблення світла відбувається в точці, якщо світло поширюється у вакуумі; у повітрі; у воді; в алмазі.
- 3\*. За рис. 44.4 визначте відстань на екрані між максимумами другого порядку для фіолетового й червоного світла, якщо відстань від уявних джерел  $S_1$  і  $S_2$  до екрана  $1,5 \text{ м}$ , а відстань між джерелами  $0,50 \text{ мм}$ . Вважайте, що довжина хвилі фіолетового світла в повітрі дорівнює  $0,42 \text{ мкм}$ , червоного —  $0,70 \text{ мкм}$ .
- ★ 4. В обидва плеча інтерферометра Майкельсона помістили дві циліндричні кювети завдовжки  $50 \text{ мм}$  кожна. Коли в одній з кювет повітря замінили вуглекислим газом, то інтерференційний спектр змістився на  $25$  смуг. Визначте показник заломлення вуглекислого газу, якщо показник заломлення повітря  $1,0003$ . Інтерферометр освітлювався світлом з довжиною хвилі  $630 \text{ нм}$ .

## § 45. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

?!

Камінь, кинутий у воду, утворює на поверхні водойми хвилю. Якщо на своєму шляху хвиля зустріне перешкоду, наприклад скелю або очеретину, що стирчить із води, то за скелею утвориться тінь (тобто безпосередньо за скелею хвиля не проникне), а за очеретиною тінь не утвориться (хвиля просто обійде її). Отже, хвилі можуть огинати перешкоди. Якщо світло — хвиля, то воно також має огинати перешкоди. З'ясуємо, чи так це.

1

### Чи може світло огинати перешкоди

Явище огинання хвилями перешкод називається **дифракцією** (від лат. *diffractus* — розламаний).

У наведеному прикладі дифракція хвиль відбувається на очеретині й не відбувається на скелі. Але це не зовсім так. Якщо скеля достатньо віддалена від берега, то на певній відстані від неї тінь зникне — хвиля обігне й скелю. Річ у тім, що дифракція спостерігається у двох випадках: 1) коли лінійні розміри перешкод, на які падає хвиля (або розміри отворів, через які хвиля поширюється), порівнянні з довжиною хвилі або менші за неї; 2) коли відстань  $l$  від перешкоди до місця спостереження в багато разів більша за розмір перешкоди.

Хвилі, що огинають перешкоду, когерентні, тому дифракція завжди супроводжується інтерференцією (рис. 45.1). Інтерференційна картина, отримана внаслідок дифракції, називається *дифракційною картиною*.

Оскільки світло є хвилею, в разі виконання зазначених умов можна спостерігати і дифракцію світла. Але світло — це дуже коротка хвиля (від  $400$  до  $760 \text{ нм}$ ), тому дифракцію на предметі розміром, наприклад,  $1 \text{ см}$  можна помітити лише на відстані порядку  $10 \text{ км}$ . Якщо ж розміри

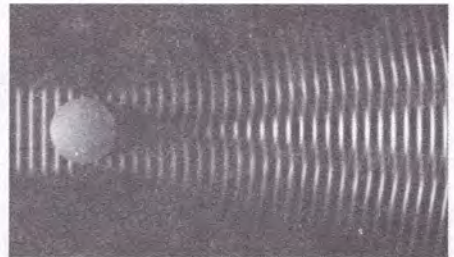


Рис. 45.1. Дифракція хвиль на кулі: на певній відстані від кулі тінь зникає, а хвилі, накладаючись одна на одну, створюють дифракційну картину



перешкод менше 1 мм, то дифракцію можна спостерігати й на відстанях порядку 1 м.



**Дифракцією світла** називається огинання світловими хвилями межі непрозорих тіл і проникнення світла в ділянку геометричної тіні.

На рис. 45.2 показано, як виглядають на фотографіях дифракційні картини від різних перешкод, що освітлюються монохроматичним світлом. Бачимо, що тінь від тонкого дроту з обох боків оточена поперемінними світлими і темними смугами, а в центрі тіні розташована світла смуга. Тінь від непрозорого круглого екрана також оточена світлими і темними концентричними кільцями, в центрі тіні — світла кругла пляма (*пляма Пуассона*). Так само оточена світлими і темними кільцями кругла пляма світла, що пройшло від точкового джерела світла крізь невеликий круглий отвір; зменшуючи діаметр отвору, можна отримати в центрі картини і темну пляму. Якщо освітлювати перешкоду або отвір пучком білого світла, то світлі смуги змінюються на райдужні, які легко побачити, дивлячись на джерело світла крізь клаптик капрону. Подібні дифракційні картини нерідко спостерігаються і в природі (рис. 45.3).

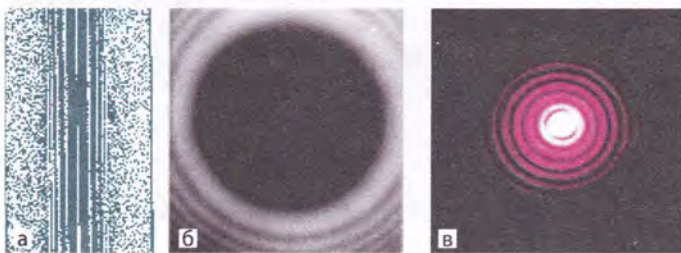
## 2 У чому полягає принцип Гюйгенса — Френеля

Кількісну теорію дифракції світла побудував Френель, сформулювавши принцип, який з часом отримав назву **принцип Гюйгенса — Френеля**:

Кожна точка хвильової поверхні є джерелом вторинної хвилі; вторинні джерела світла, які розташовані на одній хвильовій поверхні, є когерентними; хвильова поверхня в будь-який момент часу є результатом інтерференції вторинних хвиль.

Для знаходження результату інтерференції Френель запропонував метод розбиття хвильового фронту на зони — так звані *зони Френеля* (рис. 45.4).  

Якщо на вузьку щілину падає плоска світлова хвиля, то на екрані, який розташований на досить великій відстані від щілини, можна спостерігати



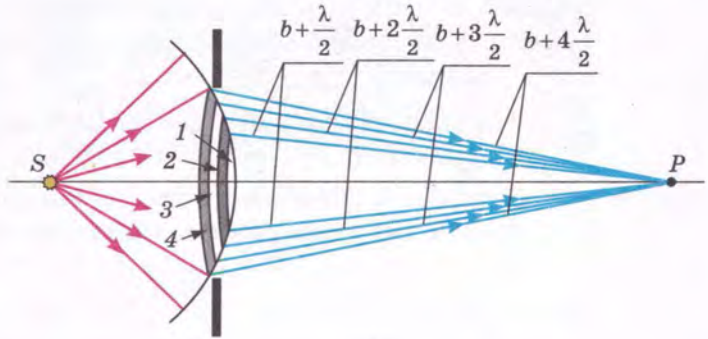
**Рис. 45.2.** Дифракційні картини від різних перешкод: тонкого дроту (а); невеликого непрозорого екрана (б); невеликого круглого отвору (в)



**Рис. 45.3.** Природне явище «сяйво Будди» виникає внаслідок дифракції світла на дрібно-сеньких крапельках води, коли світло від сонця пробивається крізь туман або хмару

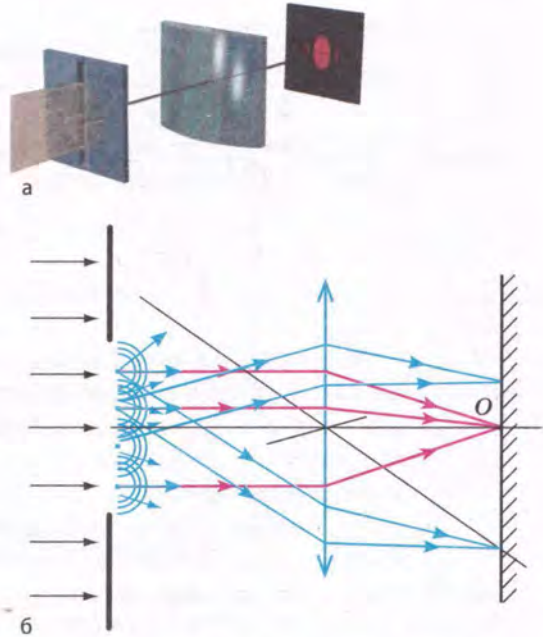


**Рис. 45.4.** Розбиття хвильового фронту від точкового джерела світла  $S$  на зони Френеля (1, 2, 3, 4). Радіус кожної наступної зони відрізняється від попередньої на  $\lambda/2$ . Отвір перекриває парна кількість зон Френеля, тому в точці  $P$  спостерігається мінімум інтерференції



дифракційну картину (рис. 45.5, а). Пояснимо її появу, користуючись принципом Гюйгенса — Френеля.

Згідно з цим принципом освітлену щілину можна розглядати як численну кількість вторинних джерел світла, від кожного з яких у всіх напрямках поширюються когерентні хвилі (рис. 45.5, б). Від точки  $O$  екрана відстань до будь-якої точки щілини однакова, тому всі вторинні хвилі, що потрапляють в точку  $O$ , посилюють одна одну. Отже, на лінії, що проходить через точку  $O$  паралельно щілині, буде спостерігатися максимум освітленості. Для інших точок екрана різниця ходу падаючих хвиль вже не дорівнюватиме нулю, тому в цих точках виникатимуть максимуми та мінімуми інтерференції, створюючи дифракційну картину.

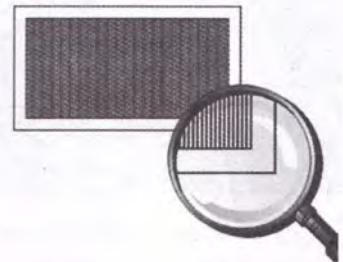


**Рис. 45.5.** Дифракція паралельного пучка світла на вузькій щілині: а — схема досліду; б — хід променів

### 3 Дифракційна ґратка

Дифракційна картина від плоскої хвилі спостерігається тільки на відстанях, коли ширина щілини є в багато разів меншою, ніж відстань до екрана. За цієї умови на екран потрапляє дуже мало світла. Щоб отримати яскравішу дифракційну картину використовують *дифракційну ґратку*, що являє собою велику кількість вузьких щілин, розділених непрозорими проміжками.

Для виготовлення дифракційних ґраток (рис. 45.6) на металеву або скляну пластинку наносять велику кількість паралельних штрихів



**Рис. 45.6.** Дифракційна ґратка



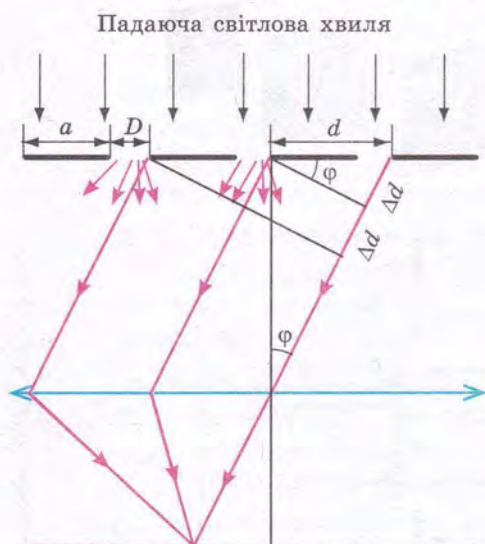
(до 2000 штрихів на один міліметр поверхні). Спостереження на металевих ґратках проводяться тільки у відбитому світлі, а на скляних — найчастіше у прохідному.

**Дифракційна ґратка** — це спектральний прилад, що слугує для розкладання світла у спектр і вимірювання довжини хвилі.

Величину  $d$ , що дорівнює відстані між двома сусідніми щілинами, називають **періодом ґратки**, або **сталю ґратки**:

$$d = a + D = \frac{l}{N},$$

де  $a$  — ширина непрозорої ділянки;  $D$  — ширина щілини;  $N$  — кількість штрихів на відрізку довжиною  $l$ .



**Рис. 45.7.** Схема ходу променів під час дифракції плоскої світлової хвилі на дифракційній ґратці

Нехай на ґратку падає паралельний пучок світла. Вторинні джерела світла від кожної щілини створюють когерентні хвилі, що поширюються в усіх напрямках. Якщо на шляху цих хвиль розташувати збиральну лінзу, то всі паралельні промені збиратимуться на екрані у фокальній площині лінзи (рис. 45.7). Знайдемо умову, за якої ці хвилі посилюють одна одну.

З рисунка бачимо, що різниця ходу  $\Delta d$  для двох крайніх хвиль, що поширюються від сусідніх щілин під кутом  $\varphi$ , дорівнює:  $\Delta d = d \sin \varphi$ .

Щоб у точці  $P$  спостерігався інтерференційний максимум, різниця ходу  $\Delta d$  має дорівнювати цілому числу довжин хвиль  $\Delta d = k\lambda$ .

Звідси маємо **формулу дифракційної ґратки**:

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (*)$$

де  $k = 0, 1, 2, \dots$

$k = 0$  відповідає центральному (нульовому) максимуму,  $k = 1$  — максимумам першого порядку, що розташовані симетрично з обох боків від центрального, і т. д. Слід мати на увазі, що при виконанні умови (\*) посилюються хвилі, що йдуть від будь-якої точки щілини, оскільки для будь-якої точки щілини існує точка в сусідній щіліні, розташована на відстані  $d$  від першої точки.

★ Зверніть увагу:

1. Кут  $\varphi$ , під яким спостерігається інтерференційний максимум, залежить від довжини хвилі, тому *дифракційні ґратки розкладають немонохроматичне світло у спектр* (рис. 45.8). Такий спектр називається *дифракційним*.



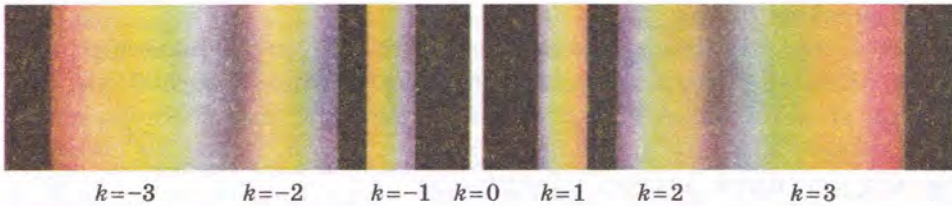


Рис. 45.8. Дифракційний спектр

2. Внаслідок того що довжина хвилі фіолетового кольору менша, ніж довжина хвилі червоного кольору, в дифракційному спектрі червоні лінії розташовані далі від центрального максимуму, ніж фіолетові.

3. Для центрального максимуму різниця ходу хвиль будь-якої довжини дорівнює нулю, тому він завжди має колір світла, що освітлює ґратку.

4. Вимірюючи кут  $\varphi$ , під яким спостерігається інтерференційний максимум  $k$ -го порядку, та знаючи період дифракційної ґратки, можна виміряти довжину світлової хвилі:  $\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$ . ★

#### ★ 4 Вплив дифракції на роздільну здатність оптичних приладів

Будь-яка фізична теорія має межі застосування, в тому числі й геометрична оптика. Закони геометричної оптики виконуються досить точно тільки у випадку, коли розміри перешкод, що зустрічаються на шляху світлової хвилі, набагато більші, ніж довжина цієї хвилі. Описуючи дію оптичних пристроїв, ми користувалися законами геометричної оптики. Здавалося б, відповідно до цих законів за допомогою мікроскопів можна розрізняти як завгодно маленькі деталі об'єкта, а за допомогою телескопів спостерігати за як завгодно віддаленими об'єктами. Але це не так.

Дифракція не дозволяє отримати чіткі зображення дрібних предметів, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі, оскільки такі предмети світло огинає.

Відстань  $l$  між двома найближчими точками, які можна побачити роздільно, називається *роздільною здатністю мікроскопа*.

Внаслідок дифракції хвиль на лінзі об'єктива телескопа зображення зорі має вигляд системи світлих і темних кілець (рис. 45.9). Якщо дві зорі розташовані на малій кутовій відстані, то їхні зображення збігаються. Найменший кут  $\varphi$ , під яким дві світні точки видно роздільно, називається *роздільною здатністю телескопа*. ★



Рис. 45.9. Зображення двох зір, розташованих на малій кутовій відстані одна від одної



**5** Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** На дифракційну ґратку, що містить 200 штрихів на 1 мм, падає плоска монохроматична хвиля довжиною 500 нм. Визначте: а) найбільший порядок спектра, який можна спостерігати за нормального падіння променів на ґратку; б) кут, під яким спостерігається максимум другого порядку.

$k_{\max}$  — ?  
 $\varphi$  — ?

Дано:

$$\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$N = 200$$

$$l = 10^{-3} \text{ м}$$

$$k = 2$$

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання*

Формула дифракційної ґратки має вигляд:  $d \sin \varphi = k \lambda$ ,

де  $d = \frac{l}{N}$ . Звідси маємо:  $\sin \varphi = \frac{N k \lambda}{l}$ . Максимальному

$k$  відповідає  $\sin \varphi = 1$ , отже,  $k_{\max} = \frac{d}{\lambda} = \frac{l}{N \lambda}$ .

Визначимо значення шуканих величин:

$$\sin \varphi = \frac{200 \cdot 2 \cdot 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{10^{-3} \text{ м}} = 0,20, \text{ звідси } \varphi \approx 0,20 \text{ рад};$$

$$k_{\max} = \frac{10^{-3} \text{ м}}{200 \cdot 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 10.$$

*Відповідь:*  $k_{\max} = 10$ ;  $\varphi \approx 0,20$  рад.

**!** Підбиваємо підсумки

Дифракцією світла називається огинання світловими хвилями межі непрозорих тіл і проникнення світла в ділянку геометричної тіні.

Кількісну теорію дифракції світла побудував Френель, сформулювавши принцип, який з часом отримав назву принцип Гюйґенса — Френеля: кожна точка хвильової поверхні є джерелом вторинної хвилі; вторинні джерела світла, які розташовані на одній хвильовій поверхні, є когерентними; хвильова поверхня в будь-який момент часу є результатом інтерференції вторинних хвиль.

Дифракційна ґратка — це спектральний прилад, що має вигляд періодично розташованих щілин та слугує для розкладання світла у спектр і вимірювання довжини хвилі. Головна характеристика ґратки — стала ґратки  $d$ , яка є її періодом:  $d = a + D = \frac{l}{N}$ .

Формула дифракційної ґратки:  $d \sin \varphi = k \lambda$ , де  $\varphi$  — кут, під яким спостерігаються головні максимуми  $k$ -го порядку для плоскої хвилі довжиною  $\lambda$ , що падає перпендикулярно до поверхні ґратки.

**?** Контрольні запитання

1. Що називається дифракцією? 2. Чому в повсякденному житті ми не спостерігаємо дифракцію світла? 3. Сформулюйте принцип Гюйґенса — Френеля. За яких умов спостерігається дифракція? За яких умов явищем дифракції можна знехтувати, описуючи поширення світла? 4. Опишіть дифракційні картини від різних перешкод. 5. Що таке дифракційна ґратка? У чому її принципова відмінність від окремої щілини? 6. Як впливає дифракція на роздільну здатність оптичних приладів?



## Вправа № 34

1. Дифракційна ґратка має 250 штрихів на 1 мм. На ґратку падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 550 нм. Під яким кутом видно перший дифракційний максимум? Скільки всього максимумів дає ґратка?
2. Визначте довжину хвилі монохроматичного світла, що падає на ґратку з періодом 3,33 мкм, якщо максимум першого порядку видно під кутом  $10^\circ$ .
3. Для вимірювання довжини світлової хвилі застосовано дифракційну ґратку, що має 1000 штрихів на 1 мм. Максимум першого порядку на екрані отримано на відстані 24 см від центрального. Визначте довжину хвилі, якщо відстань від дифракційної ґратки до екрана 1,0 м.
4. Дифракційна ґратка, що має 200 штрихів на 1 мм, розташована на відстані 2 м від екрана. На ґратку падає біле світло, максимальна довжина хвилі якого 720 нм, мінімальна — 430 нм. Знайдіть ширину спектра першого порядку.

## § 46. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА. ПОЛЯРОЇДИ

?! Людське око здатне сприймати дві важливі характеристики світла: колір (довжину світлової хвилі) і рівень освітленості (амплітуду світлової хвилі). Світло має й третю характеристику — ступінь поляризації, яку наше око не здатне сприймати, на відміну, наприклад, від ока бджоли. Виявлення поляризації світла однозначно доводить, що світло — це поперечна хвиля.

## 1 Як поляризоване природне світло

Світлова хвиля характеризується вектором напруженості  $\vec{E}$  і вектором магнітної індукції  $\vec{B}$ , які коливаються у взаємно перпендикулярних площинах. Площину, в якій коливається вектор напруженості  $\vec{E}$ , називають *площиною коливань*. Площину, в якій здійснює коливання вектор магнітної індукції  $\vec{B}$ , називають *площиною поляризації*.

Окремо взяті молекула або атом випромінюють електромагнітну хвилю, для якої площина коливання вектора  $\vec{E}$ , а отже, і вектора  $\vec{B}$  є чітко фіксованою (рис. 46.1). Але будь-яке світне тіло складається з величезної кількості частинок. Випромінювання кожної з них ніяк не пов'язане з випромінюванням сусідньої з нею частинки, тому

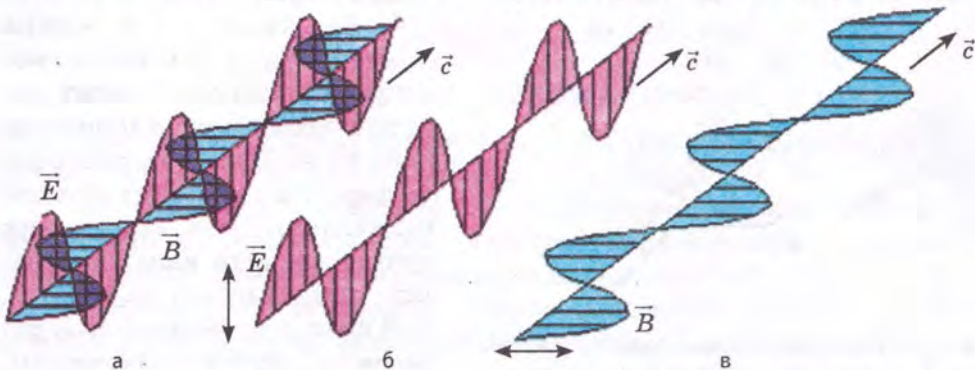


Рис. 46.1. Світлова хвиля від окремого атома (а). Площини коливань вектора  $\vec{E}$  (б) і вектора  $\vec{B}$  (в) є фіксованими



площина коливань вектора  $\vec{E}$  у кожній з них не залежить від сусідньої. У сумарному випромінюванні, що випускається таким тілом, безліч різноманітно орієнтованих площин коливань, а амплітуда коливань вектора  $\vec{E}$  в будь-якій площині однакова. Таке світло називається *природним*, або *неполяризованим*. Прикладами неполяризованого світла є сонячне випромінювання, випромінювання ламп розжарювання, ламп денного світла тощо.

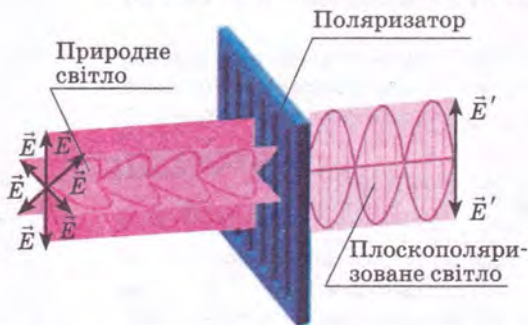


Рис. 46.2. У плоскополяризованому світлі коливання вектора  $\vec{E}$  відбуваються лише в одній площині

Якщо на шляху природного світла поставити **поляризатор** — *пристрій, що пропускає світлові хвилі лише в певній площині коливань вектора  $\vec{E}$* , то у світлі, що пройшло крізь поляризатор, коливання вектора  $\vec{E}'$  відбуватимуться тільки в цій площині (рис. 46.2). Таке світло називається *плоскополяризованим*, або *лінійнополяризованим* (окрім лінійної, існують і інші види поляризації, але ми не будемо їх розглядати).

**Поляризація світла** — це орієнтація вектора напруженості світлової хвилі в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі, під час взаємодії світла з речовиною.

Неполяризоване й поляризоване світло — це два окремі випадки так званого *частково поляризованого світла* — світла, у якого амплітуда коливань вектора  $\vec{E}$  в різних площинах коливань неоднакова.

## ★ 2 Як отримати поляризоване світло

Розглянемо деякі приклади поляризації світла.

1) Ще наприкінці XVII ст. було виявлено, що кристал ісландського шпату роздвоює пучки світла, які проходять крізь нього.

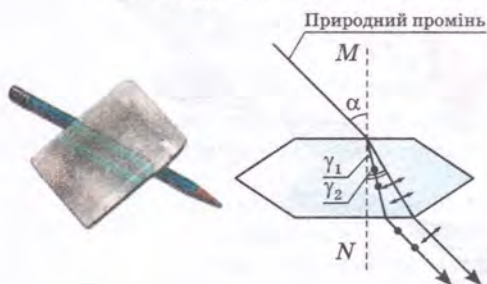


Рис. 46.3. Подвійна променезаломлюваність природного світла в кристалі. MN — оптична вісь кристала: світло, напрямлене вздовж оптичної осі, не заломлюється й не роздвоюється

Це явище, яке можна спостерігати у більшості монокристалів, дістало назву *подвійної променезаломлюваності* (рис. 46.3). Спроба одержати інтерференційну картину шляхом накладання двох заломлених пучків дає негативний результат, хоча ці пучки когерентні. Цей факт пояснюється тим, що заломлені пучки поляризовані у взаємно перпендикулярних напрямках.



2) Якщо з кристала турмаліну вздовж його оптичної осі вирізати пластину, то вона буде пропускати лише ті світлові хвилі, вектор напруженості яких паралельний оптичній осі кристала. Побачити це можна за допомогою іншої пластини, обертаючи її в площині, яка паралельна першій пластині.

У міру збільшення кута між оптичними осями кристалів інтенсивність світла, що проходить крізь пластини, зменшуватиметься. Коли осі кристалів встановляться перпендикулярно одна до одної, світло не пройде зовсім — поглинеться. В цьому випадку перша пластинка виконує функції поляризатора, а друга — *аналізатора*: поляризатор виділяє з природного світла пучок з однією площиною коливань вектора  $\vec{E}$ , аналізатор визначає площину, в якій відбуваються коливання в поляризованому пучку (рис. 46.4). *Поляризатори й аналізатори мають спільну назву — поляроїди.*

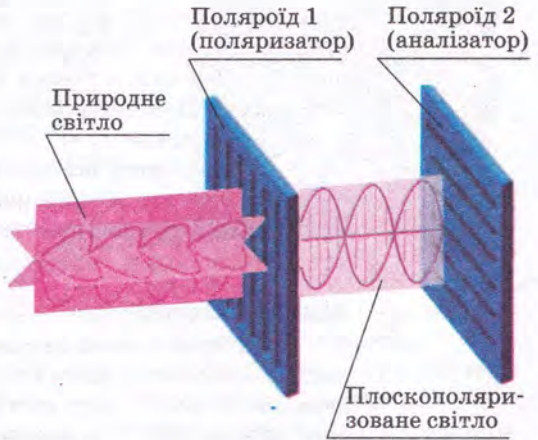


Рис. 46.4. Схема дії поляризатора й аналізатора

На практиці в якості поляроїдів використовують спеціальні плівки, які наносять на скляну або целулоїдну пластинку, наприклад, плівки з кристаликів герпатиту.

3) Світло завжди частково поляризується при відбиванні від поверхні діелектрика та при заломленні на його поверхні. У відбитій хвилі вектор  $\vec{E}$  переважно перпендикулярний до площини падіння, а у заломленій — лежить у площині падіння.

#### Закон Брюстера:\*

Для кожної пари прозорих середовищ існує кут падіння  $\alpha_B$ , при якому відбите світло стає повністю плоскополяризованим:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21},$$

де  $n_{21}$  — відносний показник заломлення середовищ.

Цей кут називається *кутом Брюстера*. При *куті Брюстера відбитий і заломлений промені взаємно перпендикулярні*.

Поляризованість відбитого світла, наприклад відблисків на поверхні води або скляних вітрин, визначає методи боротьби з цим явищем. Якщо дивитися на відблиск крізь поляроїдний фільтр, неважко підібрати такий кут обертання фільтра, при якому відблиск повністю або значною мірою зникає. Використання поляроїдних фільтрів

\* На честь шотландського фізика Скотта Брюстера (1781–1868), який встановив цей закон у 1815 р.



у фотографії, для виготовлення сонцезахисних окулярів, вітрового скла дозволяє погасити сліпучі відблиски від скляних вітрин, поверхні води або вологого шосе.★

**!** Підбиваємо підсумки

Світло, у якого вектор напруженості  $\vec{E}$  коливається в будь-якій площині, а амплітуда коливань в кожній площині однакова, називається природним, або неполяризованим. Світло, у якого коливання вектора  $\vec{E}$  відбуваються тільки в одній площині, називається плоскополяризованим. Для поляризації світла використовують спеціальні пристрої — поляризатори.

★ У випадку відбиття світла від поверхні діелектрика відбитий і заломлений промені завжди частково поляризовані. Кут падіння  $\alpha_B$ , при якому відбита хвиля стає повністю поляризованою, називається кутом Брюстера й визначається за формулою  $\text{tg} \alpha_B = n_{21}$ .★

**?** Контрольні запитання

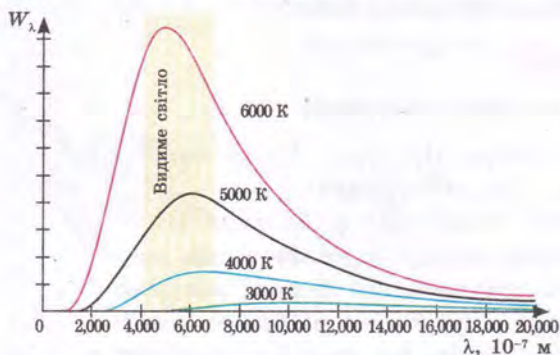
1. Чому природне світло завжди неполяризоване? 2. Яке світло називають плоскополяризованим? 3. Дайте визначення поляризації. ★ 4. Наведіть приклади поляризації світла. ★ 5. Які функції виконують поляроїди і як залежно від цього вони називаються? ★ 6. Що таке кут Брюстера? ★ 7. З якою метою використовують поляроїдні фільтри?

**§ 47. ТЕОРІЯ М. ПЛАНКА. ФОТОНИ**

**?!** Ви вже знаєте, що сучасна теорія світла розглядає світло з позицій корпускулярно-хвильового дуалізму. Хвильові властивості світла ми вже розглянули. У цьому параграфі ви дізнаєтесь про частинки світла — фотони.

**1** Чому Планк вимушений був висунути гіпотезу про дискретний характер випромінювання

Однією з проблем, з якою фізики стикнулися наприкінці XIX ст., було встановлення закономірностей випромінювання абсолютно чорного тіла.



**Рис. 47.1.** Залежність енергії електромагнітних хвиль, випромінюваних за 1 с з одиниці площі поверхні абсолютно чорного тіла, від довжини хвилі

*Абсолютно чорне тіло* — це фізична модель тіла, яке повністю поглинає будь-яке випромінювання, що падає на нього. До випромінювання абсолютно чорного тіла близьке випромінювання багаття, волоска лампи розжарювання, Сонця тощо.

Експериментальні дослідження показали, що розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла (графік залежності  $W_\lambda(\lambda)$ ) має вигляд такий, як зображено на рис. 47.1.



Однак усі спроби вчених одержати аналітичний вигляд цієї функції, користуючись законами класичної електродинаміки Максвелла, зазнавали поразки.

Восени 1900 р., зіставивши всі отримані до цього часу результати, німецький фізик Макс Планк (рис. 47.2) нарешті встановив формулу, яка повністю відповідала експериментальній кривій. Точніше, вчений спочатку її просто вгадав. Але маючи вже готову формулу, Планк так і не зміг вивести її з відомих на той час законів, тому був змушений висунути гіпотезу, яка суперечила класичним уявленням про безперервність енергії випромінювання.

### Гіпотеза Планка:

Випромінювання електромагнітних хвиль атомами й молекулами речовини відбувається не безперервно, а дискретно, тобто окремими елементами, енергія яких має бути пропорційною частоті  $\nu$  випромінювання:

$$E = h\nu,$$

де  $h$  — стала величина.

Згодом «елементи енергії» стали називати *квантами енергії*, а сталу  $h$  — *сталою Планка*. За сучасним даними стала Планка дорівнює:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

## 2 Знайомимося з властивостями фотонів

Щоб якось «примиритися» з класичними уявленнями про електромагнітну природу світла, Планк спочатку вирішив, що світло тільки випромінюється квантами, а поширюється й поглинається безперервно. Ситуація докорінно змінилася, коли А. Ейнштейн вирішив розглянути властивості теплового випромінювання по-новому, тобто не базуючись на «будь-яких уявленнях про виникнення й поширення випромінювання». Використавши аналогію між відомими формулами для ідеального газу, Ейнштейн дійшов висновку, що монохроматичне випромінювання малої густини поводить так, ніби складається з  $N = \frac{W}{h\nu}$  «незалежних один від одного квантів енергії» величиною  $h\nu$  кожний.

Після тривалих міркувань Ейнштейн дійшов висновку, що річ не просто у квантах енергії, а в реальних частинках, з яких складається будь-яке електромагнітне випромінювання. Згодом *частинки світла* (кванти світла) стали називати *фотонами*.



Рис. 47.2. Макс Карл Ернст Людвіг Планк (1858–1947) — видатний німецький фізик-теоретик, засновник квантової теорії — сучасної теорії руху, взаємодії та взаємних перетворень мікроскопічних частинок



Згідно із сучасними уявленнями **фотони мають такі властивості:**

1. Фотон є електрично нейтральною частинкою, тобто його заряд дорівнює нулю ( $q=0$ ).

2. Швидкість руху фотона не залежить від вибору системи відліку і завжди дорівнює швидкості світла у вакуумі  $c=3 \cdot 10^8$  м/с. Не слід плутати швидкість поширення світлової хвилі в речовині зі швидкістю руху фотона. Фотони в речовині рухаються від частинки до частинки, поглинаються ними і знову виникають.

3. Енергія фотона пропорційна частоті електромагнітного випромінювання, квантом якого він є:  $E=h\nu$ .

4. Імпульс фотона дорівнює відношенню його енергії до швидкості й обернено пропорційний довжині його хвилі:  $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ .

5. Маса фотона дорівнює нулю ( $m=0$ ). Ця властивість стосується тільки окремого фотона, а світло в цілому (як потік фотонів) має масу. Наприклад, для системи із двох фотонів, які мають однакову енергію ( $E=h\nu$ ) та летять під кутом  $\theta$  один до одного, їхня маса визначається співвідношенням:

$$M = \frac{2E}{c^2} \sin \frac{\theta}{2}.$$

Цей результат може здаватися дивним, адже маса кожного фотона дорівнює нулю, а  $0+0=0$ . Але річ у тім, що маса, відповідно до законів теорії відносності, не є адитивною, тобто повна маса системи тіл не дорівнює сумі мас тіл, що утворюють цю систему.

6. Фотони випромінюються під час: переходів частинок речовини зі збудженого стану в стан з меншою енергією; прискорення заряджених частинок; розпаду деяких частинок; анігіляції. Під час поглинання світла речовиною фотон цілком передає всю енергію частинкам речовини.

Наведені властивості фотонів були встановлені не відразу. На початку ХХ ст. сама ідея існування частинок світла зустрічала різке неприйняття. Адже інтерференція, дифракція й поляризація світла показували, що світло — це хвилі. Зазначимо, що саме Ейнштейн через понад 50 років після висунення гіпотези Планка, коли існування фотонів уже не бралось під сумнів, писав, що він «після 50 років роздумів так і не зміг наблизитися до відповіді на питання, що ж таке світловий квант».

3

### Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Скільки фотонів за секунду випромінює волосок електричної лампи розжарювання, споживана потужність якої 100 Вт, якщо на випромінювання світла витрачається 4,4 % електричної енергії? Довжину хвилі випромінювання вважайте такою, що дорівнює 600 нм.



$N$  — ?

Дано:

$$P_{\text{спож}} = 100 \text{ Вт}$$

$$\lambda = 6,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\eta = 0,044$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

**Аналіз фізичної проблеми.** За умовою задачі випромінювання лампи можна розглядати як сукупність фотонів однакової енергії. Оскільки кожний фотон має енергію  $E$ , то сумарна енергія  $N$  фотонів дорівнює  $W = EN$ , а потужність випромінювання

$P_{\text{кор}} = \frac{W}{t}$ , де  $t$  — час, за який лампа випромінює

$N$  фотонів. Корисну потужність можна знайти

зі співвідношення:  $\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{спож}}}$ .

**Розв'язання.** Енергія фотона дорівнює:  $E = h\nu$ , де  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , тому

$$E = \frac{hc}{\lambda}. \text{ Таким чином, } P_{\text{кор}} = \frac{W}{t} = \frac{EN}{t} = \frac{h\nu N}{t} = \frac{hcN}{\lambda t}. \text{ З формули ККД}$$

$$\text{маємо: } P_{\text{кор}} = \eta P_{\text{спож}}. \text{ Отже, } \eta P_{\text{спож}} = \frac{hcN}{\lambda t} \Rightarrow N = \frac{\eta P_{\text{спож}} \lambda t}{hc}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[N] = \frac{\text{Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot (\text{м/с})} = \frac{(\text{Дж/с}) \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{Дж} \cdot \text{м}} = 1;$$

$$\{N\} = \frac{0,044 \cdot 100 \cdot 6,0 \cdot 10^{-7}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8} = 1,3 \cdot 10^{19}, \quad N = 1,3 \cdot 10^{19}.$$

**Відповідь:** волосок лампи випромінює  $1,3 \cdot 10^{19}$  фотонів за секунду.

### ! Підбиваємо підсумки

Відповідно до гіпотези Планка світло випромінюється скінченними порціями енергії, які вчений назвав квантами світла. Енергія цієї елементарної порції випромінювання залежить тільки від частоти хвилі:  $E = h\nu$ , де  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — стала Планка. Ейнштейн довів, що світло не тільки випромінюється квантами енергії, а й поглинається та поширюється у вигляді набору частинок світла (фотонів).

За сучасними уявленнями, фотон є електрично нейтральною частинкою, що не має маси спокою, рухається зі швидкістю світла у вакуумі, має енергію  $E = h\nu$  та імпульс  $p = \frac{h}{\lambda}$ .

### ? Контрольні запитання

1. У чому полягає гіпотеза М. Планка? 2. Як розрахувати енергію кванта випромінювання? 3. Який внесок зробив А. Ейнштейн у розвиток квантової теорії світла? 4. Що таке фотон? Які його властивості?

### Вправа № 35

- Знайдіть енергії фотонів синього та червоного випромінювань, довжини хвиль яких дорівнюють 480 і 720 нм відповідно. Енергія якого фотона є більшою і в скільки разів?
- Визначте імпульс і енергію кванта ультрафіолетового випромінювання, довжина хвилі якого 20 нм.
- Тривалість імпульсу рубінового лазера 1 мс. За цей час лазер випромінює  $2 \cdot 10^{19}$  світлових фотонів із довжиною хвилі 694 нм. Чому дорівнює потужність спалаху лазера?
- Чутливість сітківки ока до жовтого світла становить  $3,3 \cdot 10^{-18}$  Вт. Скільки фотонів має щосекунди поглинатися сітківкою, щоб виникло зорове відчуття? Довжину хвилі вважайте такою, що дорівнює 600 нм.



## § 48. ФОТОЕФЕКТ І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

?

Ще десять років тому більшість людей, почувши термін «сонячні батареї», підсвідомо асоціювали його із системою забезпечення космічного корабля енергією. Але в 2010 р. сумарна потужність «земних» сонячних батарей склала більш ніж 10 ГВт, що можна порівняти з потужністю всіх атомних станцій України. Про те, яке суто наукове відкриття привело до створення цих перспективних джерел електричної енергії, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1

## Що таке фотоелектрний ефект і як його спостерігати

Явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випусканням електронів, називається **фотоелектрним ефектом**.

Розрізняють: *зовнішній фотоелектрний ефект*, за якого фотоелектрони вилітають за межі тіла, та *внутрішній фотоелектрний ефект*, за якого електрони, «вирвані» світлом з молекул та атомів, залишаються всередині речовини.

Зовнішній фотоелектрний ефект легко спостерігати за допомогою електрометра з прикріпленою до нього цинковою пластинкою (рис. 48.1, а). Якщо пластинку передати від'ємний заряд й освітити її ультрафіолетовим випромінюванням, то електрометр дуже швидко розрядиться. У разі позитивного заряду пластинки такий ефект не спостерігається. Пояснити це можна тим, що під дією ультрафіолетового світла пластинка випускає електрони (рис. 48.1, б). Якщо пластинка заряджена негативно, то електрони відштовхуються від неї, і електрометр розряджається. Якщо пластинка заряджена позитивно, випущені електрони притягуються до пластинки і повертаються назад, тому заряд електрометра не змінюється.

Зовнішній фотоелектрний ефект відкрив німецький фізик Г. Герц у 1887 р., а детально дослідив російський вчений Олександр Григорович Столетов (1839–1896) у 1888–1890 роках.

## 2 Закони фотоелектрного ефекту

Для вивчення фотоелектрного ефекту можна використати пристрій, схематичне зображення якого наведено на рис. 48.2. Всередині камери, з якої викачане повітря, розташовані два електроди (анод А і катод К), на які подається напруга від джерела постійного струму. Крізь кварцове вікно падає світловий пучок, під дією якого катод К випускає електрони. Рухаючись в електричному полі від катода до анода, електрони створюють

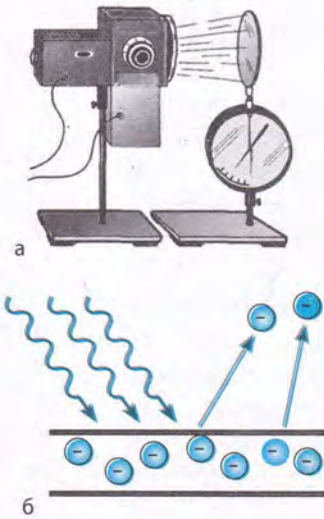


Рис. 48.1. Зовнішній фотоелектрний ефект: а — спостереження; б — механізм явища

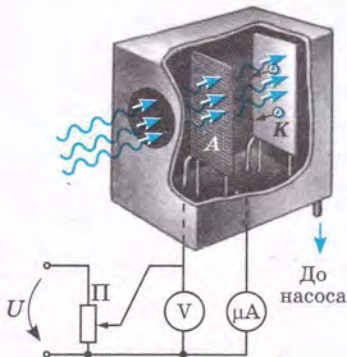


Рис. 48.2. Схема дослідження фотоелектрного ефекту



*фотострум*, сила якого вимірюється мікроамперметром  $\mu\text{A}$ . Якщо за допомогою потенціометра  $\Pi$  змінювати напругу на електродах, то сила фотоструму теж змінюватиметься.

На рис. 48.3 наведені графіки залежності сили фотоструму  $I$  від напруги  $U$  на електродах  $I(U)$ . З графіків бачимо, що за певної напруги сила фотоструму досягає максимального значення і далі залишається постійною. Зрозуміло, що це відбувається тоді, коли всі електрони, які випускає катод, досягають анода.

Найбільше значення сили фотоструму називають *силою струму насичення*  $I_n$ :

$$I_n = \frac{q_{\max}}{t} = \frac{N|e|}{t},$$

де  $q_{\max}$  — максимальний заряд, перенесений фотоелектронами;  $N$  — число вибитих електронів;  $e$  — заряд електрона;  $t$  — час спостереження.

Зі зменшенням напруги між електродами сила струму зменшується. Але навіть коли напруга між електродами досягне нуля, струм не зникне. Це можна пояснити тим, що фотоелектрони мають початкову швидкість, тому деякі з них досягають анода й за відсутності поля. Щоб виміряти цю швидкість, пластину  $A$  з'єднують з негативним полюсом джерела струму, а пластину  $K$  — з позитивним. У цьому випадку електричне поле гальмує електрони. При досягненні певної *затримуючої напруги*  $U_3$  фотострум припиняється. Згідно із законом збереження енергії:

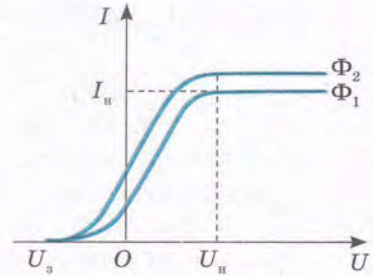
$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3,$$

де  $m$  — маса електрона;  $v_{\max}$  — максимальна початкова швидкість фотоелектрона.

Дослід показує, що затримуюча напруга (а отже, й початкова швидкість фотоелектронів) зменшується у разі збільшення довжини (зменшення частоти) падаючої на катод світлової хвилі; за певної довжини хвилі фотоефект припиняється.

Змінюючи по черзі інтенсивність та частоту падаючого світла, а також матеріал, з якого виготовлений катод, встановили такі **закони зовнішнього фотоефекту**:

1. Число фотоелектронів, що випускає катод за одиницю часу, прямо пропорційне інтенсивності світла.
2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується при збільшенні частоти падаючого світла й не залежить від інтенсивності світла.



**Рис. 48.3.** Графік залежності сили фотоструму від напруги на електродах за незмінної частоти падаючої світлової хвилі і різних значень світлового потоку  $\Phi$ :  $\Phi_2 > \Phi_1$



3. Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі  $\lambda_{\text{черв}}$  (червона межа фотоелекту), за якої починається фотоелект. Опромінення речовини світловими хвилями більшої довжини фотоелекту не викликає.

Якщо перший закон фотоелекту можна було пояснити в межах класичної електромагнітної теорії світла, то наступні два закони прямо суперечили уявленням, що існували на той момент. Знадобилося більш ніж 20 років і геніальність двох фізиків — М. Планка та А. Ейнштейна, щоб розгадати цю загадку.

### 3 За що Ейнштейн одержав Нобелівську премію

Робота виходу  
електронів  $A_{\text{вих}}$   
( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ )

Речовина	$A_{\text{вих}}$ , eV
Вольфрам	4,5
Калій	2,2
Літій	2,4
Мідь	4,7
Платина	6,35
Срібло	4,3
Цинк	4,2

Для пояснення законів фотоелекту А. Ейнштейн використав ідею М. Планка. На той час було відомо, що кожній речовині відповідає своя робота виходу  $A_{\text{вих}}$  (таблиця), тобто кожний метал характеризується певною енергією, яку треба передати електрону для того, щоб він зміг подолати сили, які утримують його всередині зразка. Вчений припустив, що *внаслідок поглинання фотона металом енергія фотона ( $E = h\nu$ ) може бути цілком передана електрону й витратитися лише на здійснення роботи виходу  $A_{\text{вих}}$  та надання електрону кінетичної енергії  $E_{\text{к.мах}}$ .*

**Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелекту:**

$$h\nu = A_{\text{вих}} + E_{\text{к.мах}} \quad \text{або} \quad h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m_e v_{\text{е}}^2}{2}$$

Рівняння Ейнштейна дає можливість пояснити всі наведені закони фотоелекту:

1) більша інтенсивність світла означає більшу кількість фотонів, які, поглинаючись електронами речовини, сприяють їхньому випусканню;

2) електрон може поглинути тільки один фотон (більше — лише за дуже великої інтенсивності світла), тому максимальна кінетична енергія електрона визначається тільки енергією фотона, а отже, частотою світла й не залежить від інтенсивності;

3) максимальна довжина світлової хвилі (мінімальна частота) відповідає мінімальній енергії фотона: якщо  $h\nu < A_{\text{вих}}$ , то електрони не вилітатимуть із речовини. Умова  $h\nu_{\text{мін}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{черв}}} = A_{\text{вих}}$  визначає червону межу фотоелекту (граничну частоту).

Саме за пояснення явища фотоелекту А. Ейнштейн одержав найвищу наукову нагороду — Нобелівську премію.



#### 4 Де і як застосовують фотоэффект

Фотоэффект отримав широке застосування у пристроях для перетворення світлових сигналів на електричні або для безпосереднього перетворення світлової енергії на електричну. Існують два великі класи таких пристроїв: *вакуумні фотоелементи* (рис. 48.4), дія яких ґрунтується на зовнішньому фотоэффекті, і *напівпровідникові фотоелементи* та *фоторезистори* — їхня дія заснована на внутрішньому фотоэффекті. 🐣★

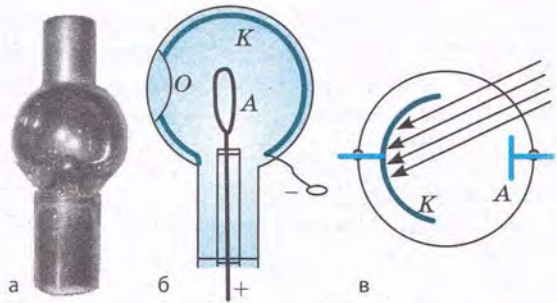
Властивість фотоелемента майже миттєво реагувати на світлову дію або її зміну використовують у різноманітних *фотореле*. Фотореле слугують для автоматичного вмикання і вимикання освітлення, сортування деталей за формою й кольором, у системах безпеки, наприклад для зупинки потужного преса, якщо рука людини опинилась в небезпечній зоні, тощо.

Фотоелементи застосовують також у надчутливих *фотоприймачах*, які перетворюють слабкі світлові сигнали на електричні. Особливо масово застосовують такі чутливі датчики в цифрових фотоапаратах. Замість фотоплівки такий фотоапарат має напівпровідникову пластинку (матрицю), яка складається з великої кількості напівпровідникових фотоелементів. Кожен із цих елементів приймає «свою» частину світлового потоку, перетворює її на електричний сигнал і передає його у відповідне місце екрана. Фотозйомка таким апаратом являє собою не що інше, як запам'ятовування масиву сигналів.

Енергетичні застосування фотоэффекту пов'язані насамперед із *сонячними батареями*. Крім невеликих електростанцій на одну родину, останнім часом стали створювати й великі «енергетичні поля» із сонячних батарей. Типова потужність однієї такої станції становить 20 МВт. Більшість із вас бачили автономний «грибок» на сонячних батареях, який, зарядившись за день, увечері й уночі освітлює доріжку в саду. Промислове застосування подібних пристроїв дозволяє практично безкоштовно освітлювати автомобільні траси.

#### 5 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Цинкова пластинка освітлюється монохроматичним світлом із довжиною хвилі 300 нм. Якого максимального потенціалу набуде пластинка? Червона межа фотоэффекту для цинку  $\lambda_{\text{черв}} = 332$  нм.



**Рис. 48.4.** Вакуумний фотоелемент: *а* — зовнішній вигляд; *б* — будова; *в* — схематичне позначення. У скляному балоні закріплене металеве кільце — анод *A*; внутрішня поверхня балона, за винятком невеликого вікнця *O*, вкрита світлочутливим шаром металу, що слугує катодом *K*



$\varphi$  — ?

Дано:

$$\lambda = 3,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\lambda_{\text{черв}} = 3,32 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

**Аналіз фізичної проблеми**

Пластина припиняє витратити електрони, коли останні повністю затримуються електричним полем пластини, яка завдяки фотоелекту набуває позитивного заряду. Вважаючи, що потенціал точок поля на достатній відстані від пластини дорівнює нулю, маємо:  $U_a = \varphi$ .

**Пошук математичної моделі, розв'язання**

Відповідно до формули Ейнштейна:  $h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$ ,

де  $A_{\text{вих}} = h\nu_{\text{min}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{черв}}}$ ,  $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = |e|U_a$ ,  $v = \frac{c}{\lambda}$ .

Враховуючи, що  $U_a = \varphi$ , маємо:  $\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{\text{черв}}} + |e|\varphi$ .

$$\text{Отже, } \varphi = \frac{\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_{\text{черв}}}}{|e|} = \frac{hc}{|e|} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\text{черв}}} \right).$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[U] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{Кл}} \cdot \left( \frac{1}{\text{м}} - \frac{1}{\text{м}} \right) = \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В};$$

$$\{U\} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \left( \frac{1}{3,00 \cdot 10^{-7}} - \frac{1}{3,32 \cdot 10^{-7}} \right) \approx 0,40; U = 0,40 \text{ В.}$$

**Відповідь:** максимальний потенціал пластини  $U = 0,40 \text{ В}$ .

**Підбиваємо підсумки**

Явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випусканням електронів, називається фотоелектом.

Експериментально встановлено три закони фотоелекту:

1. Число фотоелектронів, що випускає катод за одиницю часу, прямо пропорційне інтенсивності світла.

2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується при збільшенні частоти падаючого світла й не залежить від інтенсивності світла.

3. Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі  $\lambda_{\text{черв}}$  (червона межа фотоелекту), за якої починається фотоелект. Опромінення речовини світловими хвилями більшої довжини фотоелекту не викликає.

Пояснити всі три закони з позицій квантової теорії дозволила формула Ейнштейна для фотоелекту:  $h\nu = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} + A_{\text{вих}}$ .

Фотоелект використовується в різних датчиках для систем керування й безпеки. Основна галузь використання внутрішнього фотоелекту — сонячні батареї.

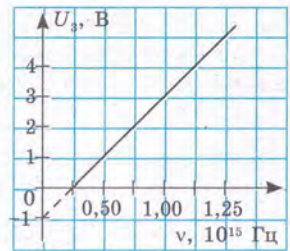


**Контрольні запитання**

1. Дайте визначення фотоелектру. 2. Чим відрізняється внутрішній фотоелектр від зовнішнього? 3. Опишіть пристрій для вивчення фотоелектру. 4. Які фізичні величини вимірюються під час експерименту? Як подається його результат? 5. Які висновки можна зробити, аналізуючи вольт-амперну характеристику фотоелектру? Які фізичні величини можна визначити за цим графіком? 6. Сформулюйте закони фотоелектру. 7. Запишіть формулу Ейнштейна для фотоелектру і поясніть її фізичну сутність. 8. Що називають червоною межею фотоелектру? Як її визначити? 9. Які ви знаєте приклади застосування фотоелектру?

**Вправа № 36**

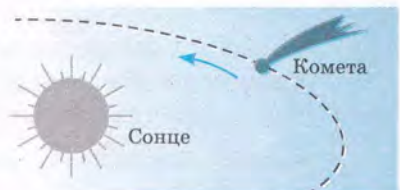
- Електрон виходить із цезію з максимальною кінетичною енергією 2 еВ. Яка частота світла, що опромінює цезій, якщо робота виходу дорівнює 1,8 еВ?
- На рис. 48.3 подано вольт-амперну характеристику фотоелектру. Накресліть вольт-амперні характеристики: 1) у разі збільшення частоти падаючого випромінювання; 2) у разі зменшення падаючого світлового потоку.
- Яка максимальна кінетична енергія фотоелектронів, «вирваних» із калієвого фотокатода фіолетовим світлом із довжиною хвилі 420 нм?
- Визначте максимальну швидкість фотоелектрона, що вилетів із срібла внаслідок освітлення його ультрафіолетовим випромінюванням із довжиною хвилі 155 нм.
- Знайдіть частоту світла, якщо електрони, «вирвані» цим світлом з поверхні металу, повністю затримуються напругою 2,0 В. Фотоелектр у цьому металі починається за частоти падаючого світла  $6,0 \cdot 10^{14}$  Гц. Яка робота виходу електрона для цього металу?
- За графіком залежності затримуючої напруги від частоти падаючого світла (рисунок) знайдіть сталу Планка.

**§ 49. ТИСК СВІТЛА. КОРПУСКУЛЯРНО-ХВИЛЬОВИЙ ДУАЛІЗМ**

Протягом кількох століть тривала «боротьба» між прихильниками корпускулярної та хвильової теорій світла. Найвидатніші фізики докладали зусиль, щоб з'ясувати природу світла. Результат цієї багаторічної дискусії врешті привів до перегляду всіх класичних уявлень фізики й до створення квантової фізики. У цьому параграфі ви ознайомитеся із сучасним поглядом на природу світла й речовини та з'ясуєте причину тиску світла.

**1 Чому світло здійснює тиск**

Гіпотеза про те, що світло здійснює тиск, виникла ще у XVII ст., коли І. Кеплер та І. Ньютон припустили, що відхилення хвостів комет у бік, протилежний Сонцю, спричинене тиском світла (рис. 49.1). Для пояснення світлового тиску розглянемо дію електромагнітної хвилі, що падає на металеву пластину, перпендикулярно до її поверхні



**Рис. 49.1.** Відхилення хвостів комет у бік, протилежний Сонцю, пояснюється тиском світла



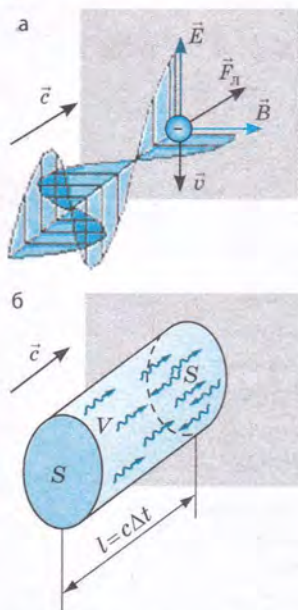


Рис. 49.2. До пояснення тиску світла в межах електромагнітної (а) та квантової (б) теорій світла

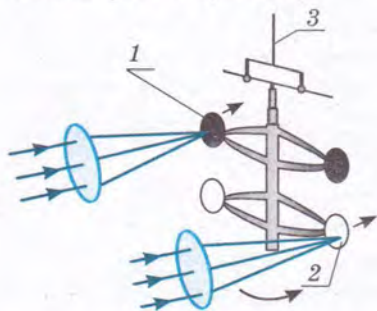


Рис. 49.3. Схема досліду Лебедева: тиск світла на темне крильце (1) у два рази менш, ніж на дзеркальне крильце (2), тому нитка (3) закручується; за кутом закручення нитки можна визначити тиск світла

(рис. 49.2, а). Під дією електричного поля хвилі вільні електрони рухатимуться з певною швидкістю  $\vec{v}$  в напрямку, протилежному напрямку вектора напруженості  $\vec{E}$ . З боку магнітного поля хвилі на рухомий електрон діє сила Лоренца. Якщо, скориставшись правилом лівої руки, визначити напрямок сили Лоренца, то побачимо, що він збігається з напрямком поширення хвилі. Сумарна сила Лоренца, що діє на електрони пластини, і є силою тиску, а її відношення до площі поверхні пластини визначає тиск електромагнітної хвилі.

Максвелл теоретично довів, що тиск, створений електромагнітною хвилею на абсолютно непрозоре тіло, визначається за формулою:

$$p = (1 + R)w_{\text{сеп}},$$

де  $R$  — коефіцієнт відбивання,  $w_{\text{сеп}}$  — середня густина енергії хвилі.

Дзеркальна поверхня повністю відбиває світло, тому  $R_{\text{да}} = 1$  і  $p_{\text{да}} = 2w_{\text{сеп}}$ . Чорна поверхня, навпаки, повністю поглинає світло, тому  $R_{\text{ч}} = 0$  і  $p_{\text{ч}} = w_{\text{сеп}}$ . Отже, тиск, створюваний світлом на дзеркальну поверхню, вдвічі більший, ніж тиск на чорну. Саме цим висновком Максвелла скористався російський фізик Петро Михайлович Лебедев (1866–1912), створюючи прилад для вимірювання тиску світла. Пристрій Лебедева являв собою дуже чутливі крутильні терези, рухливою частиною яких була рамка із закріпленими на ній «крильцями» — світлим й чорними дисками завтовшки від 0,1 до 0,01 мм (рис. 49.3). Результат, отриманий Лебедевим у 1899 р., збігався з теоретичними розрахунками Максвелла. Зазначимо, що дослід було виконано дуже майстерно, оскільки світловий тиск є надзвичайно малим. Наприклад, влітку в сонячний день він дорівнює лише  $4 \cdot 10^{-8}$  Па.

Тиск світла можна розрахувати і в межах квантової теорії. Припустимо, що паралельний пучок монохроматичного світла падає на тіло перпендикулярно до його поверхні (рис. 49.2, б). За інтервал часу  $\Delta t$  на поверхню падає  $N$  фотонів. Кожний із поглинених фотонів передає тілу імпульс  $p_v = \frac{hv}{c}$ , а кожний із відбитих — імпульс  $\Delta p'_v = \frac{2hv}{c}$ . Якщо  $R$  — коефіцієнт відбивання фотонів, то  $RN$  фотонів



відбивається від тіла, а  $(1-R)N$  — поглинається. Сумарний імпульс, який передають тілу всі  $N$  фотонів, дорівнює:

$$\Delta p = (1-R)N \frac{h\nu}{c} + RN \frac{2h\nu}{c} = (1+R) \frac{Nh\nu}{c} = (1+R) \frac{W}{c},$$

де  $W = Nh\nu$  — сумарна енергія всіх фотонів.

Сила тиску, відповідно до другого закону Ньютона, дорівнює  $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ , тому тиск світла визначається співвідношенням:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{S \Delta t} = \frac{(1+R)W}{cS \Delta t} = \frac{(1+R)W}{V} = (1+R)w,$$

де  $w = \frac{W}{V}$  — об'ємна густина енергії падаючого світла.

Таким чином, вираз для тиску світла, отриманий у межах квантової теорії, повністю збігається з виразом для тиску світла, передбаченим теорією Максвелла.

2

### Що означає корпускулярно-хвильовий дуалізм світла

Отже, що таке світло — потік частинок чи електромагнітні хвилі? Сучасна фізика відповідає на це питання так.

**Світло** — це потік фотонів, а фотони — це кванти електромагнітного випромінювання, що мають водночас і хвильові, і корпускулярні властивості.

Подати ці кванти у вигляді якогось наочного образу неможливо, тому що наш досвід і наша уява базуються на сприйнятті лише макроскопічних тіл, серед яких об'єктів, аналогічних квантам, немає. Недарма фізика завжди чітко розмежовувала об'єкти, що мають хвильову природу (наприклад, радіохвилі або звук), і об'єкти, що мають дискретну (тобто переривчасту) структуру (наприклад, системи матеріальних точок). Але вивчення світла привело до розуміння хибності розмежування його корпускулярних і хвильових властивостей.

**Кванти світла** — це особливі частинки, енергія та імпульс яких, на відміну від звичайних матеріальних точок, визначаються не через масу і швидкість руху, а через хвильові характеристики — частоту й довжину хвилі:  $E = h\nu$ ,  $p = \frac{h}{\lambda}$ .

Наявність у фотонів водночас і корпускулярних, і хвильових характеристик якраз і зумовлює те, що світло виявляє властивості як безперервних електромагнітних хвиль, так і окремих частинок.

Властивість матеріальних об'єктів, яка полягає в тому, що в поведінці одного об'єкта можуть виявлятися і корпускулярні, і хвильові риси, називається **корпускулярно-хвильовим дуалізмом**.



Відповідно до принципу корпускулярно-хвильового дуалізму електромагнітна хвиля може мати властивості частинок. Цей факт у 1922 р. експериментально встановив американський фізик Артур Холлі Комптон (1892–1962). Він виявив, що при розсіянні рентгенівського випромінювання речовиною у відбитих хвилях поряд



із хвилями тієї самої довжини  $\lambda_0$  спостерігаються хвилі і з більшою довжиною. Ефект Комптона можна пояснити, тільки враховуючи квантові властивості рентгенівського випромінювання. Врахування тільки хвильових властивостей призводить до хибного висновку: розсіяне випромінювання повинне мати ту саму частоту (довжину хвилі), що й випромінювання, яке падає на речовину, оскільки частота вимушених коливань дорівнює частоті змушуючої сили.★

### ★ 3 Які фізичні основи квантової механіки

Згідно з принципом корпускулярно-хвильового дуалізму *будь-яка частинка має властивості хвилі*.

Уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм частинок лежить в основі *квантової механіки*, яка є одним з основних напрямів сучасної фізики.

У 1924 р. французький фізик Луї де Бройль (1892–1987) висунув гіпотезу, згідно з якою *корпускулярно-хвильовий дуалізм є універсальною властивістю матеріальних об'єктів, характерною не лише для фотонів, а й для будь-яких інших мікрочастинок*.

За де Бройлем, формули для розрахунку енергії ( $E = hv$ ) та імпульсу ( $p = \frac{h}{\lambda}$ ) слід вважати *універсальними* — такими, що справджуються як для фотонів, так і для будь-яких інших частинок, а кожній частинці відповідає хвиля довжиною  $\lambda = \frac{h}{p}$  і частотою  $\nu = \frac{E}{h}$ . Ці


*хвилі речовини* отримали назву *хвилі де Бройля*. Довжина хвилі де Бройля для всіх реальних тіл виявляється дуже малою. Наприклад, для електронів, розігнаних до швидкості  $\nu = 7,3 \cdot 10^6$  м/с, вона дорівнює  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = 1,0 \cdot 10^{-10}$  м, а для тіла масою 1 г, що рухається

зі швидкістю 0,5 м/с, лише  $3,3 \cdot 10^{-30}$  м, що на 20 порядків менше за розмір атома. Тому хвильові ефекти від макротіл виявити неможливо. Разом із тим нині *експериментально виявлено хвильові властивості не тільки електронів та інших елементарних частинок, а й атомів і молекул*.

Одними з перших, хто виявив хвильові властивості в електронів, були американські фізики *Клінтон Джозеф Девіссон* (1881–1958) та *Лестер Хелберт Джермер* (1896–1971). У 1927 р. вони спостерігали дифракцію електронів на монокристалі нікелю, який виконував функцію дифракційної ґратки. Цей дослід виявився блискучим підтвердженням наявності в електронів хвильових властивостей.

Отже, природу електрона, як і інших частинок речовини, не можна повністю описати з використанням тільки корпускулярних або тільки хвильових уявлень. Марними виявились і спроби механічно поєднати корпускулярні й хвильові властивості в одному об'єкті.



Квантова механіка, на відміну від класичної, використовує інший метод опису стану системи. У будь-якій задачі класичної механіки матеріальна точка (або тіло) має визначені координати, які характеризують її положення в просторі, і швидкість (або імпульс). У квантовій механіці й координата, й імпульс визначаються лише з певною точністю ( $\Delta x$  — невизначеність координати;  $\Delta p$  — невизначеність імпульсу), тобто можна знайти лише ймовірність виявлення об'єкта в певній ділянці простору, ймовірність наявності в об'єкта певного імпульсу. *Визначити одночасно координати і швидкість (або імпульс) частинки в будь-який момент часу в принципі неможливо.* Отже, квантова механіка дає статистичний опис стану мікросистем. ★

Радянський фізик *Сергій Іванович Вавилов (1891–1951)* писав: «Речовина і світло одночасно мають властивості хвиль і частинок, однак у цілому це не хвилі, й не частинки, й не суміш того й іншого. Наші механічні поняття неспроможні повністю охопити реальність, для цього не достатньо реальних образів».★

### Підбиваємо підсумки

Максвелл на основі електромагнітної теорії світла показав, що світло має чинити тиск, і теоретично довів, що цей тиск визначається за формулою:  $p = (1+R)w_{\text{сеп}}$ . Квантова теорія пояснює тиск світла як сумарний імпульс, переданий фотонами за одиницю часу одиничній площі поверхні. Виміряв тиск світла та експериментально підтвердив розрахунки Максвелла П. М. Лебедев.

Світло має двоїсту корпускулярно-хвильову природу. Кванти світла — це особливі частинки, енергія та імпульс яких, на відміну від звичайних матеріальних точок, визначаються через хвильові характеристики — частоту й довжину хвилі:  $E = h\nu$ ,  $p = \frac{h}{\nu}$ .

★ Корпускулярно-хвильовий дуалізм є універсальною властивістю будь-яких матеріальних об'єктів. Хвильові властивості матеріального об'єкта, що має імпульс  $p$ , характеризує довжина хвилі де Бройля:  $\lambda = \frac{h}{p}$ . Відмітною рисою квантової механіки є врахування корпускулярно-хвильового дуалізму та ймовірнісний опис поведінки мікрочастинок.★

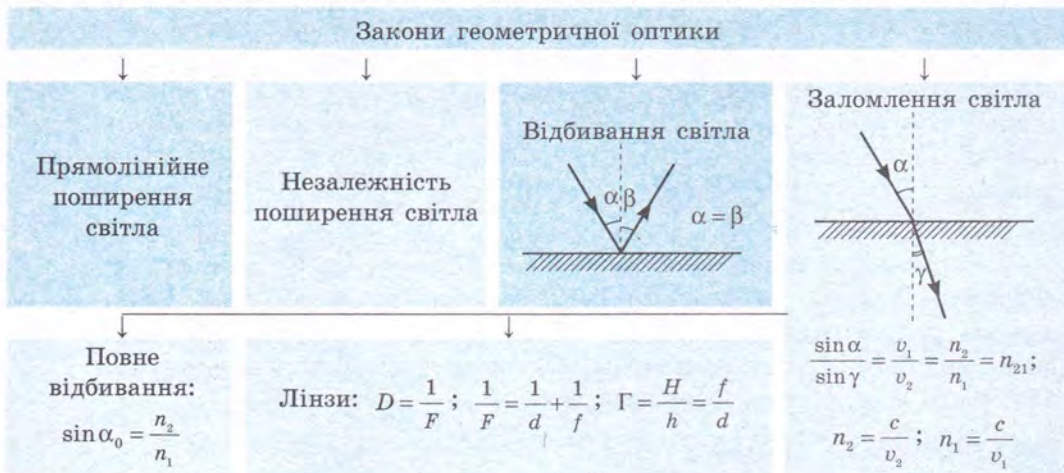
### Контрольні запитання

1. Як пояснюється наявність світлового тиску на основі електромагнітної теорії світла?
2. Опишіть досліди Лебедева з вимірювання світлового тиску.
3. Як пояснює тиск світла квантова теорія?
4. Чому тиск світла залежить від типу поверхні?
5. У яких явищах виявляються хвильові властивості світла?
6. У яких явищах виявляються корпускулярні властивості світла?
7. Що таке світло? ★
8. У чому суперечність між дослідами Комптона й класичною теорією розсіювання електромагнітних хвиль?
9. У чому сутність корпускулярно-хвильового дуалізму? ★
10. У чому полягає гіпотеза де Бройля? ★
11. Чому ми не спостерігаємо хвильові властивості тіл навколо нас? ★
12. У чому принципова відмінність квантово-механічного опису стану системи від класичного?

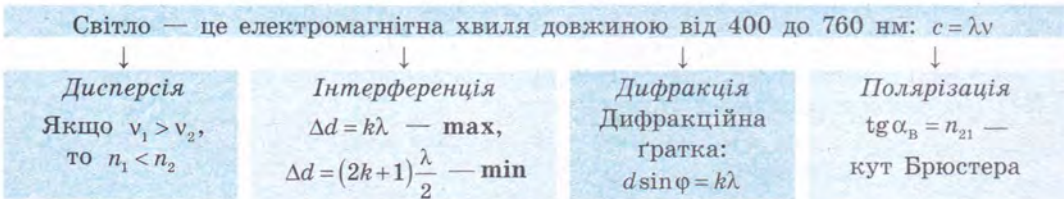


## ПІДБИВАЄМО ПІДСУМКИ РОЗДІЛУ 5 «ОПТИКА»

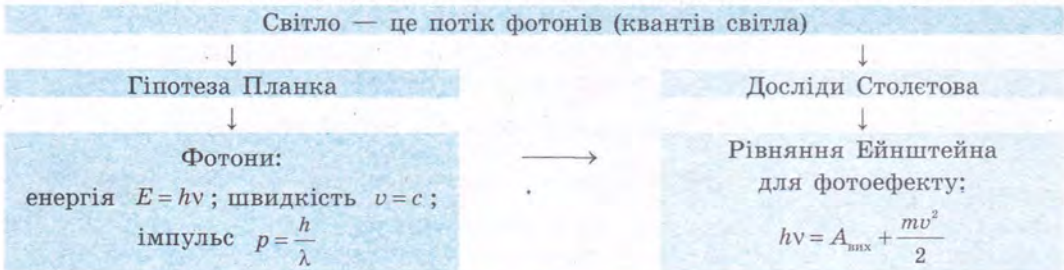
1. Вивчаючи розділ 5, ви розширили та систематизували знання про світло, який є об'єктом вивчення *оптики* — розділу фізики, що вивчає явища, пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль видимого діапазону та їхньою взаємодією з речовиною.
2. Ви згадали світлові явища та закони поширення світла.



3. Ви дізналися про хвильові властивості світла.



4. Ви виявили, що світло одночасно з хвильовими має квантові властивості.



5. Ви переконалися, що світло здійснює тиск, який можна пояснити в межах як електромагнітної, так і квантової теорії світла:

$$p = (1+R)w_{\text{сеп}}, \quad p = (1+R)\frac{Nh\nu}{cS\Delta t}$$

6. Ви дізналися, що світлу, як і будь-якій частинці, притаманний корпускулярно-хвильовий дуалізм, тобто в поведінці цих об'єктів можуть виявлятися як корпускулярні, так і хвильові риси.



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ 5 «ОПТИКА»

**Завдання 1.** Промінь світла падає з повітря на прозору плоскопаралельну пластину, показник заломлення якої 1,5. Кут заломлення променя дорівнює  $35^\circ$ .

(2 бали) Визначте кут між відбитим та заломленим променями.

★ (3 бали) Під яким кутом до поверхні пластини має падати світло, щоб відбитий промінь був повністю поляризованим?

(4 бали) Обчисліть товщину пластини, якщо після проходження крізь неї світловий промінь зміщується на 10 мм.

**Завдання 2.** У сучасних оптичних приладах енергію відбитого світлового потоку зменшують за допомогою інтерференції світла.

(2 бали) Чому «просвітлена оптика» часто має характерне бузкове забарвлення?

(4 бали) Якою має бути найменша товщина плівки, щоб монохроматичні світлові хвилі довжиною 550 нм, які відбиваються від верхньої й нижньої поверхонь плівки, гасили одна одну? Показник заломлення матеріалу плівки 1,375. ★ Чому показник заломлення плівки має бути меншим за показник заломлення скла?

**Завдання 3.** Для визначення довжини світлової хвилі використали дифракційну ґратку, період якої дорівнює 0,016 мм.

(2 бали) Які з наведених прикладів можна пояснити дифракцією світла?

- а) Неможливість побачити атоми в мікроскоп;
- б) райдужне забарвлення крилець метеликів;
- в) райдужне забарвлення DVD-диска;
- г) райдужне забарвлення мильної плівки.

(2 бали) Якою є найбільша довжина хвилі, що її можна визначити за допомогою цієї дифракційної ґратки?

(3 бали) Червона лінія спектра другого порядку розташована на відстані 14,2 см від середньої лінії. Відстань від ґратки до екрана 1,5 м. Визначте довжини хвиль червоних і фіолетових променів, якщо ширина спектра другого порядку дорівнює 6,7 см.

**Завдання 4.** В одному з експериментів із вивчення фотоефекту електрони, що вилітають під впливом світла з поверхні металу, повністю затримуються гальмівним полем за різниці потенціалів 0,95 В.

(2 бали) Визначте максимальну швидкість фотоелектронів.

(3 бали) Обчисліть роботу виходу й максимальний імпульс, який передається поверхні металу в момент вильоту кожного електрона, якщо метал освітлюється світлом із довжиною хвилі 420 нм.

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



## РОЗДІЛ 6. АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА

### § 50. ПОСТУЛАТИ БОРА. ★ ПРИНЦИП ПАУЛІ ★

**?!**  Джерелом близько 50 % електрики в Україні є поділ ядер Урану на атомних станціях. Майбутня термоядерна енергетика — це забезпечення людства електрикою після вичерпання вуглеводневих запасів палива. Водночас зі словом «ядерний» пов'язані величезні трагедії в історії людства — згадайте атомні бомби, скинуті на Японію в 1945 р., Чорнобильську катастрофу 1986 р., аварію 2011 р. на АЕС «Фукусіма» в Японії. У 9-му класі ви почали знайомство з явищами в мікросвіті. У цьому розділі продовжите вивчення атомної та ядерної фізики.

#### **1** Як з'явилася ядерна модель атома

Експерименти, проведені різними вченими протягом XIX ст. (зокрема, англійцями *Джоном Дальтоном* (1766–1844), *Майклом Фарадеєм* (1791–1867), французом *Антуаном Анрі Беккерелем* (1852–1908) та ін.), надали незаперечні докази того, що атом має складну структуру. Фізикам стало відомо, що до складу атома входять електрони, які мають негативний заряд, а атом загалом є нейтральним. Але якою є структура атома?

Одну з перших моделей будови атома запропонував у 1903 р. англійський фізик *Джозеф Джон Томсон* (1856–1940). Він припустив, що атом має форму кулі; позитивний заряд атома розподілений рівномірно по всьому об'єму цієї кулі, а негативно заряджені електрони вкраплені в її середину. Подальший прогрес у дослідженнях внутрішньої структури атома пов'язаний з ім'ям англійського фізика *Ернеста Резерфорда* (1871–1937). Досліди, проведені під його керівництвом у 1908–1911 рр., було докладно описано в курсі фізики 9-го класу. Нагадаємо, що в ході цих дослідів вивчалася розсіювання  $\alpha$ -частинок ядрами Аурому. Схему одного з таких дослідів наведено на рис. 50.1.

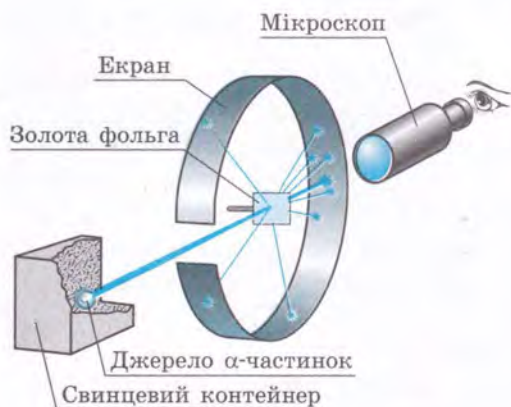


Рис. 50.1. Схема дослідів, проведеного під керівництвом Е. Резерфорда

Якби будова атома відповідала моделі Томсона, то  $\alpha$ -частинки практично не розсіювалися б, оскільки їх енергія є величезною. Однак під час дослідів Резерфорда деякі  $\alpha$ -частинки відхилилися на великі кути. Учений припустив, що розсіювання  $\alpha$ -частинок пояснюється тим, що позитивний заряд і маса в атомі не розподілені рівномірно по всьому об'єму атома, а зосереджені в його невеликій центральній частині — ділянці, яку назвали *ядро атома*. За аналогією з будовою Сонячної системи, нова модель атома була названа *планетарною*, або *ядерною*, моделлю.★



## 2 Постулати Бора

Планетарна модель атома, блискуче пояснивши результати експериментів із розсіювання  $\alpha$ -частинок, разом з тим суперечила класичним законам електродинаміки. Рух планетарною орбітою, як відомо, є рухом із прискоренням (доцентровим), а відповідно до теорії Дж. Максвелла прискорений рух зарядженої частинки супроводжується випромінюванням. Отже, електрон в атомі мав би випромінювати електромагнітні хвилі та відповідно — втрачати енергію. А наслідками цього були б зменшення швидкості руху електрона та його падіння на атомне ядро.

Модифікацію планетарної моделі здійснив у 1913 р. данський фізик *Нільс Бор* (1885–1962). Він припустив існування в атомі особливих станів електронів. Ці стани визначаються на підставі двох гіпотез, які дістали назву *постулати Бора*.

### Перший постулат Бора:

Існують особливі стани атома, в яких він не випромінює енергію. Такі стани атома називають стаціонарними станами.

Стаціонарний стан атома означає, що його електрони локалізовані в просторі (у Н. Бора йшлося про радіус орбіти електрона, зараз ми говоримо про орбіталі електронів) та мають певну енергію. Щоб визначити характеристики стаціонарних станів атомів, слід звернутися до курсу механіки. Коли розглядають умови рівноваги тіл, використовують поняття моменту сили. Більш загальне визначення цього терміна — момент імпульсу. У найпростішому випадку, коли векторні величини перпендикулярні одна до одної, момент імпульсу  $L$  тіла визначається як  $L = mvr$ , де  $m$  — маса тіла;  $v$  — модуль швидкості його руху;  $r$  — відстань до точки обертання тіла. Отже, згідно з першим постулатом Бора орбітальний момент імпульсу електрона може набувати тільки дискретних значень:

$$m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi},$$

де  $m_e$  — маса електрона;  $v$  — швидкість руху електрона;  $r_n$  — радіус стаціонарної орбіти атома;  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$  (цілі числа);  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — стала Планка.

У ядерній фізиці часто використовують величину  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ .

### Другий постулат Бора:

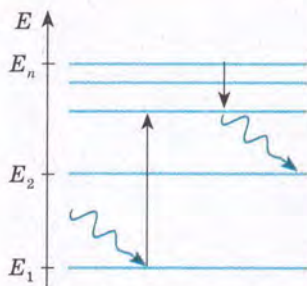
Будь-яке випромінювання атома пов'язане з його переходом з одного стаціонарного енергетичного стану в інший.

Для переходу атома з одного стаціонарного стану в інший зі значеннями енергій  $E_1$  і  $E_2$  справджується рівність:

$$h\nu = E_1 - E_2.$$

Для наочної демонстрації енергетичного стану атома застосовують спеціальні схеми. Кожний *стаціонарний (дозволений)* стан атома





**Рис. 50.2.** Схема енергетичних рівнів в атомі та схема переходів електронів з одного енергетичного рівня на інший (переходи показано стрілками). Зверніть увагу на те, що в разі переходу на нижчий рівень електрон випромінює електромагнітні хвилі, а у випадку зворотного переходу поглинає їх. Електромагнітне випромінювання позначено хвилястою лінією

позначають лінією, яку називають *енергетичним рівнем*. Найнижчий рівень називають *енергетичним рівнем основного стану*. Вище від нього розташовані інші дозволені рівні. Переходи атома з одного стану в інший зображують вертикальними стрілками (рис. 50.2).

Є очевидним, що насправді стаціонарним є тільки нижній рівень, на якому кожен атом може перебувати нескінченно довго. Щойно електрон буде «закинуто» на вищий рівень, він негайно й довільно перейде в основний стан із випромінюванням фотона. Тому всі інші стаціонарні стани атома з енергіями  $E_2, E_3, \dots, E_n$  називають *збудженими станами*.

Зверніть увагу: коли йдеться про збуджений стан, матимемо на увазі як *збуджений атом* (в якому електрон перейшов з основного на вищий рівень), так і *електрон*, що міститься на одному з верхніх енергетичних рівнів.

Спираючись на свої постулати, Бор обчислив довжини хвиль світла, що випускається або поглинається атомом Гідрогену під час переходу електрона з однієї орбіти на іншу. Задовго до теорії Бора ці величини вже було виміряно швейцарським фізиком *Йоганном Якобом Бальмером* (1825–1898). На честь дослідника їх було названо *серією Бальмера*. Обчислення Бора дали дивовижно точний збіг теоретичних даних з експериментальними результатами (на рівні 0,001 %).

★ **3** Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте радіус першої орбіти атома Гідрогену (так званий *радіус Бора*). Маса електрона  $9,11 \cdot 10^{-31}$  кг; заряд електрона  $1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл; стала Планка  $6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с; електрична стала  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

$r_1$  — ?

Дано:

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг

$e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м =

$= 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл/(В·м)

*Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі.* Щоб розв'язати задачу, скористаємося формулою для орбітальних моментів імпульсу:  $m_e v r_n = n \hbar$ .

Оскільки слід знайти значення першого радіуса, то  $n = 1$ . Невідоме у формулі значення швидкості електрона на орбіті знайдемо з рівнянь механіки (рух тіла по колу).

*Розв'язання.* Доцентрове прискорення  $a$  визначається кулонівською силою притягання до ядра Гідрогену:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r^2},$$

де  $\epsilon_0$  — електрична стала. У формулі було враховано, що заряд ядра Гідрогену (протона) дорівнює заряду електрона.



Орбітальний момент імпульсу електрона на першій орбіті:  $m_e v r_1 = \hbar$ .

Далі одержимо вираз для  $v^2$ :  $v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r}$ ; підставимо значення  $v$

у першу формулу та знайдемо рівняння для  $r_1$ :  $r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}$ . Враховуючи, що  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , маємо:  $r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$r_1 = \frac{\text{Ф/м} \cdot (\text{Дж} \cdot \text{с})^2}{\text{кг} \cdot \text{Кл}^2} = \frac{\text{Кл} / (\text{В} \cdot \text{м}) \cdot (\text{Дж} \cdot \text{с}) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с})}{\text{кг} \cdot \text{Кл}^2} = \text{м};$$

$$\{r_1\} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (6,63 \cdot 10^{-34})^2}{3,14 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (1,60 \cdot 10^{-19})^2} = 5,31 \cdot 10^{-11}, \quad r_1 = 5,31 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

Відповідь: радіус першої орбіти атома Гідрогену  $r_1 = 5,31 \cdot 10^{-11}$  м. ★

#### ★ 4 Принцип Паулі

Ми описали стаціонарні стани одного електрона в атомі Гідрогену. Для атомів із більшою кількістю електронів теж можна знайти енергетичні рівні, якщо скористатися методами сучасної квантової механіки. На перший погляд здається, що відповідно до принципу мінімуму енергії всі електрони перебуватимуть у стані з найменшою енергією, тобто їхні спектри випромінювання будуть однаковими. Але це повністю суперечить експериментальним даним. Отже, постулатів Бора виявилось недостатньо для пояснення будови атомів. Для усунення суперечності на допомогу приходить сформульований у 1925 р. австрійським фізиком *Вольфгангом Ернестом Паулі* (1900–1958) так званий **принцип Паулі**:

У будь-якій квантовій системі два й більше електронів не можуть перебувати одночасно в тому самому квантовому стані.

Іншими словами, виявилось, що електрони — «яскраві індивідуалісти», яким «заборонено жити разом». Тому принцип Паулі іноді називають *принципом заборони Паулі*. ★

#### ★ 5 Фізичні основи побудови Періодичної системи хімічних елементів

Усі ви, без сумніву, пам'ятаєте ім'я видатного російського вченого *Дмитра Івановича Менделєєва* (1834–1907) та створену ним Періодичну систему хімічних елементів. Але, мабуть, не всі знають, що Д. І. Менделєєв знайшов дивовижне застосування відкритому ним закону періодичності хімічних властивостей атомів: він зміг передбачити існування шести елементів, які на той час ще не були відкриті й мали зайняти незаповнені клітинки в його таблиці. Згодом усі ці елементи були відкриті (або отримані штучно) і з'ясувалося, що вони мають властивості, передбачені Д. І. Менделєєвим. Сучасна квантова



механіка надала повне теоретичне обґрунтування періодичного закону, відкритого Д. І. Менделєєвим.

Можливість такого передбачення, без сумніву, означає, що елементи, об'єднані в Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва в групи, мають схожі властивості. Зараз ви «озброєні» принципом Паулі та принципом мінімуму енергії системи. Тож спробуємо передбачити деякі спільні властивості елементів на основі одержаних знань. Згадавши з курсу хімії правила заповнення електронних оболонок, порівняємо, наприклад, властивості елементів із повністю заповненими електронними оболонками. Першими з таких елементів будуть № 2 (повністю заповнена перша оболонка) і № 10 (повністю заповнені дві оболонки). Імовірно, що електронна структура цих атомів дуже стійка і хімічна взаємодія цих елементів з іншими має бути дуже слабкою.

А тепер звернемося до Періодичної системи. Назва елемента № 2 — Гелій, елемента № 10 — Неон. Із курсу хімії пригадаємо, що обидва елементи є газами, атоми яких справді хімічно інертні; у системі вони об'єднані в групу під назвою «Інертні гази». Спробуйте тепер самі передбачити властивості інших елементів.★



### Підбиваємо підсумки

Дослідження, проведені фізиками в XIX ст., довели атомарну структуру речовини й підтвердили, що атом має складну будову. Експерименти, виконані під керівництвом Е. Резерфорда, дозволили створити планетарну модель атома.

Розвитком планетарної моделі атома стали постулати Бора, згідно з якими електрони в атомі можуть перебувати тільки на певних («дозволених») орбітах. Рухаючись такою орбітою, електрон не випромінює електромагнітних хвиль. Випромінювання / поглинання електромагнітних хвиль (чітко визначеної частоти) відбувається тільки під час переходів електрона з однієї дозволеної орбіти на іншу.

★ Додатково до постулатів Бора був сформульований принцип Паулі, що «забороняє» перебування двох електронів на орбітах з однаковими квантовими числами. Правила заповнення багатеелектронних оболонок в атомах визначаються принципом Паулі й вимогою мінімізації енергії системи. Схожість хімічних властивостей елементів зумовлена подібністю будови їхніх електронних оболонок. Квантова механіка дала теоретичне обґрунтування закону періодичності хімічних властивостей атомів.★



### Контрольні запитання

1. Які вчені зробили значний внесок у створення атомістичної теорії? 2. Опишіть дослід, проведений під керівництвом Е. Резерфорда, із розсіювання  $\alpha$ -частинок атомами Ауруму. 3. У чому полягає розбіжність між моделями атомів, запропонованими Дж. Дж. Томсоном і Е. Резерфордом? 4. Яким експериментальним даним суперечить планетарна модель атома Резерфорда й чому? 5. У чому сутність постулатів Бора? ★ 6. Сформулюйте принцип Паулі. Наведіть приклад його застосування. ★ 7. Наведіть приклади подібності властивостей елементів, яка зумовлена подібністю будови електронних оболонок атомів цих елементів.



**Вправа № 37**

1. Обчисліть загальну енергію електрона, який перебуває на третій орбіті атома Гідрогену.
2. Визначте енергію, яку випромінює електрон під час переходу в атомі Гідрогену з п'ятої орбіти на першу.
3. Унаслідок опромінювання атомів Меркурію електронами енергія атомів збільшується на 4,9 еВ. Якою буде довжина хвилі випромінювання під час переходу атомів Меркурію в незбуджений стан?

**§ 51. СПЕКТРИ ВИПРОМІНЮВАННЯ АТОМІВ І МОЛЕКУЛ.****★ ВИДИМЕ ТА РЕНТГЕНІВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ★**

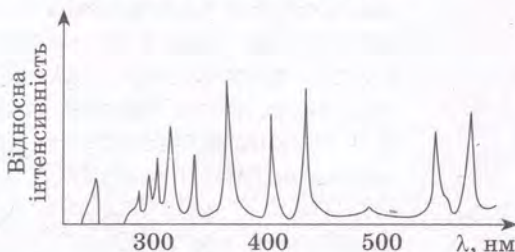
Кольори фізичних тіл, що нас оточують, визначаються поглинанням і відбиттям певних частин спектра атомами цих тіл. У попередньому параграфі йшлося про випромінювання та поглинання електромагнітного випромінювання атомами. Чи пов'язана ця нова інформація з кольором? І якщо так, то яким чином? Настав час розібратися. Наступні параграфи будуть присвячені з'ясуванню цих питань.

**Що таке лінійчаті спектри випромінювання газів**

Якщо кинути дрібочку кухонної солі в полум'я газового пальника, звичні блакитні язички одразу забарвляться в жовтий колір. Причина цього явища вам уже відома: до складу кухонної солі входить натрій, і саме цей метал має характерне жовте випромінювання. Розберемося в механізмі появи цього випромінювання. У полум'ї пальника натрій нагрівається, і електрони на верхніх оболонках атомів Натрію переходять у збуджений стан. Повертаючись на стаціонарну орбіту, електрони випромінюють електромагнітні хвилі, причому відповідно до постулатів Бора — чітко визначеної частоти.

Численні дослідження довели, що внаслідок нагрівання до високої температури пара будь-якої хімічної речовини випромінює світло, вузький пучок якого розкладається призмою на кілька пучків / ліній (рис. 51.1). *Сукупність цих спостережуваних ліній називають лінійчатим спектром випускання.* Зазначимо, що лінійчатий спектр випускання будь-якого конкретного хімічного елемента не збігається зі спектром випускання інших хімічних елементів і, відповідно, є «візитною карткою» елемента.

Відбувається й зворотне явище: у випадку пропускання білого світла через пару речовини спостерігається виникнення темних ліній на тлі суцільного спектра. Темні лінії розташовані точно в тих місцях, де спостерігалися би світлі лінії спектра випускання цього хімічного елемента. Такий спектр називають *лінійчатим спектром поглинання.*



**Рис. 51.1.** Залежність відносної інтенсивності випромінювання від довжини хвилі. Схематичне зображення лінійчатого спектра елемента



## 2 Чим відрізняються атомні та молекулярні спектри

Спектри молекулярних газів відрізняються від атомних спектрів і виглядають як система смуг із численних і дуже близьких одна до одної ліній. Така спектральна картина пояснюється двома причинами: коливаннями атомів усередині молекули та обертанням молекули.

Енергія коливального руху молекули теж підпорядковується законам квантової фізики й має дискретний ряд значень. Таким чином, один електронний енергетичний рівень розбивається на безліч коливальних підрівнів. Окрім коливань окремих частин молекули, може відбуватися обертання молекули як цілого.

У результаті електронні та коливальні рівні енергії молекули розбиваються на множину обертальних підрівнів. Кількість можливих переходів різко збільшується, що на практиці зумовлює виникнення величезної кількості ліній спектра, які зливаються в широкі смуги.★

## 3 Яким чином ініціюється рентгенівське випромінювання.

### ★Роботи І. П. Пулюя★



Рис. 51.2. Перший рентгенівський знімок кисті руки людини

У XXI ст. навряд чи знайдеться людина, яка хоча б раз у житті не робила рентгенівського знімка. Наприкінці ж XIX ст. зображення кисті людини з видимою структурою кісток (рис. 51.2.) обійшло шпальти газет усього світу й стало справжньою сенсацією для фізиків. Відкриття особливого проникного випромінювання німецький фізик *Вільгельм Конрад Рентген* (1845–1923) здійснив 8 листопада 1895 р. *Рентгенівське випромінювання* виникає внаслідок взаємодії швидких електронів з атомами катода в рентгенівській трубці.

★Розглянемо цей процес детальніше. Якщо енергія електронів достатньо значна, то може відбуватися вивільнення електронів із внутрішніх оболонок атомів із великим порядковим номером  $Z$ . «Повернення» електронів супроводжуватимуться випусканням дискретного спектра рентгенівського випромінювання, подібного до спектра

у видимому діапазоні. Це випромінювання називають *характеристичним рентгенівським випромінюванням*. Крім того, у рентгенівській трубці відбувається гальмування швидких заряджених частинок під час їхньої взаємодії з електричними полями атомних ядер. Спектр такого випромінювання, яке дістало назву *гальмівне рентгенівське випромінювання*, є суцільним.

Значний внесок у дослідження рентгенівського випромінювання зробив видатний учений українського походження *Іван Павлович Пулюй* (1845–1918). Фахівці, які займаються історією фізики, досі сперечаються, хто насправді відкрив так звані «рентгенівські промені». Є достатньо свідчень, що саме Іван Пулюй уперше отримав докази практичного застосування цього випромінювання. Не втручаючись у цю дискусію на сторінках підручника, зазначимо, що беззаперечною є якість виконання досліджень українським ученим.★





#### 4 Як визначають хімічний склад речовини за результатами вимірювань атомних і рентгенівських спектрів

До цього ми розповідали про особливості атомних спектрів, було також приділено увагу фізичним теоріям, які пояснюють спостережані факти. А чи замислювалися ви над тим, навіщо взагалі потрібні ці дослідження? Перша відповідь очевидна: для пізнання природи. А чи існує практичне застосування цих знань?

Уже зазначалося, що вимірювання спектрального випромінювання одноелементних газів *дозволяє ідентифікувати склад цих газів*. Якщо порівняти інтенсивність цього виміру зі стандартом, то за відносним рівнем випромінювання можна визначити не тільки склад, але й *концентрацію елемента*. Прилади, що забезпечують такі вимірювання, називають *спектрометрами* (див. § 43 підручника).

На жаль, таким методом можна однозначно визначити лише одноелементні гази. Спектри ж молекулярних сполук складаються із широких смуг, із яких доволі важко виділити окремі лінії. Тому оптичні спектрометри можуть дати інформацію про структуру молекул лише за наявності добре розробленої методики інтерпретації результатів.

Однак у спеціальному випадку атомні спектри можуть допомогти в ідентифікації складних молекулярних сполук. При цьому реєструється *характеристичне рентгенівське випромінювання*, за яким можна не тільки виявити наявність елемента у молекулі, а й, порівнявши інтенсивність спектра з інтенсивністю стандартного зразка, визначити питомий уміст елемента в молекулі.★



#### Підбиваємо підсумки

Атоми газоподібних речовин за підвищених температур випромінюють електромагнітні хвилі чітко визначених частот — у даному випадку йдеться про лінійчатий спектр випромінювання. Лінійчатий спектр кожного елемента характеризується індивідуальним для цього елемента набором частот.

Якщо газ опромінюють білим світлом, на спектрі спостерігаються чорні смуги безпосередньо на тих частотах, на яких відбувається випромінювання даного елемента, — у такому випадку йдеться про лінійчатий спектр поглинання.

Спектри випромінювання молекул відрізняються від аналогічних спектрів газів наявністю великої кількості близько розташованих ліній, які під час спостережень часто зливаються у смуги.

★ Під час взаємодії речовини з високоенергетичними електронами спостерігається рентгенівське випромінювання двох видів: *характеристичне* — індивідуальне для кожного елемента та *гальмівне*. Значний внесок у дослідження рентгенівського випромінювання зробив учений українського походження І. П. Пулюй.★

Вимірювання атомних спектрів дозволяє одержати інформацію про елементний склад речовин.



**Контрольні запитання**

1. Що називають лінійчатим спектром випромінювання? лінійчатим спектром поглинання? 2. Назвіть характерні риси спектрального випромінювання молекул. ★3. Назвіть різновиди рентгенівського випромінювання, що виникає внаслідок опромінення речовини високоенергетичними електронами. У чому відмінність цих різновидів? ★4. Який внесок зробив І. П. Пулюй у дослідження та використання рентгенівського випромінювання? ★5. Як за допомогою вимірювання атомних та рентгенівських спектрів можна одержати інформацію про елементний склад речовин?

**§ 52. НЕТЕПЛОВЕ ЗБУДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ**

«Стандартним» способом збудження світлового випромінювання є зіткнення атомів за високих температур. Пізніше виявилось, що, крім теплового збудження, випромінювання може ініціюватися іншими причинами. Так, у повсякденному житті ми дуже часто зустрічаємося з різними прикладами люмінесценції, але в багатьох випадках навіть не здогадуємось про це. Практичне застосування іншого відкриття — лазерних генераторів — теж відоме більшості з вас. Це звичайна лазерна указка. У цьому параграфі ми розглянемо механізми явищ, пов'язаних із нетепловим збудженням випромінювання, та їх застосування в техніці.

**1 Як застосовують люмінесценцію**

**Люмінесценція** — це явище нетеплового світіння речовини, яке відбувається після поглинання нею енергії збудження. Загальна назва речовин, здатних перетворювати поглинуту енергію на світлове випромінювання, — **люмінофори**.

Найпоширенішим прикладом застосування люмінесценції є так звані лампи «денного світла». Ці лампи мають форму трубок, заповнених ртутною парою низького тиску, внутрішня поверхня яких вкрита люмінофорами. Газовий розряд у парі спричиняє ультрафіолетове випромінювання, яке «перетворюється» в люмінофорі на світло, близьке до денного. Лампи денного світла приблизно в 3–4 рази економніші за звичайні лампи розжарювання.

Екрани телевізорів, радіолокаторів та ЕОМ вкриті люмінофорами, які світяться внаслідок бомбардування їх електронами. Деякі люмінофори використовують як індикатори радіації.

Органічні люмінофори — *люмогени* — застосовують для виготовлення яскравих флуоресцентних фарб, люмінесцентних матеріалів, наприклад, для фарбування дорожніх знаків тощо.

Люмінесцентне світіння також допомагає здійснювати якісний і кількісний *люмінесцентний аналіз складу речовини*. За інтенсивністю спектральних ліній люмінесценції визначають незначні домішки (приблизно  $10^{-11}$  г у 1 г досліджуваної речовини). Люмінесцентний аналіз широко застосовують у різних галузях промисловості, у медицині, біології, хімії, криміналістиці тощо.

**2 Які бувають різновиди люмінесцентних явищ**

Причиною всіх люмінесцентних явищ є перехід джерел люмінесцентного світіння у збуджений стан.



Явище, коли збуджений стан центрів люмінесценції зберігається протягом доволі нетривалого часу (близько  $10^{-8}$  с), називають **флуоресценцією**.

Явище, коли збуджений стан центрів люмінесценції зберігається порівняно довго (від  $10^{-4}$  с до десятків хвилин), називають **фосфоресценцією**.

Фосфоресценція спостерігається у випадках опромінення світлом деяких рідин і газів. Наприклад, гас під дією денного світла дає слабе блакитнувате фотолюмінесцентне світіння. Розчини багатьох барвників під дією ультрафіолетового випромінювання, створюваного ртутною лампою, випромінюють видиме світло.

Люмінесцентне світіння тіл прийнято поділяти на види, які визначаються за типом зовнішнього впливу на речовину. Наприклад, *хемілюмінесценція* — це світіння, яке виникає під час деяких хімічних реакцій. Іншими типами впливу на речовину є такі: опромінення швидкими електронами (катодними променями); обробка звуком високої частоти; опромінення рентгенівськими променями; опромінення  $\gamma$ -променями; розтирання, роздавлювання або розколювання люмінофорів; пропускання електричного струму через певні типи люмінофорів тощо.

### ★ 3 Спонтанне та вимушене випромінювання

Час життя атома в збудженому стані здебільшого є дуже нетривалим і становить  $10^{-9}$ ... $10^{-10}$  с. Після цього електрон обов'язково «самостійно» повертається до основного стану з випромінюванням фотона. *Випромінювання, що випускається внаслідок спонтанного переходу атома з одного стану в інший, називають спонтанним*. Спонтанне випромінювання некогерентне, бо кожен атом починає й закінчує випромінювати незалежно від інших.

У деяких випадках перехід електрона з верхнього енергетичного рівня на нижній із випромінюванням фотона може відбуватися не тільки спонтанно, але й вимушено — під впливом зовнішнього електромагнітного поля. Таке «спеціальне» випромінювання дістало назву *вимушеного, або індукованого, випромінювання*. Природно, що такий перехід ініціюється не будь-яким електромагнітним полем, а лише полем із частотою, яка дорівнює власній частоті переходу. *Власною частотою переходу* називають частоту фотона, унаслідок поглинання якого атом переходить з основного стану в збуджений.

Ініціювати та зафіксувати індуковане випромінювання вдається тільки в деяких спеціальних випадках, оскільки термін перебування електрона у збудженому стані дуже короткий. Однак деякі атоми мають збуджені стани, в яких вони можуть перебувати протягом доволі тривалого часу, наприклад  $10^{-3}$  с. Такі стани називають *метастабільними*. Саме в таких атомів було зафіксовано індуковане випромінювання, і це, в свою чергу, спричинило появу принципово нового типу генераторів — *квантових генераторів*. *Особливостями індукованого випромінювання є його монохроматичність і когерентність*.★



#### 4 Що таке квантові генератори (лазери) і де їх застосовують

Наприкінці 50-х — на початку 60-х рр. ХХ ст. фахівці з квантової фізики здійснили низку відкриттів. Згодом ці відкриття значно змінили життя людства. Йдеться передусім про мобільні телефони та персональні комп'ютери. Гідне місце серед цих відкриттів належить винайденню квантових генераторів. Розберемося, що приховане під цією назвою, яка неначе зійшла зі сторінок науково-фантастичних романів. Із точки зору здорового глузду, назва «квантовий генератор» має означати, що цей прилад «виробляє» значну кількість квантів електромагнітного випромінювання. Але, якщо керуватися такою логікою, то звичайна лампа розжарювання — також квантовий генератор?

Насправді квантовий генератор — це прилад, який генерує дуже специфічний тип випромінювання — *монохроматичне і когерентне*. Пам'ятаєте, як учені-оптики ХІХ ст. «вирізали» з повного світлового потоку «вузьку смужку» потрібного їм випромінювання для вивчення оптичних явищ? Сьогодні потужне джерело, яке генерує виключно монохроматичне когерентне випромінювання, може придбати кожен охочий у найближчому кіоску. Здогадалися, про що йдеться? Так, прикладом квантового генератора, який працює в діапазоні видимого світла, є лазерна указка («лазер» — таку назву одержали квантові генератори, що працюють у діапазоні видимого світла).

Попередній пункт параграфа підказав перший напрямок практичного застосування лазерів. Це — якісні джерела когерентного монохроматичного світла для наукових досліджень. Але сфера застосування лазерів — не лише наукові дослідження.

Потужні лазери, зокрема інфрачервоні на вуглекислому газі, використовуються для обробки матеріалів (різання, зварювання, свердління) за допомогою сфокусованого лазерного пучка. Такі самі пучки застосовуються в хірургії замість скальпеля; під час операцій, здійснюваних за їхньою допомогою, краї ран майже не кровоточать.

Лазерні пучки широко застосовують в офтальмології. За їхньою допомогою проводять операції на кришталику й сітківці ока. Можливість «приварювати» відшаровану сітківку до очного дна врятувала багатьох хворих від неминучої сліпоти.

Уже йшлося про те, що лише за допомогою лазерів удалося реалізувати новий метод одержування зображень — голографію (див. § 49).

На монохроматичному когерентному лазерному пучку за допомогою волоконної оптики здійснюють кабельний, телефонний, радіо- й телевізійний зв'язок. Висока частота-носії (приблизно  $10^{13}$ ...  $10^{14}$  Гц) дозволить по одному світлопроводу передати до мільярда музичних передач або до мільйона телевізійних передач.

За допомогою лазерного випромінювання визначають відстань до рухомих об'єктів і швидкість їхнього руху. Лазерна локація точніша за радіолокацію, оскільки світлові хвилі значно коротші, ніж радіохвилі.



Зараз дослідники займаються проблемами використання лазерів у термоядерному синтезі, поділі ізотопів, вивчають застосування лазерного опромінення для стимуляції хімічних реакцій і т. ін. У міру вдосконалювання конструкцій лазерів, використання різних активних середовищ — напівпровідників, рідких барвників, нових сортів скла тощо — можливості застосування лазерів із різними властивостями дедалі розширюватимуться.

### 5 Яким чином працюють квантові генератори

Розглянемо таку модельну ситуацію. На збуджений атом падає фотон, енергія якого дорівнює енергії збудження (частоті переходу). Взаємодія первинного фотона зі збудженим електроном спричиняє повернення електрона на основний рівень із випромінюванням вторинного фотона. Напрямок руху та енергія другого фотона збігатимуться з напрямком руху й енергією фотона, що спричинив випромінювання, тобто виникають два «фотони-близнюки» (рис. 52.1). Якщо в речовині буде багато збуджених атомів, то фотони-близнюки зумовлять появу чотирьох нових близнюків, потім — восьми і так далі. Наприкінці з'явиться «лавина» фотонів з однаковими характеристиками. Отже, розглянута вище модельна речовина стає генератором когерентного монохроматичного випромінювання. Саме цю властивість речовини покладено в основу будови лазерів.

Розглянемо принцип посилення та генерації електромагнітного випромінювання в лазерах, який був запропонований радянськими російськими фізиками *Миколою Геннадійовичем Басовим* (1922–2001), *Олександром Михайловичем Прохоровим* (1916–2002) і американським ученим *Чарлзом Таунсом* (народ. у 1915 р.). У цих лазерах активним середовищем став кристал рубіну ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) з домішкою близько 0,05 % хрому. Зараз цей основний (активний) елемент лазера зазвичай має форму циліндра (рис. 52.2). Торці циліндра паралельні, й на кожний нанесено відбивний шар (дзеркало). Одна із дзеркальних поверхонь частково прозора: 92 % світлового потоку відбивається від неї, а близько 8 % пропускається.

Рубіновий стрижень поміщений усередину імпульсної спіральної лампи, що є джерелом випромінювання-збудника. Атом Хрому, поглинаючи випромінювання з довжиною хвилі 560 нм, що міститься в спектрі випромінювання лампи, переходить з основного рівня

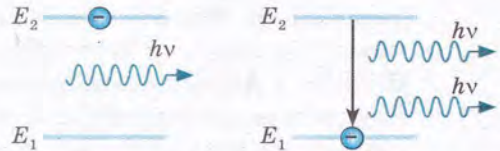


Рис. 52.1. Схема вимушеного випромінювання

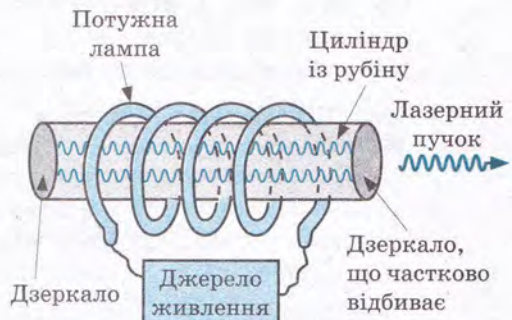


Рис. 52.2. Схематична будова рубінового лазера



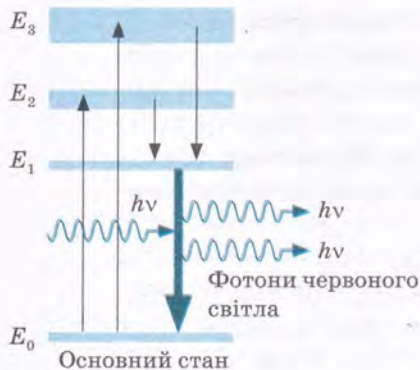


Рис. 52.3. Схема переходів збуджених електронів атома Хрому

з енергією  $E_1$  на збуджений рівень з енергією  $E_3$ . Процес переведення атомів з основного у збуджений стан називають *накачуванням*; відповідно лампу, яку використовують для цього, називають *лампю накачування*. Час життя атомів Хрому на збудженому рівні є малим. Тому більша частина атомів робить переходи із цього рівня на метастабільний рівень з енергією  $E_1$  (рис. 52.3).

Варто одному атому Хрому здійснити спонтанний перехід із метастабільного рівня на основний рівень із випускненням фотона, як виникає лавина фотонів, спричинена індукованим випромінюванням атомів Хрому, що перебувають у метастабільному стані. Якщо

напрямок руху первинного фотона є чітко перпендикулярним до площини дзеркала на торці рубінового циліндра, то первинні та вторинні фотони відбиваються від першого дзеркала й летять крізь кристал до другого дзеркала. На своєму шляху вони спричиняють вимушене випромінювання в нових атомів Хрому і т. д. Процес висвічування всіх збуджених атомів Хрому завершується за  $10^{-8} \dots 10^{-10}$  с. Потужність світлового випромінювання лазера при цьому може бути більшою за  $10^9$  Вт, тобто перевищувати потужність великої електростанції.



## 6 Лазери та мазери

Першим квантовим генератором був прилад, який випромінював когерентні електромагнітні хвилі в міліметровому діапазоні (радіохвилі). Він був створений у 1954 р. Ч. Таунсом і дістав назву *мазер*. Ця назва — аббревіатура від англійського словосполучення — *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Сьогодні мазери використовуються в техніці (зокрема в космічному зв'язку), у фізичних дослідженнях, а також як квантові генератори стандартної частоти.

Квантові генератори іншого типу, про які йшлося вище, працюють у діапазоні видимого світла. Вони, як ви вже знаєте, звуться лазерами. Назва «лазер» — теж аббревіатура від англійських слів *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.★



## Підбиваємо підсумки

Люмінесценція — нетеплове світіння речовини, що відбувається після поглинання нею енергії збудження. Люмінофори — речовини, здатні випромінювати поглинену енергію у вигляді світлової хвилі.

Види люмінесценції розрізняють за типом джерела збудження люмінофорів.

Застосування люмінесценції дуже широке — від люмінесцентного одягу до вузлів найскладнішої наукової та побутової техніки.

★ Спонтанним випромінюванням називають випромінювання, що випускається внаслідок спонтанного переходу атома з одного



стану в інший. Воно є некогерентним і немонохроматичним. Випромінювання, яке виникає внаслідок вимушеного переходу електрона зі збудженого верхнього енергетичного рівня на основний, одержало назву вимушеного, або індукованого.★

Прилади, які є джерелом когерентного монохроматичного випромінювання світла, називають квантовими генераторами або лазерами. Лазери застосовують у наукових дослідженнях, медицині, для передавання інформації, локації об'єктів тощо.

★ Мазер — це мікрохвильовий квантовий генератор, що генерує електромагнітне випромінювання в діапазоні радіохвиль.★

?

### Контрольні запитання

1. Дайте визначення люмінесценції.
2. Які існують види люмінесценції? ★
3. Яке випромінювання називають спонтанним? Чи є воно когерентним?
4. Яке випромінювання називають вимушеним? Чи є воно когерентним?
5. Чи є вимушене випромінювання монохроматичним? ★
6. Які ви знаєте приклади застосування лазерів? ★
7. Як улаштований оптичний квантовий генератор — лазер? ★
8. Що таке мазер? ★

## § 53. ПРОТОННО-НЕЙТРОННА МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА

?!

Ви вже добре знаєте, що розміри атомів, із повсякденної точки зору, надзвичайно малі. Розміри ж атомного ядра менші від розмірів відповідного атома в 10 000 000 разів. Те саме стосується маси й зарядів електрона та ядер. Однак фізики навчилися вимірювати масу і заряд цих мікроскопічних частинок, більш того, виявили, що і ядро складається з окремих «шматочків». Про те, що це за шматочки і які вони мають характеристики, йтиметься в цьому параграфі.

1

### Якими є будова атома та його складники

Як ви вже знаєте, наприкінці XIX — на початку XX ст. учені здобули незаперечні докази того, що атом не є «неподільним» і складається з певних частин. Наступними етапами в пізнанні будови атома стали відкриття важкої зарядженої серцевини атома — атомного ядра в 1911 р. (*Е. Резерфорд*) і його складників: протона в 1919 р. (*Е. Резерфорд*) і нейтрона в 1932 р. (англійський фізик *Джеймс Чедвік* (1891–1974)). Невдовзі після відкриття нейтрона радянський фізик *Дмитро Дмитрович Іваненко* (1904–1994) й німецький фізик *Вернер Карл Гейзенберг* (1901–1976) висунули гіпотезу щодо протонно-нейтронної будови ядра. Відтоді наші уявлення про будову ядра залишаються практично незмінними.

Протони і нейтрони, маса кожного з яких приблизно в 1800 разів більша за масу електрона, утворюють важке позитивне ядро дуже малих розмірів ( $10^{-15} \dots 10^{-14}$  м). Протони і нейтрони, які разом називають нуклонами, утримуються всередині ядра ядерними силами притягання. Зверніть увагу: *між нуклонами немає сил відштовхування*.

Різні типи атомних ядер відрізняються один від одного кількістю протонів і нейтронів, що в них містяться. Сумарну кількість нуклонів в атомі називають *масовим* (або *нуклонним*) числом і позначають символом *A*. Зауважимо, що маса атома зі значною точністю збігається з масою ядра, оскільки маса електрона набагато менша за масу нуклона.



Кількість протонів у ядрі називають *протонним* (або *зарядовим*) числом і позначають символом  $Z$ . Протонне число легко визначити, скориставшись Періодичною системою хімічних елементів Д. І. Менделєєва. Порядковий номер елемента в періодичній таблиці відповідає кількості протонів у його ядрі (протонному числу).

Знаючи протонне ( $Z$ ) і масове ( $A$ ) числа ядра хімічного елемента, можна визначити кількість нейтронів ( $N$ ) у ядрі цього елемента:  $N = A - Z$ .



Рис. 53.1. Визначення кількості протонів і нейтронів у ядрі

Для позначення ядра атома хімічного елемента перед символом елемента вгорі вказують нуклонне число  $A$ , а внизу — протонне число  $Z$  (рис. 53.1). Наприклад,  ${}_{13}^{27}\text{Al}$  — ядро Алюмінію, яке має масове число 27 та протонне число 13. Цей запис означає, що в ядрі атома Алюмінію міститься 27 нуклонів: 13 протонів і  $27 - 13 = 14$  нейтронів.

Навколо атомного ядра на відносно великих відстанях ( $10^{-10}$  м) розташовані електрони, які втримуються електромагнітними силами притягання, що діють на них з боку атомного ядра. Атом є електронейтральним; кількість протонів дорівнює кількості електронів, оскільки заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона.

## 2 Як було визначено основні характеристики атомного ядра

Одна з основних характеристик атомного ядра — його *електричний заряд*. Точні вимірювання електричного заряду атомних ядер були здійснені у 1913 р. англійським фізиком *Генрі Мозлі* (1887–1915). *Маси атомних ядер* вимірюються за допомогою мас-спектрометра.

Із частинок, що входять до складу атомних ядер, першою був відкритий *протон*. У 1919 р. Е. Резерфорд помістив джерело  $\alpha$ -частинок до камери, внутрішня поверхня якої була вкрита флуоресцентною речовиною. Якщо в камері був вакуум, то  $\alpha$ -частинки досягали екрана й спричиняли світлові спалахи. У випадку заповнення камери газоподібним азотом  $\alpha$ -частинки витрачали свою енергію на іонізацію та збудження атомів Нітрогену та не досягали екрана. Однак поодинокі світлові спалахи на екрані все ж спостерігалися — вони спричинялись якимись іншими зарядженими частинками. Важливим було те, що ці частинки були здатні пройти в газі більшу відстань, ніж  $\alpha$ -частинки. Дослідження показали, що ці частинки є *ядрами атомів найлегшого ізотопу Гідрогену*. Їх назвали *протонами*.

Провівши досліди з іншими елементами (В; F; Na; Al; P та ін.), Резерфорд виявив, що з ядер атомів усіх цих елементів  $\alpha$ -частинки вибивають протони. На цій підставі можна було припустити, що ядра атомів усіх елементів містять протони.



Незабаром після відкриття протона Резерфорд висловив гіпотезу про можливість існування в атомному ядрі нейтральної частинки з масою, що приблизно дорівнює масі протона (1920 р.). Однак експериментальне відкриття цієї частинки — *нейтрона* — відбулося лише через 12 років, коли Дж. Чедвік, учень Резерфорда, провів досліди з вивчення властивостей випромінювання, що виникає внаслідок опромінення Берилію  $\alpha$ -частинками.

Порівняння мас нейтрона і протона свідчить, що вони різняться дуже незначно, менш ніж на 0,2 %. Однак при цьому важливо зазначити, що маса нейтрона перевершує масу протона більш ніж на дві електронні маси. Однією із загадок нейтронів була відсутність їх у природі у вільному вигляді. Однак цій загадці незабаром було знайдено пояснення. Причина відсутності помітної кількості вільних нейтронів — їхня нестабільність. Кожний нейтрон, яким-небудь способом звільнений з атомного ядра, за кілька хвилин спонтанно перетворюється на протон, електрон і електронне антинейтрино:  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \nu$ .

### 3 Що таке ізотопи

**Ізотопи** («однакові за місцем») — атоми того самого хімічного елемента, ядра яких містять однакове число протонів, але різну кількість нейтронів.

Ізотопи займають одне й те саме місце в Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва. Наприклад, у природі є три ізотопи Гідрогену: ядро найлегшого ізотопу Гідрогену містить 1 протон, маса ядра дорівнює приблизно 1 а. о. м; ядро атома другого ізотопу Гідрогену — Дейтерію — містить 1 протон і 1 нейтрон ( $m_x \approx 2$  а. о. м.); ядро третього ізотопу Гідрогену — Тритію — містить 1 протон і 2 нейтрони ( $m_x \approx 3$  а. о. м.).

### ! Підбиваємо підсумки

Будь-який атом складається з ядра та електронної оболонки. Ядро побудовано з протонів  $p$ , які мають позитивний електричний заряд, та нейтронів  $n$  — частинок, що не мають заряду. Електронна оболонка атома має від'ємний заряд.

Сумарну кількість протонів і нейтронів в атомі називають масовим числом і позначають символом  $A$ . Кількість протонів у ядрі називають протонним числом і позначають символом  $Z$ . Кількість нейтронів у ядрі  $N = A - Z$ .

У результаті дослідів Е. Резерфорда, Дж. Чедвіка та інших було визначено заряд і масу ядра, а також відкрито елементарні частинки — протони й нейтрони, із яких складається ядро будь-якого елемента.

Ядра з однаковою кількістю протонів, але з різною кількістю нейтронів називають ізотопами.

### ? Контрольні запитання

1. Які частинки входять до складу атома? атомного ядра? 2. Як за допомогою Періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва визначити кількість протонів і нейтронів у певному елементі? 3. Опишіть дослід Е. Резерфорда щодо відкриття протонів. 4. Чому в природі відсутні вільні нейтрони? 5. Що таке ізо- топ? 6. Які ізотопи має Гідроген?



## § 54. ЯДЕРНІ СИЛИ ТА ЇХНІ ОСОБЛИВОСТІ



Уявіть собі перші теплі весняні дні та велику перерву в школі. Ледь пролунав дзвоник — і першокласники миттю розбігаються по шкільному подвір'ю. Здається, немає сили, що може утримати їх разом. На перший погляд, однойменно заряджені протони в ядрі мають поводитися подібно до цих школярів — розбігтися в різні боки під впливом електростатичних сил відштовхування, а саме ядро має миттєво розвалитися.

Оскільки цього не відбувається, логічно припустити, що є якісь інші сили, які утримують нуклони разом. Що це за сили?

**1 Загальна характеристика ядерних сил**

*Ядерні сили* є найбільш потужними серед чотирьох відомих на сьогодні взаємодій: гравітаційної, слабкої, електромагнітної та сильної. Саме ядерні сили утримують протони всередині ядра. Нагадаємо, що гравітаційні та електричні сили зменшуються з відстанню:  $F \sim \frac{1}{r^2}$ . Експерименти засвідчують, що ядерні сили зменшуються з відстанню набагато швидше, тому кажуть, що ядерні сили є короткотривалими.

**Основні властивості ядерних сил**

1. Ядерні сили — на відміну від гравітаційних та електромагнітних — *короткотривалі сили*. Вимірювання показали, що інтенсивна взаємодія між нуклонами відбувається на відстанях, які приблизно дорівнюють розмірам нуклона. На більших відстанях діють лише електромагнітні сили.

2. Ядерні сили є дуже *потужними*. Вони у 100–1000 разів більші за електростатичні сили відштовхування двох протонів на близьких відстанях (приблизно  $10^{-15}$  м).

3. Ядерні сили є *силами притягання*. Тому вони утримують нуклони всередині ядра.

4. Ядерні сили *діють між будь-якими нуклонами*: протон / протон, нейтрон / нейтрон, протон / нейтрон. У всіх цих випадках ядерні сили однакові.

5. Одна з прикметних властивостей ядерних сил — *властивість насичення* — полягає в тому, що нуклон виявляється здатним до ядерної взаємодії одночасно лише з невеликою кількістю нуклонів-сусідів.★

**2 Краплинна модель будови ядра**

За своїми властивостями ядерна матерія (агломерат із великої кількості нуклонів) багато в чому нагадує рідину. Тому фізики спробували поширити на ядерну матерію добре відомі уявлення про поведінку краплини рідини. Зокрема, було введено поняття поверхневого натягу та механізм подрібнення краплини на менші краплинки. Це дало змогу пояснити такі важливі явища, як обмежена кількість атомів у Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва та розпад ядра Урану-235 під впливом зіткнення з нейтронами.

Зупинимося на кількості елементів у Періодичній системі хімічних елементів. Ви вже знаєте, що між нуклонами діють ядерні



сили, які притягують нуклони один до одного. Окрім того, між протонами діють кулонівські сили відштовхування. Зважаючи на властивість ядерних сил до насичення їх моделюють як поверхневий натяг у моделі краплини рідини. Тому енергія ядерних сил  $E_n$  прямо пропорційна поверхні  $S$  краплини. Енергія кулонівської взаємодії  $E_{кул}$  прямо пропорційна кількості протонів у ядрі  $Z$  або об'єму краплини  $V$ . Нехай радіус краплини  $r$ . Тоді ці дві енергії можна подати у вигляді:  $E_n \sim r^2$ ;  $E_{кул} \sim r^3$ .

Зрозуміло, що зі збільшенням  $r$  кулонівська енергія стає більшою за ядерну енергію і нарешті, за певних (великих) масових чисел  $A$ , ядро втрачає свою стійкість, тобто розпадається на частини. Ми дійшли висновку, що атоми з дуже великими масовими числами не можуть існувати. Ось чому останнім стабільним атомом у Періодичній системі є Уран.

### 3 Що таке енергія зв'язку атомного ядра

Щоб краще розібратися в енергетиці атомного ядра, на хвилинку уявімо себе чарівниками. Візьмемо одне ядро і, скориставшись «чарівною» силою, «вимкнемо» електромагнітне відштовхування протонів. Тепер витягнемо по черзі кожний із нуклонів і спробуємо відповісти на запитання: яка система — ядро в цілому чи набір нуклонів — має більшу енергію?

Для правильної відповіді на це запитання згадаємо, що, хоча електромагнітне відштовхування було «вимкнене», ядерні сили притягання продовжували діяти. Тож чарівникам довелося докласти чималих зусиль, щоб «дістати» нуклони з ядра. Докладені зусилля означають виконану механічну роботу, або збільшення енергії. Виходить, що ядро в цілому мало меншу енергію, ніж його складники.

Енергію, необхідну для повного розщеплення ядра на окремі нуклони, називають **енергією зв'язку атомного ядра** ( $E_{зв}$ ):

$$E_{зв} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я}]c^2 \geq 0,$$

де  $Zm_p + (A - Z)m_n$  — маса всіх нуклонів, які входять до складу ядра;  $m_{я}$  — маса ядра;  $c$  — швидкість світла у вакуумі.

Величина  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я}$  отримала назву *дефект мас*. Отже, можемо записати:

$$E_{зв} = \Delta mc^2$$

У ядерній фізиці незручно використовувати одиниці СІ, тому зазвичай масу частинок подають в *атомних одиницях маси* (а. о. м.), а енергію — у *мегаелектрон-вольтах* (МеВ). Нескладно довести: якщо  $\Delta m = 1$  а. о. м., то  $E_{зв} = 931,5$  МеВ, отже:

$$E_{зв} = \Delta mk,$$

де  $k = 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а. о. м.}}$ .





#### 4 Як одержати ядерну енергію: синтез легких і поділ важких ядер

Фізичну величину  $f$ , яка чисельно дорівнює відношенню енергії зв'язку  $E_{зв}$  ядра до масового числа  $A$  цього ядра, називають **питомою енергією зв'язку атомного ядра**:

$$f = \frac{E_{зв}}{A}$$

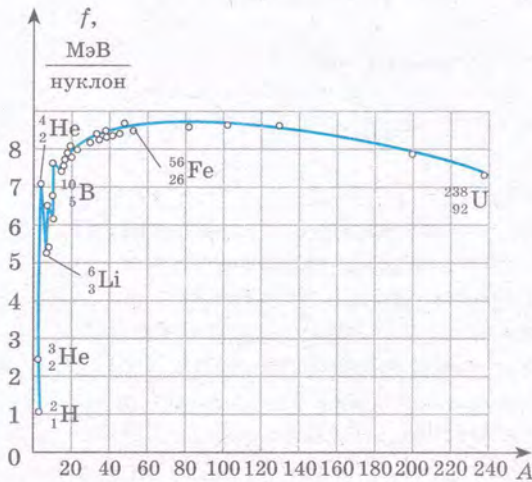


Рис. 54.1. Графік залежності питомої енергії зв'язку різних ядер від кількості нуклонів

Графік залежності  $f(A)$  (рис. 54.1) має характерний вигляд: крива зростає від нуля, коли  $A=1$ ; досягає «плато» у районі середніх значень масового числа, а потім плавно знижується. Такий характер залежності питомої енергії пояснюється краплинною моделлю ядра. Рис. 54.1 указує на способи, якими можна добути енергію з ядра атома. Видно, що існують два різні способи для виділення енергії. Перший полягає в поділі важкого ядра на частини. Сумарна маса складових частин буде меншою, ніж маса вихідного ядра. Різниця — це енергія, що виділилася. Такий шлях одержання енергії називають *поділом важких ядер*.

Другий шлях одержання енергії пов'язаний із висхідною віткою графіка на рис. 54.1. Об'єднання надлегких ядер в одне більше теж спричинить виділення енергії. Такі реакції називають *реакціями синтезу*.★

#### 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Обчисліть питому енергію зв'язку нуклонів у ядрі ізотопу Гелію  ${}^4_2\text{He}$ . Маса ядра Гелію 4,00151 а. о. м., маса вільного протона 1,00728 а. о. м., маса вільного нейтрона 1,00866 а. о. м.

$f$  — ?

Дано:

$$m_{\text{He}} = 4,00151 \text{ а. о. м.}$$

$$m_p = 1,00728 \text{ а. о. м.}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ а. о. м.}$$

$$k = 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{а. о. м.}}$$

$$A_{\text{He}} = 4$$

$$Z_{\text{He}} = 2$$

$$N_{\text{He}} = 2$$

*Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі.* Для розв'язання задачі скористаємося визначенням питомої енергії зв'язку:

$f = \frac{E_{зв}}{A}$ . Енергію зв'язку можна визначити за

дефектом маси  $\Delta m$  ядра:  $E_{зв} = \Delta m k$ , де

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}$$

*Розв'язання.* За умовою в ядрі Гелію 2 протони та 2 нейтрони: кількість  $A$  нуклонів у ядрі дорівнює 4.



Використовуючи числові значення мас протона, нейтрона та ядра Гелію, одержуємо дефект мас в атомних одиницях маси:

$$\Delta m \approx 2 \cdot 1,007\,28 \text{ а. о. м.} + 2 \cdot 1,008\,66 \text{ а. о. м.} - 4,001\,51 \text{ а. о. м.} \approx 0,030\,37 \text{ а. о. м.}$$

Використовуючи перевідний коефіцієнт  $k$ , знайдемо енергію зв'язку:

$$E_{\text{зв}} \approx 0,030\,37 \cdot 931,5 \approx 28,29 \text{ МеВ. Отже: } f \approx \frac{28,29}{4} \approx 7,07 \frac{\text{МеВ}}{\text{нуклон}}.$$

**Відповідь:** питома енергія зв'язку нуклонів у ядрі ізотопу Гелію  ${}^4_2\text{He}$   
 $f \approx 7,07 \frac{\text{МеВ}}{\text{нуклон}}.$

## ★ 6 Навіщо потрібна високотемпературна плазма

Інший процес видобутку ядерної енергії відбувається за рахунок злиття легких ядер (див. початок графіка на рис. 54.1). Цей процес одержав назву «термоядерний синтез». *Термоядерним синтезом* називають процес множинного злиття легких ядер, яке відбувається за дуже високих ( $\sim 10^9$  К) температур. Звернемо увагу на слово «множинного». Саме ця характеристика й пов'язана з технічним рішенням: перехід від одиничних актів реакцій до їхньої великої кількості. Високі температури, тобто великі енергії ядер, потрібні для подолання електростатичного бар'єра, зумовленого взаємним відштовхуванням ядер (однойменно заряджених частинок). Без цього неможливе зближення вихідних ядер на дистанцію дії ядерних сил. У природі такі умови реалізуються в надрах зір, де ізотопи Гідрогену перетворюються на Гелій. Фізики відтворили зоряні умови на Землі за рахунок створення та утримання високотемпературної плазми.★

## ! Підбиваємо підсумки

Взаємодію протонів і нейтронів забезпечують ядерні сили, які в сотні разів інтенсивніші, ніж електромагнітні, але мають дуже короткий радіус дії. До основних особливостей ядерних сил слід віднести такі: нуклони можуть взаємодіяти тільки з найближчими сусідами; ядерні сили однакові для будь-якої пари нуклонів. Поведінка ядерної матерії досить повно описується напівемпіричною краплинною моделлю.

У результаті дії ядерних сил притягання маса ядра елемента, що складається з ряду нуклонів, стає меншою, ніж сума мас нуклонів у його складі. Зазначена різниця має назву дефект мас  $\Delta m$ . Дефект мас визначає енергію зв'язку:  $E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$ .

Видобування енергії з атомних ядер, з огляду на нелінійний характер залежності енергії зв'язку від масового числа, можливе у двох випадках: унаслідок злиття (синтезу) легких ядер і поділу важких.

★ Термоядерний синтез — це процес злиття легких ядер, що множинно відбувається за дуже високих ( $\sim 10^9$  К) температур.★

## ? Контрольні запитання

1. Що таке ядерні сили? 2. Які властивості ядерних сил ви знаєте? 3. Які істотні відмінності між кулонівською взаємодією і ядерними силами? 4. Яку модель ядра ви знаєте? Опишіть її. 5. Поясніть на базі краплинної моделі ядра, чому не можуть існувати ядра з великими масовими числами. 6. Які можливі способи



видобування енергії з ядер з огляду на нелінійний характер залежності енергії зв'язку від масового числа? **7.** На якому принципі ґрунтується робота атомних станцій? **8.** Який процес називають термоядерним синтезом?



### Вправа № 38

1. Знайдіть дефект мас ядра Нітрогену  $^{14}_7\text{N}$ .
2. Для ядра якого елемента енергія зв'язку дорівнює нулю?
3. Яка питома енергія зв'язку ядра  $^{56}_{26}\text{Fe}$ ?
4. Яку енергію треба витратити, щоб розділити ядро атома Літію  $^7_3\text{Li}$  на протони та нейтрони, що його складають?
5. Яку кількість енергії можна отримати від ділення 1 г Урану  $^{235}_{92}\text{U}$ , якщо в ході кожного поділу виділяється енергія, що дорівнює приблизно 200 МеВ?

## § 55. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ. ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕКОЛОГІЯ



З осені 2008 р. почав працювати найпотужніший фізичний пристрій сучасності — великий адронний колайдер (рис. 55.1). Навіщо ж уряди різних країн у великих обсягах фінансують досліджування першооснови матерії? Процес вкладання великих коштів у ядерну фізику почався ще в 40-х рр. минулого століття, коли вчені винайшли способи розщеплення атомного ядра та створили перші атомні енергетичні реактори.

Про те, як допомагають дослідження з ядерної фізики забезпечувати людство дешевою енергією, ви дізнаєтесь із цього параграфу.



### 1 Що таке ланцюгова ядерна реакція

У 1939 р. було з'ясовано, що внаслідок взаємодії ядра Урану-235 і нейтрона утворюється нове нестабільне ядро Урану ( $^{236}_{92}\text{U}$ ), яке відразу розпадається на два осколки, що розлітаються з величезною швидкістю (рис. 55.2). До речі, цей процес теж може бути пояснений у рамках краплинної моделі ядра.

Під час поділу кожного ядра Урану вивільняються 2–3 нейтрони. Ці нейтрони, у свою чергу, можуть спричинити поділ інших ядер Урану, які також випускають нейтрони, здатні викликати поділ ядер, і т. д. Таким чином, кількість ядер, що поділилися, швидко збільшується (рис. 55.3). Цей процес дістав назву *ланцюгова*

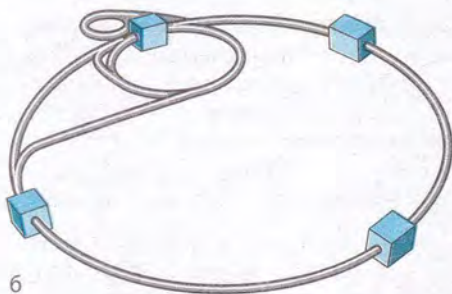
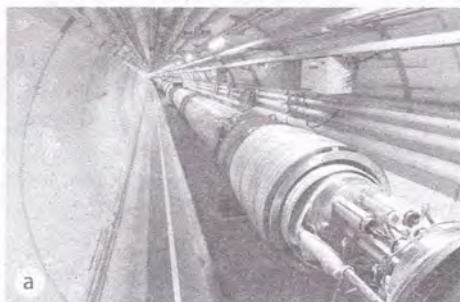
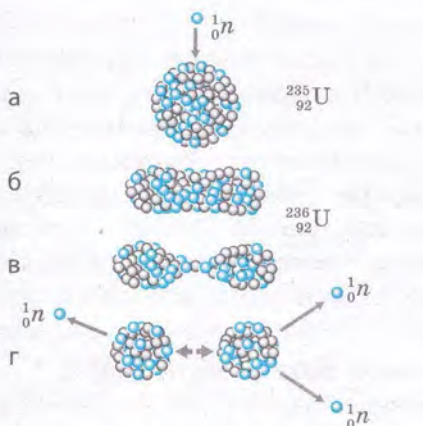
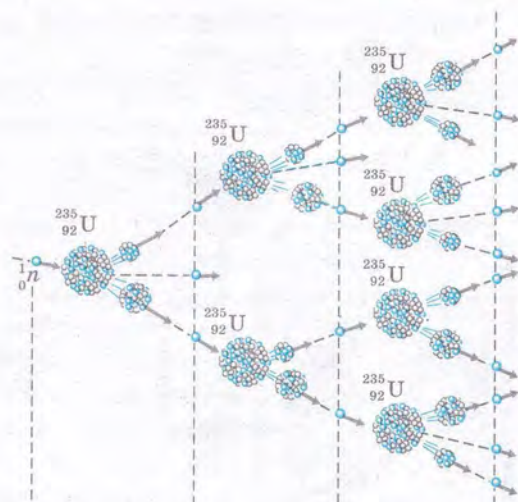


Рис. 55.1. Найбільший дослідницький пристрій — прискорювач заряджених частинок: а — вигляд ізсередини; б — схематичне зображення. Довжина кільця становить 26 км





**Рис. 55.2.** Схема поділу ядер Урану. Поглинаючи нейтрон (а), ядро Урану збуджується й набуває витягнутої форми (б); поступово розтягуючись (в), нове нестійке ядро розпадається на два осколки (г)



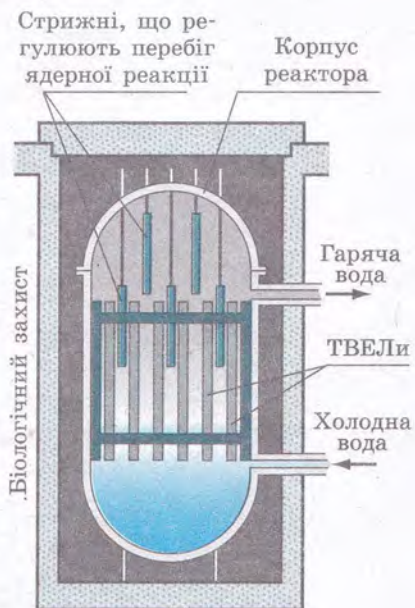
**Рис. 55.3.** Схематичне зображення ланцюгової ядерної реакції.

*ядерна реакція.* Хоча під час поділу кожного ядра Урану виділяється невелика кількість енергії — приблизно  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж, проте, якщо розпадуться всі ядра, що містяться, наприклад, в одному молі урану ( $6,02 \cdot 10^{23}$  ядер), енергія, яка виділиться, дорівнюватиме приблизно  $19,2 \cdot 10^{12}$  Дж. Таку саму кількість енергії можна отримати, наприклад, від згоряння 450 т нафти!★

## 2 Яким чином можна перетворити ядерну енергію на інші її види (теплову, електричну тощо)

Ланцюгова реакція, яка відбувається в урані й деяких інших речовинах, є основою для перетворення ядерної енергії на інші види енергії. Під час цієї реакції безперервно з'являються нові й нові осколки ядер, які летять із великою швидкістю. Якщо шматок урану занурити в холодну воду, то осколки гальмуватимуться у воді й нагріватимуть її. У результаті холодна вода стане гарячою або навіть перетвориться на пару. Саме так працює ядерний реактор, у якому відбувається процес перетворення ядерної енергії на теплову.

У реальних ядерних реакторах (рис. 55.4) ядерне паливо (уран або плутоній) розміщують усередині так званих тепловидільних елементів (ТВЕЛів).



**Рис. 55.4.** Схема будови ядерного реактора



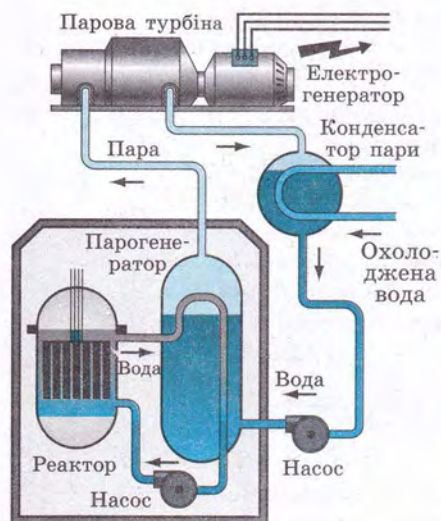


Рис 55.5. Принцип роботи атомної електростанції

Продукти поділу нагрівають оболонки ТВЕЛів, і ті передають теплову енергію воді, яку в цьому випадку ще називають теплоносієм. Отримана тепла енергія перетворюється далі на електричну (рис. 55.5) подібно до того, як це відбувається на звичайних теплових електростанціях.

### 3 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте електричну потужність атомної електростанції, яка витрачає за добу 440 г ізотопу Урану-235 і має ККД 20%. Під час поділу одного ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  виділяється 200 МеВ енергії.

$P_{\text{ел}}$  — ?

Дано:

$$m_{\text{U}} = 0,44 \text{ кг}$$

$$\eta = 20\%$$

$$\Delta t = 86,4 \cdot 10^3 \text{ с}$$

$$N_{\text{A}} = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$$

$$E_0 = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$$

*Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.* Для розв'язання задачі скористаємося формулою для визначення потужності:

$$P_{\text{ел}} = \eta P_{\text{тепл}} \quad (1)$$

Теплову потужність знайдемо як відношення повної енергії, що вивільняється від поділу Урану, до часу:

$$P_{\text{тепл}} = \frac{E}{\Delta t} \quad (2)$$

Повна енергія дорівнює:  $E = E_0 \cdot N$ , де  $N = \frac{m}{M} N_{\text{A}}$  — кількість атомів Урану;  $N_{\text{A}}$  — число Авогадро. Отже:  $E = \frac{E_0 \cdot m \cdot N_{\text{A}}}{M}$  (3).

Підставивши вирази (2) і (3) у формулу (1), маємо:

$$P_{\text{ел}} = \eta P_{\text{тепл}} = \eta \frac{E}{\Delta t} = \eta \frac{NE_0}{\Delta t} = \frac{\eta E_0 N_{\text{A}} m_{\text{U}}}{M \Delta t}$$

$$\text{Остаточно: } P_{\text{ел}} = \frac{\eta E_0 N_{\text{A}} m_{\text{U}}}{M \Delta t}$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[P_{\text{ел}}] = \frac{\text{Дж} \cdot 1 / \text{моль} \cdot \text{кг}}{\text{кг} / \text{моль} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{с}} = \text{Вт};$$

$$\{P_{\text{ел}}\} = \frac{0,2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,44}{0,235 \cdot 86,4 \cdot 10^3} = 8,3 \cdot 10^7, \quad P_{\text{ел}} = 8,3 \cdot 10^7 \text{ Вт.}$$

*Відповідь:* електрична потужність АЕС  $P_{\text{ел}} = 83 \text{ МВт}$ .



#### 4 **Стан сучасної атомної енергетики. Екологічні проблеми**

Україна належить до тих країн світу, в яких завдяки наявності високих технологій і висококваліфікованих інженерів та вчених створена й успішно розвивається атомна енергетика. На сьогодні в країні працюють 15 атомних енергоблоків, загальна потужність яких становить 13 580 МВт. На атомні електростанції припадає близько половини електроенергії, що виробляється в країні.

Зазвичай побоювання пересічного громадянина, коли йдеться про АЕС, пов'язані зі словом «радіація». Але, як показують дослідження, для основної маси населення найбільш небезпечними джерелами радіації є зовсім не ті, про які зазвичай говорять. Найбільший вплив радіації на людину відбувається за рахунок природних джерел радіації та під час медичних досліджень. Радіація, пов'язана з «нормальним» розвитком атомної енергетики, становить лише малу частину радіації, що спричинена діяльністю людини. На жаль, історія людства налічує декілька випадків аномального розвитку подій на атомних енергетичних реакторах. Наслідки цих випадків були катастрофічними.

Один із них, на жаль, відбувся в нашій країні. 26 квітня 1986 р. стався вибух на 4-му енергоблоці Чорнобильської атомної електростанції. Причиною вибуху стало неконтрольоване виділення ядерної енергії всередині ядерного реактора. Через низку помилок персоналу станції стрижні, що регулюють хід ядерних реакцій, не змогли вчасно потрапити всередину реактора й погасити ланцюгову реакцію. Без них «атомний котел» (інша назва атомного реактора) уподібнився до скороварки на плиті, в якій не працює клапан, що випускає пару. Тому вибух був неминучим. Він призвів до пожежі на 4-му енергоблоці й до катастрофічного викиду радіоактивних речовин. Вітри рознесли ці шкідливі речовини на багато сотень і тисяч кілометрів.

Подібна за масштабами катастрофа відбулася на АЕС «Фукусіма» в Японії у 2011 р. Унаслідок землетрусу та цунамі припинили дію насоси, які перекачують теплоносії. Відбулися перегрів та пошкодження атомного реактора, і радіаційна речовина забруднила довкілля.

Тож зараз людство опинилося перед дилемою: поступове вичерпання традиційних енергоносіїв нібито підштовхує до розвитку атомної енергетики: водночас від аварій не застраховані навіть такі технологічно розвинені країни, як Японія.

Уряд Німеччини зробив свій вибір та заборонив розвиток атомної енергетики. А яка ваша думка із цього питання? Поміркуйте над аргументами «за» і «проти».

#### **Підбиваємо підсумки**

Поглинення ядром Урану нейтрона може спричинити розпад ядра. Ця реакція супроводжується вивільненням нейтронів, які містяться в ядрі, а ті, у свою чергу, можуть спричинити поділ інших ядер, отже, відбуватиметься ланцюгова ядерна реакція. Під час такої реакції виділяється величезна енергія.



Процес перетворення ядерної енергії на теплову здійснюється в ядерних реакторах. Ядерне паливо розміщується всередині спеціального вузла, який називають тепловидільним елементом (ТВЕЛом). Продукти ядерної реакції гальмуються у ТВЕЛі та нагрівають його. ТВЕЛі передає теплову енергію теплоносію.

Зараз в Україні працюють чотири атомні електростанції загальною потужністю 13 580 МВт. На АЕС припадає близько половини електроенергії, що виробляється в країні.

26 квітня 1986 р. сталася Чорнобильська катастрофа — вибух на 4-му енергоблоці Чорнобильської АЕС. Вибух спричинив найбільше у світі радіаційне зараження місцевості, зокрема великих територій в Україні, Росії та Білорусі.



### Контрольні запитання

1. Що відбувається під час взаємодії ядра Урану та нейтрона? 2. Опишіть механізм ланцюгової ядерної реакції. 3. Які перетворення енергії відбуваються в ядерних реакторах? 4. Якою є загальна потужність атомних електростанцій в Україні? 5. Що ви знаєте про Чорнобильську трагедію?



### Вправа № 39

1. Яка енергія виділяється в результаті термоядерної реакції синтезу 2 г Гелію із Дейтерію та Тритію?  
2. Потужність реактора атомного криголама дорівнює 80 000 кВт. Споживання реактором Урану-235 становить 500 г на добу. Визначте ККД реактора.  
3. Якій енергії (у кВт·год) відповідає спалювання в ядерному реакторі 15 г Урану-235? Унаслідок поділу одного ядра  $^{235}_{92}\text{U}$  виділяється 200 МеВ енергії.

## § 56. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ



Алхіміки Середньовіччя мріяли про філософський камінь, що перетворював би всі речовини на золото. «Сучасна алхімія» — так назвав Е. Резерфорд свою книгу про перетворення атомних ядер. Про те, які зміни відбуваються з ядром під час радіоактивного випромінювання, що таке ядерні реакції та за якими законами відбуваються ці процеси, йтиметься в цьому параграфі.



### Які види радіоактивного випромінювання є відомими

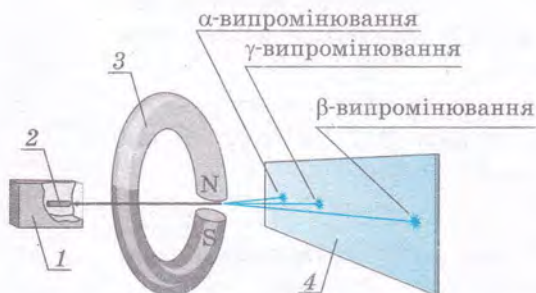


Рис. 56.1. Схема дослід з вивчення природи радіоактивного випромінювання

Перші реальні докази можливості перетворення одного елемента на інший з'явилися у фізиків під час дослідження явища радіоактивності. Стисло нагадаємо схему одного з таких дослідів (рис. 56.1). У свинцевому контейнері (1) з невеликим отвором розміщували радіоактивну речовину (2). Пучок радіоактивного випромінювання, що виходив з отвору, спочатку потрапляв у сильне магнітне поле постійного магніту (3), а потім на фотопластинку (4), розміщену навпроти отвору.



На фотопластинці після проявлення було видно три темні плями. Це означає, що в магнітному полі радіоактивне випромінювання розділилося на три складники. Їх було названо  $\alpha$  (альфа)-випромінювання,  $\beta$  (бета)-випромінювання та  $\gamma$  (гамма)-випромінювання. Найбільший внесок у вивчення  $\alpha$ -випромінювання зробив Е. Резерфорд. Учений з'ясував, що  $\alpha$ -випромінювання — це потік ядра атомів Гелію.  $\beta$ -складова радіоактивного випромінювання, як і  $\alpha$ -складова, відхиляється магнітним полем, але в протилежний бік. У ході подальших досліджень виявилось, що  $\beta$ -випромінювання — це потік електронів. Вивчення  $\gamma$ -випромінювання показало, що це електромагнітні хвилі.

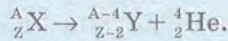
## ★ 2 Правила зміщення

Якщо ядро має надлишкову енергію, то її вивільнення може відбуватися двома шляхами: 1) шляхом спонтанного поділу ядра на більш стійкі частини; 2) шляхом спонтанної зміни заряду ядра на одиницю з перетворенням нейтрона в протон чи протона в нейтрон. Прикладом перетворення першого типу може бути  $\alpha$ -розпад і поділ ядер; другого —  $\beta$ -розпад, тобто випускнення ядром електронів або позитронів.

Після низки експериментів було встановлено загальні правила таких перетворень. Оскільки найбільший внесок у їх розробку здійснив англійський хімік *Фредерік Содді* (1877–1956), зазвичай ці правила називають *правила зміщення Содді*.

### Правило зміщення 1

Під час  $\alpha$ -розпаду нуклонне число ядра атома зменшується на 4, а протонне — на 2, тому *утворюється ядро елемента, порядковий номер якого в періодичній таблиці на 2 одиниці менший, ніж порядковий номер вихідного елемента:*



Під час  $\alpha$ -розпаду атомних ядер доволі часто на кінетичну енергію руху  $\alpha$ -частинки та ядра-продукту перетворюється не вся енергія ядра. Частина цієї енергії може піти на збудження ядра-продукту з подальшим випускненням  $\gamma$ -квантів.

### Правило зміщення 2

Під час  $\beta$ -розпаду нуклонне число ядра атома залишається незмінним, а протонне збільшується на 1, тому *утворюється ядро елемента, порядковий номер якого в періодичній таблиці на 1 одиницю більший, ніж порядковий номер вихідного елемента:*



Окрім електрона, під час  $\beta$ -розпаду з ядра вилітає ще одна частинка. Її було відкрито, як і багато інших елементарних частинок, «на кінчику пера». Первинні вимірювання реакції  $\beta$ -розпаду показали, що в цій реакції не справджується закон збереження енергії. «Не може бути!» — сказали теоретики і стали шукати вихід. Його знайшов німецький учений *Вольфганг Ернст Паулі* у 1931 р., припустивши, що під час  $\beta$ -розпаду, крім електрона, виникає ще одна частинка, яку назвали



нейтрино (від італ. *neutrino* — «нейтрончик», «маленький нейтрон»). Через відсутність у нейтрино заряду та маси воно дуже слабо взаємодіє з речовиною, що утруднювало спроби виявити його в експерименті. Лише в 1952–1956 рр. існування нейтрино було підтверджено експериментально.  $\beta$ -розпад, як і  $\alpha$ -розпад, може супроводжуватися  $\gamma$ -випромінюванням.

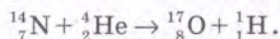
### 3 Спонтанний поділ ядер

У 1940 р. російські фізики *Георгій Миколайович Фльоров* (1913–1990) та *Костянтин Антонович Петржак* (1907–1998) відкрили ще один тип радіоактивного перетворення атомних ядер — *спонтанний поділ ядер*. Вони з'ясували, що в результаті спонтанного поділу певне ядро (фізики зовуть його материнським) без будь-якого впливу ззовні поділяється на дві нерівні частини. Під впливом електростатичних сил продукти поділу, які по-іншому зовуться ядрами-осколками, розлітаються у протилежні боки з великою швидкістю. Елементи, що мають менше зарядове число, ніж Уран, не мають ізотопів, які демонструють явище спонтанного поділу. Але для елементів після Урану цей тип радіоактивних перетворень є дуже поширеним.★

### 4 У чому відмінність ядерних реакцій від радіоактивності

Створені вченими сучасні прискорювачі забезпечили можливість штучного руйнування/перетворення будь-якого атомного ядра. Щоб описати процеси ядерних перетворень, учені ввели поняття *ядерних реакцій*, якими називають *взаємодії ядер або елементарних частинок із ядром, наслідком чого є утворення частинок, відмінних від вихідних*. Будь-яка ядерна реакція записується у вигляді  $A + a \rightarrow B + b$ , де  $A$  — вихідне ядро;  $a$  — частинка, що бомбардує;  $b$  — частинка, що випускається;  $B$  — ядро-продукт.

Першу ядерну реакцію здійснив Резерфорд у 1919 р. Це була реакція перетворення ядра Нітрогену на ядро Оксигену:



Від моменту відкриття Резерфорда було досліджено тисячі ядерних реакцій, перераховувати які немає можливості. Тому відзначимо тільки загальну закономірність. Найважливіший результат, що його одержали фізики, вивчаючи ядерні реакції, — це підтвердження законів збереження. Було з'ясовано, що в ядерних реакціях зберігаються енергія, імпульс, момент імпульсу, електричний заряд, масове число. Урахування законів збереження дозволяє передбачати можливі варіанти ядерних перетворень.

Енергію, яка вивільняється внаслідок ядерної реакції, називають **енергетичним виходом  $\Delta W$  ядерної реакції**:

$$\Delta W = \Delta mc^2, \quad \text{або} \quad \Delta W = \Delta m \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{а. о. м.}},$$

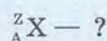
де  $\Delta m = m_1 - m_2$  (тут  $m_1$  — маса частинок до реакції,  $m_2$  — маса частинок після реакції).



На завершення параграфу повернемося до його назви. Що є спільним і в чому полягають відмінності між ядерною реакцією і радіоактивним розпадом? Спільною ознакою обох явищ є ядерне перетворення. Відмінність же полягає в тому, що радіоактивний розпад відбувається спонтанно, а ядерна реакція спричиняється зовнішнім впливом на ядро.

### 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** У результаті поглинання ядром Нітрогену  ${}^{14}_7\text{N}$   $\alpha$ -частинки з'являються невідомий елемент і протон. Запишіть ядерну реакцію та визначте невідомий елемент.

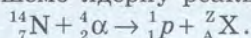


Дано:



*Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі.*  
Для розв'язання задачі запишемо ядерну реакцію. Суми зарядів і мас для лівої і правої частин формули реакції мають збігатися. Із цих рівнянь одержимо невідомі значення. Потім знайдемо невідомий елемент, скориставшись Періодичною системою.

*Розв'язання.* Запишемо ядерну реакцію:



Обчислимо маси та заряди в обох частинах рівняння реакції:

$$14 + 4 = 1 + A; \quad 7 + 2 = 1 + Z.$$

Із цих рівнянь одержимо:  $A = 17$ ;  $Z = 8$ .

Із Періодичної системи знайдемо, що невідомим елементом є ізоотоп Оксигену  ${}^{17}_8\text{O}$ .

**Відповідь:** невідомий елемент є ізоотопом Оксигену  ${}^{17}_8\text{O}$ .

### ! Підбиваємо підсумки

Дослідження показали, що в будь-якому радіоактивному випромінюванні наявні  $\alpha$ -частинки,  $\beta$ -частинки та  $\gamma$ -частинки (весь набір або частково).

★ Сутність  $\alpha$ -розпаду та  $\beta$ -розпаду полягає в переході збудженого стану атомного ядра в основний із випускненням відповідно  $\alpha$ - або  $\beta$ -частинки й (можливо) одного-двох  $\gamma$ -квантів;  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпади підпорядковуються правилам зміщення Содді.

Спонтанний поділ — це явище, за якого певне ядро без жодного впливу ззовні поділяється на дві частини.★

Ядерною реакцією називають взаємодію ядер або елементарних частинок із ядром, що відбувається з утворенням частинок, відмінних від вихідних. Під час ядерних реакцій справджуються класичні закони збереження.

### ? Контрольні запитання

1. Які види радіоактивного випромінювання ви знаєте? ★ 2. Сформулюйте правила зміщення Содді. ★ 3. Що називають ядерною реакцією? 4. Хто й коли першим здійснив ядерну реакцію? 5. Чим відрізняються ядерні реакції від радіоактивних перетворень? 6. Які відомі вам закони збереження справджуються під час ядерних реакцій?



### Вправа № 40

1. Під час радіоактивного розпаду з ядра  ${}^{238}_{92}\text{U}$  випромінюється  $\alpha$ -частинка. Запишіть ядерну реакцію. На ядро якого елемента перетворюється при цьому ядро атома Урану?



2. Ядро Натрію  $^{24}_{11}\text{Na}$ , розпадаючись, випромінює електрон. Ядро якого елемента при цьому утворюється?
3. Запишіть ядерні реакції, заповнивши пропуски:
  - 1)  $^{19}_9\text{F} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{16}_8\text{O} + ?$ ;
  - 2)  $^{27}_{13}\text{Al} + ^4_2\text{He} \rightarrow ? + ^1_1\text{H}$ ;
  - 3)  $^{55}_{25}\text{Mn} + ? \rightarrow ^{55}_{26}\text{Fe} + ^1_0\text{n}$ ;
  - 4)  $? + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{22}_{11}\text{Na} + ^4_2\text{He}$ .
4. Унаслідок бомбардування ізотопу Нітрогену  $^{14}_7\text{N}$  нейтронами отримано ізотоп Карбону  $^{14}_6\text{C}$ , який виявився  $\beta$ -радіоактивним. Запишіть рівняння обох реакцій.
5. Унаслідок опромінювання ізотопу Меркурію  $^{198}_{80}\text{Hg}$  нейтронами утворюються атоми Ауруму  $^{198}_{79}\text{Au}$ . Запишіть ядерну реакцію. Чи вигідно таким шляхом практично отримувати золото?

## § 57. ПЕРІОД ПІВРОЗПАДУ. АКТИВНІСТЬ РАДІОНУКЛІДА

**?!** На відміну від, скажімо, світла, радіоактивність не фіксується нашими органами чуття. Тож, коли кінорежисер або письменник хоче продемонструвати, що приміщення радіоактивно забруднене, він показує людину з приладом, який видає характерні звуки. А чи є певні закономірності в інтенсивності цих звуків? Почнемо розбиратися.

### 1 Що таке період піврозпаду

Уявіть собі певну кількість радіоактивної речовини. Це може бути, наприклад, шматок солі урану або газ радон, поміщений у скляну колбу. Певними приладами можна зафіксувати, що даний об'єкт є радіоактивним. А чи можна дізнатися, яке саме ядро в речовині, що ми розглядаємо, розпадеться першим? А яке ядро виявиться «довгожителем» і розпадеться останнім? На жаль, дізнатися про це неможливо: розпад того чи іншого ядра радіонукліда — подія випадкова. Водночас поведінка радіоактивної речовини загалом підлягає чітко визначеній закономірності. Якщо взяти закриту скляну колбу, що містить певну кількість радону, виявиться, що приблизно за 57 с кількість радону в колбі зменшиться вдвічі.

Ще через 57 с із решти залишиться теж половина і т. д. Тому природно, що інтервал часу 57 с був названий періодом піврозпаду Радону.

Сталі радіоактивного розпаду деяких радіонуклідів

Радіонуклід	Стала радіоактивного розпаду $\lambda, \frac{1}{\text{с}}$
Йод-131	$9,98 \cdot 10^{-7}$
Кобальт-60	$4,15 \cdot 10^{-9}$
Плутоній-239	$9,01 \cdot 10^{-13}$
Радій-226	$1,37 \cdot 10^{-11}$
Радон-220	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Уран-235	$3,14 \cdot 10^{-17}$
Цезій-137	$7,28 \cdot 10^{-10}$

**Період піврозпаду** — це фізична величина, що дорівнює часу, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер певного радіонукліда.

Для характеристики радіоактивного розпаду частіше використовують величину, яку називають *сталою радіоактивного розпаду радіонукліда* (див. таблицю) і позначають символом  $\lambda$ . Стала радіоактивного розпаду пов'язана з періодом піврозпаду

співвідношенням:  $\lambda = \frac{0,69}{T}$ .



## 2 Як пов'язана стала піврозпаду з інтенсивністю радіоактивного випромінювання певного зразка

Із практичної точки зору важливою характеристикою процесу радіоактивного розпаду є *швидкість, із якою розпадається той чи інший радіонуклід*.

Фізичну величину, яка чисельно дорівнює кількості розпадів, що відбуваються в певному радіонуклідному зразку за одиницю часу, називають **активністю радіонуклідного зразка**.

Активність радіонуклідного зразка позначають символом  $A$ . *Одиниця активності в СІ — бекерель (Бк). 1 Бк — це активність такого зразка, в якому за 1 с відбувається 1 акт розпаду. Але 1 Бк — це дуже мала активність, тому використовують позасистемну одиницю активності — кюрі (Ки):  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ .*

Якщо на певний момент часу в зразку міститься деяка кількість  $N$  атомів радіонукліда, то активність  $A$  цього радіонуклідного зразка можна обчислити за формулою:

$$A = \lambda N,$$

де  $\lambda$  — стала радіоактивного розпаду радіонукліда.

## 3 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Визначте масу Радію-226, що міститься в радіонуклідному зразку, якщо активність Радію становить 5 Ки.

$m$  — ?

Дано:

$$A = 5 \text{ Ки} = 18,5 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

$$\lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ 1/с}$$

$$M = 226 \text{ г/моль} =$$

$$= 226 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$$

*Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі. Для розв'язання задачі скористаємося формулою активності радіонуклідного зразка:  $A = \lambda N$ . Сталу радіоактивного розпаду  $\lambda$  знайдемо в таблиці. Знаючи активність зразка, визначимо кількість  $N$  атомів Радію, що містяться в радіонуклідному зразку.*

*Як відомо з курсу хімії,  $N = \nu N_A$ , де  $\nu$  — кількість речовини,  $N_A$  — число Авогадро.*

Визначивши кількість речовини та скориставшись формулою  $\nu = \frac{m}{M}$ , де  $M$  — молярна маса Радію, знайдемо масу  $m$  Радію.

*Розв'язання.* Активність зразка дорівнює:  $A = \lambda N$ .

Оскільки  $N = \nu N_A$ , а  $\nu = \frac{m}{M}$ , то  $N = \frac{m}{M} \cdot N_A$ . Підставимо вираз

для  $N$  у формулу активності:  $A = \frac{\lambda m N_A}{M}$ . Звідси  $m = \frac{AM}{\lambda N_A}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[m] = \frac{\text{Бк} \cdot \text{кг/моль}}{(1/\text{с}) \cdot (1/\text{моль})} = \frac{(1/\text{с}) \cdot \text{кг}}{1/\text{с}} = \text{кг};$$

$$\{m\} = \frac{18,5 \cdot 10^{10} \cdot 226 \cdot 10^{-3}}{1,37 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} = 5,07 \cdot 10^{-3}, \quad m = 5,07 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 5,07 \text{ г}.$$

*Відповідь:* у радіоактивному зразку міститься 5,07 г Радію-226.



**4 Отримання та застосування радіонуклідів**

Радіоактивні ізотопи можна одержати в результаті опромінювання речовини частинками високих енергій (електронами, протонами, нейтронами). Одержані штучні матеріали широко застосовують у медичних дослідженнях як індикатори. Річ у тім, що організм людини має властивість збирати у своїх тканинах певні хімічні речовини, — наприклад, щитовидна залоза накопичує у своїй тканині йод. Його радіоактивний ізотоп своїм більш інтенсивним за норму випромінюванням повідомить лікареві про хворобу пацієнта. Інші радіоактивні ізотопи (наприклад,  $\text{Co}^{60}$ ) використовують як джерела вторинного випромінювання для стерилізації. Доволі докладно це питання ви вивчали в курсі фізики 9-го класу.★

**Підбиваємо підсумки**

Період піврозпаду — це фізична величина, що дорівнює часу, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер певного радіонукліда.

Активність радіонуклідного зразка — фізична величина, яка чисельно дорівнює кількості розпадів, що відбуваються в певному радіонуклідному зразку за одиницю часу:  $A = \lambda N$ , де  $N$  — кількість атомів радіонукліда в зразку на певний момент часу;  $\lambda$  — стала радіоактивного розпаду радіонукліда.

**Контрольні запитання**

1. Що таке період піврозпаду? Як він пов'язаний зі сталою розпаду? 2. Що таке активність радіонуклідного зразка? 3. У яких одиницях вимірюють активність?

**Вправа № 41**

- Період піврозпаду Цезію-137 становить 30 років. Скільки відсотків атомів цього ізотопу розпадається за 240 років?
- Визначте (у тис. років) вік залишків стародавнього поселення, якщо в деревині, знайденій на місці розкопок, залишилося 25 % радіоактивного Карбону  $^{14}_6\text{C}$  від його початкової кількості. Період піврозпаду радіоактивного Карбону  $^{14}_6\text{C}$  становить 5700 років.
- Період піврозпаду ізотопу Радію  $^{226}_{88}\text{Ra}$  становить 1600 років. Скільки ядер ізотопу розпадеться за 3200 років, якщо початкова кількість радіоактивних ядер  $N_0 = 10^9$ ?
- В організмі людини вміст калію становить приблизно 0,19 % від її маси. Радіоактивний ізотоп  $^{40}_{19}\text{K}$  у природній суміші ізотопів становить 0,012 %, період його піврозпаду — 1,24 млрд років. Скільки ядер ізотопу Калію  $^{40}_{19}\text{K}$  розпадається за 1 с у тканинах організму людини, якщо її маса становить 50 кг?

**§ 58. МЕТОДИ РЕЕСТРАЦІЇ ЙОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Оскільки наші органи чуття не можуть зареєструвати йонізуюче випромінювання, вченим довелося розробити низку пристроїв, які допомагають людині «побачити» радіацію. Із цього параграфа ви дізнаєтеся про деякі з них.

**1 Якими є пристрої для реєстрації йонізуючого випромінювання**

Загальний принцип реєстрації йонізуючого випромінювання полягає в реєстрації дії, яку чинять невидимі оком частинки.



Перелічимо основні способи реєстрації йонізуючого випромінювання.

**Метод фотоемульсій.** Швидка заряджена частинка, рухаючись у шарі фотоемульсії, внаслідок йонізації утворює вздовж траєкторії свого руху центри прихованого зображення. Після проявлення фотоплівки (фотоплатівки) на ній проступають зображення слідів первинної частинки та всіх заряджених частинок, що виникли в емульсії внаслідок ядерних взаємодій із первинною частинкою. За товщиною слідів у фотоемульсії та за їхніми довжинами можна визначити заряди частинок і їхню енергію.

**Сцинтиляційні лічильники.** Процес перетворення кінетичної енергії швидкої зарядженої частинки на енергію світлового спалаху називається *сцинтиляцією*. Саме такі спалахи й реєструють сцинтиляційними лічильниками.

**Камера Вільсона.** У початковому стані в цій камері міститься повітря з перенасиченою парою спирту. Якщо через робочий об'єм камери пролітає швидка заряджена частинка, то вздовж шляху її руху в газі утворюється ланцюжок йонів, на яких конденсується пара. Цей ланцюжок крапель можна зареєструвати, наприклад, сфотографувавши.

Принцип реєстрації частинок у бульбашковій камері подібний до способу спостереження в камері Вільсона. Відмінність полягає в тому, що робочим тілом у цьому випадку є перегріта рідина. Йони, які виникають уздовж шляху руху частинки, стають центрами кипіння — бульбашками, які теж можна сфотографувати.

Дія двох наступних типів детекторів — *газорозрядних лічильників* (їх іще називають *лічильники Гейгера* — *Мюллера*) і *йонізуючих камер* — ґрунтується на схожих ефектах. У приладах обох типів робоче тіло — газ — поміщене в електричне поле з високою напругою. Під дією зарядженої частинки, що пролітає крізь газ, відбувається йонізація робочого тіла. У результаті крізь газ проходить електричний струм, який і фіксується стандартними приладами.★



## 2 Як захиститися від йонізуючого випромінювання

У більшості людей слово «радіація» асоціюється з небезпекою. І це, безумовно, правильно. Радіоактивне випромінювання може призвести до згубних наслідків. Утім учені з'ясували, що життя на Землі виникло й розвивається в умовах постійної дії радіації. Як це може бути? Виявилось, що незалежно від того, в якому куточку Землі живе людина, вона постійно зазнає впливу радіації, тому що в будь-якій місцевості завжди є певний радіаційний фон.

**Радіаційний фон** — це йонізуюче випромінювання земного та космічного походження. Радіаційний фон Землі складається з кількох компонентів. Це космічне випромінювання; випромінювання природних радіонуклідів, які містяться в земній корі, повітрі та інших об'єктах зовнішнього середовища; випромінювання штучних радіоактивних ізотопів. Унаслідок діяльності людини відбулося



техногенне підвищення природного радіаційного фону. У таблиці наведено дані про відносну шкідливість випромінювання для людини від різних джерел радіації.

Джерела радіації	Відносна шкідливість випромінювання для людини
Космічне випромінювання	35
Зовнішнє природне опромінення	35
Внутрішнє природне опромінення	135
Будівельні матеріали	140
Медичні дослідження	140
Телевізори та монітори	0,1
Ядерні випробування	2,5
Атомна енергетика	0,2

Найбільш надійний захист від шкідливого впливу радіації — це побудова на шляху випромінювання перешкод. Найпростіше захиститися від  $\alpha$ - і  $\beta$ -випромінювань. Хоча  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинки летять із величезною швидкістю, їхній потік легко зупиняє навіть тонка перешкода. Як показали експерименти, достатньо тонкого аркуша паперу (0,1 мм), щоб зупинити  $\alpha$ -частинки;  $\beta$ -випромінювання повністю поглинається алюмінієвою пластинкою завтовшки 1 мм. Найбільш небезпечним є  $\gamma$ -випромінювання. Воно проникає крізь доволі товсті шари матеріалів. В окремих випадках для захисту від  $\gamma$ -випромінювання необхідні бетонні стіни завтовшки кілька метрів.★



### Підбиваємо підсумки

Для реєстрації дози та визначення потужності дози йонізуючого випромінювання використовують різні типи вимірювальних пристроїв: сцинтиляційні лічильники; бульбашкові камери; камери Вільсона; йонізаційні камери та ін.

На всій поверхні Землі реєструється певний рівень радіації — природний радіаційний фон. Радіаційний фон Землі складається з таких компонентів: космічне випромінювання; випромінювання природних радіонуклідів; випромінювання штучних радіоактивних ізотопів.

Для запобігання шкідливому впливу різних видів радіоактивного випромінювання на організми використовують захисні перешкоди, різні завтовшки й виготовлені з різних матеріалів.



### Контрольні запитання

1. Які прилади для вимірювання та реєстрації радіаційного випромінювання ви знаєте?
2. Який принцип покладено в основу роботи лічильників Гейгера — Мюллера?
3. Що таке радіаційний фон? Із яких компонентів він складається?
4. Який техногенний фактор найбільше впливає на підвищення радіаційного фону?
5. Як захиститися від радіоактивного випромінювання?



## § 59. ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ



Ми вже згадували про «відкриття на кінчику пера». Прикладом такого відкриття для людей, що жили в XIX ст., було виявлення нової планети — Нептуна. Квантова механіка та теорія відносності дали фізикам у руки «чарівне перо», дозволивши масово передбачати існування нових об'єктів. Про те, які елементарні частинки було відкрито фізиками-теоретиками, й піде мова в цьому параграфі.



### 1 Які ще бувають елементарні частинки

Дотепер, пояснюючи будову атома, його ядра, процеси радіоактивного розпаду і ядерних реакцій, ми оперували в основному чотирма частинками: електрон, протон, нейтрон і фотон. Здавалося б, чотирьох частинок буде цілком достатньо для пояснення всіх спостережуваних явищ. Але природа почала підносити вченим нові сюрпризи. Так, для пояснення експериментів з опромінення нейтронами протонів знадобилося припущення про існування *мезонів*. Ця частинка спочатку була «вигадана» японським фізиком *Хідекі Юкавою* (1907–1981). Дослідження  $\beta$ -розпаду змусили В. Паулі в 1935 р. «винайти» частинку-фантом — *нейтрино*. А от експериментальне виявлення нейтрино відбулося лише двадцять років потому.

У 1928 р. англійський фізик *Поль Адрієн Дірак* (1902–1984), розв'язуючи задачу про рух електрона зі швидкістю, близькою до швидкості світла, дійшов висновку про можливість існування в природі не тільки «звичайної» частинки, а й її антипода — античастинки електрона. Античастинка дістала назву *позитрон*. Відмітною рисою античастинки є те, що в разі зіткнення її зі звичайною частинкою відбувається *анігіляція* — частинки зникають із випускненням двох фотонів. Причому, оскільки вся маса спокою електрон-позитронної пари перетворюється на фотони, енергія цих фотонів є дуже великою. Відзначимо, що, як і деякі інші частинки, позитрон було відкрито «на кінчику пера» — експериментальне спостереження позитрона відбулося тільки через кілька років після його передбачення.



### 2 Як здійснити класифікацію елементарних частинок

Після створення в 50–60-х рр. XX ст. потужних прискорювачів відкриття нових елементарних частинок стало відбуватися дуже часто. З одного боку, це применшило роль кожного нового відкриття, а з другого, виникла необхідність здійснити систематизацію. Справді, хіба це елементарні частинки, коли їхня кількість досягла багатьох сотень? Було запропоновано найпростішу схему систематизації — розташування частинок у порядку збільшення маси. За аналогією до Періодичної системи хімічних елементів «повний перелік» частинок було розбито на три групи.

У першій групі опинилась тільки одна частинка — фотон із нульовою масою. До другої групи увійшли відносно легкі частинки, які були названі *лептонами* (від грецьк. *leptos* — легкий). Вам відомий представник цієї групи — електрон. Третя група частинок —



найбільш важких — одержала назву *адрони* (від грец. *hadros* — великий, сильний). Представники цієї групи вам добре знайомі — нуклони.

Подальші дослідження показали, що частинки об'єднані в групи не тільки через розбіжності в їхніх масах, а й відповідно до їхньої здатності до фундаментальних взаємодій. В *електромагнітній взаємодії* беруть участь усі частинки, які несуть електричний заряд. Носіями електромагнітної взаємодії є фотони. У слабкій взаємодії беруть участь усі елементарні частинки, крім фотонів. До адронів відносять частинки, які, окрім того, здатні до сильної взаємодії.

Сучасна класифікація елементарних частинок доступна тільки вузькому колу фахівців у цій галузі й, безумовно, виходить за рамки нашого курсу. Немає сумнівів, що завдяки дослідженням на великому адронному колайдері будуть розроблені нові, більш досконалі теорії й системи класифікації елементарних частинок.

### 3 Що таке кварки

У дослідях із вивчення розсіювання дуже швидких електронів на протонах і нейтронах було виявлено, що більша частина електронів проходить крізь протони та нейтрони, не зазнаючи істотних відхилень, а невелика їх частина сильно розсіюється на якихось центрах. Цей результат схожий на результати дослідів Е. Резерфорда з дослідження розсіювання  $\alpha$ -частинок під час проходження крізь атоми. Для пояснення таких властивостей адронів у 1964 р. було розроблено модель, яка дістала назву *теорія кварків*. Авторами теорії були американські вчені *Маррі Гелл-Манн* (народ. 1929 р.) і *Джордж Цвейг* (народ. 1937 р.).

Кварками вчені назвали три «справжні» елементарні частинки, з яких будуються всі адрони. Вони були позначені буквами *u*, *d* і *s* (від англ. *up* — угору, *down* — униз, *strange* — дивний). Однак згодом трьох кварків виявилось недостатньо для пояснення властивостей усіх адронів. Необхідним стало припустити існування ще декількох кварків. Після цього в теорії з'явилися *антикварки*. Потім знадобилося пояснити причини об'єднання кварків в адрони. Відповідно до сучасних уявлень, це відбувається за допомогою ще одного типу частинок — *глюонів* (від англ. *glue* — клей). Урешті кількість «справжніх» елементарних частинок знову зросла. Не перераховуючи всіх деталей цієї класифікації, звернемо увагу лише на одну особливість кварків. Передбачається, що заряд цих частинок не цілий (в одиницях заряду електрона), а дробовий і дорівнює  $\frac{2}{3}$  або  $\frac{1}{3}$  елементарного електричного заряду!

### 4 Що таке космічне випромінювання

Перш ніж завершити цей параграф і розділ «Атомна і ядерна фізика», звернемо увагу ще на один інструмент, яким широко користувалися фізики, досліджуючи будову атомів і ядер. У попередніх



параграфіях під час вивчення природної радіоактивності ми розглядали поняття *природний радіаційний фон*. Одним зі способів вимірювання цього фону є дані, отримані за допомогою йонізаційної камери. Було природним припустити, що ці дані зменшуватимуться в міру віддалення від природних джерел випромінювання. Учені підняли камеру на висоту кількох кілометрів, віддаливши її таким чином від радіоактивних земних порід. І одержали... значне збільшення інтенсивності випромінювання. Пояснення цього феномену криється в тому, що джерелом радіації є не тільки поверхня Землі, але й далекий космос. Саме звідти приходить до нас додаткове випромінювання, яке дістало назву *космічного випромінювання*, або *космічних променів*.

Дослідження показали, що первинні космічні промені складаються в основному з потоку протонів і  $\alpha$ -частинок із невеликою «домішкою» (~1 %) ядер атомів більш важких елементів. Потоки частинок рухаються зі швидкостями, близькими до швидкості світла. Хоча їхня кількість є невеликою, енергія, яку має кожна частинка, — величезна. Потрапляючи в земну атмосферу, частинка з первинного космічного випромінювання зіштовхується з ядром одного з атомів повітря, й, залежно від енергії, відбувається та чи інша ядерна реакція. Продуктами реакції є багато нових елементарних частинок. Таким чином, космічне випромінювання дозволило вченим «зазирнути» до внутрішньої структури матерії задовго до появи надпотужних прискорювачів.



### Підбиваємо підсумки

Теоретичні розробки в галузі квантової механіки дозволили передбачити існування багатьох елементарних частинок (позитрона, нейтрино), які потім були відкриті в результаті експериментальних досліджень.

Запропонований спосіб розміщення елементарних частинок за принципом збільшення маси підказав дослідникам ідею «природної» класифікації частинок — за видами фундаментальних взаємодій.

Елементарні частинки поділяють на такі групи: фотон; лептони; адрони. До адронів відносять частинки, здатні до сильної взаємодії, до лептонів — частинки, не здатні до сильної взаємодії.

Для пояснення експериментів із розсіювання високоенергетичних електронів на нуклонах було висунуто гіпотезу про існування нового типу елементарних частинок — кварків. Відмітна риса кварків — дробовий заряд.

Космічні промені високих і надвисоких енергій були й залишаються надійним інструментом дослідників для одержання даних про будову мікросвіту.

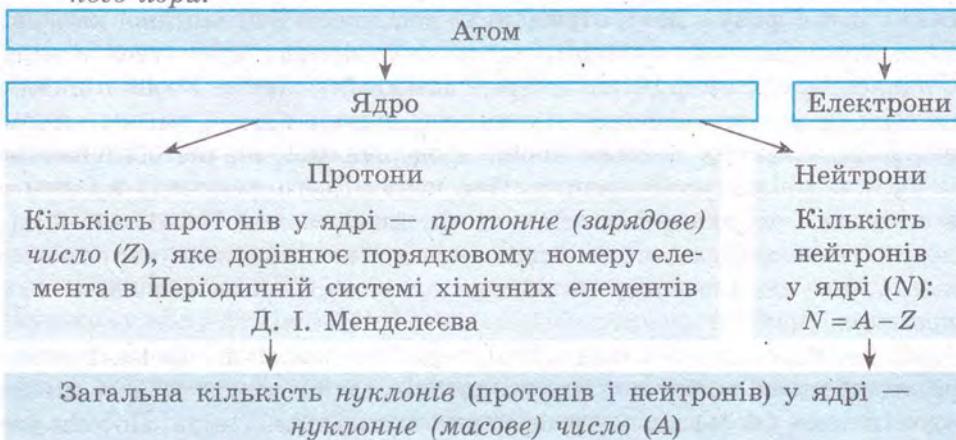


### Контрольні запитання

1. Що називають елементарною частинкою?
2. Яку частинку називають позитроном? Чим вона відрізняється від електрона?
3. Які частинки називають лептонами?
4. Які частинки називають адронами?
5. Які заряди мають кварки?
6. Що таке космічні промені?



1. У процесі вивчення розділу 6 ви згадали *будову атома й атомного ядра*.



2. Ви дізналися про *спектри випромінювання світла атомами*, а також про те, як завдяки постулатам Бора ★ та принципу Паулі ★ сформувались сучасні уявлення про *структуру атома*. ★ Ці ж закони дали змогу роз'яснити *правила побудови Періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва* ★.

3. Ви розширили свої знання про будову ядра атома та дізналися про *ядерні сили та протонно-нейтронну модель ядра*.

4. Ви з'ясували, що *радіоактивність* — це здатність деяких хімічних елементів спонтанно перетворюватися на ядра інших елементів із випромінюванням мікрочастинок; ознайомилися з *трьома видами радіоактивного випромінювання*, ★ а також зі *спонтанним поділом ядер* ★ та з'ясували їх природу.

Радіоактивне випромінювання

Вид	Природа	Заряд частинки	Швидкість
α-випромінювання	Ядра атомів Гелію	$2 e $	Близько 10 000 $\frac{\text{км}}{\text{с}}$
β-випромінювання	Електрони	$e$	Близько 300 000 $\frac{\text{км}}{\text{с}}$
γ-випромінювання	Електромагнітне випромінювання	Відсутній	Дорівнює швидкості світла 300 000 $\frac{\text{км}}{\text{с}}$

5. Ви дізналися про *радіоактивні елементи* ★ та поглибили свої знання про *правила зміщення*. ★



## ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ДО РОЗДІЛУ 6 «АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА»

**Завдання 1.** Атом Гідрогену під час переходу з п'ятого стану в другий випромінює фотон з енергією 2,86 еВ.

(3 бали) Визначте довжину хвилі цього випромінювання.

(4 бали) Визначте кулонівську силу взаємодії та гравітаційну силу, що діють між електроном і ядром атома Гідрогену. Вважайте, що радіус атома дорівнює  $5 \cdot 10^{-9}$  см.

**Завдання 2.** Фосфор  ${}_{15}^{30}\text{P}$  уперше був здобутий подружжям Жоліо-Кюрі шляхом опромінення  $\alpha$ -частинками атома Алюмінію з масовим числом 27.

(3 бали) Запишіть рівняння цієї ядерної реакції та визначте її енергетичний вихід. Відносна атомна маса цього ізотопу 29,978 67 а. о. м.

(4 бали) Запишіть рівняння позитронного розпаду Фосфору. Обчисліть енергію зв'язку ядра атома  ${}_{15}^{30}\text{P}$ . Відносна атомна маса цього ізотопу 29,978 67 а. о. м.

**Завдання 3.** В археологічних дослідження «вік» знайденого предмета визначають за вмістом у ньому  $\beta$ -радіоактивного ізотопу Карбону.

(3 бали) Визначте заряд і масове число цього ізотопу, якщо він утворюється в атмосфері Землі внаслідок такої реакції:  ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_{0}^{1}n \rightarrow x + {}_{1}^{1}\text{H}$ . Запишіть рівняння  $\beta$ -розпаду цього ізотопу.

(4 бали) Період піврозпаду даного ізотопу 5730 років. У 1 г вуглецю органічного походження міститься приблизно 70 млрд атомів Карбону  ${}^{14}\text{C}$ . Через який час у вуглецевому зразку масою 1,6 г залишиться 14 млрд атомів цього ізотопу?

**Завдання 4.** У результаті поділу одного ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  на два осколки виділяється близько 200 МеВ енергії.

(3 бали) Яка енергія виділиться під час «згоряння» в ядерному реакторі 1 см<sup>3</sup> цього ізотопу? Густина урану 19 г/см<sup>3</sup>.

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



## ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ РОЛЬ НАУКИ В ЖИТТІ ЛЮДИНИ ТА СУСПІЛЬНОМУ РОЗВИТКУ. СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО БУДОВУ РЕЧОВИНИ



Ви завершуєте п'ятирічний курс фізики загальноосвітньої школи. За цей час ви познайомилися з її основними розділами — механікою, оптикою, електрикою та ін.; дізналися, як відбувалося відкриття фізичних законів, як знання цих законів застосовуються на практиці — втілюються у приладах, машинах, обладнанні, що значно підвищують якість життя людини. Разом із тим ви довідалися, яким чином дослідження вчених-фізиків сприяли створенню сучасних уявлень про будову Всесвіту, про процеси, що відбуваються в надрах зірок, тощо.

На узагальнюючих заняттях ми розглянемо деякі загальні питання сучасної фізики, а саме: яким є внесок сучасних фізиків у створення природничо-наукової картини світу, яку роль відіграє наука в житті людини, що таке наноматеріали і яким чином ці речовини змінюють світ.

Висвітленню кожного з цих питань можна присвятити окрему книжку, й не одну. Тому на сторінках підручника ми зупинимося лише на основних моментах, які зорієнтують вас у подальшому більш глибокому вивченні цього матеріалу.



### **Яким є внесок фізиків у створення природничо-наукової картини світу**

Протягом усього періоду свого існування фізика не лише займалася вивченням і розв'язанням суто фізичних проблем, а й впливала на розвиток інших наук — так би мовити, допомагала у вирішенні проблем суміжних природничо-наукових дисциплін (хімії, біології тощо). Тут доречно говорити скоріше не про допомогу, а про взаємодію, оскільки якщо проаналізувати історію найвідоміших відкриттів, то побачимо, що це були, кажучи сучасною мовою, спільні проекти, результати яких потім використовувало все людство.\*

Можна виділити два основні напрямки, за якими відбувалося використання досягнень фізичної науки в інших дисциплінах. По-перше, *вимірвальні прилади*, які були розроблені фізиками для вивчення суто власних проблем, застосовуються зараз не тільки для досліджень в галузі будь-якої з природничих наук, а й при розробці нових технологій, створенні нових речовин, автоматизації промислових процесів. По-друге, *фізичні теорії*, зокрема квантова механіка, допомогли глибше зрозуміти природу хімічних і біологічних процесів, з часом з'явилися нові науки: біофізика, хімічна фізика, фізична хімія тощо.

Розглянемо зв'язок між дисциплінами більш докладно на прикладі взаємодії фізики та астрономії.

Вивчення процесів, що відбуваються в далеких галактиках та міжзоряному просторі, неможливе без надпотужних телескопів, які були розроблені завдяки розвитку такого розділу фізики як оптика. До спостережень видимого оком Всесвіту додалися дослідження випромінювання космічних об'єктів в діапазоні радіохвиль завдяки створенню радіотелескопів. До речі, Україна має декілька таких приладів світового рівня.

Фізичні теорії були й залишаються основою уявлень людства про будову Всесвіту. Пригадайте: спочатку вчені вважали Землю плоскою та оточеною гігантською кришталевою сферою; у середні віки була сформована *геліоцентрична картина світу*; на початку ХХ ст. вчені почали вивчати фізичні процеси, що відбуваються

\* Щоб переконатися в цьому, знайдіть інформацію про відкриття ДНК або співпрацю Е. Резерфорда та Ф. Содді.



в зорях. Виявилось, що «світіння» цих гігантських скупчень пов'язане зі структурою й властивостями найменших із відомих на той час об'єктів — атомних ядер. Процеси в безкраїх просторах та навіть сама структура цього простору виявилися залежними від взаємодії між елементарними частинками. Всі ці дослідження систематизуються на основі теорії відносності та квантової механіки. Отже, завдяки розробленому фізиками теоретичному підґрунтю формується сучасна картина будови Всесвіту.

2

### Яка роль фізики в науково-технічному прогресі

Поряд із впливом на процес набуття природничими науками сучасного вигляду фізика є постійним генератором інновацій в техніці. Ще давні греки у своїх працях намагалися науково обґрунтувати застосування тих чи інших технічних пристроїв і прийомів. Починаючи з XIX ст. фізичні закони не тільки використовуються для пояснення (і поліпшення) вже придуманих інженерами конструкцій, а й стають «поживою для розуму» при створенні нових напрямків розвитку техніки.

Прослідкуємо вплив фізичних відкриттів на історію розвитку зв'язку. Приблизно із середини XIX ст., після встановлення фізичних законів, пов'язаних із поширенням і дією електричного струму (закону Ома, закону електромагнітної індукції та ін.), починають інтенсивно розвиватися провідний телеграфний зв'язок, а згодом і телефонний. Винайдення і поширення радіо стали можливими після формулювання *рівнянь Максвелла*.

У XX ст. після винаходу електронних ламп (тріодів) були розроблені потужні генератори коливачів радіохвильового діапазону, які забезпечили розвиток сучасного телебачення та радіомовлення. Спільними зусиллями розробників нових матеріалів та вчених-оптиків були створені волоконно-оптичні лінії зв'язку, завдяки чому багатоканальне телебачення, Інтернет, телефон увійшли в кожную домівку.

Сучасний етап розвитку фізичної науки на початку XXI ст. характеризується її тісною співпрацею з виробництвом і бізнесом. Для вирішення кожного нового технічного завдання залучаються не тільки інженери, технологи, а й учені. Одним із результатів такої співпраці є мініатюризація мобільних телефонів — від таких, що були завбільшки з портфель і важили декілька кілограмів (на початку 90-х років минулого століття), до кишенькових апаратів.

3

### Як саме сучасні фізичні уявлення про будову речовини допомагають «пересічному громадянину»

Усього за декілька десятків років наше життя кардинально змінилося. Мобільний зв'язок та персональні комп'ютери усунули відстані між людьми, що живуть у різних країнах та навіть на різних континентах. Вражаючи технічні пристрої (згадайте автоматичні пральні машини, побутові мікрохвильові печі, бортові комп'ютери в автомобілях тощо) стали можливими лише завдяки новим матеріалам.

На початку XX ст. *квантова механіка та дослідження атомних спектрів* виглядали дуже схожими лише на інтелектуальні забави. Практичне значення, навіть на думку самих фізиків, мали тільки дослідження, що стосувалися вивільнення енергії під час атомних та ядерних перетворень.



Але починаючи із середини ХХ ст. квантова механіка почала давати відповіді на те, як створювати матеріали з надзвичайними властивостями. Саме в той період з'являються напівпровідникові діод і тріод, перші фотоелектричні перетворювачі, магнітні носії пам'яті та ін. Крім теоретичних досліджень, опорою технічного прогресу стали винаходи фізиків зі створення новітніх приладів для вивчення *структури матеріалів*. Розвиток експериментальних методів дослідження структури йшов двома паралельними шляхами. По-перше, вчені навчилися використовувати цілу низку приладів / методів проведення комплексних досліджень. По-друге, фізики займалися винайденням нових, більш потужних методів дослідження властивостей матеріалів. Так, наприклад, потужні прискорювачі заряджених частинок стали використовуватися не тільки для суто ядерних досліджень, а й для пошуку шляхів створення новітніх електронних матеріалів. Тунельний мікроскоп, за винайдення якого вченим було присуджено Нобелівську премію, дозволив «побачити» кожний атом на поверхні твердого тіла.

Новим кроком стало винайдення так званих *наноматеріалів* — дуже маленьких «шматочків», які налічують лише кілька десятків атомів. Ви знаєте, що властивості атомів на поверхні відрізняються від властивостей атомів усередині матеріалу. Для «звичайних» розмірів така різниця має суто теоретичний характер. Судіть самі. Візьмемо шматок матеріалу у вигляді куба з ребром 1 см. Приблизно кількість атомів у цьому матеріалі —  $10^{23}$ . Кількість атомів на всіх шести гранях  $\sim 10^{17}$ . Отже, відносна кількість поверхневих атомів для такого шматка  $10^{17} : 10^{23} = 10^{-6}$ , тобто лише кожний мільйонний атом є поверхневим. Зрозуміло, що вплив поверхні в цьому випадку є незначним.

Розглянемо інший шматок, у якому буде тільки тисяча атомів. У цього шматка на грані розташовано 100 атомів, на всіх гранях — 600. Тож їх відносна кількість  $600 : 1000 \cdot 100 \% = 60 \%$ , отже, більш ніж половина атомів є поверхневими! Зрозуміло, що за своїми властивостями другий шматок має значно відрізнятись від першого. Якщо тепер зібрати ці маленькі шматки до купи, то в нас вийдуть абсолютно нові речовини, які й назвали наноматеріалами.

Наноматеріали мають безліч сфер застосування вже зараз. Це перш за все різноманітні хімічні речовини, які можуть реагувати із «зовнішнім світом» більш ефективно; це створені зі «склеєних» наночастинок об'ємні конструкції з дуже високими механічними властивостями і багато іншого.



### Підбиваємо підсумки

За майже 2500 років свого існування фізична наука змогла розвинути загальне уявлення про природу, яке поєднує знання людей про мега-, макро- і мікросвіти. Починаючи з ХІХ ст. фізики стали не тільки пояснювати відомі факти, а й установлювати нові закони і, спираючись на них, розвивати нові галузі техніки.

Результати, отримані вченими-фізиками, застосовуються в інших науках, зокрема в біології та хімії. Фізичні прилади й методи досліджень широко використовуються в науці, промисловості, сільському господарстві.



★ Лабораторна робота № 1

**Тема.** Вивчення конденсаторів.

**Мета:** дослідити процес розрядження електролітичного конденсатора, визначити електроємність конденсатора.

**Обладнання:** конденсатор електролітичний (10–30 В, 2000 мкФ), мікроамперметр (0–100 мкА або 0–200 мкА), вольтметр (0–6 В), резистор (50–100 кОм), джерело постійного струму (4 В), ключ, з'єднувальні проводи, секундомір.

**Ідея дослідження**

Електроємність конденсатора визначається як відношення заряду  $q$  конденсатора до напруги  $U$  на його обкладках. Тому, вимірявши вольтметром напругу на конденсаторі та визначивши заряд конденсатора, можна розрахувати електроємність цього пристрою.

Склавши електричне коло (рис. 1) і замкнувши ключ, досліджуваній конденсатор заряджають до напруги джерела. Потім ключ розмикають, змушуючи конденсатор розряджатися через резистор і мікроамперметр.

Очевидно, що заряд, який пройде через мікроамперметр за час повного розрядження конденсатора, дорівнює заряду конденсатора в початковий момент часу. Щоб визначити цей заряд, пропонується скористатися графічним методом: побудувати графік залежності  $I(t)$  сили струму в колі від часу (приблизний вигляд цього графіка подано на рис. 2) і обчислити площу фігури, обмеженої осями та графіком залежності  $I(t)$ . Ця площа відповідатиме заряду, який пройшов через мікроамперметр за час розрядження конденсатора.

Таким чином, вимірявши мікроамперметром силу струму в колі в різні моменти часу в процесі розрядження конденсатора й побудувавши графік залежності  $I(t)$  сили струму від часу, можна оцінити заряд  $q$  конденсатора як площу під графіком  $I(t)$ .★

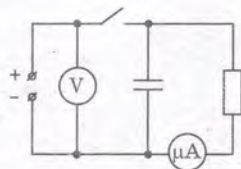


Рис. 1

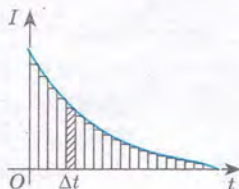


Рис. 2

★ Лабораторна робота № 2

**Тема.** Дослідження послідовного з'єднання провідників.

**Мета:** експериментально перевірити, що у випадку послідовного з'єднання двох провідників справджується таке: сила струму в кожному провіднику є однаковою; загальна напруга на провідниках дорівнює сумі напруг на кожному з них; загальний опір провідників дорівнює сумі опорів окремих провідників.

**Обладнання:** джерело постійного струму, амперметр шкільний (0–2 А), вольтметр шкільний (0–4 В або 0–6 В), два резистори, з'єднувальні проводи, ключ.

**Ідея дослідження**

Склавши електричне коло, що містить два послідовно з'єднані резистори, і використавши амперметр для вимірювання сили струму та вольтметр для вимірювання напруги, спочатку слід експериментально довести співвідношення  $I_1 = I_2$  і  $U = U_1 + U_2$ , де  $I_1$  і  $I_2$  — сила струму в першому та другому резисторах відповідно;  $U_1$



і  $U_2$  — напруга на першому та другому резисторах відповідно;  $U$  — загальна напруга на резисторах. Потім, розрахувавши опори  $R_1$  і  $R_2$  першого та другого резисторів і загальний опір  $R$  двох резисторів, переконайтесь у правильності співвідношень  $R = R_1 + R_2$ ;  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ . ★

### ★ Лабораторна робота № 3

**Тема.** Дослідження паралельного з'єднання провідників.

**Мета:** експериментально перевірити, що у випадку паралельного з'єднання двох провідників справджується таке: загальна напруга та напруга на кожному з провідників є однаковими; сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів у кожному з провідників; величина, обернена загальному опору розгалуженої частини кола, дорівнює сумі величин, кожна з яких обернена опору відповідного провідника.

**Обладнання:** джерело постійного струму, амперметр шкільний (0–2 А), вольтметр шкільний (0–4 В або 0–6 В), два резистори, з'єднувальні проводи, ключ.

#### Ідея дослідження

Склавши електричне коло, що містить два паралельно з'єднані резистори, і використавши амперметр для вимірювання сили струму та вольтметр для вимірювання напруги, спочатку слід експериментально довести співвідношення  $U = U_1 = U_2$  і  $I = I_1 + I_2$ , де  $U_1$  і  $U_2$  — напруга на першому та другому резисторі відповідно;  $U$  — загальна напруга на резисторах;  $I$  — сила струму в нерозгалуженій частині кола;  $I_1$  і  $I_2$  — сила струму в першому та другому резисторі відповідно. Потім, розрахувавши опори  $R_1$  і  $R_2$  першого та другого резисторів і загальний опір  $R$  двох резисторів, переконайтесь у правильності співвідношень  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ;  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ . ★

### Лабораторна робота № 4

**Тема.** Визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму.

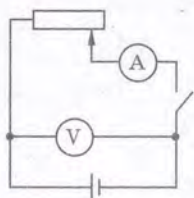
**Мета:** експериментально визначити ЕРС і внутрішній опір гальванічного елемента на підставі результатів вимірювань сили струму в колі та напруги на зовнішній ділянці кола.

**Обладнання:** джерело струму (гальванічний елемент), амперметр шкільний (0–2 А), вольтметр шкільний (0–4 В або 0–6 В), реостат лабораторний (6–8 Ом), ключ, з'єднувальні проводи.

#### Вказівки до роботи

Складіть електричне коло, схема якого зображена на рисунку. Виміряйте напругу на клеммах джерела струму, коли ключ розімкнено (отримане значення буде відповідати ЕРС  $\mathcal{E}$  джерела струму).

Замкніть ключ і виміряйте силу струму  $I$  в колі та напругу  $U$  на клеммах джерела струму для двох положень повзунка реостата.





За допомогою формули  $r = \frac{\mathcal{E} - U}{I}$  обчисліть внутрішній опір джерела струму для кожного досліду та знайдіть його середнє значення. Складіть таблицю результатів вимірювань та обчислень, визначте похибки вимірювань. Підготуйте звіт про проведену роботу.

### Лабораторна робота № 5

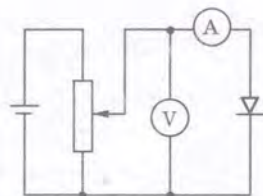
**Тема.** Дослідження електричного кола з напівпровідниковим діодом.

**Мета:** дослідити особливості роботи напівпровідникового діода в колі постійного струму, побудувати вольт-амперну характеристику такого діода.

**Обладнання:** напівпровідниковий діод (Д226, Д7 або інший) на підставці, джерело постійного струму (4 В), міліамперметр постійного струму (0–1 мА), амперметр шкільний (0–2 А), вольтметр шкільний (0–4 В або 0–6 В), ключ, повзунковий потенціометр (0–15 Ом), з'єднувальні проводи.

#### Вказівки до роботи

Підготуйте дві таблиці, до яких ви будете заносити результати вимірювань. Складіть електричне коло за схемою, зображеною на рисунку. Виміряйте силу прямого струму та напругу на діоді для десяти положень повзунка потенціометра. Потім змініть полярність увімкнення діода та замість амперметра включіть у коло міліамперметр. Виміряйте силу зворотного струму та напругу на діоді для десяти положень повзунка потенціометра.



За результатами двох дослідів побудуйте вольт-амперну характеристику діода (силу прямого струму та відповідну напругу вважайте додатними, а силу зворотного струму та відповідну напругу — від'ємними). Підготуйте звіт про проведену роботу.

### Лабораторна робота № 6

**Тема.** Дослідження явища електромагнітної індукції.

**Мета:** дослідити умови виникнення індукційного струму в замкненому провіднику, перевірити виконання правила Ленца.

**Обладнання:** міліамперметр, джерело постійного струму, два штабові магніти, дві дротяні котушки, які можна надівати на спільне осердя, реостат лабораторний (6–8 Ом), ключ, з'єднувальні проводи.

#### Вказівки до роботи

Замкніть одну з котушок на міліамперметр. З'ясуйте, коли виникає індукційний струм, як змінюються напрямок та сила струму у випадках зміни магнітного потоку, що пронизує котушку. Для проведення експерименту скористайтеся описом дослідів, наведених у § 21, або запропонуйте власні. Опишіть свої дії та запишіть результати спостережень. Виконавши пояснювальні рисунки, переконайтесь у слушності правила Ленца. Зробіть висновок. Чи можна виявити, як залежить сила індукційного струму від опору кола? Якщо можна, то проведіть експеримент і запишіть його результати. Підготуйте звіт про проведену роботу.



### ★ Лабораторна робота № 7

**Тема.** Дослідження електричного кола змінного струму.

**Мета:** виміряти активний, індуктивний та ємнісний опори елементів кола, повний опір ділянки послідовно з'єднаних елементів кола та встановити зв'язок між повним опором кола та опором окремих елементів.

**Обладнання:** амперметр (0–1,2 А), міліамперметр (0–2 мА), вольтметр (0–15 В), джерело змінного струму стандартної частоти (0–10 В), резистор, котушка від універсального трансформатора, конденсатор, ключ, з'єднувальні проводи.

#### Ідея дослідження

Склавши електричне коло, що містить послідовно з'єднані резистор, котушку та конденсатор, і використавши амперметр і вольтметр змінного струму, спочатку слід визначити повний опір  $Z$  кола. а потім, вимірявши окремо активний  $R$ , індуктивний  $X_L$  та ємнісний  $X_C$  опори кола, переконатись у правильності рівності:  $Z = \sqrt{R^2 - (X_L - X_C)^2}$ . Чи можна визначити, чому дорівнює ємність конденсатора? індуктивність котушки? Якщо можна, то визначте їх.★

### Лабораторна робота № 8

**Тема.** Спостереження інтерференції світла.

**Мета:** навчитися спостерігати, зарисовувати та пояснювати інтерференційні картини від тонких плівок.

**Обладнання:** посудина з мильним розчином, дротяна рамка, лезо бритви, штатив із лапкою, ганчірка, сірники, дві скляні пластинки, світлофільтр, кольорові олівці.

*Увага! Будьте обережні під час роботи з лезом та склом!*

#### Вказівки до роботи

Поспостерігайте інтерференційні картини у відбитому світлі від вертикальної мильної плівки; від оксидної плівки, що виникає на лезі бритви під час його нагрівання; від повітряного клину між стиснутими скляними пластинками та ін. Подивіться на одержані мильну та оксидну плівки через світлофільтр. Кольоровими олівцями виконайте рисунки інтерференційних картин. Поясніть спостережуване явище, звертаючи увагу на колір смуг, їх послідовність, ширину. Сформулюйте висновок за результатами всіх спостережень. З'ясуйте, чи відрізнятимуться інтерференційні картини в прохідному та відбитому світлі і чому. Підготуйте звіт про проведену роботу.

### Лабораторна робота № 9

**Тема.** Спостереження дифракції світла.

**Мета:** навчитися спостерігати та пояснювати дифракційні картини, що виникають на різних перешкодах та отворах.

**Обладнання:** проекційний апарат із розсувною щілиною (один на клас), клаптик капрону, пташине перо, аркуш чорного паперу з прорізом, тонкий дріт, лазерний компакт-диск, світлофільтр.



### Вказівки до роботи

Піднесіть близько до ока по черзі аркуш паперу з вузьким прорізом, клаптик капрону, пташине перо, тонкий дріт і, розглядаючи крізь них щілину проекційного апарата, поспостерігайте дифракційні картини в прохідному світлі (білому та монохроматичному). Розгляньте дифракційну картину від компакт-диска у відбитому світлі. Виконайте рисунки та поясніть спостережувані явища. Підготуйте звіт про проведену роботу.

### ★ Лабораторна робота № 10

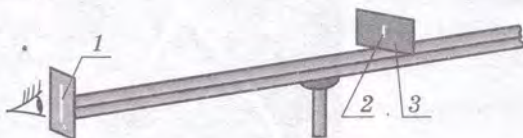
**Тема.** Визначення довжини світлової хвилі.

**Мета:** навчитися вимірювати довжину світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки.

**Обладнання:** лампа розжарювання (одна на клас), прилад для визначення довжини світлової хвилі, дифракційна ґратка, штатив.

#### Ідея дослідження

Дивлячись крізь дифракційну ґратку 1 та щілину 2 в екрані 3 на джерело світла (див. рисунок), спостерігайте на екрані симетрично розташовані дифракційні спектри.



Вимірявши відстань  $b$  від ґратки до екрана та відстані  $a_n$  від щілини до червоної, фіолетової, жовтої та блакитної ліній спектра 1-го порядку, визначте довжину хвилі для світла кожного кольору за формулою  $l = \frac{d \sin \varphi}{k} = \frac{db}{ka_n}$  та переконайтеся, що отримані вами результати збігаються з табличними. ★

### Лабораторна робота № 11

**Тема.** Спостереження неперервного та лінійчатого спектрів речовин.

**Мета:** навчитися спостерігати та аналізувати неперервний спектр випромінювання електричної лампи розжарювання, а також лінійчаті спектри випромінювання газів.

**Обладнання:** проекційний апарат зі щілиною, набір спектральних трубок, високовольтний індуктор, джерело живлення, з'єднувальні проводи (усе зазначене обладнання — по одному екземпляру на клас), скляна пластина зі скошеними гранями, кольорові олівці.

#### Вказівки до роботи

Дивлячись крізь скошену грань скляної пластини на щілину проекційного апарата, поспостерігайте райдужну смугу, що утворилась унаслідок дисперсії світла під час проходження крізь скло. Також поспостерігайте лінійчаті спектри різних газів. Виділіть основні кольори та запишіть їх послідовність. Кольоровими олівцями виконайте рисунок кожної з побачених вами картин. Порівняйте отримані спектральні картини з фотографіями спектрів та проаналізуйте результати спостережень. З'ясуйте, який спектр можна спостерігати від щіпки кухонної солі (NaCl), внесеної в полум'я свічки. Підготуйте звіт про проведену роботу.



## Лабораторна робота № 12

**Тема.** Дослідження треків заряджених частинок за фотографіями.

**Мета:** навчитися аналізувати фотографії із зображенням треків заряджених частинок, отриманих за допомогою камери Вільсона, та ідентифікувати ці частинки.

**Обладнання:** фотографія треків заряджених частинок, аркуш кальки.

## Вказівки до роботи

Перенесіть треки частинок (див. рисунок) на аркуш кальки та всі необхідні побудови робіть на ньому.



Із урахуванням масштабу виміряйте радіуси  $R_1$  і  $R_2$  кривизни треків частинки I і частинки II на початку їх пробігу. Зважаючи на те що частинка I являє собою протон і використовуючи результати вимірювань, знайдіть питомий заряд частинки II за формулою  $\frac{q_{II}}{m_{II}} = \frac{e}{m_p} \cdot \frac{R_1}{R_{II}}$ , де  $\frac{|e|}{m_p}$  — питомий заряд протона. Ідентифікуйте частинку II, тобто визначте, ядром якого елемента є ця частинка. Підготуйте звіт про проведену роботу.



# ВІДПОВІДІ ДО ВПРАВ І ЗАВДАНЬ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

## Розділ 1 «Електричне поле»

№ 1. 1. ↓ в 4 рази. 2. ↓ в 3 рази. 3. 0,23 мН. 4. а) ↑ в 1,8 рази; б) ↓ в 1,25 рази. 6.  $-q(2\sqrt{2}+1)/4$ . № 2. 1. 250 Н/Кл. 2. 5400 Н/Кл. 3.  $E_A = 8kq/a^2$ ;  $E_B = E_C = 8kq/3a^2$ . 4. 0. 5.  $9 \cdot 10^7$  Н/Кл. 6.  $E = 4kq/a^2$ . 7.  $E_O = 0$ ;  $E_A = (kQ_1)/l_1^2$ ;  $E_B = (k(Q_1 + Q_2))/l_2^2$ . № 3. 1.  $A = 15$  мкДж,  $\Delta W_{\text{п}} = -15$  мкДж, змінюють знак на протилежний. 2. 22,5 Дж. 3. 1,27 Дж. № 4. 1. 4 нКл. 2. 1 Н. 3. 2,275 кВ; 0,17 мкс. 4. 1,95 см. 5. 24 нКл/м<sup>2</sup>. № 5. 6. Сфера не заземлена:  $\varphi = kq/R$ , при  $r \leq R \leq R_1$ , та при  $R > R_2$ ;  $\varphi = 0$  при  $R_1 < R < R_2$ . Сфера заземлена:  $\varphi = kq/R$  при  $r \leq R \leq R_1$ ;  $\varphi = 0$  при  $R > R_1$ . № 6. 1. 367 нКл. 3. Да. 4. 0,5 мКл. 5.  $q_{\text{внутр}} = (1-\epsilon)q/\epsilon$ ;  $q_{\text{зовн}} = (\epsilon-1)q/\epsilon$ . № 7. 1. При паралельному > у 16 разів. 2. 40 В і 80 В. 3. 15 мкКл. 4. 150 В. 5.  $\varphi = (C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2)/(C_1 + C_2)$ . 6. (2/3)С, С. № 8. 1. 5 мкФ, 360 мкДж, ↓ в 2 рази. 2. 113 см<sup>2</sup>, 250 мкДж. 3. ↓ в 2 рази. 4. -0,29 мкДж. 5. 0,12 мДж. 6. 0,2 мДж. **Завдання для самоперевірки.** 1. 1. а. 2. 6 мм. 3. 2,3 мН. 2. 1. г. 2. 6,4·10<sup>-17</sup> Дж. 3. 1,2·10<sup>7</sup> м/с, 5 см. 4. 5·10<sup>-19</sup> Дж. 3. 1. 0. 2. 11,5 кДж/м<sup>3</sup>. 4. 1. а. 2. Енергія ↓ в 2 рази. 3. 800 мкФ.

## Розділ 2 «Електричний струм»

№ 9. 1. 60 Ом. 2. 2 м. 3. 11 кг. 4. 5,05 А. 5. 18 Ом,  $I_1 = I_6 = 2$  А,  $I_2 = I_4 = I_5 = 0,8$  А,  $I_3 = 1,2$  А. 6. 30 Ом і 10 Ом. 7. а) послідовно підкл.  $R_1 = 200$  кОм; б) паралельно підкл.  $R_2 = 0,063$  Ом. 8. 1:3. 9. 0,4 А. № 10. 1. 5 В. 2. 2 Ом. 3. 2,7 В, 3 В. 4. 0,5 А. 5. 60 В. 6.  $I_2 + (U_2/U_1)I_1$ . № 11. 1. 20 мА. 2.  $I = (I_1 - I_2)/(r_1 + r_2)$ ,  $\Delta\varphi = (r_1 I_1 - r_2 I_2)/(r_1 + r_2)$ ,  $\Delta\varphi = (r_1 I_1 - r_2 I_2)/(r_1 + r_2)$ . 3. 0,4 мА; 0,7 мА; 1,1 мА і 0. № 12. 1. 0,41 А і 0,18 А; 538 Ом і 1210 Ом. 2. 12,5 А. 3. 236 Ом. 4. 10 Вт. 5. 17,5 хв. 6. 204 В. 7. 1,125 Вт; 0,9 Вт; 0,6 Вт. 8. При паралельному, в 4 рази. № 13. 2. 34 см. 3. 14,6 А. № 14. 1. 40,3 г. 2. 4 кВт. 3. 4,4 год, 246 кДж. 4. 4,3 мг. № 15. 1. 2,26·10<sup>6</sup> м/с. 2. 105 000 К. 3. 1,6·10<sup>-11</sup> А. 4. 1·10<sup>9</sup> см<sup>-3</sup>. **Завдання для самоперевірки.** 1. 1. а. 2.  $K_3$ . 2. 1. 792 Дж. 2. 1,8 л. 3. 1. 0,3 А; 0,3 В; 1,2 В. 2. ≤ 0,3 Ом. 4. 1. б. 2. 1,2 г. 5. 2646 °С. 6. 1. в. 2. 216 В.

## Розділ 3 «Електромагнетизм. Електромагнітне поле»

№ 16. 1. 7,1 А. № 17. 1. 1,08 Н; 0. 3. 15·10<sup>-3</sup> Н·м. 4. 2,0 Ом. № 18. 4. 2,7·10<sup>-15</sup> Н; 5,6 м. 5. 9,1·10<sup>-31</sup> кг. 6. 6 км/с; 0,6 мкТл; 0,18 м. № 19. 5. 26,7 мВб. № 20. 1. 10 мВ. 2. 0,5 с; 5 А. 4. 31,25 А. № 21. 2. 0,13 Гн. 3. 0,38 Гн. 4. 340 мкГн. 5. 25 мкКл. **Завдання для самоперевірки.** 1. 1. б. 2. 3,16 А; 1,58 А. 2. 1. в. 2. 3,0·10<sup>6</sup> м/с. 3. 7·10<sup>-8</sup> с. 4. 1,8 мм. 3. 1. 16 мВ. 2. 16 мкКл. 4. 1. в. 2. 0,1 с.

## Розділ 4 «Електромагнітні коливання і хвилі»

№ 22. 1.  $i(t) = 0,5 \cos 100\pi t$  (А). 2.  $x(t) = 0,8 \sin 6\pi t$  (см). 3. а) 2 см, 0,125 Гц; б)  $\pi/2$ , 0 см, -1,57 см/с. 4. а) 20 см, 2с, 0,5 Гц; 308 В, 20 мс, 50 Гц; б)  $x(t) = 0,2 \cos \pi t$  (м) і  $U(t) = 308 \sin 100\pi t$  (В). № 23. 1. 10 мкКл. 2. 3,125 Гн. 3. а) 100 мкДж; б) 0,58 А; в) 0,46 А. № 24. 1.  $T$  ↓,  $v$  ↑ в 2 рази. 2. 150 мс; а) ↓ в 2 рази; б) ↑ в 2 рази. 3. 1) 0 і  $\pi/6 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>; 2) 12 мкс і 83 кГц; 3) 10 мкКл і 5,2 кА; 4) 9,1 мГн; 5) 31,25 кДж і 93,75 кДж. № 25. 2.  $e(t) = 31,4 \sin 314t$  В,  $i(t) = 2,6 \sin 314t$  А; 31,4 В; 0,8 А. 3. 5,6 А. 4. 36 пар. № 26. 1. 311 В і 180 В. 2. 0,35 А, 315 В, 112,5 Вт і 450 В. 3. 5 хв. № 27. 2. 30 В; 0,29. 3. 5,625 А. 4. 0,5 Ом. **Завдання для самоперевірки.** 1. 1. г. 2. 2,5·10<sup>-10</sup> Ф. 3. 2 мкДж. 2. 1. б. 2. 70. 3. 6 В. 4. У первинній збільшиться; у вторинній зменшиться. 3. 1. 50 м. 2. 3 км. 3. 37,5 км, 180 м. 4. 1. 10 В. 2. 524 мкФ. 3. 5 Ом, 12 Вт.

## Розділ 5 «Оптика»

№ 29. 2. 40°. 3. 18°. 4. 76,7°. 5. 30,5 м. № 30. 2. 124·10<sup>6</sup> м/с; 225,6·10<sup>6</sup> м/с; 229·10<sup>6</sup> м/с. 3. 48,8°; 33,3°; 61°. 4. 1,41. 5. 11,9 мм. 6. 5,5 м. 7.  $n = \sin((\theta + \varphi)/2) / \sin(\theta/2)$ . № 31. 1. Розсіювальна. 3. -3 дптр, розсіювальна. 4. 8 дптр, збиральна. 5. 12 см і 20 см. № 32. 1. 15,3 мм, 0,9. 2. 24 дптр. 3. 50 дптр. 4. 1 дптр. № 33. 2. Посилення; посилення; послаблення; послаблення. 3. 1,68 мм. 4. 1,00046. № 34. 1. 7,9°. 2. 578 нм. 3. 247 нм. 4. 11,6 см. № 35. 1. 4,1·10<sup>-19</sup> Дж; 2,76·10<sup>-19</sup> Дж; синього, у 1,5 рази. 2. 0,33·10<sup>-25</sup> (кг·м)/с; 10<sup>-17</sup> Дж. 3. 5,7 кВт. 4. 10. № 36. 1. 0,9·10<sup>15</sup> Гц. 3. 0,8 еВ. 4. 1,14·10<sup>6</sup> м/с. 5. 1,08·10<sup>5</sup> Гц; 2,5 еВ. 6. 6,4·10<sup>-34</sup> Дж·с. **Завдання для самоперевірки.** 1. 1. 86°. 2. 56,3°. 3. 2 см. 2. 1. Відбиті промені жовто-зеленої частини спектра гасяться за рахунок інтерференції, сильніш за все відбиваються промені червоної та фіолетової частин спектра. 2. 0,1 мкм. 3. 1. б, г. 2. 16 мкм. 3. 757 нм; 400 нм. 4. 1. 6·10<sup>5</sup> м/с. 2. 3,2·10<sup>-19</sup> Дж, 5,3·10<sup>-25</sup> (кг·м)/с.

## Розділ 6 «Атомна і ядерна фізика»

№ 37. 1. -1,5 еВ. 2. 13 еВ. 3. 254 нм. № 38. 1. 0,11236 а. о. м. 2. Гідроген. 3. 8,8 МеВ/нуклон. 5. 82 ГДж. № 39. 1. 850 ГДж. 2. 17 %. 3. 3,4 кВт·год. № 41. 2. 11400 років. 3. 7,5·10<sup>9</sup>. **Завдання для самоперевірки.** 1. 1. 435 нм. 2. 9,2·10<sup>-12</sup> Н; 4,0·10<sup>-51</sup> Н. 2. 1.  ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_1^1\text{H}$ ; -3 МеВ. 2.  ${}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_0^0\text{e} + {}_{14}^{30}\text{Si}$ ; 250,3 МеВ. 3. 1. 6; 14;  ${}_{16}^{34}\text{S} \rightarrow {}_0^0\text{e} + {}_{17}^{34}\text{N}$ . 2. 17190 років. 4. 1. 1,6·10<sup>12</sup> Дж.



- А** Абсолютний показник заломлення 218  
 Активний опір 169  
 Активність радіонуклідів 299  
 Антена 189
- В** Вимушені електромагнітні коливання 164  
 Вихрове електричне поле 134  
 Відносна магнітна проникність 143
- Г** Газовий розряд 95  
 Генератор змінного струму 164, 166  
 Геометрична оптика 211  
 Гіпотеза Планка 255  
 Голографія 243
- Д** Дисперсія світла 236  
 Дифракційна ґратка 248  
 Дифракція 245, 246  
 Діамагнетики 143  
 Діелектрики 34  
 Діелектрична проникність 37  
 Діюче значення сили струму 170  
 Досліди Герца 186  
 — Фарадея 128
- Е** Еквіпотенціальна поверхня 24  
 Електризація 5  
 Електричне поле 10  
 Електричний диполь 35  
 Електричний заряд 4  
 Електричний струм 56, 81, 88, 94, 108  
 Електроємність 39  
 Електромагнітна хвиля 185  
 Електромагнітне поле 145  
 Електронно-дірковий перехід  
     (*n-p*-перехід) 103  
 Електронно-променева трубка 110  
 Електрорушійна сила 67  
 Електростатична індукція 30  
 Елементарні частинки 303  
 Енергія конденсатора 50  
 Енергія магнітного поля 140  
 Ефект Доплера 200
- З** Закон Брюстера 253  
 — відбивання світла 213  
 — Джоуля — Ленца 77  
 — електромагнітної індукції 133  
 — заломлення світла 218  
 — Кулона 6  
 — Ома для ділянки кола 58  
 — Ома для повного кола 69  
 — самоіндукції 139  
 Закони Фарадея 89, 133  
 — фотоефекту 259  
 Змінний електричний струм 164
- І** Ізотопи 285  
 Індуктивність 139  
 Інтерференція 238
- К** Квантові генератори 280  
 Коливальний контур 154  
 Конденсатор 40  
 Корпускулярно-хвильовий дуалізм 265  
 Кут зору 230
- Л** Лінза 223  
 Лінії магнітної індукції 116  
 — напруженості 13  
 Люмінесценція 278
- М** Магнітна індукція 115  
 Магнітне поле 114, 146  
 Магнітний момент 144  
 Момент сили Ампера 121
- Н** Намагніченість 142  
 Напівпровідники 100  
 Напруженість електричного поля 11
- О** Оптична сила лінзи 224
- П** Парамангнетики 143  
 Період коливань 152  
 — півропаду 298  
 Питомий опір 58  
 Плазма 98  
 Повне внутрішнє відбивання 219  
 Повний опір кола 171  
 Поляризація світла 252  
 Постулати Бора 271  
 Потенціал електричного поля 21  
 Потік магнітної індукції 129  
 Потужність електричного струму 77  
 Правила зміщення 295  
 — Кірхгофа 73  
 — правої руки 116  
 Правило Ленца 130  
 — лівої руки 119  
 — свердлика 116  
 Принцип Гюйгенса 209  
 — Гюйгенса — Френеля 246  
 — Паулі 273  
 — суперпозиції полів 12  
 — Ферма 212  
 Провідники 29
- Р** Радіоактивність 294  
 Радіолокація 198  
 Радіохвиля 195  
 Резонанс 174  
 Рівняння Ейнштейна для фотоефекту 260  
 Різниця потенціалів 22
- С** Самоіндукція 138  
 Сила Ампера 118  
 — Лоренца 124  
 — струму 57
- Т** Температурний коефіцієнт опору речовини 84  
 Теорема Остроградського — Гаусса 12  
 Термоелектричні явища 85  
 Термоелектронна емісія 107  
 Трансформатор 176
- У** Умова максимуму 239  
 — мінімуму 240
- Ф** Фаза коливань 152  
 Феромагнетики 143  
 Формула дифракційної ґратки 248  
 — Томсона 159  
 — тонкої лінзи 226  
 Фотоефект 258
- Ц** Циклічна частота 152  
 Циклотрон 126
- Ч** Частота коливань 152
- Ш** Шкала електромагнітних хвиль 201
- Я** Явище самоіндукції 138  
 Ядерні реакції 296  
 Ядерні сили 286



**Розділ 1. Електричне поле**

§ 1. Азбука електростатики .....	4
§ 2. Електричне поле .....	10
§ 3. Робота з переміщення заряду в електростатичному полі. ★ Потенціальна енергія взаємодії точкових зарядів★ .....	17
§ 4. Потенціал електростатичного поля. Різниця потенціалів .....	21
§ 5. Провідники в електростатичному полі .....	29
§ 6. Діелектрики в електростатичному полі. Поляризація діелектриків ...	34
§ 7. Електроємність. Конденсатори та їх використання в техніці .....	39
§ 8. Енергія та густина енергії електростатичного поля .....	49
<i>Підбиваємо підсумки розділу 1 «Електричне поле» .....</i>	<i>54</i>
<i>Завдання для самоперевірки до розділу 1 «Електричне поле» .....</i>	<i>55</i>

**Розділ 2. Електричний струм**

§ 9. Електричний струм. Електричні кола з послідовним і паралельним з'єднаннями провідників. ★ Шунти та додаткові опори★ .....	56
§ 10. Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола .....	65
★§ 11. Розгалужені кола. Розрахунок електричних кіл. Правила Кірхгофа★ .....	73
§ 12. Робота і потужність електричного струму .....	76
§ 13. Електричний струм у металах. ★Термоелектричні явища★ .....	81
§ 14. Електричний струм у рідинах .....	88
§ 15. Електричний струм у газах. Плазма та її властивості .....	94
§ 16. Електропровідність напівпровідників та її види. Електронно-дірковий перехід і його застосування .....	100
§ 17. Струм у вакуумі та його застосування .....	108
<i>Підбиваємо підсумки розділу 2 «Електричний струм» .....</i>	<i>112</i>
<i>Завдання для самоперевірки до розділу 2 «Електричний струм» .....</i>	<i>113</i>

**Розділ 3. Електромагнетизм. Електромагнітне поле**

§ 18. Магнітне поле струму .....	114
§ 19. Сила Ампера. Момент сил, який діє на прямокутну рамку зі струмом у магнітному полі .....	118
§ 20. Дія магнітного поля на рухомі заряджені частинки. Сила Лоренца .....	124
§ 21. Досліди Фарадея. Напрямок індукційного струму .....	128
§ 22. Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції .....	133
§ 23. Самоіндукція. Індуктивність. Енергія магнітного поля .....	138
§ 24. Магнітні властивості речовини. Діа-, пара- та феромагнетики .....	142
§ 25. Електромагнітне поле .....	145
<i>Підбиваємо підсумки розділу 3 «Електромагнетизм. Електромагнітне поле» .....</i>	<i>148</i>
<i>Завдання для самоперевірки до розділу 3 «Електромагнетизм. Електромагнітне поле» .....</i>	<i>149</i>

**Розділ 4. Електромагнітні коливання і хвилі**

§ 26. Коливання. Види коливань. Фізичні величини, що характеризують коливання .....	150
§ 27. Вільні електромагнітні коливання в ідеальному коливальному контурі .....	154
§ 28. Період власних коливань у коливальному контурі .....	159
§ 29. Обертання рамки в однорідному магнітному полі. Змінний електричний струм .....	164
§ 30. Активний опір у колі змінного струму. Діючі значення сили струму й напруги .....	169



§ 31. Вимушені електромагнітні коливання в коливальному контурі. Резонанс .....	173
§ 32. Трансформатор .....	175
§ 33. Генератор незатухаючих електромагнітних коливань .....	181
§ 34. Електромагнітні хвилі. Властивості електромагнітних хвиль. Досліди Герца .....	184
§ 35. Принципи радіотелефонного зв'язку .....	188
§ 36. Поширення радіохвиль. Стільниковий зв'язок. Супутникове телебачення .....	195
§ 37. Шкала електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі в природі й техніці .....	201
<i>Підбиваємо підсумки розділу 4</i>	
«Електромагнітні коливання і хвилі» .....	206
<i>Завдання для самоперевірки до розділу 4</i>	
«Електромагнітні коливання і хвилі» .....	207

### Розділ 5. Оптика

§ 38. Розвиток уявлень про природу світла .....	208
§ 39. Відбивання світла. Закон відбивання світла. Плоске дзеркало .....	211
§ 40. Заломлення світла .....	216
§ 41. Лінзи. Побудова зображень, які дає тонка лінза .....	223
§ 42. Оптичні системи. Кут зору .....	228
§ 43. Дисперсія світла. Спектроскоп .....	235
§ 44. Інтерференція світла .....	238
§ 45. Дифракція світла .....	245
§ 46. Поляризація світла. Поляріди .....	251
§ 47. Теорія М. Планка. Фотони .....	254
§ 48. Фотоефект і його застосування .....	258
§ 49. Тиск світла. Корпускулярно-хвильовий дуалізм .....	263
<i>Підбиваємо підсумки розділу 5 «Оптика»</i> .....	268
<i>Завдання для самоперевірки до розділу 5 «Оптика»</i> .....	269

### Розділ 6. Атомна і ядерна фізика

§ 50. Постулати Бора. ★Принцип Паулі★ .....	270
§ 51. Спектри випромінювання атомів і молекул. ★Видиме та рентгенівське випромінювання★ .....	275
§ 52. Нетеплове збудження випромінювання .....	278
§ 53. Протонно-нейтронна модель атомного ядра .....	283
§ 54. Ядерні сили та їхні особливості .....	286
§ 55. Фізичні основи ядерної енергетики. Ядерна енергетика та екологія ..	290
§ 56. Радіоактивність. Ядерні реакції .....	294
§ 57. Закон піврозпаду. Активність радіонукліда .....	298
§ 58. Методи реєстрації йонізуючого випромінювання .....	300
§ 59. Елементарні частинки .....	303
<i>Підбиваємо підсумки розділу 6 «Атомна і ядерна фізика»</i> .....	306
<i>Завдання для самоперевірки до розділу 6 «Атомна і ядерна фізика»</i> ..	307
Фізична картину світу. Роль науки в житті людини та суспільному розвитку. Сучасні уявлення про будову речовини .....	308
Лабораторні роботи .....	311
Відповіді .....	317
Алфавітний покажчик .....	318