

Є.В. КОРШАК, О.І. ЛЯШЕНКО, В.Ф. САВЧЕНКО

# ФІЗИКА



клас

9





ББК 22.3я721

К70

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
(наказ МОН України № 56 від 02.02.2009 р.)*

**Видано за рахунок державних коштів.  
Продаж заборонено**

*Відповідальні за підготовку до видання:*

*Хоменко О.В. – головний спеціаліст МОН України;  
Юрчук І.А. – методист вищої категорії Інституту інноваційних  
технологій і змісту освіти.*

*Незалежні експерти:*

*Бар'яхтар В.Г. – доктор фіз.-мат. наук, професор, академік, ди-  
ректор Інституту магнетизму НАН України;*

*Головко М.В. – кандидат пед. наук, заступник директора Інститу-  
ту педагогіки АПН України;*

*Бродин І.І. – кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики твер-  
дого тіла Прикарпатського національного університету ім. В. Сте-  
фаника;*

*Євтушик З.Я. – методист Ковельського міського управління  
освіти;*

*Хоренко О.М. – учитель-методист Київського ОШОПК;*

*Дума О.М. – учитель-методист гімназії № 4, м. Одеса;*

*Карпова В.М. – учитель-методист гімназії № 28, м. Запоріжжя.*

**Коршак, Є.В.**

**К70**     **Фізика : 9 кл. : підруч. для загальноосвіт. навч. закл. /**  
**Є.В. Коршак, О.І. Ляшенко, В.Ф. Савченко. – К. : Генеза,**  
**2009. – 160 с. : іл.**

**ISBN 978-966-504-901-2.**

**ББК 22.3я721**

© Коршак Є.В., Ляшенко О.І.,  
Савченко В.Ф., 2008

© Видавництво «Генеза»,  
оригінал-макет, 2009

**ISBN 978-966-504-901-2**



## Дорогий друже!

Цим підручником завершується вивчення фізики в основній школі, що є фундаментом для її поглибленого і профільного вивчення у старшій школі чи в інших загальноосвітніх та професійних навчальних закладах.

Тут ти ознайомишся з цікавими і важливими для практики електромагнітними явищами, з найважливішими уявленнями фізики атомів та їх основними застосуваннями в галузі ядерної енергетики, важливими для розвитку твоїх уявлень про фізичну картину світу, про науково-технічний прогрес.

У ході вивчення матеріалу ти здобудеш ґрунтовні знання про електромагнітне поле, електричний струм та його закономірності, про те, як проводять електричний струм різні середовища, як попередити ураження струмом, що можуть статися при користуванні ним.

Ще матимеш величезне задоволення від самостійного дослідження фізичних явищ під час виконання лабораторних робіт, навчишся користуватись електричними приладами, ознайомишся з методами наукового пізнання.

Щоб полегшити тобі орієнтування в тексті підручника і поліпшити засвоєння матеріалу, у книжці застосовуються такі умовні позначення:



цікаві факти,  
додаткові відомості,  
дані про вчених



актуалізуючі  
й контрольні запитання



важливо знати,  
запам'ятати



для додаткового  
читання

*Бажаємо тобі успіхів у набутті знань про природу,  
техніку, технології, в оволодінні вмінням застосовувати  
набуті знання!*

Автори





# ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

Засвоївши матеріал цього розділу, ви будете **знати**:

- що таке електричний заряд;
- що таке електричне поле;
- як взаємодіють заряджені тіла;
- яку будову мають атоми.

Ви зможете **пояснити**:

- як заряджаються тіла при безпосередньому контакті та на відстані;
- чому електричні заряди мають дискретні значення;
- як утворюються йони;
- як встановити існування електричного поля.

Ви будете **вміти**:

- заряджати різні тіла;
- встановлювати знаки електричних зарядів тіл.



# Розділ 1



## ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

5

### Світ електрики

Широкого використання електричні явища набули фактично лише в ХІХ ст. завдяки дослідженням всесвітньо відомих учених. Це, перш за все, Шарль Кулон, Луїджі Гальвані, Алессандро Вольта, Андре Ампер, Ганс Ерстед, Георг Ом, Майкл Фарадей, Джеймс Максвелл, Генріх Герц, Олександр Попов та багато інших.

Щоб краще уявити значення електрики в нашому житті, подумайте, що могло б статися, якби вона раптом зникла. Відразу



Мал. 1. Блискавка

замовкли б радіоприймачі й телефони, зникли б зображення з екранів телевізорів і комп'ютерів, зупинилися б верстати на заводах і фабриках, які приводяться в рух за допомогою електричних двигунів... Навіть звичайний автомобіль не зміг би рухатися, бо не працював би його стартер, за допомогою якого

Щодня ми чуємо або вимовляємо слова «електрика», «електротехніка», «електроніка»... В основу цих галузей покладені електричні явища.





запускається двигун, системи запалювання, освітлення, контролю... Раптове зникнення електрики в сучасному світі спричинило б величезну катастрофу.

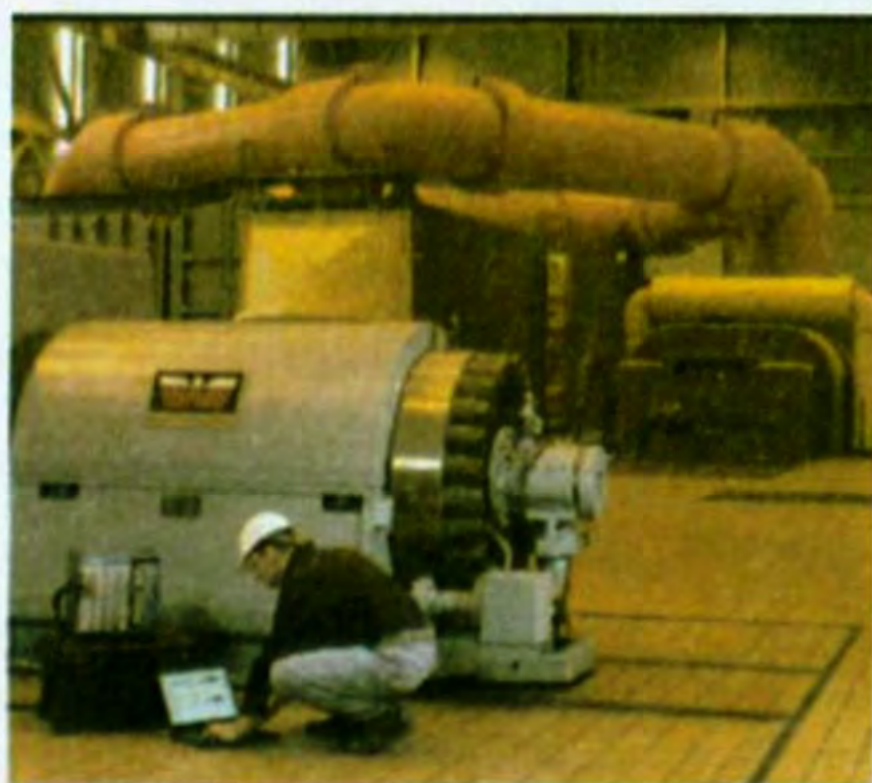
У природі є електричні явища, що супроводжують людину все життя, наприклад блискавки, величезні електричні розряди, які можуть завдати багато лиха (мал. 1). Тому здавна їх вивчають, щоб знайти надійний захист. Грім, що супроводить блискавку, майже безпечний. Це звук, який виникає від раптового розширення повітря, що нагрівається під час виникнення блискавки. Зайве говорити про те, що сталося б, якби перестала працювати сучасна електронно-обчислювальна техніка, завдяки якій здійснюється керування величезною кількістю виробничих процесів.

Вирішальна роль електричної енергії в сучасному житті пояснюється її перевагами перед іншими видами енергії. По-перше, *електрична енергія найбільш універсальна, вона легко перетворюється в механічну, теплову, хімічну, світлову тощо.* По-друге, *електричну енергію зручно розподіляти між найрізноманітнішими споживачами.* Навіть у вашій квартирі від однієї електромережі живляться радіоприймач і телевізор, електрична лампа і холодильник, електрична праска і записуючі та відтворюючі інформацію прилади. По-третє, *електричну енергію можна досить просто передавати на великі відстані без значних втрат.* Це дає можливість за допомогою ліній електропередачі (мал. 2) енергію подавати від гідроелектростанцій (мал. 3), що їх зводять на річках, чи теплових електростанцій, які можна будувати біля покладів палива.

Сьогодні і, мабуть, у найближчому майбутньому електрика залишається основою наукового і технічного прогресу суспільства.



Мал. 2. Лінія електропередачі



Мал. 3. Машинний зал електростанції



## § 1. Електризація тіл. Електричний заряд. Два роди зарядів

У повсякденному житті ми часто можемо спостерігати електричні явища. Розчісуючи сухе волосся пластмасовим гребінцем, ви, мабуть, спостерігали дрібненькі іскорки і потріскування. Це і є невеликі блискавки і громи.

Якщо при цьому гребінець піднести до дрібненьких клаптиків паперу, то вони будуть притягуватися до нього. Коли скляну паличку потерти об шовк або аркуш сухого паперу, то ця паличка набуде властивості притягувати різні тіла (мал. 4). Так само поводить себе, наприклад, і ебонітова паличка, потерта об шерстяну тканину чи вовну.

Ще в VII ст. до н. е. ця особливість була виявлена в янтарю (бурштину). Грецькою мовою янтар називається електроном. Тому причину притягання тіл янтарем, який натирали шерстю, назвали *електричною силою*. Звідси й пішла назва цілої галузі фізики – *електрика*.

Явище, в результаті якого тіла набувають властивості притягувати інші тіла, здавна називають *електризацією тіл*, а самі тіла називаються *наелектризованими*, або ж такими, що мають електричний заряд.

Янтар – скам'яніла смола хвойних дерев, що росли на землі багато сотень тисяч років тому. На малюнку 5 показано янтар та хутро.



Під час вивчення фізики в 7-му класі ви дізналися, що всі тіла, які нас оточують, складаються з атомів, а атоми можуть об'єднуватися в молекули – «мікроцеглинки» речовини. До складу всіх без винятку атомів (і молекул) входять так звані елементарні частинки, що мають електричні заряди, *електро-*



Мал. 4. Заряджені тіла притягують тіла незаряджені



Мал. 5. Янтар і хутро



ни і протони: електрони мають *негативний* заряд, а протони – такий самий за значенням, але *позитивний*.

Тіла заряджаються не лише в разі натирання одних тіл іншими. Під час будь-якої взаємодії різнорідних тіл і безпосереднього контакту відбувається їх заряджання. Але при натиранні контакт між тілами щільніший, і вони заряджаються сильніше, що легше виявити під час дослідів.



Ретельні дослідження показали, що під час взаємодії тіл заряджається кожне з них. При натиранні ебонітової палички хутром заряджається як паличка, так і хутро – обоє помітно притягують легенькі клаптики паперу.

*Заряджені тіла притягують до себе інші тіла, які не були зарядженими.*

Деякі властивості можна виявити під час дослідження взаємодії заряджених тіл. Зарядимо натиранням об хутро ебонітову паличку і підвісимо її на нитці.

8

Якщо тепер піднести до неї так само заряджену іншу ебонітову паличку (мал. 6), то вони будуть відштовхуватися.

Якщо ж до зарядженої ебонітової палички піднести заряджену тертям об шовк чи сухий папір скляну паличку, то палички будуть притягуватися одна до одної (мал. 7).

Із цих дослідів можна зробити висновок, що однаково заряджені тіла відштовхуються, а по-різному заряджені тіла притягуються.

Найрізноманітніші досліди показують, що заряди бувають двох видів: одні такі самі, як на ебонітовій паличці, а інші – як на скляній. Заряди на склі, потертому об шовк, назвали **позитивними**, а заряди на ебонітовій паличці, потертій об хутро, – **негативними**. Позитивні заряди позначили знаком «+» (плюс), а негативні – знаком «-» (мінус).

Як ви вже знаєте з попереднього вивчення природознавства, фізики, хімії, атоми різних хімічних елементів відрізняються зарядом ядер. Науковці встановили, що ядра атомів мають складну будову: до їхнього складу входять **позитивно заряджені частинки – протони**, а також **незаряджені частинки – нейтрони**.

Заряд протона за значенням дорівнює заряду електрона, але має масу в 1840 разів більшу, ніж маса електрона. Маса ж протона й нейтрона майже однакові.

Найпростішим є атом Гідрогену: його ядро складається з одного протона, навколо якого рухається один електрон. Проте й атоми одного й того самого елемента можуть бути різними, у їхніх ядрах однакова кількість протонів, але різна кількість





Мал. 6. Відштовхування однаково заряджених паличок



Мал. 7. Притягування неоднаково заряджених паличок

нейтронів – це так звані *ізотопи*. Так, наприклад, ядро звичайного Гідрогену (Протію) складається з протона; ядро важкого Гідрогену (Дейтерію) – з протона і нейтрона; ядро надважкого Гідрогену (Тритію) – з протона і двох нейтронів. Ізотопи одного хімічного елемента мають різні фізичні властивості.

Тепер можна зробити такі висновки:

- 1) існують незаряджені й заряджені тіла або частинки, з яких вони складаються;
- 2) однойменно заряджені тіла або частинки відштовхуються, а різнойменно заряджені – притягуються;
- 3) під час взаємодії різнорідних тіл вони заряджаються різнойменно і, відповідно, притягуються одне до одного;
- 4) частинки, що входять до складу атомів і молекул: електрони мають негативний заряд, протони – позитивний. Існують і незаряджені частинки – нейтрони.

1. Як можна виявити, чи заряджене тіло?
2. Звідки походить слово «електрика»?
3. Як можна показати, що під час контакту заряджається кожне з тіл?
4. Як взаємодіють між собою: а) дві ебонітові палички, натерті об хутро; б) дві скляні палички, натерті об шовк або сухий папір; в) ебонітова паличка, натерта об хутро, та скляна паличка, натерта об шовк чи папір?
5. Які два роди зарядів існують у природі, як їх називають і позначають?
6. Які заряджені частинки ви знаєте? Як вони називаються і які мають заряди?





## § 2. Взаємодія заряджених тіл. Провідники і непровідники електрики

Як ви вже знаєте, заряд є невід'ємною властивістю певних елементарних частинок, які входять до складу всіх тіл, що нас оточують. Коли говорять, що тіло заряджене негативно, то це означає, що в ньому більше негативно заряджених частинок (електронів), ніж позитивно заряджених. Якщо тіло незаряджене, то в ньому кількість позитивно і негативно заряджених частинок однакова. Заряди електрона і протона мають однакові значення, але різні за знаками: заряд електрона негативний, а заряд протона позитивний.



**Заряд електрона негативний, заряд протона позитивний.**

10

Якщо тіло заряджене позитивно, то це означає, що в ньому електронів менше, ніж протонів. Зарядження і розрядження тіл пояснюється переходом тих чи інших

заряджених частинок від одних тіл до інших.

Під час натирання скляної палички шовком або папером вона заряджається позитивно, це означає, що з неї на шовк чи папір перейшла певна кількість електронів з негативним зарядом.

Найпростішими приладами для вивчення заряджених тіл здавна були так звані електроскопи (мал. 8). Слово «електро-



Мал. 8. Електроскоп

скоп» походить від грецьких слів «електрон» і «скопео» – спостерігати, виявляти. В електроскопі через пластмасову пробку в металевій оправі проходить металевий стержень, на кінці якого закріплені дві смужки тонкого паперу. Оправа з обох боків закрита склом.

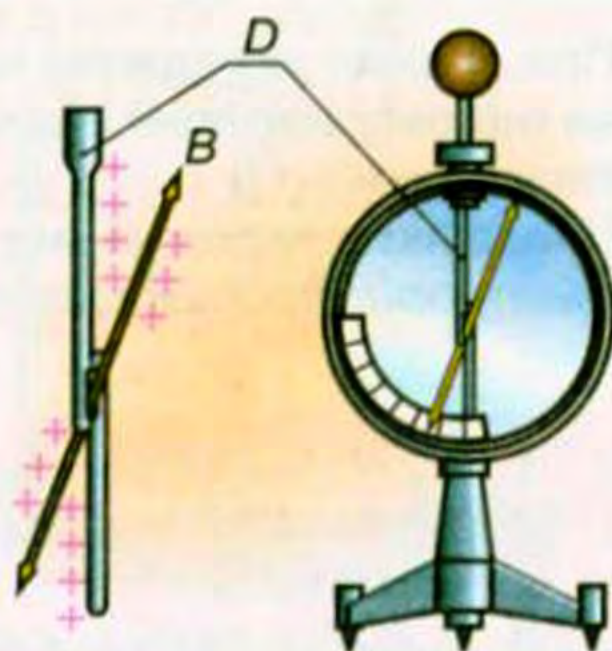
Якщо провести позитивно зарядженою паличкою або іншим зарядженим тілом по кульці електроскопа, то кулька й стержень, а разом з ними й смужки паперу зарядяться. Оскільки однойменно заряджені

тіла відштовхуються, то смужки розійдуться на певний кут. Чим більшого заряду набуває електроскоп, тим на більший кут відхиляються смужки. Отже, спостерігаючи за змінами кута розходження смужок електроскопа, можна зробити висновок про те, збільшується чи зменшується його заряд.





Мал. 9. Електроскоп, що використовувався на початку XX ст.



Мал. 10. Електрометр

На малюнку 9 показано електроскоп, виготовлений майже 100 років тому. За допомогою такого електроскопа вже можна було вимірювати певні електричні величини.

Часто для дослідів з електрики використовують досконаліший прилад – так званий **електрометр** (мал. 10). Тут легенька металева стрілочка *B*, що заряджається так само від металевого стержня *D*, відштовхується від нього на тим більший кут, чим більше вони заряджені.

Якщо доторкнутися до кульки електроскопа рукою, то він розрядиться. Якщо він був заряджений позитивно, то при доторканні до кульки рукою на електроскоп із землі перейде певна кількість негативно заряджених електронів, які й скомпенсують позитивний його заряд.

Коли до електрометра чи будь-якого зарядженого тіла доторкнутися шматком скла, пластмаси, сухої деревини тощо, то тіла не розрядяться. Очевидно, що в цих речовинах немає вільних заряджених частинок. Тому їх назвали *непровідниками електрики, ізоляторами, або діелектриками*. Це фарфор, ебоніт, скло, гума, пластмаси, повітря, бензин тощо.

Через тіло людини заряджені тіла розряджаються, тому воно так само є *провідником електрики*. До добрих провідників належать метали, розчини кислот, лугів, солей тощо.

Більшість речовин у природі не є добрими провідниками. Серед величезної кількості таких речовин існує чимало таких, що мають дуже важливі для науки і техніки властивості, наприклад *напівпровідники*, про які ви дізнаєтеся під час подальшого вивчення фізики.





Тіла, в яких заряджені частинки можуть переміщатися в тому чи іншому напрямі під час певних дій на них, є **провідниками електрики**.

Тіла, в яких заряджених частинок, що вільно рухаються, немає, є **непровідниками електрики (ізоляторами, діелектриками)**.



1. Як виявити на дослідах, заряджене тіло чи ні?
2. Як показати, що при контакті двох різнорідних тіл кожне з них заряджається?
3. Як взаємодіють між собою одно- і різнойменно заряджені тіла?
4. Як за допомогою клаптиків паперу виявити, чи заряджене дане тіло?
5. Опишіть будову і дію простих електроскопів.
6. Як виявити, що одні тіла є провідниками, а інші – непровідниками?

### § 3. Електричне поле. Закон Кулона

12

Заряджені тіла, як ви вже знаєте, взаємодіють одне з одним на відстані – різнойменно заряджені тіла притягуються, а однойменно заряджені відштовхуються. Ретельні досліди показують, що така взаємодія відбувається не лише тоді, коли між тілами є повітря або будь-яка речовина, а й коли між ними створено вакуум, наприклад відкачано повітря чи ці тіла розміщено у відкритому космосі.

Видатні англійські вчені М. Фарадей і Дж. Максвелл установили, що *в просторі навколо заряджених тіл чи частинок існує електричне поле*. Висновки щодо існування електричного поля можна зробити, розглядаючи його дію.



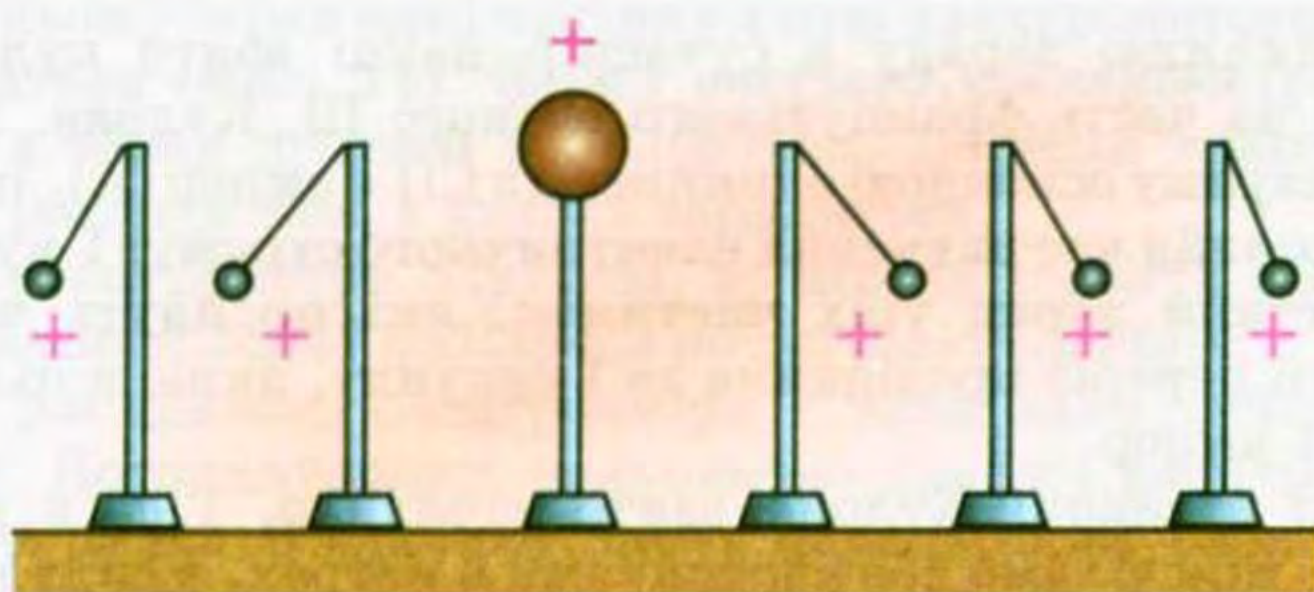
Електричне поле зарядженого тіла (чи частинки) діє з певною силою на різноманітні заряджені тіла (чи частинки), що перебувають у цьому електричному полі.

Сила, з якою електричне поле діє на внесене в нього заряджене тіло чи частинку, називається **електричною силою**.

На малюнку 11 показано, як електричне поле позитивно зарядженої кулі діє на невеличкі також позитивно заряджені кульки на різних відстанях. З такого досліду можна бачити, що чим менша відстань між тілами, які взаємодіють, тим більша сила їхньої взаємодії.

Досліди, які одним з перших виконав французький учений Ш. Кулон, показали, що при збільшенні відстані між зарядженими тілами в 2 рази сила їхньої взаємодії зменшується в 4 рази,





Мал. 11. Взаємодія позитивно зарядженої кулі з позитивно зарядженими маленькими кульками на різних відстанях

при збільшенні відстані в 3 рази сила взаємодії зменшується в 9 разів і т. д. Кулон зробив висновок, що сила взаємодії  $F$  заряджених тіл чи частинок обернено пропорційна квадрату відстані між ними:

$$F \sim \frac{1}{r^2},$$

де  $r$  – відстань між зарядженими тілами, розмірами яких можна знехтувати порівняно з цією відстанню.

Кулон також довів, що сила взаємодії заряджених тіл прямо пропорційна значенням їхніх зарядів:

$$F \sim q_1 \cdot q_2,$$

де  $q_1$  – заряд одного тіла, а  $q_2$  – заряд іншого тіла.



**Шарль Огюстен Кулон (1736–1806)** – французький фізик та інженер. Праці стосуються електрики, магнетизму, механіки. У 1785 р. дослідив силу взаємодії між зарядженими тілами і сформулював закон взаємодії, названий його ім'ям.



Об'єднавши висновки, Кулон установив один з найважливіших законів електрики, названий його ім'ям. Відповідно до цього закону **сила взаємодії заряджених нерухомих тіл, розмірами яких можна знехтувати порівняно з відстанню між ними, прямо пропорційна значенням їхніх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.**

Математично закон Кулона можна записати так:

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

де  $k$  – коефіцієнт, який залежить від вибору одиниць вимірювання величин, що входять до закону.



За одиницю заряду в сучасній науці взято кулон (Кл), названу на честь французького вченого Ш. Кулона. У вченні про електрику основною одиницею (в СІ) є ампер (А), про що ви дізнаєтеся під час вивчення електричного струму: 1 кулон – це електричний заряд усіх частинок, які пройдуть через поперечний переріз провідника за 1 секунду, якщо в ньому сила струму 1 ампер.

Якщо в законі Кулона взято заряди  $q_1$  і  $q_2$  в кулонах, відстань між тілами або частинками в метрах, а силу взаємодії в ньютонах, то:

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

Підсумовуючи викладене в цьому параграфі, можна зробити висновки:

- 1) усі заряджені тіла чи частинки мають електричні поля;
- 2) взаємодія заряджених тіл чи частинок здійснюється через їхні електричні поля;
- 3) сила взаємодії заряджених тіл чи частинок залежить від значень їхніх зарядів і відстані між ними;
- 4) електричні поля реально існують у навколишньому середовищі, як реально існують, наприклад, різноманітні речовини, молекули, атоми, елементарні частинки;
- 5) електричний заряд характеризує здатність заряджених частинок до електромагнітних взаємодій і визначає їх інтенсивність.

14



1. Чим відрізняється простір навколо заряджених тіл від простору навколо тіл незаряджених?
2. Від чого залежить електрична сила взаємодії заряджених тіл?
3. Які особливості взаємодії заряджених тіл установив Кулон?

## **§ 4. Дискретність електричного заряду. Електрон**

З дослідів можна встановити, що під час взаємодії заряджених і незаряджених тіл їхні заряди можуть змінюватися, хоча сумарний заряд взаємодіючих тіл залишається сталим.

Проведемо дослід. Зарядимо один електроскоп (електрометр), наприклад, позитивно, а інший залишимо незарядженим (мал. 12). Відмітимо покази стрілки зарядженого електрометра.

Тепер з'єднаємо кульки обох електрометрів металевим провідником А, закріпленим на ручці В з діелектрика (ізолято-



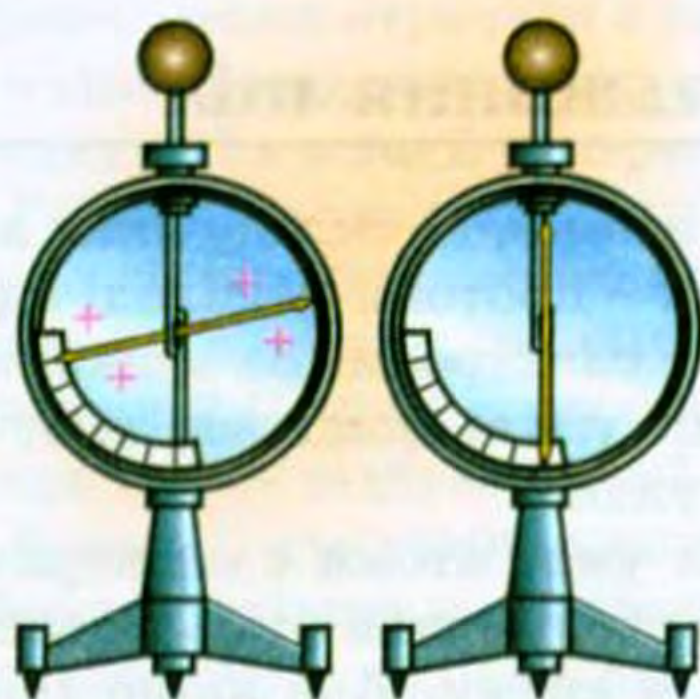
ра). При цьому заряджені частинки між електрометрами перерозподіляться (мал. 13). Заряд першого електрометра зменшиться, а заряд другого збільшиться. Перший електрометр частково розрядиться, а другий зарядиться.

Якщо електрометри однакові, то можна зробити висновок, що *початковий заряд поділився на дві рівні частини*.

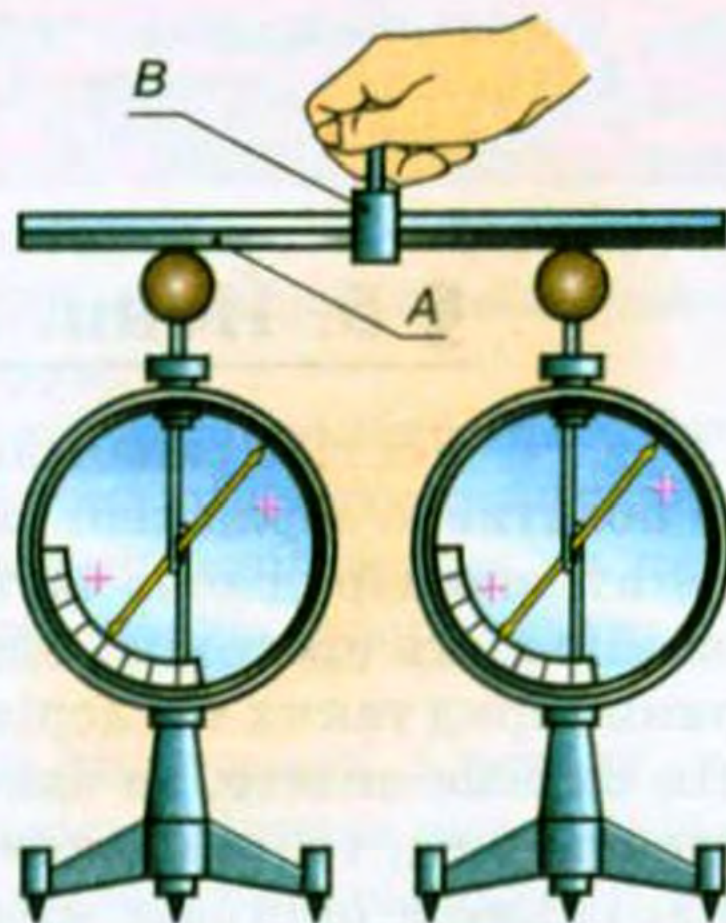
Тепер роз'єднаємо електрометри – вони залишаться зарядженими. Доторкнувшись пальцем до другого електрометра, розрядимо його. З'єднаємо знову заряджений електрометр з незарядженим – знову заряд поділиться на дві рівні частини. Так можна й далі поділяти заряджені частинки між електрометрами на більш дрібні.

Але виникає питання: чи довго можна так перезаряджати електрометри або інші заряджені тіла? Щоб відповісти на це питання, були проведені дуже складні й точні дослідження видатним американським ученим Р. Міллікеном та російським ученим А. Ф. Йоффе. Вони досліджували дію електричного поля на освітлені найдрібніші заряджені порошинки цинку, які можна було спостерігати лише в мікроскоп. Було встановлено: *заряд порошинок змінювався лише в ціле число разів (2, 3, 4, 5 і т. д.) від якогось найменшого його значення*.

На підставі цього зроблено висновок, що в природі існує така частинка, яка має найменший відомий науці заряд і цей заряд вже не поділяється. Ви вже знаєте, цю частинку називали електроном.



Мал. 12. Заряджений і незаряджений електрометри



Мал. 13. При з'єднанні зарядженого і незарядженого електрометрів металевим провідником обидва прилади стають зарядженими





За одиницю заряду взято кулон (позначається Кл) – на честь французького вченого Шарля Кулона.

Значення заряду електрона визначив Роберт Міллікен. Він установив, що електрон має негативний заряд  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, який є невід'ємною його властивістю. Маса електрона дорівнює  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, що менше в 3700 разів від найменшої з усіх молекул – молекули водню  $H_2$ .



**Абрам Федорович Йоффе (1880–1960).** Народився в м. Ромни Сумської області. Праці стосуються фізики твердого тіла, зокрема напівпровідників, загальних питань фізики. У 1913 р. виконав роботи з вимірювання заряду електрона.

16

На основі вивчення електричних явищ, великої кількості ретельно виконаних дослідів було встановлено, що в природі діє закон збереження електричних зарядів: алгебраїчна сума електричних зарядів тіл, що утворюють замкнену систему, залишається сталою  $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$ .



1. Як довести на досліді, що заряд може поділятися?
2. Чи може заряд поділятися нескінченно?
3. Що таке електрон? Що ви знаєте про його заряд і масу?
4. Чи можуть тіла чи частинки мати заряд у 1,5 раза більший чи менший від заряду електрона?
5. Заряд тіла дорівнює  $-6,4 \cdot 10^{-10}$  Кл. Якій кількості електронів відповідає цей заряд?

## § 5. Йони. Зарядження тіл

Усі тіла складаються з атомів, до складу яких входять позитивно заряджені частинки – протони (у складі ядра) та негативно заряджені частинки – електрони. За звичайних умов кількість протонів і електронів у тілі однакова, тому сумарний заряд таких тіл дорівнює нулю.

Як ви вже знаєте, за звичайних умов атоми є електрично нейтральними, тобто навколо ядра обертається стільки електронів, скільки протонів міститься в ньому. Але якщо такий атом втратить один або кілька електронів, то він уже матиме надлишковий позитивний заряд (нескомпенсований заряд ядра). Такий атом уже стає позитивним йоном (катионом). Коли ж нейтральний атом приєднує зайві електрони, то він стає негативним йоном (аніоном).



**Йони** – це заряджені частинки (атоми чи групи хімічно зв'язаних атомів) з нестачею електронів (катиони) або їх надлишком (аніони).



Йони можуть утворюватися й під час розпаду молекул. Так, під час розчинення кухонної солі у воді утворюються позитивно заряджені йони Натрію і негативно заряджені йони Хлору. При взаємодії такі йони можуть знову об'єднуватися в нейтральні молекули.

У тілах, які називають провідниками, є певна кількість вільних заряджених частинок, що хаотично рухаються в тілі, хоча воно залишається незарядженим.

Добрими провідниками електрики є, наприклад, метали. Кристалічні ґратки металів утворюють позитивно заряджені йони, між якими хаотично рухаються електрони.

З цього можна зробити важливий висновок: **тіло заряджене негативно тоді, коли воно має надлишкову, порівняно з незарядженим станом, кількість електронів.**

Якщо тіло втрачає електрони, то воно буде заряджене позитивно: на ньому залишається частково некомпенсований позитивний заряд ядер атомів. **Тіло заряджається позитивно, коли воно має меншу, порівняно з незарядженим станом, кількість електронів.**

Чому ж діелектрики практично не проводять електричного струму? В діелектриках електрони міцно зв'язані зі своїми атомами і не можуть вільно рухатися по всьому тілу. У добрих провідниках (металах) частина електронів, що перебуває на найбільших відстанях від ядер своїх атомів, слабо зв'язана з ядрами, може втрачати з ними зв'язок і майже вільно рухатися в тілі провідника. Такі електрони називаються *вільними*. За певних умов вони й утворюють струм.

Розглянемо кілька прикладів зарядження тіл і пояснимо їх. Якщо до незарядженого електроскопа піднести позитивно заряджену паличку, то смужки паперу розійдуться на певний кут (мал. 14), хоча до кульки паличкою і не доторкувалися. Що ж при цьому відбувається?

Кулька і стержень електроскопа виготовлені з металу, тобто доброго провідника, зі значною кількістю вільних електронів. Під дією електричного поля, яке є навколо зарядженої палички, вільні електрони частково змістяться до верхньої частини стержня. Тут виявиться надлишок електронів, а в нижній частині стержня залишиться некомпенсованим позитивний заряд. Смужки будуть заряджені позитивно і розійдуться на певний кут. Якщо паличку відвести від електроскопа, то електрони притягнуться до позитивно заряджених йонів металу і електроскоп знову буде незарядженим.





Якщо ебонітову паличку потерти об хутро, то вона зарядиться негативно, а хутро – позитивно. Вочевидь, що внаслідок взаємодії палички і хутра на паличці з'явиться надлишок електронів, а хутро втратить таку саму кількість електронів. Зрозуміло, що заряди палички і хутра після взаємодії однакові за значенням, але різні за знаками.



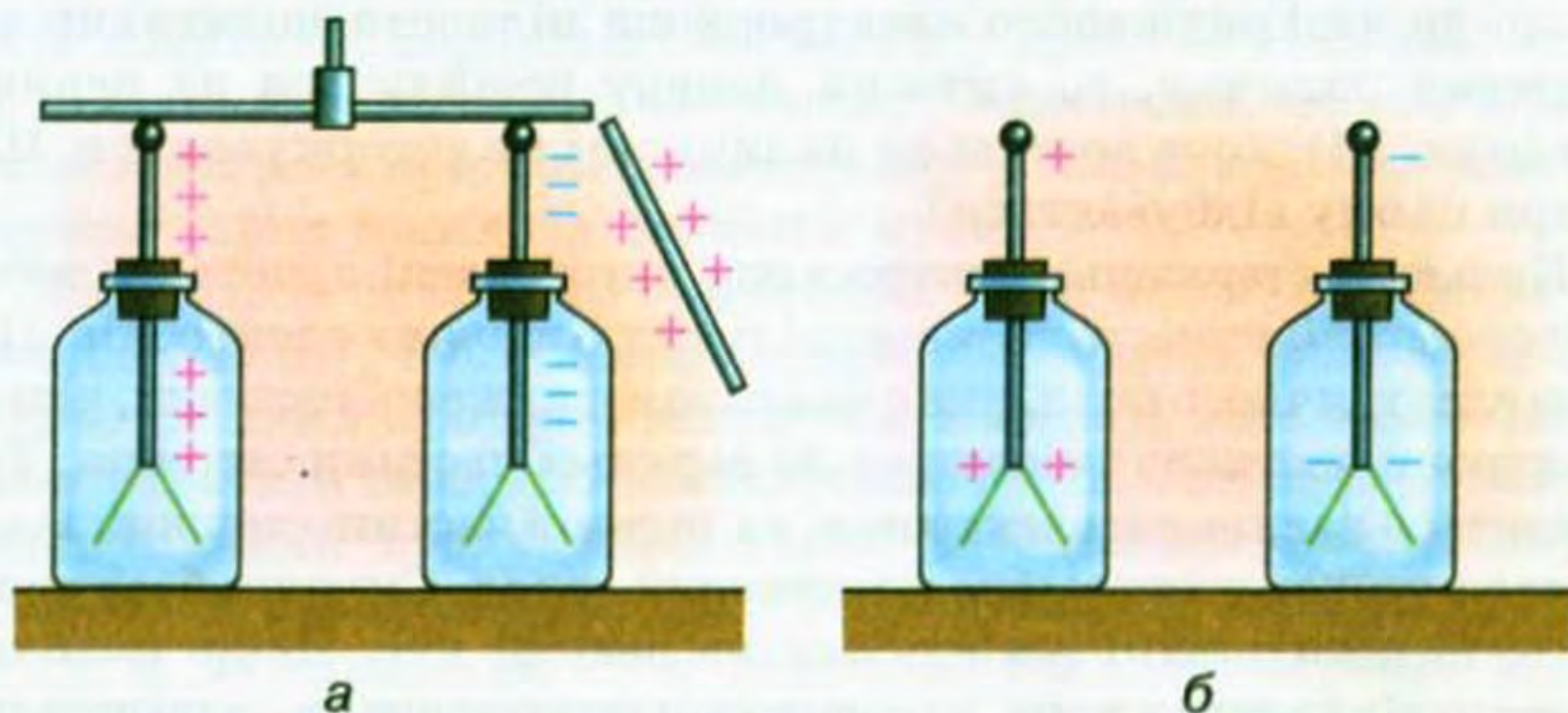
Мал. 14. Перерозподіл заряджених частинок в електроскопі під дією електричного поля

Якщо ж до кульки електроскопа піднести негативно заряджене тіло (також не доторкуючись до неї), то вільні електрони, що є в кульці і стержні, відштовхуючись від негативно зарядженого тіла, переважно зберуться в нижній частині стержня. Негативно заряджені смужки також розійдуться на певний кут. Коли віддалити заряджене тіло від електроскопа, то він знову виявиться незарядженим. Поясніть, які явища відбуваються в цьому випадку.

Таке заряджання тіл чи їхніх частин називають **електризацією через вплив**.

При електризації через вплив заряджені частинки можна розділити, що доведено на досліді (мал. 15). З'єднаємо два однакові електроскопи металевим провідником з ізоляційною ручкою і піднесемо до одного з електроскопів позитивно заряджене тіло (мал. 15, а). Смужки паперу на обох електроскопах розійдуться на певний кут. Чому?

Частина вільних електронів, що є у стержнях електроскопів і провіднику, яким їх з'єднано, під дією електричного поля позитивно зарядженого тіла перейде на правий електроскоп, де й виявиться надлишок їх. Цей електроскоп буде мати негативний заряд, а лівий, відповідно, – позитивний. Якщо позитивно заряджене тіло віддалити від електроскопів, то вони знову стануть незарядженими.



Мал. 15. Заряджання різноіменно двох електроскопів



Якщо спочатку прийняти від електроскопів металевий провідник, що їх з'єднує, а потім заряджене тіло, то обидва електроскопи виявляться зарядженими (мал. 15, б). Як можна показати, що заряди на них різнойменні? Якщо тепер з'єднати обидва електроскопи металевим провідником на ізолюючій ручці, то вони повністю розрядяться.

1. Поясніть зарядження тіл під час їхнього контакту (наприклад, натирання).
2. Чому при заряджанні тіл під час їхнього контакту обидва тіла мають однакові за значенням, але протилежні за знаком заряди?
3. Що таке електризація через вплив?
4. Як утворюються позитивно і негативно заряджені йони?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1<sup>1</sup>

### Дослідження взаємодії заряджених тіл

**Мета.** Дослідним шляхом вивчити взаємодію однойменно і різнойменно заряджених тіл.

#### Вказівки до роботи

За звичайних умов тіла є електрично нейтральними, тому що носії електричних зарядів всередині них взаємно скомпенсовані або рівномірно розподілені в об'ємі тіла. Якщо тіло містить надлишок заряджених частинок одного знака або вони нерівномірно розподілені в об'ємі тіла, то воно стає зарядженим. Наприклад, надлишкова кількість електронів приводить до появи на тілі негативного заряду і навпаки.

Здатність тіл до електромагнітної взаємодії – взаємного притягання чи відштовхування – пояснюється існуванням двох різних видів електричних зарядів – позитивного і негативного. У ході виконання самостійних дослідів слід з'ясувати, як взаємодіють між собою однойменно і різнойменно заряджені тіла.

#### Виконання роботи (варіант 1)<sup>2</sup>

**Обладнання:** лінійка з пластмаси, шматки цупкої плівки з обкладинок чи папок, поліетиленові файли, вовняна тканина або хутро, шовкова тканина або папір.

<sup>1</sup>У підручнику запропоновано виконання лабораторних робіт у двох варіантах: на обладнанні, яке є в більшості фізичних кабінетів (варіант 1); за розробками Науково-дослідного центру навчально-наукових приладів Інституту прикладної фізики НАН України, обладнання до яких нині постачається в школи (варіант 2).

<sup>2</sup>Ця робота може виконуватися учнями в домашніх умовах з наступним обговоренням одержаних результатів у класі.



1. Потріть один об одний два шматки цупкої пластмасової плівки і з'ясуйте, як вони будуть взаємодіяти між собою.

2. Натріть тепер одну плівку вовняною тканиною або хутром, а іншу – папером або шовковою тканиною, піднесіть їх одна до одної і простежте за їхньою взаємодією.

3. Підвісьте на тонких нитках пластмасові лінійки, потріть їх одна об одну і спостерігайте за їхньою взаємодією.

4. Одну з лінійок потріть об папір або шовкову тканину, а іншу – об вовняну тканину або хутро. З'ясуйте, як вони будуть взаємодіяти.

5. Зробіть висновок щодо взаємодії електрично заряджених тіл.

### Виконання роботи (варіант 2)



Мал. 16

**Обладнання:** електростатичні султани, ебонітова і скляна палички, вовняна тканина або хутро, шовкова тканина або папір.

1. Піднесіть до електростатичного султана скляну паличку, натерту шовковою тканиною (мал. 16).

2. Запишіть, що відбувається з паперовими смужками султана.

3. Поясніть, який заряд отримують смужки паперу під час доторкання зі скляною паличкою.

4. Змінюючи відстань між султаном і паличкою, спостерігайте за характером взаємодії між зарядженими тілами.

5. Піднесіть до султана ебонітову паличку, натерту хутром.

6. Поясніть, що відбувається з паперовими смужками султана. Укажіть, який заряд отримують смужки паперу під час доторкання з ебонітовою паличкою.

7. Змінюючи відстань між султаном і паличкою, спостерігайте за характером взаємодії між зарядженими тілами.

8. Дослідіть взаємодію двох різнойменно заряджених електростатичних султанів.

9. Дослідіть взаємодію двох однойменно заряджених електростатичних султанів.

10. Зробіть висновок.

### Вправа 1

1. Чому можна зарядити паличку з діелектрика під час тертя, тримаючи її в руці, і зовсім неможливо це зробити з металевою паличкою?

2. Щоб з'єднати пошкоджені провідники, електромонтер надіває гумові рукавиці й використовує інструменти з ізолюваними ручками. Для чого він це робить?



3. Є три однакові металеві кулі на ізолюючих підставках. Одна з куль заряджена. Як зарядити різнойменно дві інші кулі? Поясніть свої дії.

4. Як зміниться сила взаємодії між двома зарядженими кульками, якщо значення заряду кожної кульки збільшиться у 4 рази, а відстань між ними зменшиться у 2 рази?

5. Дві кульки, що мають заряди по  $10^{-7}$  Кл, перебувають на відстані 0,1 м одна від одної. З якою силою вони взаємодіють?

6. З якою силою взаємодіють кульки, що мають заряди  $0,66 \cdot 10^{-7}$  Кл і  $1,1 \cdot 10^{-5}$  Кл на відстані 3,3 см?

## Головне в розділі 1

- Слід вважати, що:
  - існують незаряджені та заряджені тіла або частинки, з яких складаються тіла;
  - однойменно заряджені тіла або частинки відштовхуються, а різнойменно заряджені – притягуються;
  - під час взаємодії різнорідних тіл вони заряджаються різнойменно;
  - елементарні частинки, що входять до складу атомів і молекул, – це електрони, які мають негативний заряд, та протони, що мають позитивний заряд. Існують також елементарні частинки, які не мають заряду – нейтрони.
- Заряджання і розряджання тіл пояснюється переходом тих чи інших заряджених частинок від одних тіл до інших або їх перерозподілом у цих тілах.
- Навколо заряджених тіл і частинок існує електричне поле, їх взаємодія здійснюється через електричні поля. Електричні поля існують реально, як реально існують тіла, молекули, атоми, елементарні частинки.
- Тіло заряджене негативно, коли воно має надлишкову, порівняно з незарядженим станом, кількість електронів, а позитивно – коли має меншу, порівняно з незарядженим станом, кількість електронів.
- **Закон Кулона:** сила взаємодії заряджених тіл, розмірами яких можна знехтувати порівняно з відстанню між ними, прямо пропорційна значенням їхніх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:  $F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ .





## Розділ 2

Засвоївши матеріал цього розділу, ви будете **знати**:

- що таке електричний струм, які його джерела та основні дії;
- що таке напруга, сила струму та електричний опір;
- закон Ома для однорідної ділянки кола та закон Джоуля–Ленца;
- від чого залежить робота і потужність електричного струму.

Ви зможете **пояснити**:

- природу електричного струму в різних середовищах;
- як вмикаються різні електричні пристрої в електричних колах.

Ви будете **вміти**:

- вимірювати силу струму, напругу, опір та інші фізичні величини;
- досліджувати найпростіші електричні явища.



# ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

## § 6. Що таке електричний струм

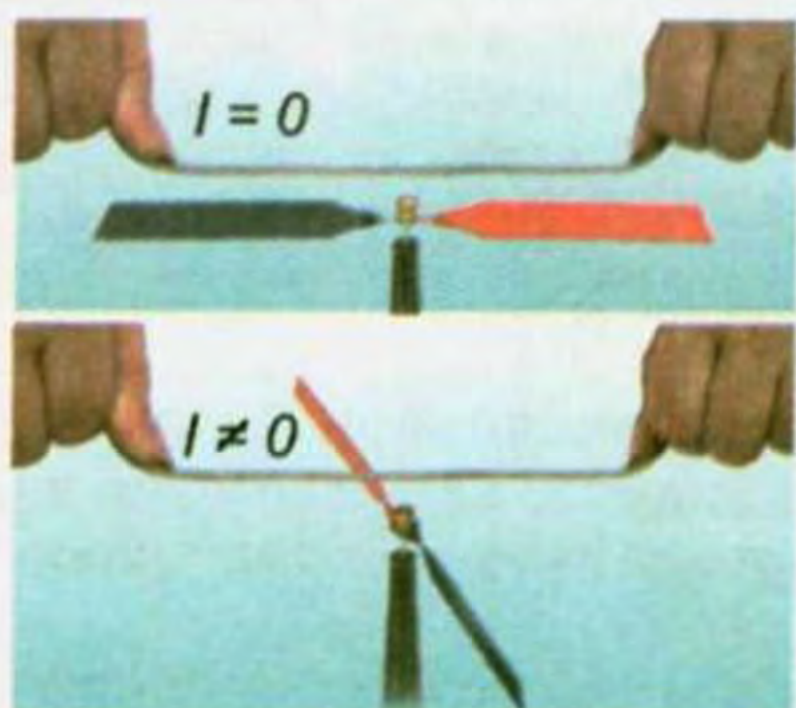
Сьогодні важко уявити життя без широкого використання електричного струму. Він живить радіоприймачі й телевізори, комп'ютери і двигуни електропотягів, допомагає готувати їжу й лікує певні хвороби тощо. Що ж таке електричний струм?

Ви вже знаєте, що до складу атомів, з яких складаються тіла, входять заряджені частинки: протони (позитивно заряджені) та електрони (негативно заряджені). Проте за звичайних умов у шматку металу електричний струм не спостерігається. А як його можна виявити?

При існуванні різних видів електричного струму для них є спільною так звана магнітна дія. Відомий датський учений Ханс Христіан Ерстед у 1820 р. виконав виключно важливий дослід, який пізніше став основою для багатьох технічних пристроїв (мал. 17).

Над магнітною стрілкою, наприклад компаса, розміщений провідник, до якого може бути приєднаний гальванічний елемент. У разі вмикання струму магнітна стрілка відхиляється – спостерігається магнітна дія струму. Саме наявність магнітної дії і є тією властивістю, що дає змогу говорити про наявність електричного струму. Дослідження показали, що струм ство-





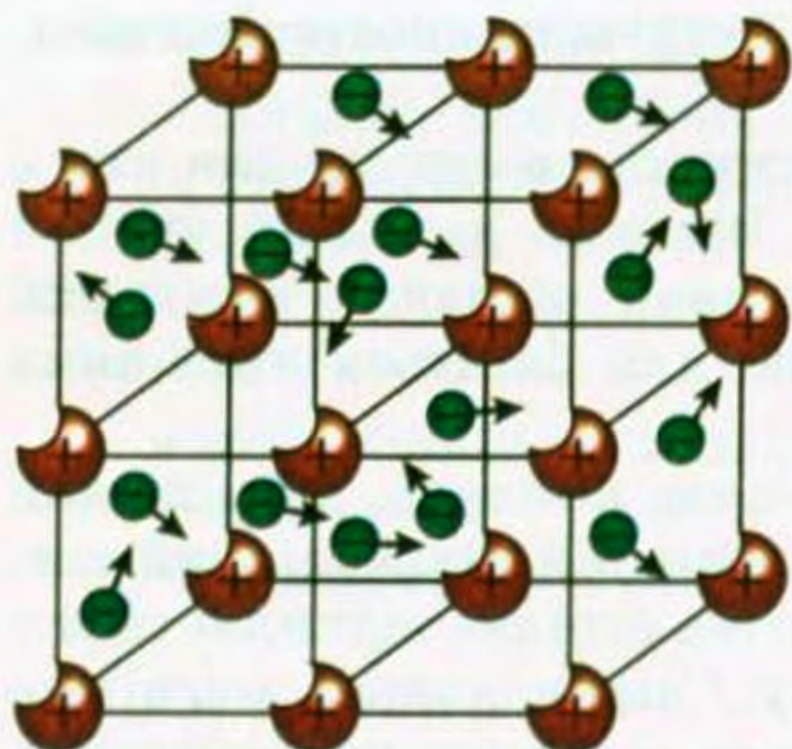
Мал. 17. Дослід з магнітної дії струму

ються вільні електрони (мал. 18). Коли до такого провідника приєднати джерело струму, то на заряджені частинки металу будуть діяти електричні сили: в одному напрямі на позитивно заряджені частинки, а в протилежному – на негативно заряджені. Але йони кристалічних ґраток у металі вільно рухатися не можуть. Поміркуємо, як будуть рухатися вільні електрони.

Зазвичай, хаотичний рух вільних електронів не припиняється, але всі вони ще будуть рухатись у певному напрямі під дією електричного поля, як рій мошок чи бджіл, що переміщується в певному напрямі під дією вітру.

Саме цей напрямлений рух вільних електронів у металі і є струмом. Розглянутий струм називають **струмом провідності**.

Проте таке напрямлене переміщення електронів у провіднику можна отримати і в інший спосіб.



Мал. 18. Будова металу

рюють рухомі заряджені частинки або тіла.

Як бачимо з досліду Ерстеда, у металевому провіднику струм виник тоді, коли до нього приєднали гальванічний елемент – джерело електричного струму. З'ясуємо, які заряджені частинки могли рухатися в металевому провіднику.

Металеві провідники, як ви вже знаєте, мають кристалічні ґратки, що утворюються з позитивно заряджених йонів. Між цими йонами хаотично руха-

Уявіть собі, що металевий стержень падає на землю (на підлогу) вертикально. Ударившись об підлогу, стержень зупиниться – зупиняться жорсткі кристалічні ґратки. А щодо вільних електронів, то вони ще будуть певний час продовжувати свій рух до землі. Цим пояснюється виникнення інерційного електричного струму.

В обох розглянутих випадках струм утворюється напрямленим



переміщенням величезної кількості електронів, що може виникати за різних причин.

Але струм можуть створювати й великі заряджені тіла, що рухаються в певному напрямі. Якщо тіло навіть значних розмірів має електричний заряд і рухається в певному напрямі, то при цьому виникає магнітне поле, що свідчить про наявність електричного струму. Це так званий **конвекційний струм**.

Отже, **електричним струмом** називається напрямлений рух заряджених частинок або заряджених тіл.

**Електричний струм** – це напрямлений рух заряджених частинок або заряджених тіл.



1. Що таке електричний струм?
2. Як можна отримати струм у металевому провіднику?
3. Яка дія струму підтверджує, що він існує?
4. Який дослід провів Ерстед і які з цього були зроблені висновки?



## § 7. Джерела електричного струму

У багатьох випадках електричний струм треба підтримувати протягом тривалого часу, наприклад для кімнатного освітлення, під час плавлення металу в електропечах, для роботи електротранспорту тощо. Для цього необхідні джерела струму.

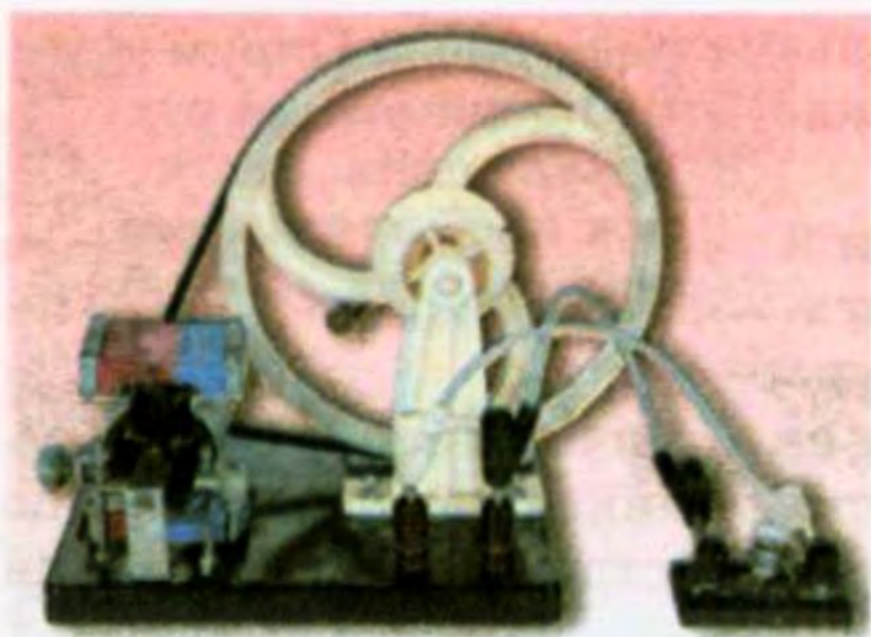
У будь-якому джерелі електричного струму відбувається роз'єднання заряджених частинок, які в ньому є, за рахунок виконання роботи так званими сторонніми силами.

Якщо обертати рамку з певною кількістю витків ізолюваного провідника в магнітному полі, то при цьому виконується механічна робота, полюси генератора заряджаються різнойменно, в лампі виникає струм і вона світиться (мал. 19). Так само працюють генератори на великих електростанціях.

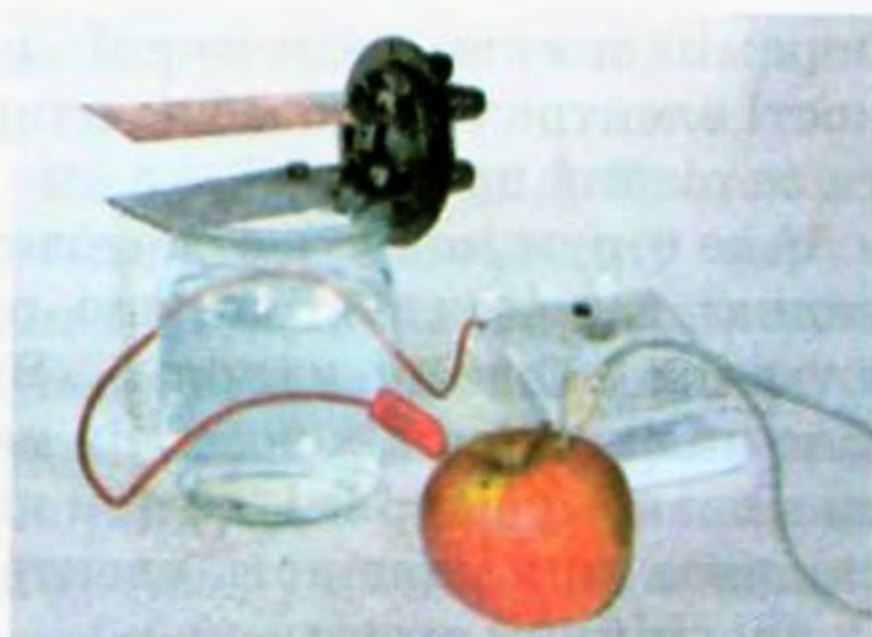
У гальванічних елементах (мал. 20) у розчин певних речовин, наприклад кислот, опускають дві пластинки з різних речовин, що по-різному взаємодіють з розчином. Унаслідок хімічних реакцій ці пластинки (електроди) заряджаються різнойменно і можуть створювати струм протягом тривалого часу.

В акумуляторі («аккумуляре» – нагромаджувати) (мал. 21) у розчин, наприклад сульфатної кислоти, опускають два однакові електроди. Але такий акумулятор струму не дає. Його по-





Мал. 19. Генератор



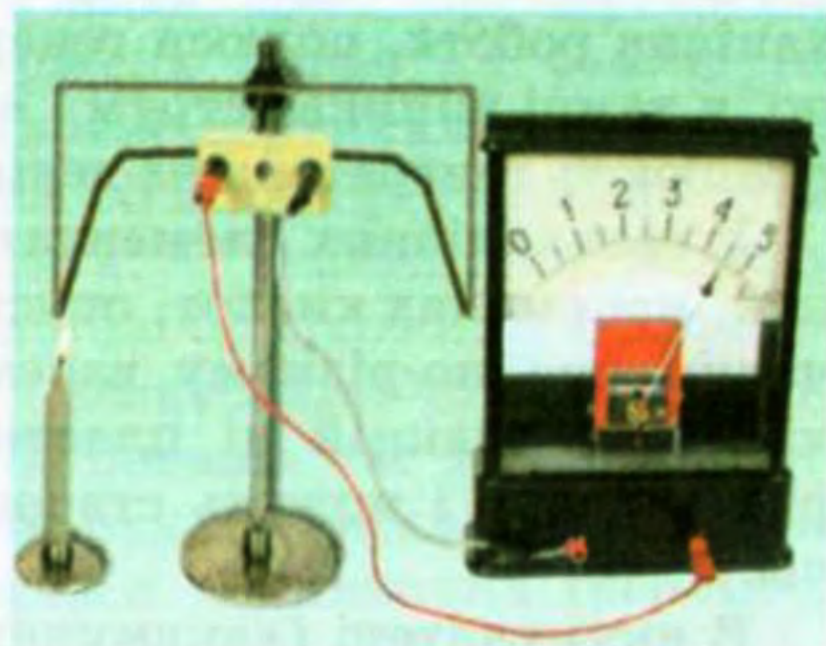
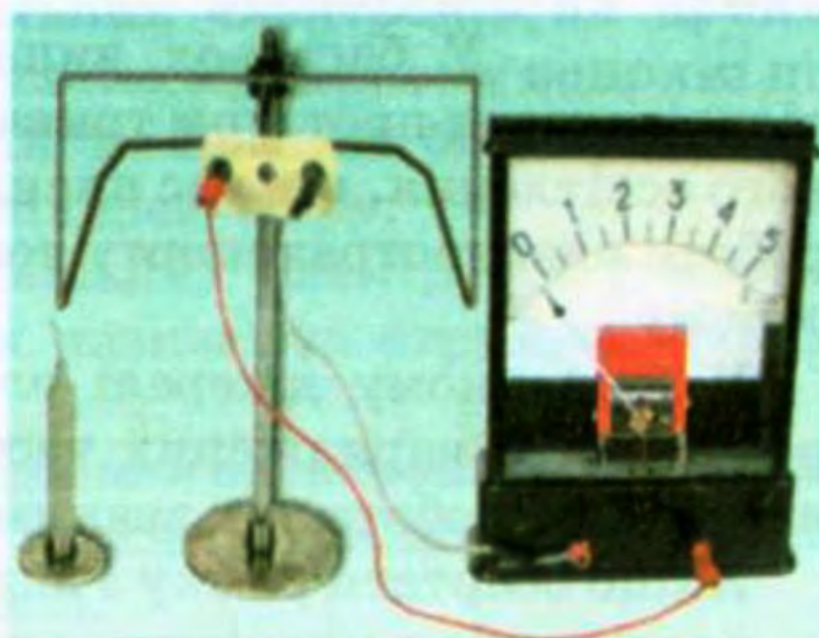
Мал. 20. Гальванічний елемент

передньо потрібно зарядити, пропускаючи через розчин струм певного напрямку. При цьому на електродах відбуваються різні хімічні реакції, і тому вони матимуть вже різні властивості. Тепер акумулятор працюватиме як звичайний гальванічний елемент.

26

Акумулятори можуть створювати струм значної сили і використовуватися багато разів.

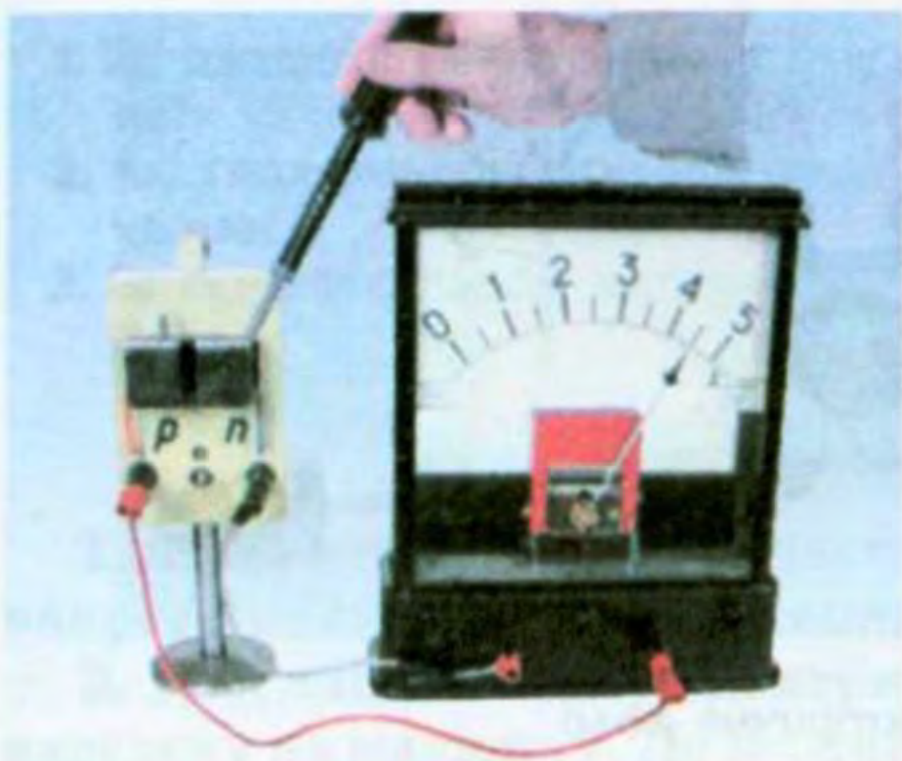
Отримати електричне джерело можна й за рахунок нагрівання певних речовин – це так звані термоелементи (мал. 22). Якщо з'єднати два різнорідні провідники і нагріти одне із з'єднань так, щоб ці з'єднання мали різну температуру, то отримаємо струм. Особливо ефективним у термоелементах є поєднання металевих провідників і напівпровідників (мал. 23).



Мал. 21. Батарея гальванічних елементів та акумулятори

Мал. 22. Термоелемент





Мал. 23. Термoeлемент  
напівпровідниковий



Мал. 24. Сонячна батарея  
супутника

Широко використовуються напівпровідникові перетворювачі енергії світла в електричну енергію – фотоелементи, сонячні батареї (мал. 24).

Отже, в джерелах струму за рахунок сил неелектричного походження відбувається розподіл заряджених частинок, і електроди джерел струму заряджаються різнойменно.

1. Для чого необхідні джерела струму?
2. Що відбувається в джерелах струму?
3. Які джерела струму ви знаєте?
4. Чим відрізняється акумулятор від гальванічного елемента?



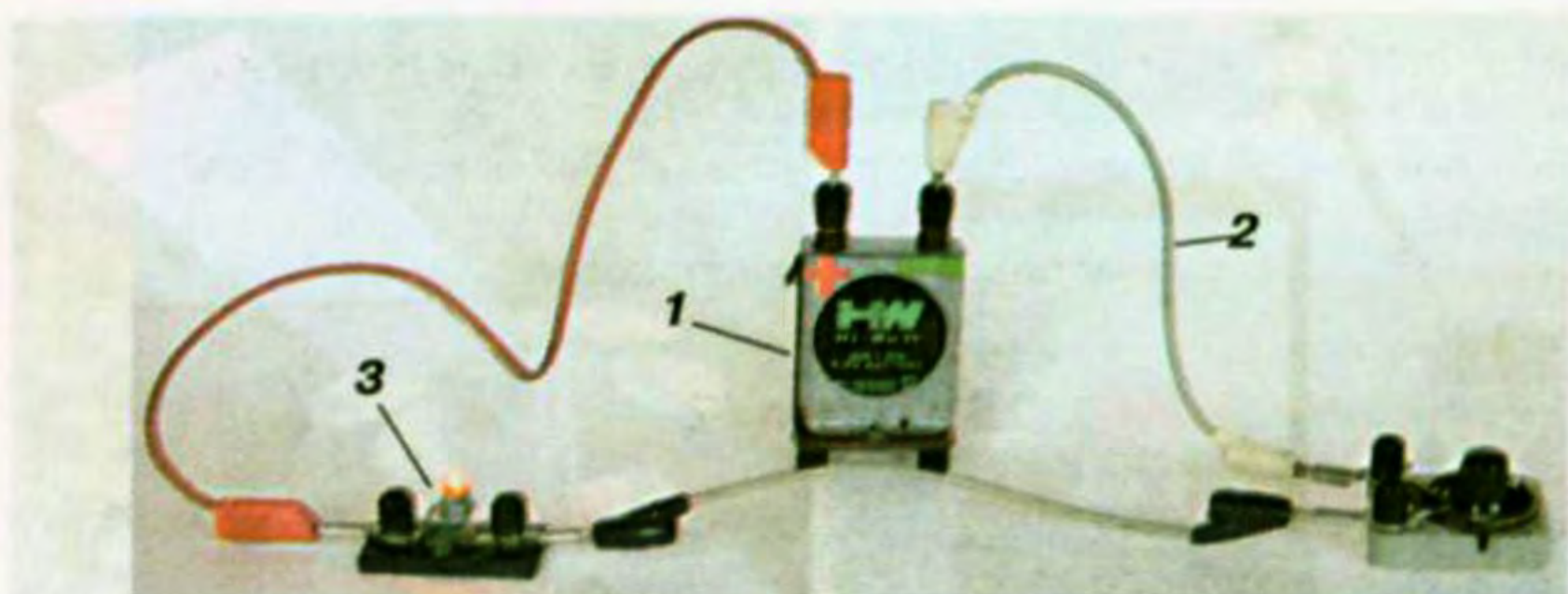
## § 8. Електричне коло

Для практичного використання електричного струму потрібні джерело струму, його споживачі, провідники, за допомогою яких струм передається від джерела до споживача. Для вмикання струму користуються вимикачами, а для запобігання пошкодженню приладів – запобіжниками. На малюнку 25 усі прилади ввімкнені так, що лампа як споживач світиться за рахунок енергії джерела струму – батареї гальванічних елементів. Усі складові частини з'єднані в замкнене коло. Тому такі установки називають *електричними колами*.

Складові частини найпростішого електричного кола: джерело струму, системи з'єднувальних провідників і керуючих пристроїв, споживачі електричної енергії.





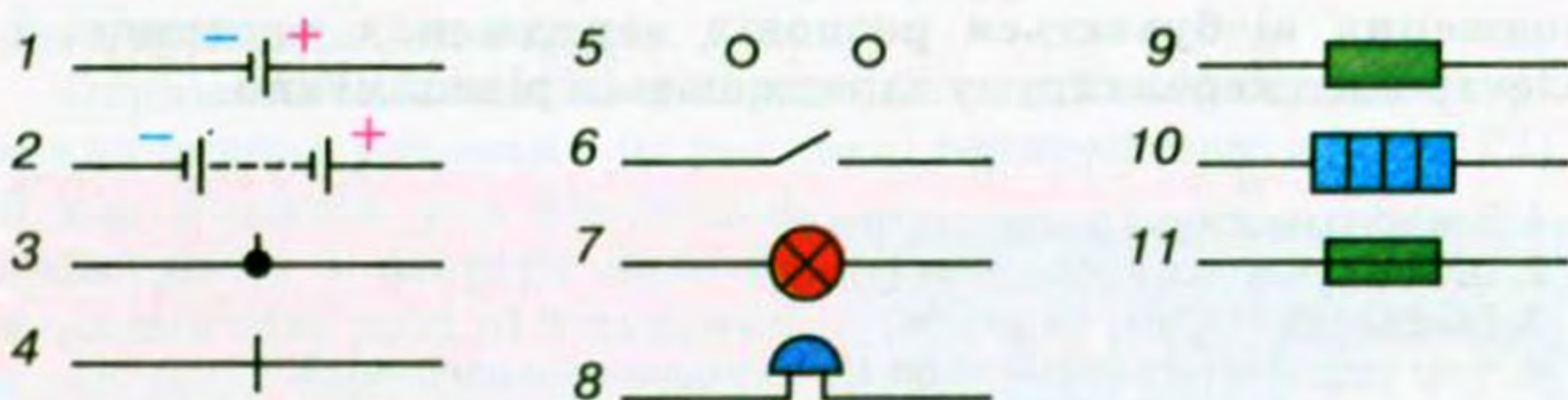


Мал. 25. Електричне коло

У найпростіших випадках до складу електричних кіл входять: 1) джерело струму; 2) системи з'єднувальних провідників і керуючих пристроїв; 3) споживачі електричної енергії.

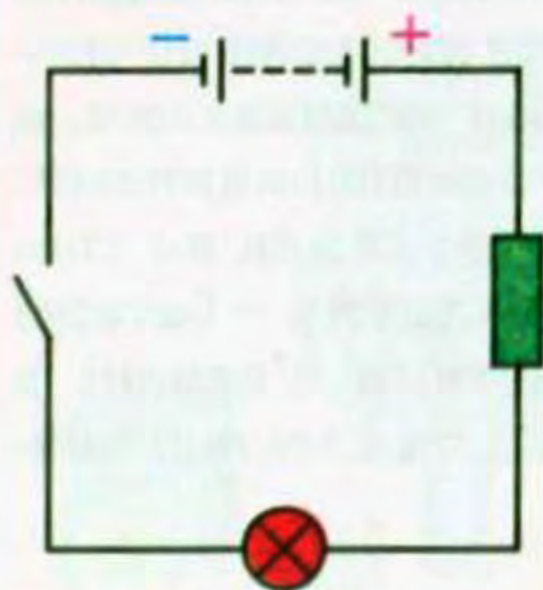
Для вимірювання фізичних величин, що характеризують електричний струм, у коло вмикають різні прилади – амперметри, вольтметри, лічильники електричної енергії тощо.

28



Мал. 26. Умовні позначення складових частин електричних кіл:

1 – гальванічний елемент чи акумулятор; 2 – батарея гальванічних елементів чи акумуляторів; 3 – з'єднані провідники; 4 – провідники, які не з'єднані електрично; 5 – клеми; 6 – вимикач чи ключ; 7 – електрична лампа; 8 – дзвінок; 9 – резистор; 10 – нагрівник; 11 – запобіжник



Мал. 27. Схема електричного кола

У замкнених електричних колах розрізняють їх внутрішню частину (власне джерело струму) і зовнішню (все те, що приєднується до полюсів джерела струму).

Електричні кола зображують за допомогою електричних схем, на яких складові частини кола показують, використовуючи умовні позначення. Деякі з умовних позначень наведені на малюнку 26. А на малюнку 27 показано схему електричного кола, що складається з батареї, провідника-резистора, лампи, вимикача.



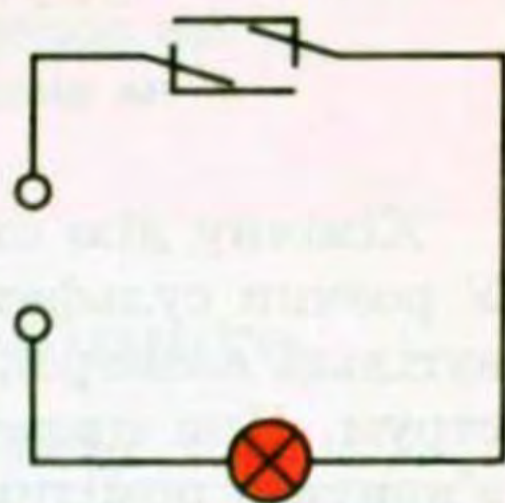
1. Які джерела електричного струму ви знаєте? Яке їхнє призначення?
2. Які споживачі електричної енергії ви знаєте? Які з них є у вас удома?
3. Які основні складові частини електричного кола?

## Вправа 2

1. Розгляньте складові частини кишенькового ліхтарика і накресліть схему його вмикання.

2. Розгляньте схему електричного кола, наведену на малюнку. Де можна використати таке з'єднання?

3. Розробіть схему електричного кола з одним джерелом струму, двома вимикачами (кнопками) та одним електричним дзвінком, який можна вмикати у двох різних місцях.

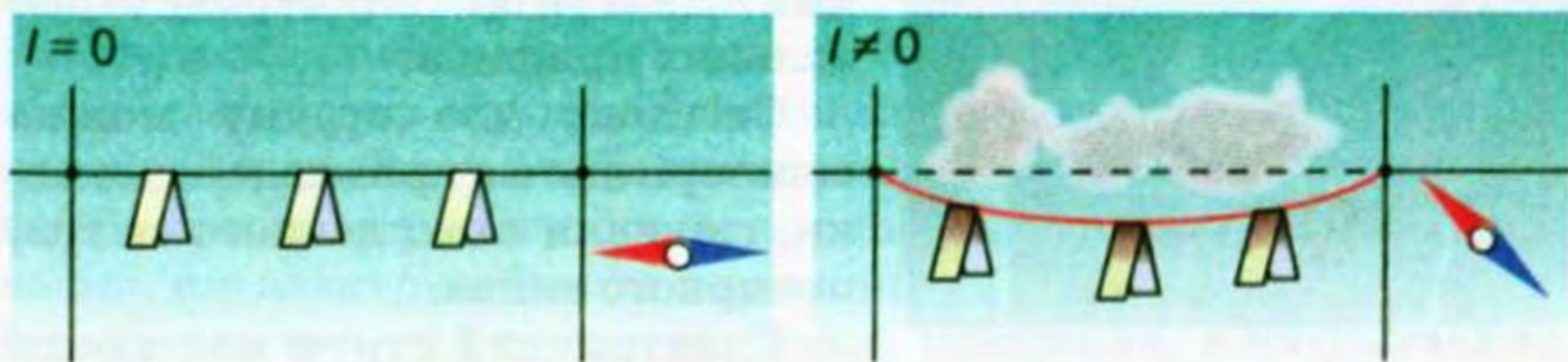


29

## § 9. Дії електричного струму

Як ви вже дізналися, струм має магнітну дію, а про його теплову дію ви знаєте з повсякденного життя (електричний паяльник, електроплита, праска, лампа розжарювання та багато інших приладів).

У багатьох випадках дії струму можуть виявлятися одночасно. На малюнку 28 показано установку, де струм проходить по прямому провіднику, на якому підвішені клаптики паперу. Біля провідника розташована магнітна стрілка, яка відхиляється на певний кут при наявності струму. При вмиканні електричного струму клаптики паперу починають диміти і горіти, а магнітна стрілка повертається. Коли струм вимкнути, то провідник охолоне, стане коротшим і підніметься до попереднього положення, магнітна стрілка повернеться в попередній стан.

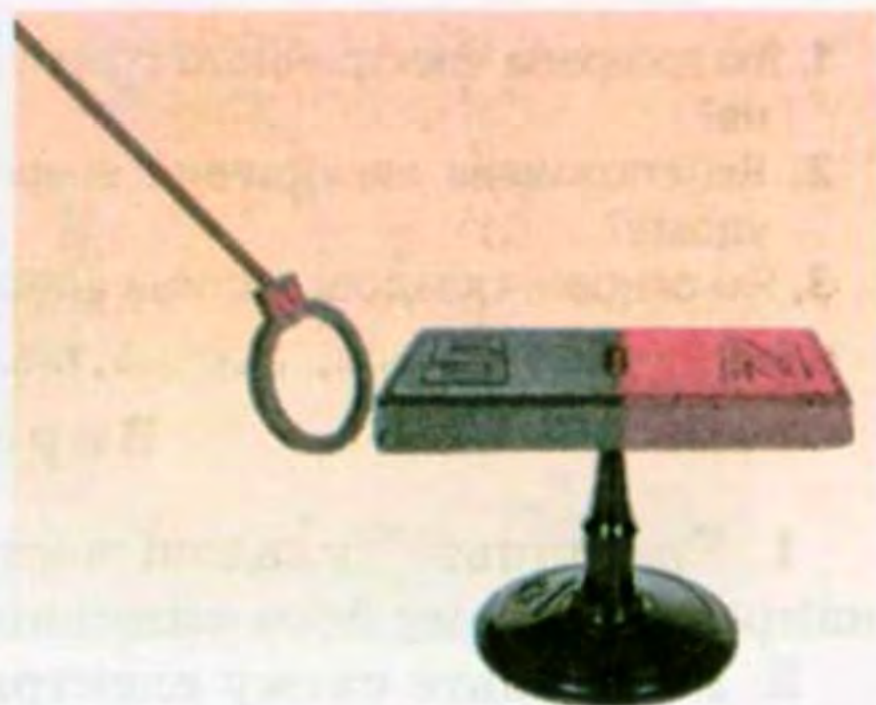


Мал. 28. Теплова і магнітна дії струму





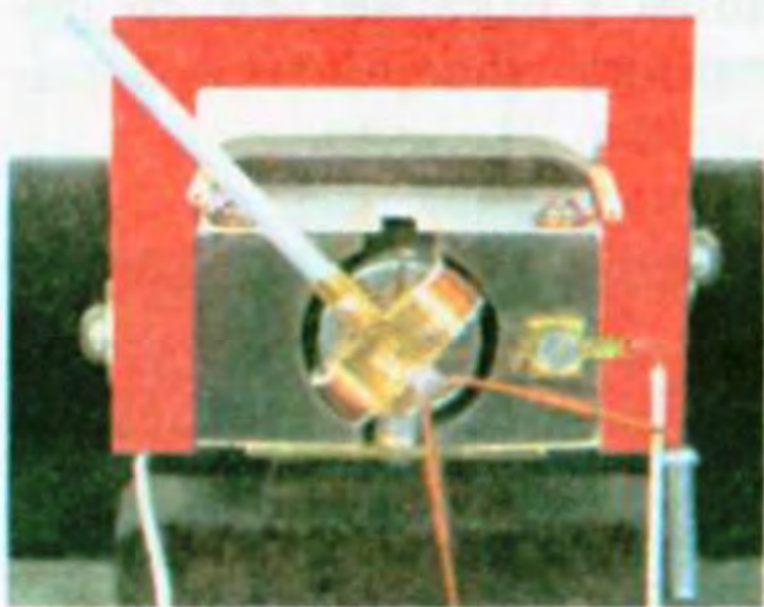
Мал. 29. Хімічна дія струму

Мал. 30.  
Дія постійного магніту  
на кільце зі струмом

Хімічну дію струму можна легко спостерігати на досліді. У розчин сульфату купруму ( $\text{CuSO}_4$ ) занурюємо два однакові вугільні електроди і пропускаємо в такому колі електричний струм. При цьому на одному з електродів через певний час з'явиться помітний шар міді (мал. 29), інтенсивність забарвлення розчину стане меншою, а на іншому електроді мідь не виділиться.

Дослід Ерстеда переконує, що провід зі струмом діє на магнітну стрілку (постійний магніт). Але можна спостерігати і дію постійного магніту на кільце зі струмом (мал. 30). При вмиканні струму котушка притягується до магніту або ж відштовхується від нього. Все залежить від того, якими полюсами до електричного кола приєднується джерело струму.

Рамка з провідника зі струмом у магнітному полі повертається на деякий кут у певному напрямі. Якщо ж поміняти місцями полюси джерела струму, то рамка буде повертатися у протилежному напрямі. На цьому ґрунтується дія гальванометрів – приладів для виявлення електричного струму (мал. 31). Стрілка такого гальванометра з'єднана з котушкою, вміщеною в магнітне поле магніту. Вона й показує наявність струму в колі.

Мал. 31. Вимірювальний  
механізм гальванометра

Повертання рамки в магнітному полі (механічна дія струму) покладено в основу дії електричних двигунів, електровимірювальних приладів.

Світлову дію струму можна спостерігати на прикладі блискавки, свічення ламп денного світла, полярного сяйва.

Електричний струм має також фізіологічну дію, тобто впливає на живі організми, і в багатьох ви-



падках буває дуже небезпечним. Тому під час використання електричного струму треба обов'язково дотримуватися правил безпеки.

**Унаслідок протікання електричного струму виникають механічна, теплова, хімічна, магнітна, світлова дії струму.**

1. Наведіть відомі вам приклади теплової дії струму.
2. Де можна спостерігати хімічну дію струму?
3. У чому проявляється магнітна дія струму? Де це явище може бути використане?
4. Які ще дії струму ви знаєте?

## § 10. Природа електричного струму. Напря́м струму

Ви вже знаєте, що метали у твердому стані мають кристалічну будову. Позитивно заряджені йони утворюють кристалічні просторові ґратки, а в просторі між ними хаотично рухаються електрони, що втратили зв'язок зі своїми атомами, так звані вільні електрони.

У звичайному стані, коли метал незаряджений, сумарний негативний заряд усіх вільних електронів за значенням дорівнює сумарному заряду всіх позитивно заряджених йонів. Незаряджений провідник називають електрично нейтральним.

Якщо до металевого провідника приєднати полюси джерела струму, то в ньому виникне електричне поле. Внаслідок цього вільні електрони, крім хаотичного, ще матимуть і рух у певному напрямі – це і є електричний струм провідності в металах. Про це мова вже йшла раніше.

Швидкість напрямленого руху вільних електронів дуже мала порівняно зі швидкістю їхнього хаотичного руху – усього кілька міліметрів за секунду, проте електричне поле у провіднику поширюється зі швидкістю близько 300 000 км/с і практично всі вільні електрони майже одночасно починають рухатися у певному напрямі. Тому на практиці вважається, що струм виникає в усіх точках електричного кола одночасно. Ми просто не помічаємо, що електричне поле в провіднику виникає не одночасно, а поширюється від точки до точки, щоправда, з надзвичайно великою швидкістю, яка дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі і є найбільшою, що відома науці.



Якщо в металах електричний струм створюють вільні електрони, то в розчинах і розплавах кислот, лугів, солей – позитивно і негативно заряджені йони. Під дією електричного поля позитивно заряджені частинки рухаються в одному напрямі, а негативно заряджені – у протилежному. В газах струм утворюють рухомі йони обох знаків, а також електрони.

У багатьох випадках ми говоримо не про напрям руху заряджених частинок, а про напрям струму. То який же він, цей напрям?



**Під дією електричного поля вільні позитивно заряджені частинки рухаються в одному напрямі, а негативно заряджені – у протилежному.**

Цілком умовно та історично склалося так, що за напрям струму взяли той напрям, у якому рухаються (або могли б рухатися) позитивно заряджені частинки, тобто напрям від позитивно зарядженого полюса джерела струму до негативно зарядженого.

Цим правилом і користуються в сучасній науці й техніці.

32



1. Як пояснити, що за звичайних умов метал електрично нейтральний (незаряджений), хоча до його складу входять і заряджені частинки?
2. Як змінюється характер руху вільних електронів у металі, коли в ньому виникає електричне поле?
3. Яка природа електричного струму в металі?
4. Що мають на увазі, коли говорять про швидкість поширення струму в провіднику?
5. Напрямок руху яких заряджених частинок взято за напрям струму?
6. Як напрям струму пов'язаний із зарядами полюсів джерела струму?



## § 11. Сила струму та її вимірювання

Дія електричного струму в різних випадках може бути сильнішою чи слабкішою. Дослідження показали, що результат дії струму залежить від заряду, який переносять заряджені частинки в електричному колі за певний час.

**Силою струму** називається величина, що характеризує швидкість перенесення заряду частинками, які створюють струм, через поперечний переріз провідника. Силу струму позначають  $I$ .

Якщо за час  $t$  через поперечний переріз провідника переноситься сумарний заряд  $q$ , то сила струму дорівнюватиме:

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

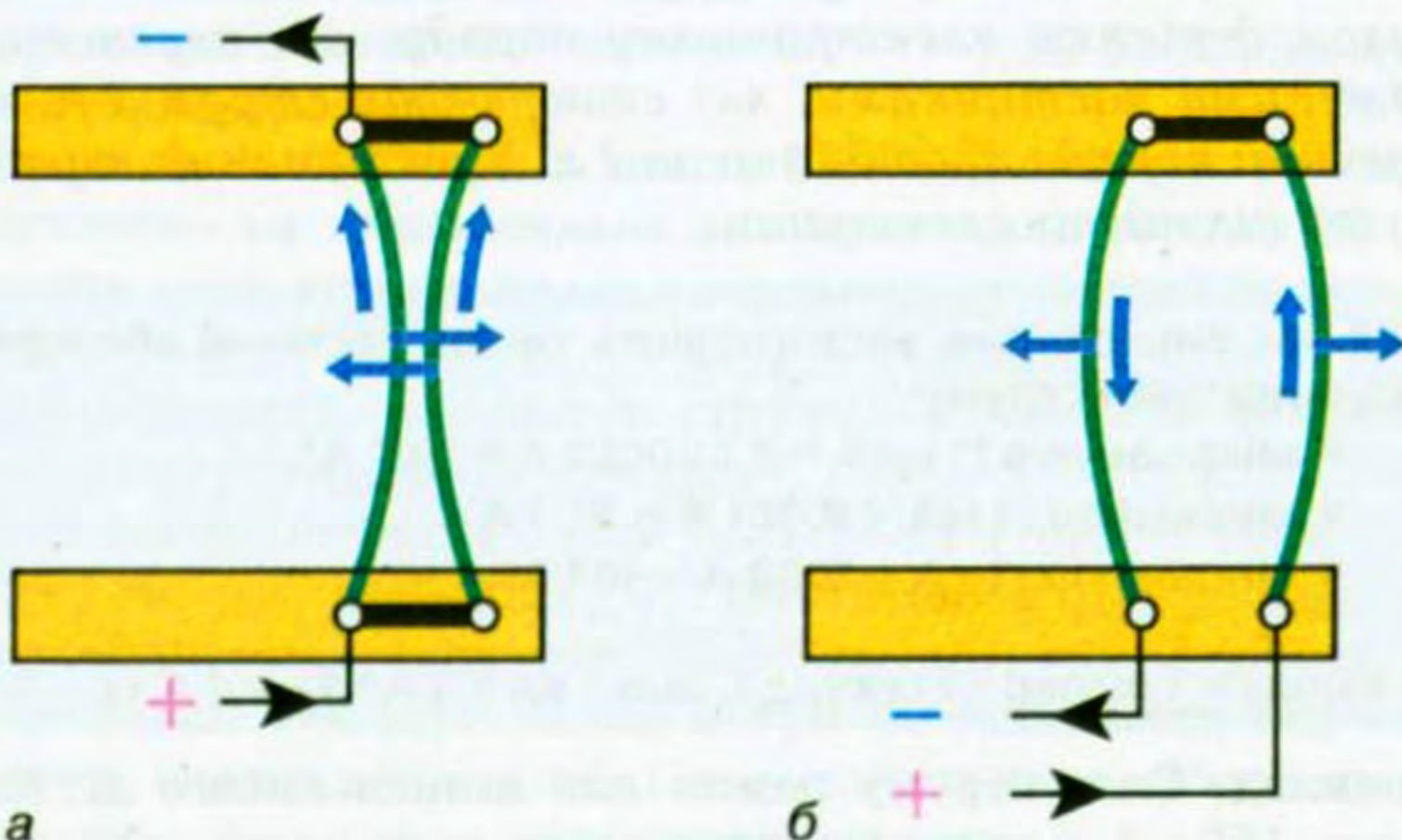
На Міжнародній конференції з мір та ваги у 1948 р. було вирішено в основу одиниці сили струму покласти явище взаємодії двох провідників зі струмом.

33

Одиниця сили струму (ампер) =  $\frac{\text{одиниця заряду (кулон)}}{\text{одиниця часу (секунда)}}.$

$$1 \text{ А} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}}.$$

Виконаємо досліди (мал. 32). Візьмемо два гнучкі провідники, які приєднані до джерела струму, і розмістимо їх паралельно один одному.



Мал. 32. Магнітна взаємодія провідників зі струмом



Якщо пропустити струм по провідниках в одному напрямі (мал. 32, а), то провідники притягуватимуться один до одного, а якщо у протилежних напрямках (мал. 32, б), то відштовхуватимуться.

Вимірювання сили взаємодії провідників показують, що вона залежить від довжини провідників, відстані між ними, середовища, в якому вони розміщені, та від сили струму в цих провідниках.

За всіх однакових умов чим більша сила струму в кожному проводі, тим з більшою силою вони притягуються або відштовхуються (взаємодіють між собою).

Уявімо два дуже тонкі і дуже довгі паралельні провідники, розташовані у вакуумі на відстані 1 м один від одного. Сила струму в провідниках однакова. За одиницю сили струму прийнято таке її значення, при якому відрізки нескінченно довгих паралельних провідників завдовжки 1 м взаємодіють із силою  $2 \cdot 10^{-7}$  Н. Цю одиницю називають **ампером** на честь французького фізика і математика Андре-Марі Ампера і позначають літерою А.

34



**Андре-Марі Ампер (1775–1836)** – французький фізик, математик, хімік. Основні праці присвячені вивченню електромагнітних явищ. У 1820 р. сформулював правило для встановлення напрямку дії магнітного поля струму на магнітну стрілку.

Саме через одиницю сили струму визначають одиницю електричного заряду – кулон (Кл).

Оскільки  $I = \frac{q}{t}$ , то  $q = It$ . Якщо взяти  $I = 1$  А,  $t = 1$  с, то отримаємо одиницю заряду – кулон.

*Кулон дорівнює електричному заряду, що переноситься зарядженими частинками, які створюють струм 1 А, через поперечний переріз провідника за 1 с. Електричний заряд має ще назву кількість електрики.*



Під час вимірювань застосовують також частинні або кратні одиниці сили струму:

- мікроампер ( $1 \text{ мкА} = 0,000001 \text{ А} = 10^{-6} \text{ А}$ ),
- міліампер ( $1 \text{ мА} = 0,001 \text{ А} = 10^{-3} \text{ А}$ ),
- кілоампер ( $1 \text{ кА} = 1000 \text{ А} = 10^3 \text{ А}$ ).

**1 кулон = 1 ампер · 1 секунда, або 1 Кл = 1 А · 1 с = 1 А · с.**

**Приклад.** Сила струму лампи для кишенькового ліхтарика дорівнює 150 мА, а ви затрачаєте на дорогу від школи додому ввечері 15 хв. Який заряд проходить через спіраль лампи за цей час?



Дано:

$$I = 150 \text{ мА} = 0,150 \text{ А},$$

$$t = 15 \text{ хв} = 900 \text{ с}.$$

.....  
 $q = ?$ 

Розв'язання

$$I = \frac{q}{t}, \quad q = It.$$

$$q = 0,150 \text{ А} \cdot 900 \text{ с} = 135 \text{ Кл}.$$

Відповідь.  $q = 135 \text{ Кл}.$ 

Для вимірювання сили струму розроблено значну кількість різноманітних приладів (амперметри, міліамперметри, мікроамперметри тощо). Ми вже розглядали будову гальванометра, де використано дію магнітного поля постійного магніту на рамку зі струмом (прилади такої конструкції називаються магнітоелектричними). Гальванометри використовують для виявлення малої сили струму.

На малюнку 33 показано амперметр. Цей прилад вийнято з корпусу, щоб можна було побачити його будову та всі необхідні позначення на шкалі.

З вимірюванням електричних величин ви зустрічаєтесь вперше, тому розглянемо, як слід це робити. Раціональною є така послідовність:

1. Установити, для вимірювання якої фізичної величини використовується даний прилад.

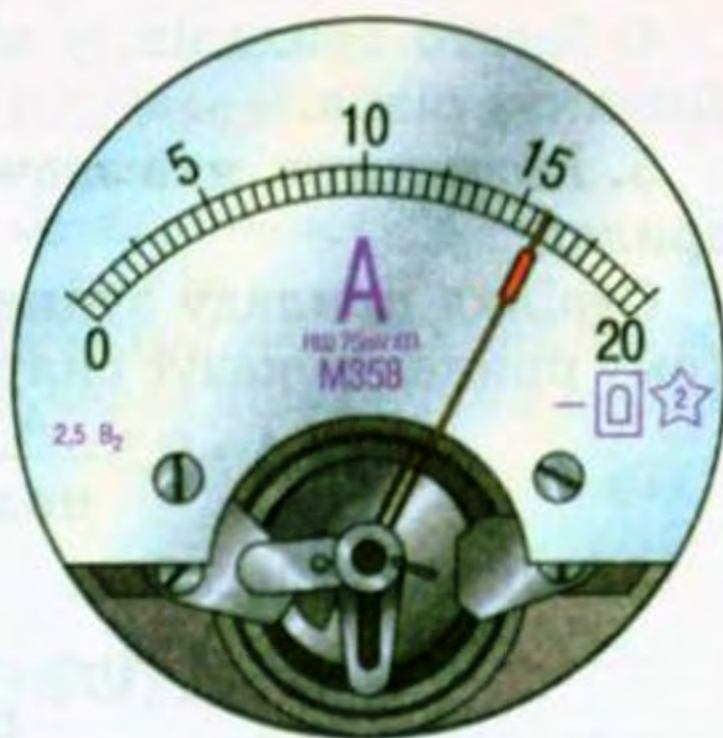
На шкалі приладу є літера А, яка означає, що це амперметр – прилад для вимірювання сили струму.

2. Установити, на яке максимальне значення вимірюваної величини розраховано прилад.

Оскільки біля літери А немає ніяких позначень, то прилад розраховано на максимальне значення сили струму 20 А. Це значення сили струму не слід перевищувати, щоб не зіпсувати прилад.

3. Установити, для якого струму (постійного чи змінного) можна використовувати прилад.

Досі ми розглядали лише постійний струм – тобто струм, який не змінює свого напрямку. Постійний струм на шкалі приладу позначається горизонтальною рисою «—». Змінний струм позначається «~» (про такий струм ви дізнаєтесь під час подальшого вивчення фізики). Отже, цей прилад можна використовувати лише в колах постійного струму.



Мал. 33. Амперметр





Постійний струм на шкалі приладу позначається горизонтальною рисою «-», а змінний – «~».

4. Визначити ціну поділки шкали приладу.

Ціну поділки найраціональніше визначати так. Наприклад, стрілка зупинилася між двома позначками шкали: 15 і 20 А. Тепер підрахуємо, скільки є проміжків між позначками на шкалі – їх тут 10. Ціна поділки шкали в інтервалі від 15 до 20 А:

$$\frac{20 \text{ А} - 15 \text{ А}}{10 \text{ под.}} = 0,5 \frac{\text{А}}{\text{под.}}$$

Якщо ціна поділки шкали в усіх її ділянках однакова, що має місце в розглянутому нами випадку, то таку ціну поділки можна визначити за максимальним значенням вимірюваної величини (20 А) і повним числом поділок на шкалі (40):

$$\frac{20 \text{ А}}{40 \text{ под.}} = 0,5 \frac{\text{А}}{\text{под.}}$$

36

Є багато приладів, у яких ціна поділки шкали в різних її ділянках різна.

5. Визначити, яке значення вимірюваної величини показує прилад.

Стрілка приладу зупинилася на дві поділки далі від 15 А. Тому прилад показує силу струму:

$$I = 15 \text{ А} + 0,5 \frac{\text{А}}{\text{под.}} \cdot 2 \text{ под.} = 15 \text{ А} + 1 \text{ А} = 16 \text{ А.}$$

Або іншим способом:

$$I = 0,5 \frac{\text{А}}{\text{под.}} \cdot 32 \text{ под.} = 16 \text{ А.}$$

Для вимірювання сили струму амперметр умикають у коло послідовно з тим приладом, силу струму в якому вимірюють.

У фізиці, де абсолютно точні вимірювання практично не трапляються, існують методи визначення похибок вимірювань.

Якщо стрілка зупинилася між поділками, то значення заокруглюють до найближчої поділки.

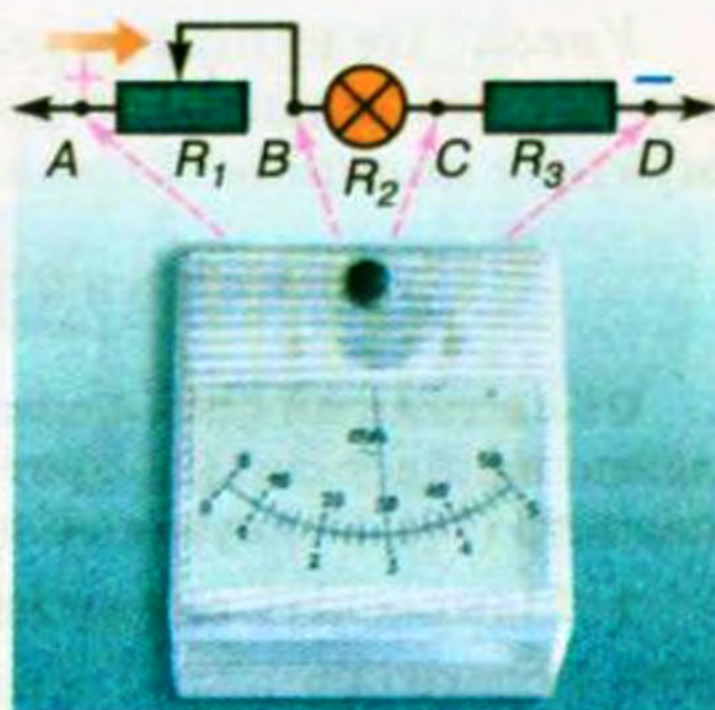
Якщо прилад можна використовувати в колах постійного струму, то біля клем, до яких приєднуються провідники, стоять знаки «+» і «-» або лише «+» чи «-». До клем «+» слід приєднувати провідник від позитивно зарядженого полюса джерела струму, що також позначається знаком «+».

На малюнку 34 показано електричне коло, до якого входять провідники і споживачі. Усі вони з'єднані так, що початок наступного споживача приєднується до кінця попереднього і т. д. (послідовно).



Якщо амперметр увімкнути в точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , то він буде показувати однакову силу струму. Пояснюється це тим, що в замкненому колі, коли немає ніяких відгалужень провідників, через будь-який поперечний переріз провідника за одиницю часу переноситься однаковий заряд.

Заборонено приєднувати амперметри безпосередньо до джерела струму без послідовно увімкнених з ним споживачів, оскільки це може вивести його з ладу.



Мал. 34. Послідовне з'єднання

1. Від чого залежить результат дії струму?
2. Якою одиницею вимірюється сила струму?
3. Яке явище використано для встановлення одиниці сили струму?
4. Що таке сила струму, яка дорівнює 1 А?
5. Як визначається одиниця заряду?

### Вправа 3

1. Яку силу струму показує амперметр, зображений на малюнку 34? Який заряд переноситься через поперечний переріз провідників у даному колі за 1 с?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Вимірювання сили струму за допомогою амперметра

**Мета.** Навчитися складати електричне коло, вимірювати силу струму в різних ділянках електричного кола.

#### Вказівки до роботи

Силу струму в електричному колі вимірюють за допомогою амперметра. Цей вимірювальний прилад вмикають в електричне коло завжди послідовно з тим приладом, в якому хочуть виміряти силу струму. При цьому обов'язково дотримуються полярності приєднання приладу: до клеми «+» амперметра приєднують провідник, що з'єднується з позитивним полюсом джерела струму (також позначається знаком «+»), а до клеми «-» амперметра – провідник, який через споживача з'єднується з негативним полюсом джерела струму (позначається «-»).



**Увага !** Не приєднуйте амперметр безпосередньо до джерела струму без послідовно увімкнених з ним споживачів і дотримуйтеся полярності вмикання вимірювального приладу.

### Виконання роботи (варіант 1)

Обладнання (див. форзац I, а): джерело постійного струму (1 або 4), лампа на підставці (2), дротяний резистор (3), ключ-вимикач (7), амперметр (10), з'єднувальні провідники (8).

1. Накресліть схему електричного кола з послідовно з'єднаних елементів.

2. Складіть електричне коло за накресленою схемою. Амперметр увімкніть між позитивним полюсом джерела струму і ключем.

3. Увімкніть струм, зніміть покази амперметра і запишіть значення сили струму  $I_1$ . Вимкніть струм.

4. Амперметр увімкніть між лампою і дротяним резистором. Увімкніть струм і запишіть значення сили струму  $I_2$ .

38

5. Увімкніть амперметр у будь-яку іншу точку ділянки кола. Виміряйте силу струму  $I_3$ .

6. Порівняйте значення сил струмів  $I_1, I_2, I_3$ . Зробіть висновок і обґрунтуйте його.

### Виконання роботи (варіант 2)

Обладнання (див. форзац I, б): джерело струму (2), комутаційна панель з шаблонами (1), амперметр (3), електрична лампочка (6), резистор (7), з'єднувальні провідники (14).

1. Запишіть характеристики амперметра в таблицю 1.

Таблиця 1

Вимірювана величина	Ціна поділки шкали	Для якого струму використовують прилад	Межі вимірювання

2. Накресліть 4 схеми електричного кола з послідовно з'єднаних елементів.

3. Позначте на схемах для різних точок ввімкнення амперметра (відповідно до шаблонів) напрям струму в колі та полярність амперметра.

4. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних елементів: джерела постійного струму, вимикача, резистора, амперметра та електричної лампи. Вигляд установки показано на малюнку 35.

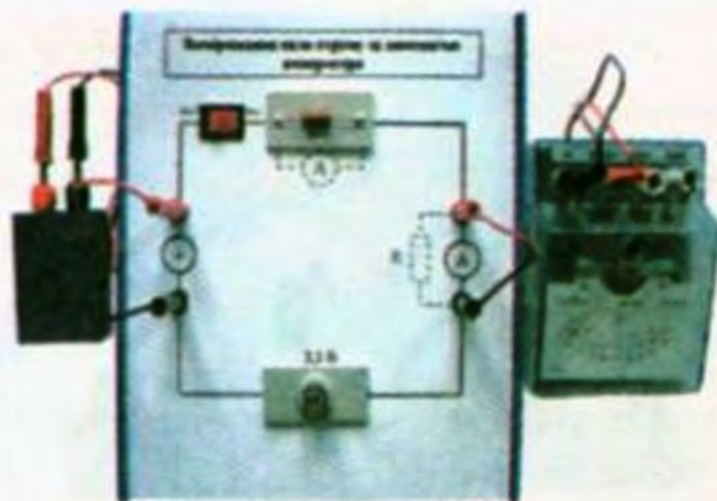


5. Увімкніть струм. Установіть, на скільки поділок відхилилася стрілка амперметра, та запишіть значення сили струму  $I_1$  у таблицю 2. Вимкніть струм.

6. Повторно виміряйте сили струму при інших з'єднаннях елементів у електричному колі.

7. Запишіть значення сили струму  $I_2, I_3, I_4$  до таблиці 2.

8. Порівняйте значення сили струму  $I_1, I_2, I_3, I_4$ . Зробіть висновок і обґрунтуйте його.



Мал. 35

Таблиця 2

№	Схема розміщення амперметра	Покази амперметра, кількість поділок	Сила струму $I$ , А
1			
2			
3			
4			

## § 12. Електрична напруга та її вимірювання

Під час проходження електричного струму, наприклад у металевому провіднику, крім хаотичного руху, вільні електрони під дією електричного поля набувають ще й деякої швидкості в певному напрямі, тобто їх кінетична енергія зростає. Це означає, що електричне поле виконує роботу.

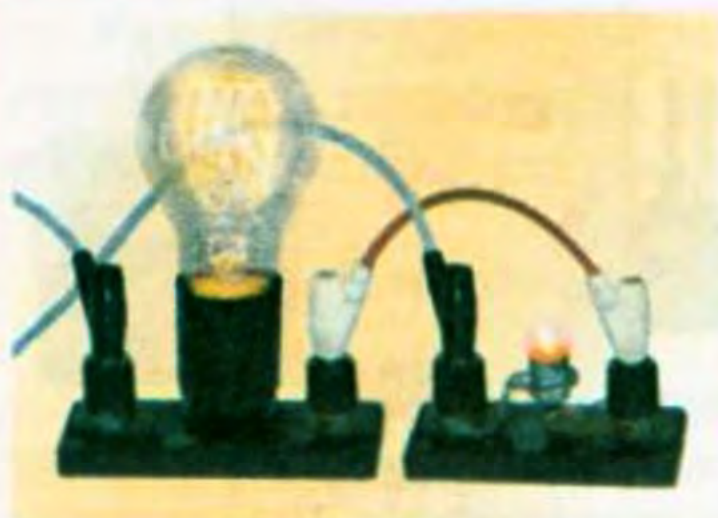
При виникненні електричного струму в металевому провіднику вільні електрони переміщуються в певному напрямі, не припиняючи свого хаотичного руху.



Під час проходження струму вільні електрони стикаються з йонами кристалічних ґраток, віддаючи їм частину енергії. Йони коливаються інтенсивніше – внутрішня енергія кристалічних ґраток зростає. Отже, у цьому випадку температура провідника підвищується. Ви вже знаєте, що теплова дія струму залежить від сили струму: чим більша сила струму, тим сильніше нагрівається провідник.

Проте не лише сила струму визначає його роботу. Проведемо такий дослід. До електричної мережі приєднаємо послідовно





Мал. 36. Послідовно з'єднані лампа для кишенькового ліхтарика та звичайна лампа для освітлення кімнати

з'єднані лампи для кишенькового ліхтарика і для освітлення кімнати (мал. 36).

Відомо, що в разі такого вмикання сила струму в будь-якій точці кола однакова. Але лампа для кімнати дає, вочевидь, більше тепла і яскравіша, ніж лампа для кишенькового ліхтарика. Тобто робота, яку виконує струм в обох лампах, неоднакова. Щоб охарактеризувати таку властивість струму, вводять фізичну величину, яка називається *електричною напругою*.

**Напруга визначає роботу, яку виконує електричне поле при перенесенні заряду 1 Кл на даній ділянці кола (між двома його точками):**

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

40

Одиницею напруги є вольт, який позначають В.

Одиницю напруги – вольт – назвали на честь італійського вченого Алессандро Вольты (1745–1827), який створив перший гальванічний елемент, поклавши початок практичним застосуванням електрики.

Застосовують також частинні й кратні до вольту одиниці:

- мікровольт (1 мкВ = 0,000001 В =  $10^{-6}$  В),
- мілівольт (1 мВ = 0,001 В =  $10^{-3}$  В),
- кіловольт (1 кВ = 1000 В =  $10^3$  В),
- мегавольт (1 МВ = 1 000 000 В =  $10^6$  В).

*Вольт дорівнює такій електричній напрузі на кінцях провідника (між двома точками кола), за якої робота перенесення електричного заряду в 1 Кл по цьому провіднику дорівнює 1 Дж:*

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}.$$

### Вимірювання напруги

Для вимірювання напруги виготовляють прилади, що називаються вольтметрами. На малюнку 37 показаний один з вольтметрів. Послідовність дій під час вимірювання напруги (як і інших фізичних величин) така сама, як і під час вимірювання сили струму (див. § 11).



1. На шкалі приладу є літера V, яка означає, що це вольтметр – прилад для вимірювання напруги.

2. Біля літери V немає ніяких позначень, отже, прилад розрахований на вимірювання напруги до 3 В.

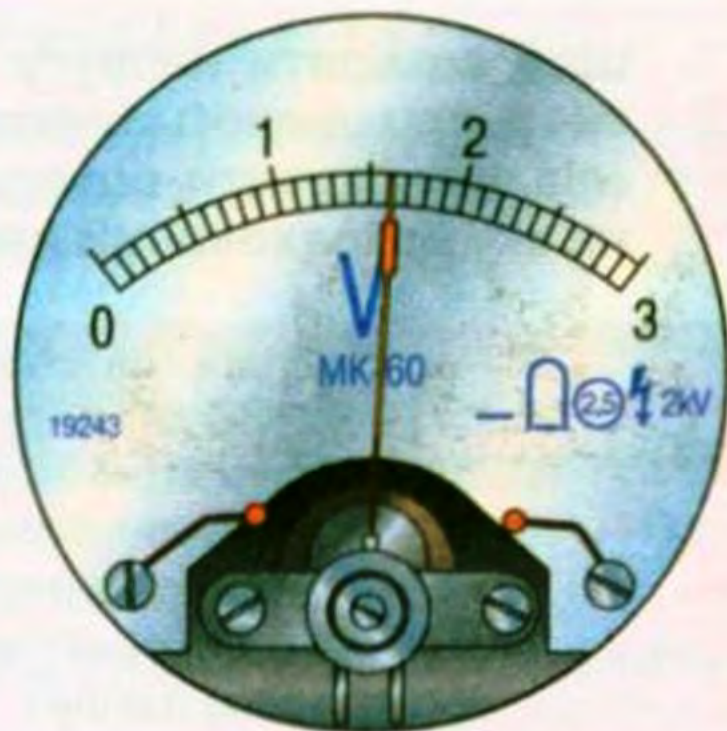
3. Оскільки на шкалі є пряма горизонтальна риска «-», то прилад можна використовувати лише в колах постійного струму.

4. Ціна поділки шкали приладу в інтервалі від 1 до 2 В:

$$\frac{2 \text{ В} - 1 \text{ В}}{10 \text{ под.}} = 0,1 \frac{\text{В}}{\text{под.}}$$

5. Прилад показує напругу (з округленням до найближчої від стрілки риски):

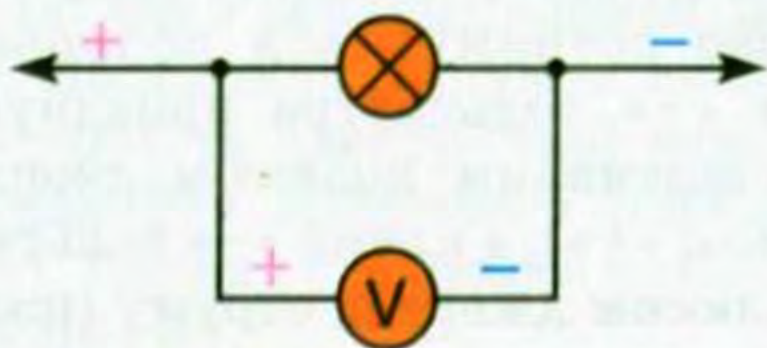
$$U = 1 \text{ В} + 0,1 \frac{\text{В}}{\text{под.}} \cdot 6 \text{ под.} = 1 \text{ В} + 0,6 \text{ В} = 1,6 \text{ В.}$$



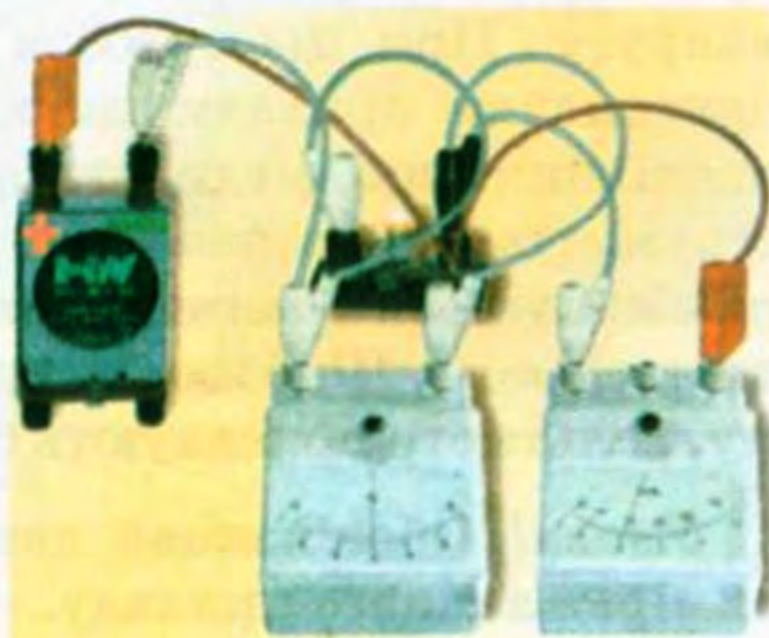
Мал. 37. Вольтметр

Як і в інших приладах, якщо вони можуть використовуватися в колах постійного струму, біля їх клем чи затискачів ставлять знаки «+» (плюс) і «-» (мінус) або ж лише «+» чи «-». Ці затискачі необхідно з'єднувати з провідником, що йде відповідно до позитивного полюса джерела постійного струму або до негативного.

На відміну від амперметра, що вмикається в розрив електричного кола для вимірювання сили струму в даній точці кола, вольтметр приєднується паралельно ділянці кола, на якій вимірюється напруга. На малюнку 38 показано схему вмикання вольтметра для вимірювання напруги на лампі, а на малюнку 39 – зовнішній вигляд установки, до якої входить і амперметр.



Мал. 38. Схема вмикання вольтметра



Мал. 39. Установка для вимірювання напруги на лампі та сили струму в колі





Щоб виміряти напругу на полюсах джерела струму, вольтметр приєднують безпосередньо до його затискачів. Проте слід враховувати, що вона не повинна перевищувати напругу, на яку розрахований даний вольтметр.



1. На якому досліді можна побачити необхідність введення поняття електричної напруги?
2. Що таке електрична напруга і як її можна визначити?
3. Яку фізичну величину як одиницю вимірювання використовують для вимірювання напруги?
4. Для чого використовують вольтметр і як його приєднують до електричного кола?

### Вправа 4

1. Накресліть схему електричного кола, що складається з батареї для кишенькового ліхтарика, вимикача, лампи, вольтметра (вимірює напругу на полюсах джерела), амперметра (вимірює силу струму в лампі).

2. На малюнку 40 показані амперметр і вольтметр, що ввімкнені так само, як у завданні 1. Що показують ці прилади та що це означає?



Мал. 40

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### Вимірювання електричної напруги за допомогою вольтметра

**Мета.** Навчитися складати електричне коло з використанням вольтметра, вимірювати напругу на різних ділянках електричного кола.

#### Вказівки до роботи

Напругу на різних ділянках електричного кола вимірюють за допомогою вольтметра. Цей вимірювальний прилад завжди приєднують паралельно до ділянки кола, на якій вимірюють напругу. При цьому обов'язково дотримуються полярності приєднання приладу: до клеми «+» вольтметра приєднують провідник, що з'єднується з позитивним полюсом джерела струму (також позначається знаком «+»), а клемма «-» вольтметра з'єднується з негативним полюсом джерела струму (позначається «-»). Щоб виміряти напругу на полюсах джерела струму, вольтметр приєднують безпосередньо до його затискачів.

**Увага!** Обов'язково дотримуйтеся полярності вмикання вимірювального приладу.



**Виконання роботи (варіант 1)**

Обладнання (див. форзац I, а): джерело постійного струму (1 або 4), лампа на підставці (2), дріт'яний резистор (3), ключ-вимикач (7), вольтметр (9), з'єднувальні провідники (8).

1. Накресліть схему електричного кола з послідовно з'єднаних елементів: джерела струму, вимикача, лампочки і резистора.

2. Складіть електричне коло відповідно до схеми, увімкніть струм і виміряйте напругу на полюсах джерела струму. Запишіть значення цієї напруги  $U$ . Вимкніть струм.

3. Виміряйте напругу на електричній лампочці та запишіть її значення  $U_1$ . Вимкніть струм.

4. Виміряйте напругу на резисторі та запишіть її значення  $U_2$ . Вимкніть струм.

5. Порівняйте значення напруги  $U$  на полюсах джерела струму зі значеннями напруг на лампочці  $U_1$  і на резисторі  $U_2$ . Зробіть висновки.

**Виконання роботи (варіант 2)**

Обладнання (див. форзац I, б): джерело струму (2), комутаційна панель з шаблонами (1), вольтметр (4), електрична лампочка (6), резистор (7), з'єднувальний елемент (10), з'єднувальні провідники (14).

1. Запишіть характеристики вольтметра до таблиці 1.

Таблиця 1

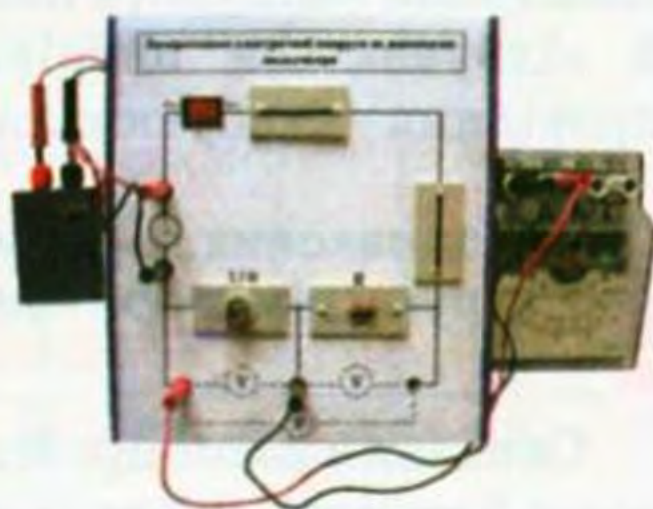
Вимірювана величина	Ціна поділки шкали	Для якого струму використовують прилад	Межі вимірювання

2. Накресліть схеми електричних кіл з послідовним з'єднанням споживачів.

3. Позначте на схемах напрям струму в колі і полярність вольтметра.

4. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних елементів: джерела постійного струму, вимикача, резистора та електричної лампочки. Приєднайте вольтметр паралельно лампі. Вигляд установки показано на малюнку 41.

5. Увімкніть вимикач. Визначте, на скільки поділок відхилилася стрілка вольтметра, та запишіть значення напруги  $U_1$  у таблицю 2. Вимкніть струм.



Мал. 41



6. Повторіть вимірювання напруги, приєднавши вольтметр спочатку до резистора, а потім – до послідовно з'єднаних електричної лампочки та резистора.

7. Запишіть значення напруги для кожного з цих випадків у таблицю 2.

8. Порівняйте значення напруги  $U_1$ ,  $U_2$  та  $U_3$  на різних ділянках. Зробіть висновок та обґрунтуйте його.

Таблиця 2

№	Елемент електричного кола	Покази вольтметра, кількість поділок	Напруга $U$ , В
1	Електрична лампочка		
2	Резистор		
3	Електрична лампочка та резистор		

### § 13. Електричний опір. Залежність опору провідників від їх геометричних розмірів і речовини. Питомий опір

Якщо до кількох провідників з однаковими розмірами (довжиною і площею поперечного перерізу), але з різних речовин (міді, заліза тощо) прикласти однакову напругу, то виявиться, що сила струму в них буде різною. Очевидно, що сила струму в провідниках залежить від речовини, з якої вони виготовлені. Так, наприклад, у мідному провіднику сила струму виявиться більшою, ніж у залізному. Як це можна пояснити?

За наявності електричного струму в металевому провіднику вільні електрони, рухаючись у певному напрямі та зустрічаючись з йонами, віддають їм частину кінетичної енергії, набутої за рахунок джерела електричного струму. У разі таких зіткнень електрони змінюють напрями свого руху, їхній рух гальмується й відбувається нагрівання провідника. Це означає, що в провіднику створюється опір електричному струму.



**В однакових за розмірами провідниках з різних речовин сила струму різна при однаковій напрузі на них.**

Оскільки різні провідники мають різну будову та структуру, тому й чинять неоднаковий опір електричному струму.

Величина, яка характеризує протидію електричному струму в провіднику, називається *опором* і позначається літерою  $R$ .



Ретельні досліди показують, що опір провідників залежить не лише від речовини, а й від довжини провідника  $l$  і площі його поперечного перерізу  $S$ . Якщо за сталої напруги, сталої температури та інших незмінних зовнішніх умов довжину провідника з певної речовини збільшити в 2 рази, то сила струму зменшиться в 2 рази. При збільшенні довжини провідника у 3, 4 і т. д. рази сила струму у відповідне число разів стає меншою, а опір провідника збільшується (мал. 42).

Можна зробити висновок про прямо пропорційну залежність опору  $R$  металевого провідника від його довжини  $l$ :  $R \sim l$ .

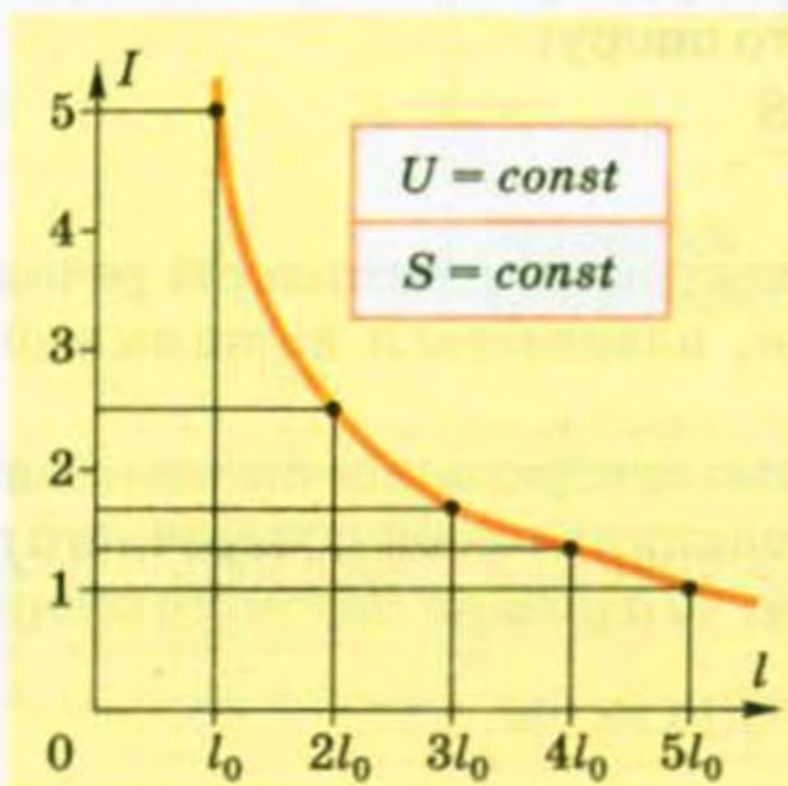
**За незмінної напруги і незмінних зовнішніх умов опір металевого провідника прямо пропорційний його довжині.**



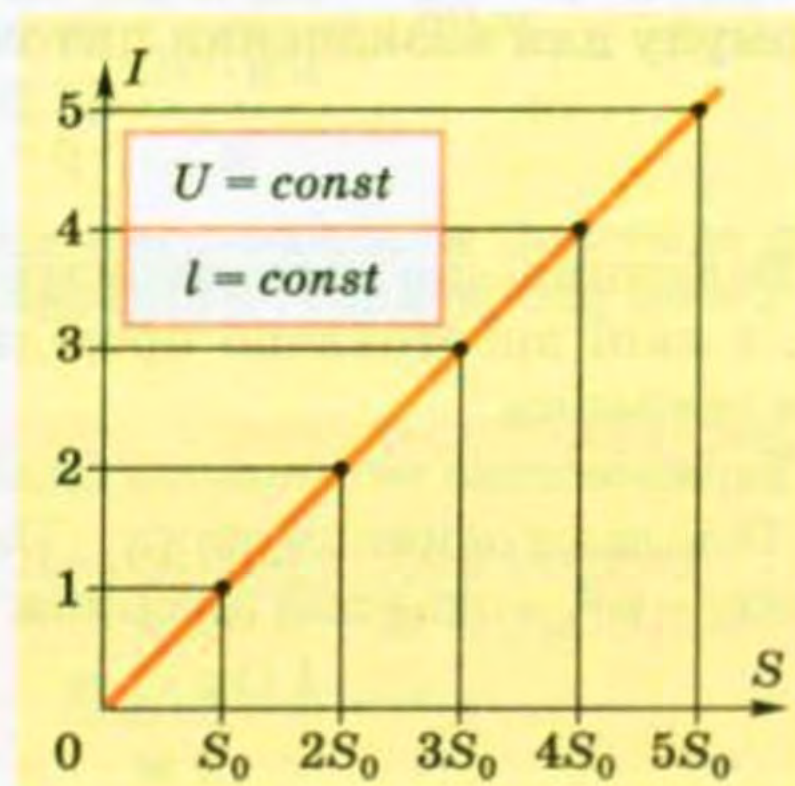
Аналогічно можна дослідити залежність опору провідника від площі поперечного перерізу  $S$ . Площу поперечного перерізу провідника легко збільшити в 2, 3 і т. д. рази. Провідник можна порізати на шматки однакової довжини, а потім сплести їх по 2 шматки, по 3 шматки і т. д. Площа поперечного перерізу утворених провідників зросте у 2, 3 і т. д. рази.

Дослідження показують, якщо за сталої напруги, незмінних зовнішніх умов, у тому числі й температури, площу поперечного перерізу провідника збільшувати в певне число разів, то в таке саме число разів зростатиме сила струму в колі (мал. 43), а, отже, опір у таку саму кількість разів зменшуватиметься. Між опором провідника  $R$  та його площею поперечного перерізу  $S$  існує обернено пропорційна залежність:

$$R \sim \frac{1}{S}.$$



Мал. 42. Графік залежності сили струму в провіднику від його довжини



Мал. 43. Графік залежності сили струму в провіднику від його площі поперечного перерізу





За однакової напруги і незмінних зовнішніх умов опір металевих провідників обернено пропорційний до його площі поперечного перерізу.

Якщо опір провідника позначити літерою  $R$ , його довжину  $l$ , а площу поперечного перерізу  $S$ , то формула для обчислення його опору матиме такий вигляд:

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

де  $\rho$  – коефіцієнт, що характеризує електричні властивості речовини, з якої виготовлено провідник. Цей коефіцієнт називається *питомим опором речовини*, з якої виготовлено провідник.

За одиницю опору взято опір, який створює провідник зі струмом силою в 1 ампер при напрузі на його кінцях 1 вольт:

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

46



Одиниця опору названа *омом* на честь німецького фізика Георга Ома (1787–1854).

$$\text{Одиниця опору} = \frac{\text{одиниця напруги}}{\text{одиниця сили струму}}.$$



Застосовують й інші одиниці опору:

- міліом ( $1 \text{ мОм} = 0,001 \text{ Ом} = 10^{-3} \text{ Ом}$ ),
- кілоом ( $1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом} = 10^3 \text{ Ом}$ ),
- мегаом ( $1 \text{ МОм} = 1\,000\,000 \text{ Ом} = 10^6 \text{ Ом}$ ) тощо.

З формули для визначення опору провідника знаходимо формулу для визначення питомого опору:

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Величина, що характеризує електричні властивості речовини, з якої виготовлено провідник, називається *питомим опором речовини*.

Тепер можна встановити одиницю вимірювання питомого опору. Оскільки одиниця опору – Ом, одиниця площі поперечного перерізу –  $\text{м}^2$ , а одиниця довжини – м, то одиниця питомого опору:

$$\frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}}, \text{ або } 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

На практиці площу значно зручніше виражати в квадратних міліметрах, тому досить часто використовують таку одиницю

питомого опору:  $1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$



Оскільки опір металевих провідників залежить від температури (він зростає з підвищенням температури), то в довідниках значення питомого опору речовин наведено для певної температури, наприклад для  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Таблиця

Питомий електричний опір деяких речовин  $\rho$  ( $10^{-8}$  Ом  $\cdot$  м, або  $10^{-2} \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ ) при  $20^\circ\text{C}$

Речовина	$\rho$	Речовина	$\rho$
Алюміній	2,8	Мідь	1,7
Вольфрам	5,5	Нікелін	42
Константан	50	Ніхром	110
Латунь	7,1	Срібло	1,6

**Приклад.** Якої довжини потрібно взяти провідник з константану для виготовлення реостата з опором 30 Ом (реостат – прилад для регулювання сили струму в електричних колах), якщо площа поперечного перерізу провідника становить  $1 \text{ мм}^2$ ?

47

Дано:

$$R = 30 \text{ Ом},$$

$$S = 1 \text{ мм}^2,$$

$$\rho = 0,50 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

.....  
 $l = ?$ 

Розв'язання

Використаємо формулу, до якої входять величини, що є в умові задачі:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ звідси } l = \frac{RS}{\rho}.$$

Значення питомого опору  $\rho$  константану візьмемо з довідкових таблиць.

Тоді

$$l = \frac{30 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ мм}^2}{0,50 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}} = 60 \text{ м}.$$

**Відповідь.** Для виготовлення реостата потрібно взяти провідник завдовжки 60 м.

1. Як можна показати, що опір провідників залежить від речовин, з яких вони виготовлені?
2. Чим пояснюється наявність опору струму у провідників?
3. Що прийнято за одиницю опору?
4. Що таке питомий опір? В яких одиницях він вимірюється?





## Вправа 5

1. Довжина одного провідника становить 20 см, а іншого – 1,6 м. Провідники виготовлені з однакової речовини і мають однаковий переріз. У якого провідника опір більший і в скільки разів?

2. Який опір має алюмінієвий провідник завдовжки 80 м і площею поперечного перерізу  $2 \text{ мм}^2$ ?

3. Спираль електричної плитки виготовлена з ніхромового провідника завдовжки 13,75 м і площею поперечного перерізу  $0,1 \text{ мм}^2$ . Який опір має цей провідник за кімнатної температури ( $t = 20^\circ\text{C}$ )?

## § 14. Закон Ома для однорідної ділянки кола

48

Під час вивчення струму в електричних колах для опису різних явищ використовують три найважливіші фізичні величини: силу струму, напругу, опір.

Один з найважливіших законів учення про електричні явища, що пов'язує між собою силу струму, напругу і опір для ділянки кола, встановив німецький учитель фізики і вчений Георг Сімон Ом. Цей закон і був названий його іменем.



Георг Сімон Ом (1787–1854) – німецький фізик, учитель математики і фізики. Основні праці присвячені електриці, вченню про звук, оптиці. У 1826 р. експериментально встановив закон, що об'єднав такі фізичні величини, як сила струму, напруга, опір. У 1827 р. теоретично обґрунтував закони (Ома) для ділянки та повного кола.

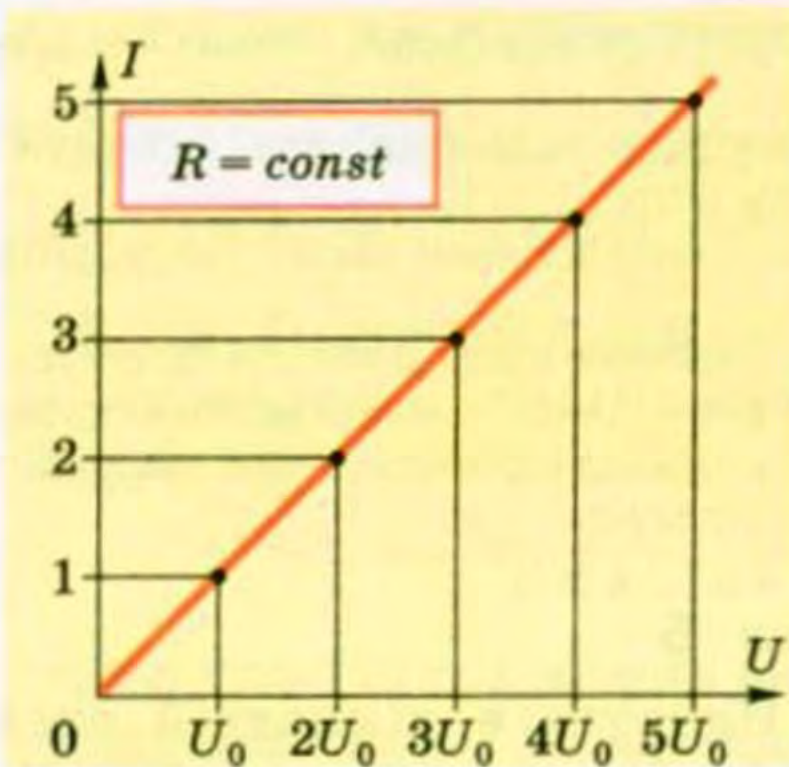
Як джерело струму Ом використав у дослідах термоелемент, що складався з мідного і вісмутового провідників. Виконавши дуже ретельні вимірювання, Ом установив: сила струму в однорідній ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки і обернено пропорційна її опору:

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

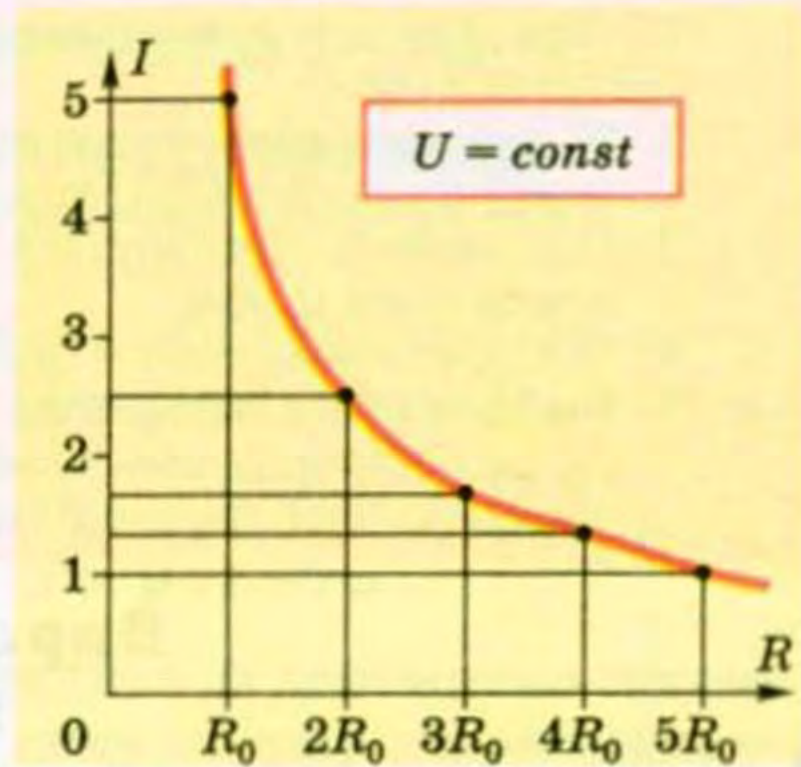
де  $I$  – сила струму в ділянці кола,  $U$  – напруга на цій ділянці,  $R$  – опір ділянки.

Ом описав закон у праці «Гальванічне коло, розроблене математично». Як зазначалось, опір провідників залежить від температури та інших зовнішніх впливів. Тому забезпечити дослі-





Мал. 44. Графік залежності сили струму в провіднику від напруги при сталому його опорі



Мал. 45. Графік залежності сили струму в провіднику від його опору при сталій напрузі на ньому

дження «чистими» дослідями досить складно. Не варто дивуватися, що досліди на підтвердження закону Ома, які ви можете виконати, не завжди вдаватимуться.

Графік залежності сили струму від напруги за умови, що опір ділянки кола залишається сталим, поданий на малюнку 44, а графік залежності сили струму від опору при сталій напрузі – на малюнку 45.

За законом Ома можна розрахувати силу струму в ділянці кола  $I = \frac{U}{R}$ , напругу на її кінцях  $U = IR$  та опір ділянки кола  $R = \frac{U}{I}$ .

Але з останньої формули не випливає, що опір залежить від напруги чи сили струму. Відомо, що опір провідника залежить від речовини, з якої виготовлений, його довжини і площі по-

перечного перерізу:  $R = \rho \frac{l}{S}$ . Крім того, він

залежить також і від температури. Так, наприклад, опір спіралі електричної лампи розжарювання, коли вона світиться, приблизно у 8 разів більший від опору при температурі 20 °С.

Якщо вам ще бракує навичок у виконанні математичних дій за формулами, що подібні до закону Ома, то можна скористатися наведеним трикутником (мал. 46). Якщо потрібно знайти силу струму  $I$ , то за-



Мал. 46. Трикутник для визначення сили струму, напруги і опору за законом Ома

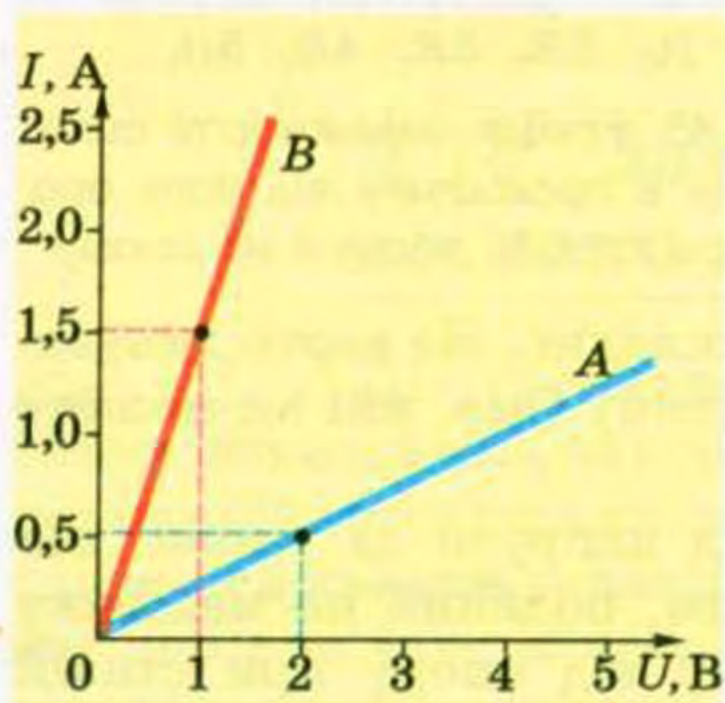
криваємо цю літеру і читаємо відповідь:  $I = \frac{U}{R}$ ; якщо потрібно

визначити опір  $R$ , то відповідь буде:  $R = \frac{U}{I}$ , а для визначення напруги:  $U = IR$ .



1. Про зв'язок яких електричних величин ідеться в законі Ома для ділянки кола?
2. Як залежить сила струму від напруги на ділянці кола? Побудуйте відповідний графік і поясніть його.
3. Як залежить сила струму від опору ділянки кола? Побудуйте відповідний графік.
4. Як формулюється закон Ома для ділянки кола? Запишіть формулу.
5. Знайдіть опір ділянки кола із закону Ома. Чому не можна сказати, що опір у цьому випадку прямо пропорційний напрузі і обернено пропорційний силі струму?

### Вправа 6



Мал. 47. Графік залежності сили струму від напруги для двох провідників



Мал. 48. Шкали амперметра і вольтметра

1. Напруга в кімнатній електричній мережі дорівнює 220 В, а опір нагрівального елемента праски — 50 Ом. Яка сила струму в нагрівальному елементі?

2. Розгляньте лампу для кишенькового ліхтарика і поясніть написи, що є на її цоколі. За цими даними знайдіть опір спіралі цієї лампи в робочому стані.

3. Розгляньте графіки залежності сили струму від напруги для двох провідників А і В (мал. 47). Який з провідників має більший опір? Відповідь поясніть. Визначте опір кожного з провідників.

4. На малюнку 48 зображено вимірювальні прилади, що показують силу струму і напругу в провіднику з опором  $R$ . Накресліть схему приєднання приладів до провідника і визначте його опір за показами приладів.

5. У таблиці наведені дані про значення різних електричних величин для ділянок кола. Перенесіть таблицю в свій зошит і заповніть порожні клітинки.

№	$I$ , А	$U$ , В	$R$ , Ом
1	2	1	
2	0,5		4,0
3		2,5	15

6. Опір провідника завдовжки 1 км дорівнює 5,6 Ом і сила струму в ньому — 7 мА. Яка напруга на кінцях цього провідника? Який питомий опір речовини цього провідника, якщо його поперечний переріз становить 4 мм<sup>2</sup>?



**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4****Вимірювання опору провідника  
за допомогою амперметра і вольтметра**

**Мета.** Навчитися вимірювати опір провідників за допомогою амперметра і вольтметра, використовуючи закон Ома для ділянки кола.

**Вказівки до роботи**

Опір провідника можна визначити за допомогою закону Ома для ділянки кола, вимірявши силу струму в провіднику і напругу на кінцях ділянки за допомогою амперметра і вольтметра відповідно:

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

Електричний опір провідника вимірюють в омах (Ом) або кратних йому одиницях – кілоомах (кОм) і мегаомах (МОм).

**Увага!** Обов'язково дотримуйтеся полярності вмикання вимірювальних приладів.

**Виконання роботи (варіант 1)**

**Обладнання** (див. форзац І, а): джерело постійного струму (1 або 4), два дротяні резистори (3), ключ-вимикач (7), вольтметр (9), амперметр (10), з'єднувальні провідники (8).

1. Накресліть схему для визначення електричного опору, що складається з послідовно з'єднаних: джерела постійного струму, ключа, амперметра і двох дротяних резисторів.

2. Складіть електричне коло і після перевірки його вчителем починайте роботу.

3. Замкніть електричне коло за допомогою ключа і виміряйте силу струму в колі. Запишіть її значення і вимкніть струм.

4. Приєднайте вольтметр до першого резистора, увімкніть струм і виміряйте напругу на цьому резисторі. Запишіть її значення і вимкніть струм.

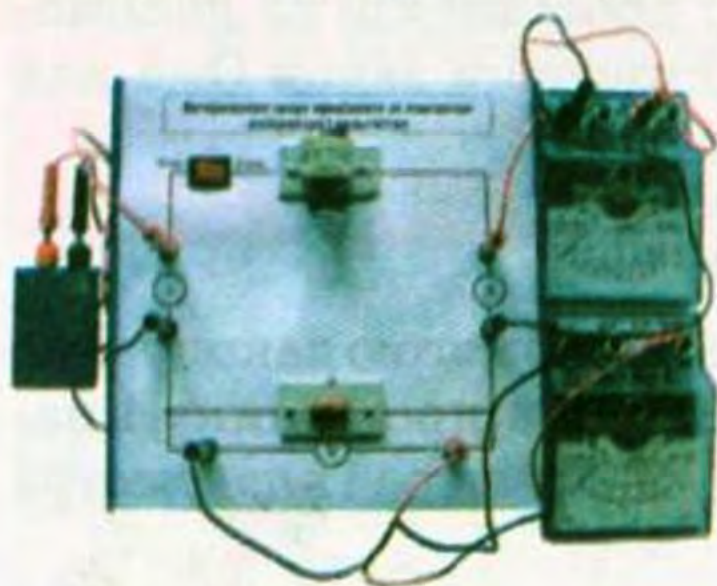
5. Приєднайте вольтметр до другого резистора, увімкніть струм і виміряйте напругу на ньому. Запишіть її значення і вимкніть струм.

6. За отриманими даними обчисліть значення опору першого  $R_1 = \frac{U_1}{I}$  і другого  $R_2 = \frac{U_2}{I}$  резисторів. Порівняйте їх зі значеннями, що позначені на резисторах. Якщо між ними існує розбіжність, спробуйте це пояснити.



## Виконання роботи (варіант 2)

Обладнання (див. форзац I, б): джерело струму (2), комутаційна панель з шаблонами (1), амперметр (3), вольтметр (4), резистор (8), реостат (9), з'єднувальні провідники (14).



Мал. 49

1. Намалюйте схему електричного кола для вимірювання електричного опору відповідно до шаблону. Позначте на ній напрям струму в колі та полярність амперметра і вольтметра.

2. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних елементів: джерела постійного струму, вимикача, реостата, амперметра і резистора. Приєднайте вольтметр паралельно резистору. Вигляд установки показано на малюнку 49.

3. Увімкніть вимикач. Виміряйте силу струму в колі та напругу на резисторі і запишіть їхні значення в таблицю.

4. За допомогою реостата змініть силу струму в електричному колі. Запишіть отримані значення напруги і сили струму в колі в таблицю. Зробіть не менше трьох таких вимірювань. Вимкніть струм.

5. Обчисліть значення опору для кожного випадку за формулою:

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

6. Результати обчислень запишіть у таблицю.

Таблиця

№	Напруга $U$ , В	Сила струму $I$ , А	Опір $R$ , Ом
1			
2			
3			

7. Порівняйте отримані результати опору зі значенням, нанесеним на резисторі. За наявності розбіжностей поясніть їх.

8. Зробіть висновок.

## Додаткове завдання

1. Побудуйте графік залежності напруги  $U$  від сили струму  $I$ , використовуючи значення таблиці.

2. З'ясуйте, від чого залежить кут нахилу прямої, що відображає цю залежність.

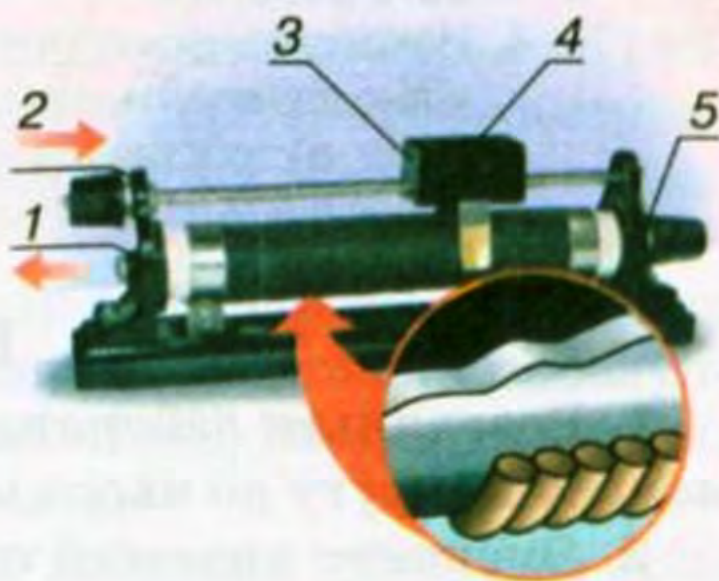


## § 15. Реостати

Під час користування електричною енергією часто доводиться змінювати силу струму в колі. Так, наприклад, щоб збільшити швидкість руху електропотяга, тролейбуса чи трамвая, збільшують силу струму в їх електродвигунах.

Прилади, які застосовуються для регулювання сили струму в електричних колах за допомогою зміни їхнього опору, називаються *реостатами*.

Найчастіше використовуються повзункові реостати (мал. 50). Такий реостат складається з вогнетривкого, наприклад фарфорового, циліндра-ізолятора, на який щільно намотаний виток до витка провідник із значним питомим опором, наприклад з константану, опір якого мало змінюється при зміні температури. Провідник з дроту вкритий окалиною, що ізолює кожний його виток від сусідніх. Кінці провідника, намотаного на ізолятор, приєднуються до клем 1 і 5, розташованих біля кінців обмотки.



Мал. 50. Будова повзункового реостата

Над обмоткою розміщено металевий стержень, ізолюваний від дроту реостата, на якому може рухатися повзунок 3 з ізоляційною ручкою 4. Повзунок щільно притискається своїми пружинними контактами до дроту реостата, у місцях контакту ізоляція на ньому руйнується, що забезпечує надійний контакт повзунка з обмоткою.

Активною частиною реостата називається та частина його обмотки, в якій проходить струм.

Для регулювання сили струму в колі (зміни опору активної частини реостата) провідники від електричного кола приєднуються до клеми 2 стержня і до клеми 1 або 5. Переміщуючи повзунок стержня, можна змінювати опір реостата практично від 0 до максимального значення опору його обмотки.

Існують реостати й інших конструкцій, наприклад так звані магазини резисторів (мал. 51). У цьому пристрої опір можна змінювати ступінчасто, наприклад через 1 Ом.



Мал. 51. Магазин резисторів

Реостати й магазини резисторів завжди розраховуються на певні значення опору, сили струму, які обов'язково вказуються на них. Перевищувати значення сили струму для конкретних реостатів не





Мал. 52. Позначення реостата

слід, оскільки це може призвести до їх псування внаслідок перегрівання обмоток.

Під час роботи з реостатами не слід доторкатися руками до їхніх робочих частин, оскільки вони можуть бути сильно нагрітими.

Позначення реостата наведено на малюнку 52.

1. Для чого застосовують реостати?
2. Поясніть дію повзункового реостата.
3. Що таке магазин резисторів і чим він відрізняється від повзункового реостата?
4. Накресліть схему повзункового реостата і покажіть, як його необхідно ввімкнути, щоб під час руху повзунка зліва направо опір реостата: **а)** зростав від нуля до максимального значення; **б)** зменшувався від максимального значення до нуля.

## Вправа 7

1. Розгляньте лабораторний реостат і визначте, яку максимальну напругу до нього можна прикласти.

2. Визначте питомий опір провідника, з якого виготовлено обмотку реостата.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

**Вивчення залежності електричного опору від довжини провідника, площі його поперечного перерізу і матеріалу провідника**

**Мета.** Розвинути навички складати електричне коло і користуватися амперметром і вольтметром; дослідити залежність опору провідника від його геометричних розмірів; визначити питомий опір провідника.

### Вказівки до роботи

Як відомо, значення опору металевого провідника прямо пропорційне довжині провідника й обернено пропорційне площі його поперечного перерізу, а також залежить від речовини, з якої складається провідник. Якщо він має круговий переріз, то формула опору має такий вигляд:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{4l}{\pi d^2},$$

де  $\rho$  – питомий опір провідника,  $l$  – довжина провідника,  $d$  – діаметр провідника.

Звідси можна знайти питомий опір матеріалу провідника  $\rho$ :

$$\rho = \frac{R \pi d^2}{4l} = \frac{U \pi d^2}{4Il},$$

де  $U$  – напруга на досліджуваному провіднику,  $I$  – сила струму в ньому.



### Виконання роботи (варіант 1)

Обладнання (див. форзац I, а): джерело постійного струму (1 або 4), лампа на підставці (2), ключ-вимикач (7), реостат (6), вольтметр (9), амперметр (10), з'єднувальні провідники (8).

1. Накресліть схему послідовного з'єднання джерела струму, електричної лампи, ключа, амперметра і реостата (реостат потрібно увімкнути на максимальне значення опору, щоб під час руху повзунка його опір зменшувався).

2. Складіть за нею електричне коло, приєднавши вольтметр паралельно реостату.

3. Увімкніть струм і запишіть значення сили струму в колі і напруги на реостаті при його максимальному опорі. Вимкніть струм.

4. Знайдіть значення максимального опору реостата і порівняйте його з написом на ньому.

5. Увімкніть струм і зменшуйте опір реостата так, щоб сила струму в колі дорівнювала 1 А. Зафіксуйте положення повзунка і запишіть значення напруги на реостаті. Вимкніть струм. Визначте опір активної частини реостата.

6. Запропонуйте спосіб обчислення довжини і діаметра дроту реостата.

7. Обчисліть питомий опір матеріалу, з якого виготовлений реостат, для обох вимірювань. Порівняйте значення питомого опору для обох випадків і зробіть висновок.

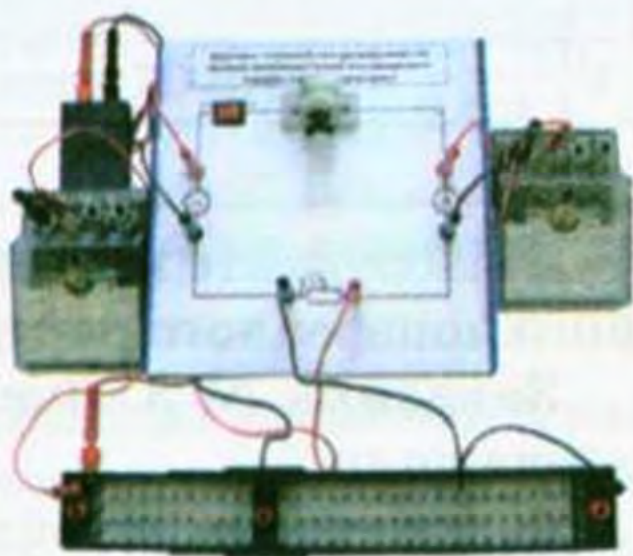
### Виконання роботи (варіант 2)

Обладнання (див. форзац I, б): джерело струму (2), комутаційна панель з шаблонами (1), амперметр (3), вольтметр (4), реостат (9), реохорд (5), з'єднувальні провідники (14).

**Завдання № 1.** Вивчення залежності опору провідника від його довжини.

1. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних елементів: джерела постійного струму, реостата, амперметра і реохорда (прямий провідник з повзунком). Приєднайте вольтметр паралельно реохорду. Вигляд установки показано на малюнку 53.

2. Увімкніть вимикач. Перемістіть повзунок реохорда на поділку 10 см і виміряйте силу струму  $I_1$  і напругу  $U_1$  на заданій довжині провідника<sup>1</sup>. Результати вимірювань запишіть у таблицю 1.



Мал. 53

<sup>1</sup>Під час виконання дослідів рекомендовано використовувати струм не більше 0,3 А, щоб запобігти перегріванню дротів. Регулювання сили струму в колі можна здійснювати за допомогою реостата.



3. Пересуваючи повзунок реохорда, виміряйте силу струму  $I$  та напругу  $U$  на довжині провідника 20 см і 30 см. Вимкніть струм. Занесіть отримані значення сили струму та напруги у таблицю 1.

4. Обчисліть опір досліджуваного провідника:  $R = \frac{U}{I}$ .

Таблиця 1

№	Напруга $U$ , В	Сила струму $I$ , А	Довжина дроту $l$ , м	Опір $R$ , Ом
1			0,1	
2			0,2	
3			0,3	

5. Побудуйте графік залежності опору провідника  $R$  від довжини  $l$  і зробіть висновок.

**Завдання № 2.** Вивчення залежності опору провідника від площі його поперечного перерізу.

56

1. Увімкніть вимикач. Перемістіть повзунок реохорда на поділку 30 см і виміряйте силу струму  $I_1$  та напругу  $U_1$  на досліджуваному провіднику відомого діаметра. Вимкніть струм. Результати вимірювань запишіть у таблицю 2.

2. Не змінюючи положення повзунка реохорда, повторіть вимірювання сили струму  $I_2$  та напруги  $U_2$  на провіднику іншого діаметра (клеми червоного кольору).

3. Обчисліть значення опору досліджуваних провідників.

Таблиця 2

№	Напруга $U$ , В	Сила струму $I$ , А	Діаметр дроту $d$ , $10^{-3}$ м	Площа поперечного перерізу дроту $S = \frac{\pi d^2}{4}$ , $10^{-3}$ м	Опір $R$ , Ом
1			0,3		
2			0,2		

4. Побудуйте графік залежності опору провідника від площі його поперечного перерізу і зробіть висновок.

**Завдання № 3.** Вивчення залежності опору провідника від матеріалу.

1. Увімкніть вимикач. Перемістіть повзунок реохорда на поділку 20 см і виміряйте силу струму  $I_1$  та напругу  $U_1$  на досліджуваному опорі. Вимкніть струм. Результати вимірювань запишіть у таблицю 3.

2. Не змінюючи положення повзунка реохорда, повторіть вимірювання сили струму  $I_2$  і напруги  $U_2$  на іншому провіднику реохорда (клеми синього кольору).



3. Обчисліть питомий опір обох провідників за формулою  $\rho = \frac{U \pi d^2}{4 I l}$  і результати запишіть у таблицю 3.

4. За допомогою довідкової таблиці питомих опорів металів визначте, з яких матеріалів виготовлено провідники реохорда.

Таблиця 3

№	Напруга $U$ , В	Сила струму $I$ , А	Довжина $l$ , м	Діаметр дроту $d$ , м	Питомий опір $\rho$ , $10^{-8}$ Ом · м	Матеріал
1			0,2	$12 \cdot 10^{-3}$		
2						

5. Побудуйте графік залежності опору провідника  $R$  від питомого опору  $\rho$  і зробіть висновок.

## § 16. Послідовне з'єднання провідників

57

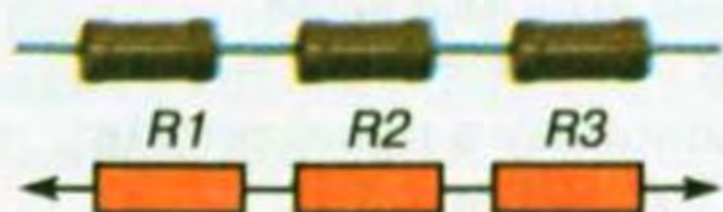
Під час вивчення електричного струму ви вже зустрічалися з послідовним і паралельним з'єднаннями провідників, резисторів, вимірювальних приладів тощо.

Послідовним вважають таке з'єднання провідників, споживачів електричної енергії, джерел струму тощо, при якому вони з'єднуються один за одним (мал. 54). Так, послідовно з'єднуються лампи ялинкової гірлянди, розраховані на 2,5 В; 3,5 В; 6,3 В; 13,6 В; 24 В тощо, розрахованої на вмикання в мережу з напругою 220 В. При цьому напруга на кожній лампі не повинна перевищувати вказану на ній напругу. Якщо для гірлянди взяти однакові лампи на 24 В кожна, то їх потрібно не менше 10 штук  $\left( \frac{220 \text{ В}}{24 \text{ В}} \right)$ .

При послідовному з'єднанні провідників струм не розгалужується.



Так послідовно з'єднуються три гальванічні елементи з напругою 1,5 В кожний, щоб отримати батарею для кишенькового ліхтарика на 4,5 В (мал. 55), а також реостат з двигуном швей-



Мал. 54. Послідовне з'єднання провідників



Мал. 55. Гальванічні елементи, з'єдані послідовно



ної електричної машинки для регулювання сили струму в ньому (числа обертів за хвилину).

Оскільки при послідовному з'єднанні струм нікуди не розгалужується, то, як ви вже бачили під час виконання лабораторної роботи, сила струму в усіх точках такого замкненого кола однакова:

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

З'єднуючи провідники послідовно, ми ніби збільшуємо загальну довжину провідника.

Загальний опір кола чи його ділянки при такому з'єднанні дорівнює сумі опорів окремих провідників (або окремих ділянок кола):

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

Як відомо, при послідовному з'єднанні сила струму в усіх ділянках кола однакова, а напруга на будь-якій ділянці кола визначається добутком сили струму на опір цієї ділянки. Тому на ділянці з більшим опором напруга, відповідно, більша.

58



**При послідовному з'єднанні провідників напруга на них прямо пропорційна до їхніх опорів.**

Загальна напруга на кінцях послідовного з'єднання дорівнює сумі напруг на окремих ділянках кола:

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

Головним недоліком послідовного з'єднання є те, що в разі виходу з ладу хоча б одного з елементів з'єднання, струм у колі зникає і перестають діяти й усі інші елементи. Скажімо, якщо згорить одна з ламп гірлянди, то перестають світитися й усі інші лампи.

**Приклад.** Два провідники з опорами 1 Ом і 4 Ом з'єднані послідовно. Сила струму в провідниках дорівнює 1 А. Який опір такої ділянки кола? Яка напруга на кожному з провідників та загальна напруга на ділянці кола?

Дано:

$$R_1 = 1 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 4 \text{ Ом},$$

$$I = 1 \text{ А}.$$

$$R - ?$$

$$U_1 - ?$$

$$U_2 - ?$$

$$U - ?$$

Розв'язання

Накреслимо схему такої ділянки і вкажемо на ній значення опорів резисторів. Оскільки сила струму при послідовному з'єднанні провідників у всіх точках ділянки кола однакова, то  $I_1 = I_2 = I = 1 \text{ А}$ .

Загальний опір ділянки кола:

$$R = R_1 + R_2; R = 1 \text{ Ом} + 4 \text{ Ом} = 5 \text{ Ом}.$$

Напруга на кожному з провідників:

$$U = IR; U_1 = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ Ом} = 1 \text{ В};$$

$$U_2 = 1 \text{ А} \cdot 4 \text{ Ом} = 4 \text{ В}.$$



Загальна напруга на всій ділянці кола:  
 $U = IR; U = 1 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом} = 5 \text{ В}$ , або  
 $U = U_1 + U_2; U = 1 \text{ В} + 4 \text{ В} = 5 \text{ В}$ .  
**Відповідь.** Загальний опір ділянки кола  
 $R = 5 \text{ Ом}$ ; напруга на першому провіднику  
 1 В, а на другому – 4 В; загальна напруга на  
 всій ділянці кола дорівнює 5 В.

1. Яке з'єднання елементів електричного кола називають послідовним?
2. Накресліть схеми послідовного з'єднання трьох однакових ламп, трьох гальванічних елементів і трьох резисторів з опорами 1 Ом, 2 Ом і 4 Ом: **а)** яка сила струму в кожній з ламп; **б)** як розподіляється напруга на лампах; **в)** яка напруга батареї з трьох гальванічних елементів, якщо кожен з них мав напругу 1,5 В; **г)** який сумарний опір ділянки кола з послідовно з'єднаних резисторів; **д)** як розподілиться напруга на трьох резисторах, якщо загальна напруга, прикладена до них, дорівнює 14 В?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

59

### Дослідження електричного кола з послідовним з'єднанням провідників

**Мета.** Розвинути вміння вимірювати силу струму і напругу та експериментально перевірити закономірності послідовного з'єднання провідників.

#### Вказівки до роботи

При послідовному з'єднанні провідників справджуються такі твердження:

- сила струму  $I$  у кожній точці такої ділянки кола однакова:

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

- загальна напруга дорівнює сумі напруг на окремих ділянках кола:

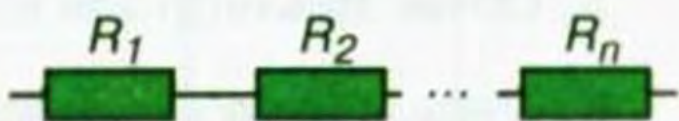
$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n;$$

- загальний опір ділянки кола дорівнює сумі опорів окремих провідників, що її складають:

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

Крім того, при послідовному з'єднанні провідників співвідношення значень напруги на ділянках кола прямо пропорційне до їхніх опорів:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$





## Виконання роботи (варіант 1)

Обладнання (див. форзац I, а): джерело постійного струму (1 або 4), дрітні резистори відомого опору (3), ключ-вимикач (7), реостат (6), вольтметр (9), амперметр (10), з'єднувальні провідники (8).

1. Накресліть схему і складіть електричне коло з послідовним з'єднанням провідників.

2. Увімкніть струм і, виконавши потрібні вимірювання сили струму і напруги, переконайтесь у правильності співвідношень для послідовного з'єднання провідників:  $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$ ;  $U = U_1 + U_2 + U_3$ ;  $U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$ .

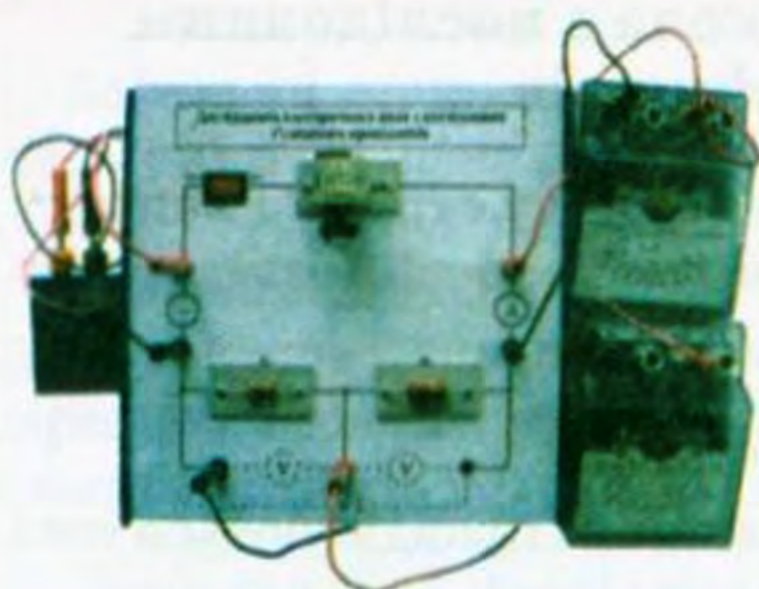
3. Експериментально доведіть справедливості співвідношення  $R = R_1 + R_2 + R_3$ .

## Виконання роботи (варіант 2)

Обладнання (див. форзац I, б): джерело струму (2), комутаційна панель з шаблонами (1), амперметр (3), вольтметр (4), резистори 10 Ом і 20 Ом (7 і 8), реостат (9), з'єднувальні провідники (14).

60

1. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних елементів: джерела постійного струму, вимикача, реостата, амперметра і двох резисторів. Вигляд установки показано на малюнку 56.



Мал. 56

2. Приєднайте вольтметр паралельно резистору  $R_1 = 10$  Ом. Увімкніть вимикач. Виміряйте силу струму  $I_1$  в електричному колі та напругу  $U_1$  на резисторі  $R_1$ . Вимкніть струм.

3. Приєднайте вольтметр паралельно резистору  $R_2 = 20$  Ом. Увімкніть вимикач. Виміряйте силу струму  $I_2$  в електричному колі та напругу  $U_2$  на резисторі  $R_2$ . Вимкніть струм.

4. Приєднайте вольтметр паралельно з'єднаним послідовно резисторам  $R_1$  та  $R_2$ . Увімкніть вимикач. Виміряйте силу струму  $I$  в електричному колі та напругу  $U$ . Вимкніть струм.

5. Обчисліть опір для кожного з вимірювань за формулою:  $R = \frac{U}{I}$ .

6. Результати вимірювань та обчислень запишіть у таблицю.

Таблиця

$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I, \text{А}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R, \text{Ом}$

7. Перевірте виконання співвідношень для послідовного з'єднання провідників і зробіть висновок.



## § 17. Паралельне з'єднання провідників

Паралельним називається таке з'єднання провідників, джерел струму, споживачів тощо, при якому одні кінці всіх провідників чи інших елементів кола приєднуються до однієї точки електричного кола, а інші кінці – до іншої. При цьому струм у точках з'єднання розгалужується.

На малюнку 57 зображено схему паралельного з'єднання трьох ламп у люстрі, які вмикаються і вимикаються одним вимикачем.

На малюнку 58 наведено схему освітлення кімнати, де кожна лампа вмикається і вимикається незалежно від інших.

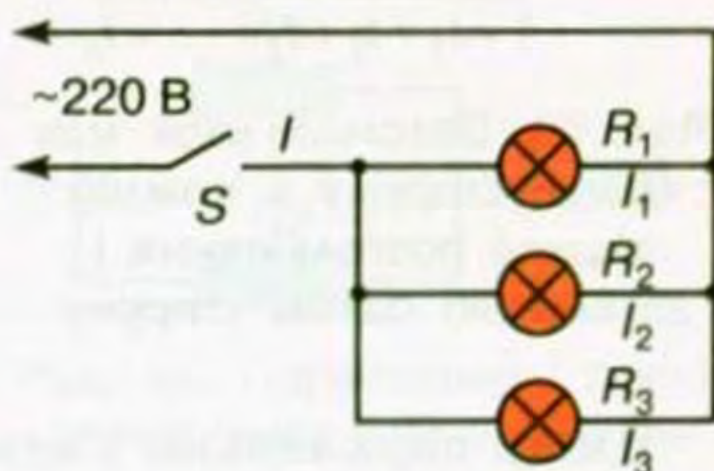
Якщо паралельно з'єднати три однакові гальванічні елементи в батарею (мал. 59), то напруга на полюсах батареї буде такою самою, як і на кожному з елементів. Але власний опір батареї зменшиться в 3 рази і від неї можна буде при потребі отримати більшу силу струму.

При паралельному з'єднанні, наприклад ламп (мал. 57), струм розгалужується на кілька струмів за кількістю ввімкнених споживачів. Кожний із споживачів може мати свої значення опорів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Паралельно з'єднуються, наприклад, споживачі в освітлювальній мережі або в мережі телефонного зв'язку.

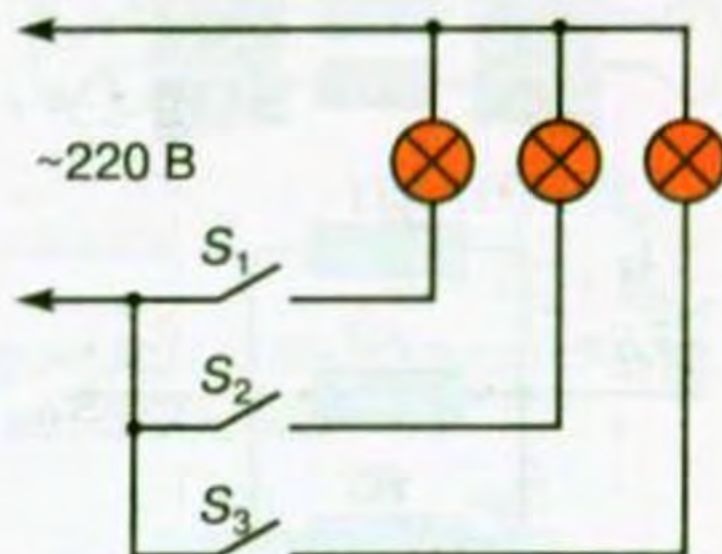
Оскільки початки і кінці всіх розгалужених ділянок кола з'єднуються в одних і тих самих точках, то напруга на кінцях усього розгалуження є такою самою, як і напруга на кінцях окремих розгалужень:

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

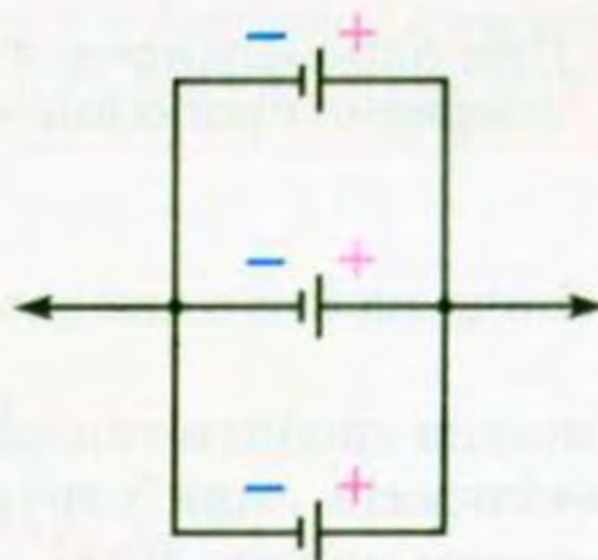
Якщо за допомогою амперметрів виміряти силу струму  $I$  до розгалуження і сили струму в кожній ділянці розгалуження (мал. 60), то



Мал. 57. Схема з'єднання ламп у люстрі, коли всі лампи вмикаються одним вимикачем

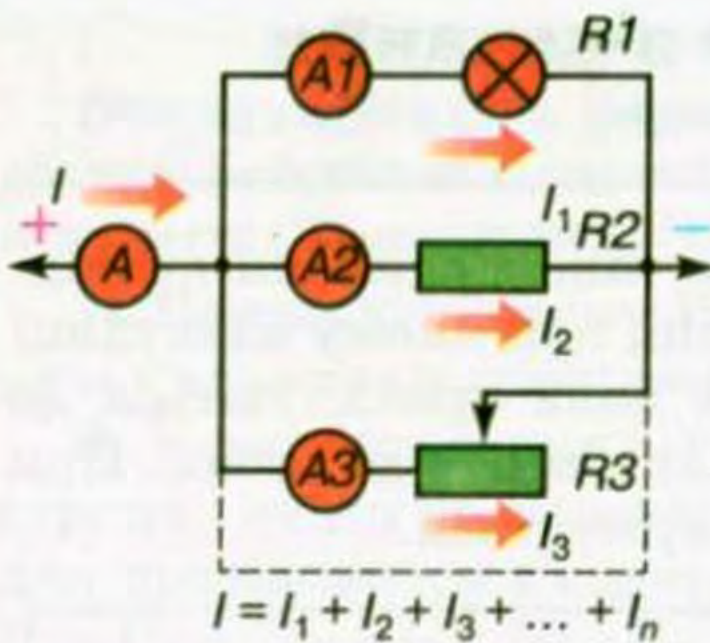


Мал. 58. Схема з'єднання ламп у кімнаті, коли кожна з них можна вмикати окремо від інших



Мал. 59. Схема паралельного з'єднання гальванічних елементів у батареї





Мал. 60. Взаємозв'язок між силою струму в кожній ділянці розгалуження і загальною силою струму

можна переконатися в тому, що сила струму в нерозгалуженій частині кола при паралельному з'єднанні дорівнює сумі сил струмів у окремих ділянках розгалуження:

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

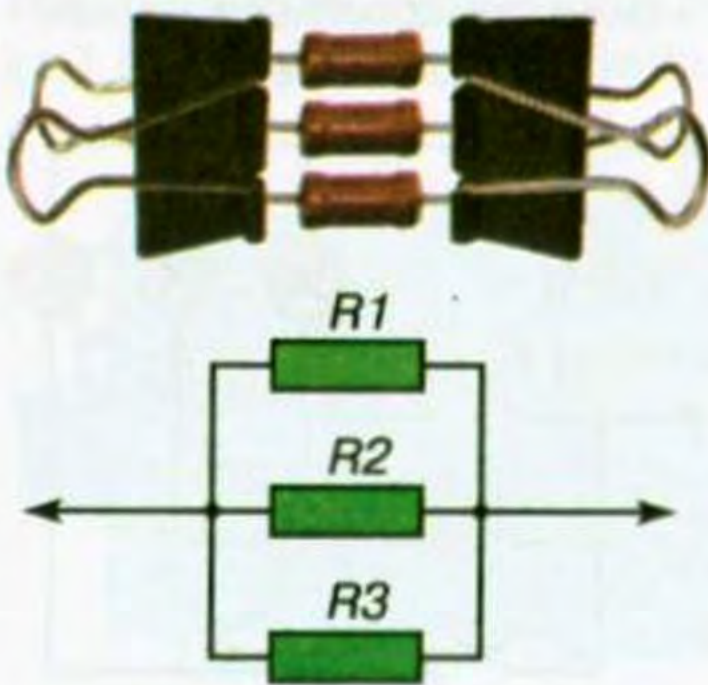
Загальний опір при паралельному з'єднанні провідників можна визначити за формулою

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

де  $R$  – загальний опір ділянки кола;  $R_1, R_2, \dots, R_n$  – опори паралельних ділянок кола, що входять до даного розгалуження.

Якщо паралельно з'єднано  $n$  провідників з однаковим опором  $R$ , то загальний опір такого розгалуження  $R_{\text{заг}} = \frac{R}{n}$ .

62



Мал. 61. Паралельне з'єднання провідників

Так, якщо з'єднати паралельно два однакові резистори з опором 3 Ом кожний, то загальний опір такої ділянки кола буде дорівнювати 1,5 Ом, а якщо три резистори, то 1 Ом (мал. 61).

Відомо, що напруга на всіх ділянках паралельного розгалуження однакова, тому можна легко знайти сили струму в кожній ділянці:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I_3 = \frac{U}{R_3}.$$



При паралельному з'єднанні провідників сили струму в них обернено пропорційні до їхніх опорів.

Якщо знайти співвідношення сил струмів  $I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$ ,

то можна зробити такий висновок: при паралельному з'єднанні провідників сили струму в окремих ділянках розгалуження обернено пропорційні до їхніх опорів.

На практиці часто зустрічається складне або змішане з'єднання провідників, яке є комбінацією послідовних і паралельних з'єднань. З'ясуємо, як розраховуються такі з'єднання.



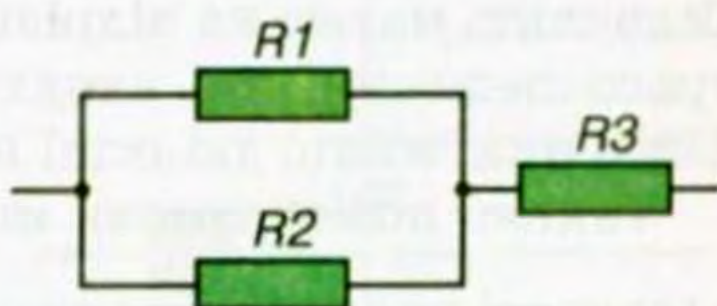
На малюнку 62 показано можливе з'єднання трьох резисторів з опорами  $R_1, R_2, R_3$ . Два перші резистори з'єднані між собою паралельно, і їхній загальний опір можна знайти за формулою:

$$\frac{1}{R_{1,2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2};$$

$$R_{1,2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Третій резистор до ділянки приєднаний послідовно. Опір усієї ділянки кола дорівнюватиме:

$$R_{1,2,3} = R_{1,2} + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3.$$



Мал. 62. Паралельне і послідовне (змішане) з'єднання провідників (I варіант)

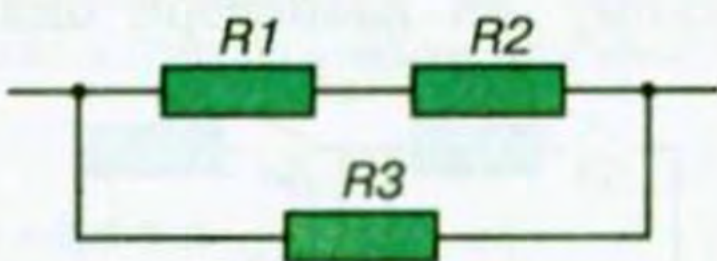
Можливе також з'єднання, зображене на малюнку 63. Тут резистори  $R_1$  і  $R_2$  з'єднані між собою послідовно, і їхній сумарний опір  $R_{1,2} = R_1 + R_2$ . Резистор  $R_3$  приєднаний до них паралельно, тому

$$\frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{(R_1 + R_2) R_3}.$$

Звідси опір усієї ділянки кола становить  $R_{1,2,3} = \frac{R_3 (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}$ .

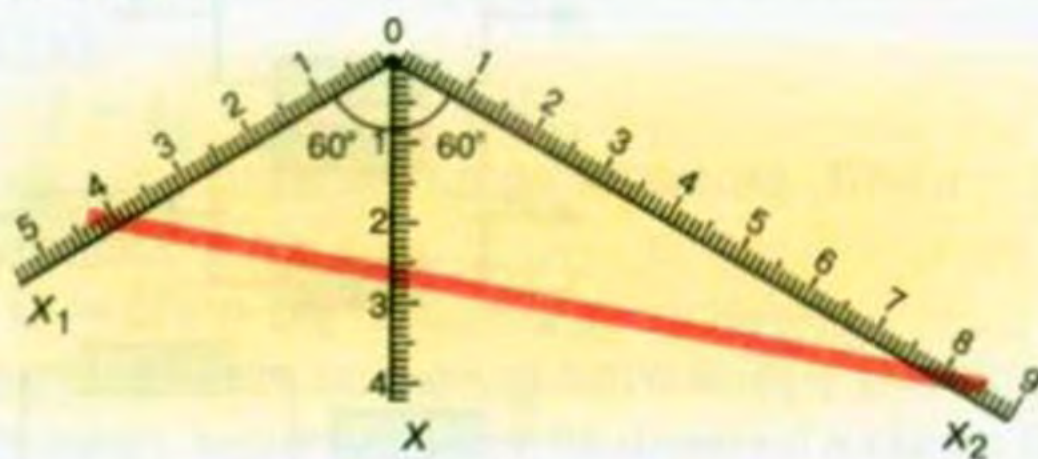
Навчившись розраховувати найпростіші електричні кола, можна досить легко розрахувати і більш складні.

Під час розв'язування задач з використанням формул типу  $\frac{1}{x} = \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2}$  зручно користуватися



Мал. 63. Послідовне і паралельне (змішане) з'єднання провідників (II варіант)

наведеною на малюнку 64 номограмою, яка дає змогу, не виконуючи обчислень, знаходити наближені значення величин.



Мал. 64. Номограма для визначення опору будь-якої кількості з'єднаних паралельно резисторів



У шкільному курсі фізики такою номограмою зручно користуватися під час розрахунків у разі паралельного з'єднання провідників для визначення загального опору за формулою:

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

Наприклад, резистори з опорами 43 кОм і 75 кОм з'єднані паралельно; треба визначити їх загальний опір. Кладемо лінійку так, щоб на відрізку  $OX_1$  було 43, а на відрізку  $OX_2$  – 75. Відповідь маємо на відрізку  $OX$  – це  $\approx 27$  кОм. Зрозуміло, що з трьох величин, які входять до формули, можна знайти будь-яку з них, якщо дві інші відомі.

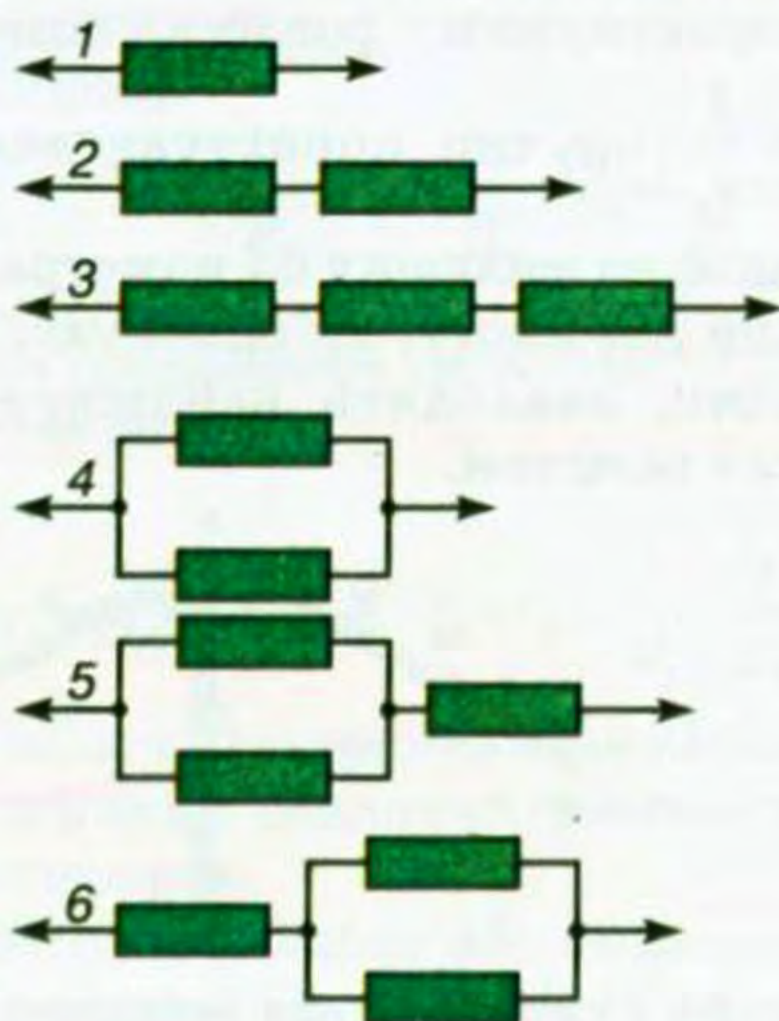
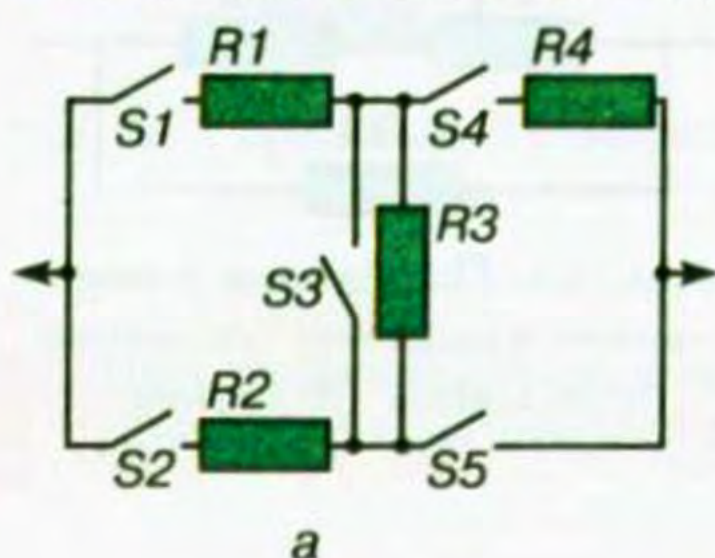
Такою номограмою можна скористатись і для будь-якої кількості доданків значень  $\frac{1}{x}$ , послідовно з'єднуючи їх по двоє.

64

1. Які з'єднання називаються паралельними?
2. Яка з основних електричних величин є однаковою для всіх гілок паралельного з'єднання?
3. Який взаємозв'язок сили струму до розгалуження і сил струмів у окремих гілках розгалуження?
4. Накресліть кілька схем змішаних з'єднань. Як розрахувати їхні опори?
5. Як з'єднані лампи та інші споживачі електричної енергії у вашій квартирі?

## Вправа 8

1. На малюнку 65, а зображено схему електричного кола, в якому всі резистори однакові і мають опір 10 Ом кожний



Мал. 65

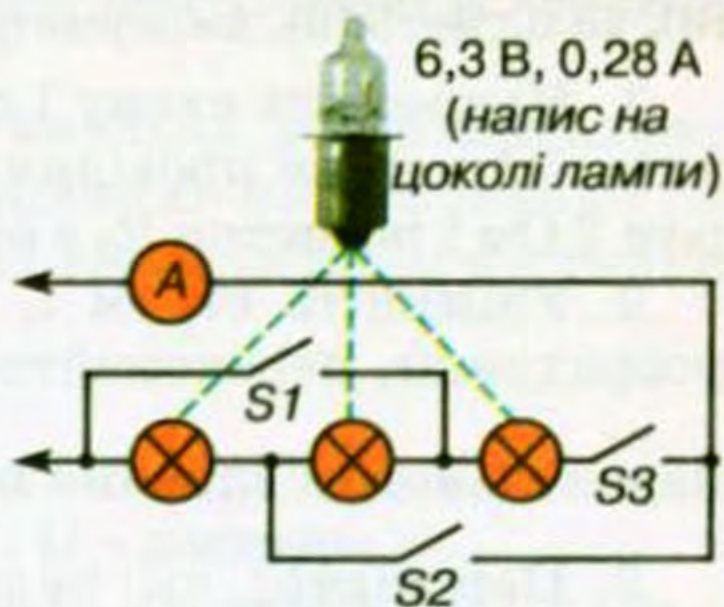
б



( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ Ом}$ ): а) які вимикачі треба ввімкнути, щоб отримати з'єднання резисторів, зображене на малюнку 65, б; б) обчисліть опір електричного кола (мал. 65, а) за всіх можливих положень вимикачів; в) які вимикачі треба ввімкнути, щоб опір  $R$  ділянки кола (мал. 65, а) дорівнював 5, 10, 15, 20 і 30 Ом; г) як має бути замкнене коло, щоб у підвідних провідниках до даного електричного кола (мал. 65, а) сила струму становила 2 А; 1 А і 0,5 А, якщо до кола прикладена напруга 10 В?

2. За схемою (мал. 66) дайте відповіді на запитання: а) які ключі треба замкнути, щоб світилися на повну потужність: одна лампа; дві лампи; три лампи; б) які значення сил струмів у кожному з цих трьох випадків покаже амперметр? До кола подається стала напруга 6,3 В.

3. Накресліть схему вмикання люстри з трьох ламп, якщо за допомогою одного вимикача вмикається одна лампа, а за допомогою другого – дві інші.



Мал. 66

65

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

### Дослідження електричного кола з паралельним з'єднанням провідників

**Мета.** Розвивати вміння досліджувати електричні кола та експериментально перевірити закономірності паралельного з'єднання провідників.

#### Вказівки до роботи

При паралельному з'єднанні провідників справджуються такі твердження:

- сила струму до розгалуження кола дорівнює сумі сил струмів в окремих його гілках (ділянках кола):

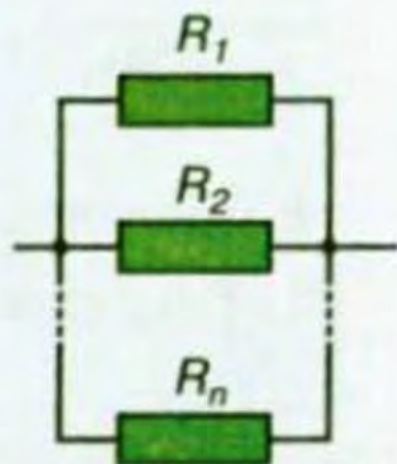
$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n;$$

- напруга на всіх паралельно з'єднаних ділянках кола однакова:

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

- величина, обернена до загального опору розгалуження, дорівнює сумі обернених величин опорів кожної з гілок (ділянок кола):

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





Оскільки робота електричного струму дорівнює  $A = UIt$ , то потужність електричного струму можна визначити за формулою:

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



$$P = UI.$$

Одиницею потужності є *ват* (Вт), що дорівнює  $1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$ .



Використовують також і кратні одиниці:

- мікроват ( $1 \text{ мкВт} = 0,000001 \text{ Вт} = 10^{-6} \text{ Вт}$ ),
- міліват ( $1 \text{ мВт} = 0,001 \text{ Вт} = 10^{-3} \text{ Вт}$ ),
- гектоват ( $1 \text{ гВт} = 100 \text{ Вт} = 10^2 \text{ Вт}$ ),
- кіловат ( $1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт} = 10^3 \text{ Вт}$ ),
- мегават ( $1 \text{ МВт} = 1\,000\,000 \text{ Вт} = 10^6 \text{ Вт}$ ).

З формули випливає, що

$$1 \text{ ват} = 1 \text{ вольт} \cdot 1 \text{ ампер, або } 1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А.}$$

68

Оскільки робота струму може бути визначена через потужність і час, то досить часто використовують одиницю роботи,

що називається ват-секундою:  $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$ , звідси  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ .

На практиці зручніше користуватися такими одиницями, як ват-година і кіловат-година:

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Дж} = 3600 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3600\,000 \text{ Дж} = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$



Мал. 69. Ватметр

Для вимірювання потужності електричного струму використовуються *ватметри* (мал. 69).

**Приклад.** Звичайна електрична лампа, що є на вашому письмовому столі, має потужність 60 Вт і працює при напрузі 220 В. Яку роботу виконує електричний струм, якщо протягом

місяця (30 днів) ви використовуєте лампу 3 год щодня? Яка сила струму в лампі та опір її нитки розжарювання в робочому стані?

Дано:

$$P = 60 \text{ Вт},$$

$$U = 220 \text{ В},$$

$$t = 3 \text{ год} \cdot 30 \text{ днів}.$$

$$A - ?$$

$$I - ?$$

$$R - ?$$

Розв'язання

$$\text{Час роботи лампи } t = 3 \text{ год} \cdot 30 \text{ днів} = 90 \text{ год}.$$

$$A = Pt; A = 60 \text{ Вт} \cdot 90 \text{ год} = 5400 \text{ Вт} \cdot \text{год} =$$

$$5,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Сила струму в лампі з формули  $P = UI$  становить:

$$I = \frac{P}{U}; I = \frac{60 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} \approx 0,3 \text{ А}.$$



Опір нитки розжарювання лампи в робочому стані із закону Ома дорівнює

$$R = \frac{U}{I}; R = \frac{220 \text{ В}}{0,3 \text{ А}} \approx 730 \text{ Ом.}$$

Відповідь.  $A = 5,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ ;  $I \approx 0,3 \text{ А}$ ;  
 $R \approx 730 \text{ Ом}$ .

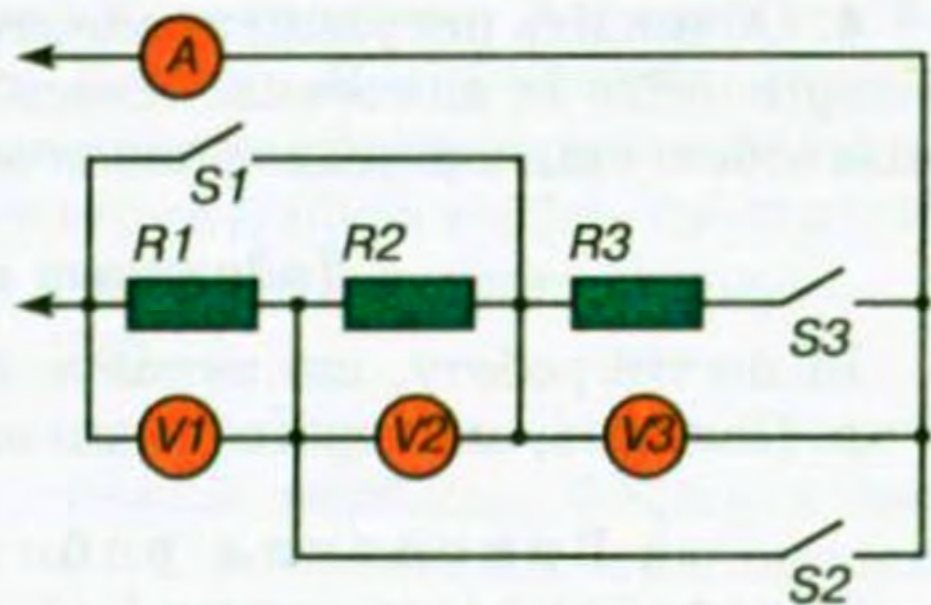
1. Чому дорівнює напруга на ділянці кола?
2. Як визначають роботу електричного струму на ділянці кола?
3. Якими приладами вимірюють роботу електричного струму?
4. Що називають потужністю та як її визначають?
5. Які ви знаєте одиниці потужності та роботи, що використовуються в електриці?

### Вправа 9

1. Розгляньте дані, що написані на лампі для кишенькового ліхтарика, і за ними визначте: а) потужність лампи; б) роботу, яку виконує струм за 15 хв роботи лампи; в) силу струму та опір нитки розжарювання лампи в робочому стані.

2. Що будуть показувати вимірювальні прилади в електричному колі, які зображені на малюнку, при всіх можливих положеннях вимикачів, якщо всі резистори в колі однакові, мають опір 10 Ом кожний і до кола прикладена стала напруга 120 В?

3. Яка потужність електричного струму в ділянці кола (див. малюнок) при всіх можливих положеннях перемикачів? Опір кожного резистора дорівнює 10 Ом. До ділянки прикладена напруга 120 В.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

### Вимірювання потужності споживача електричного струму

**Мета.** Навчитися визначати потужність електричних приладів за допомогою амперметра і вольтметра.

#### Вказівки до роботи

У провіднику, в якому проходить струм, електрична енергія може перетворюватись у теплову, механічну, хімічну тощо. Як відомо, будь-яке перетворення енергії з одного виду в інший ха-



рактизується виконаною роботою. Зокрема, значення перетвореної електричної енергії в інші види визначається роботою електричного струму:  $A = UIt$ . Споживачі електричної енергії характеризуються потужністю, тобто спроможністю перетворити її в інші види за одиницю часу:

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

Таким чином, вимірявши силу струму і напругу, можна визначити потужність будь-якого споживача електричного струму.

### Виконання роботи (варіант 1)

Обладнання (див. форзац I, а): джерело постійного струму (1 або 4), лампа на підставці (2), реостат (6), ключ-вимикач (7), вольтметр (9), амперметр (10), з'єднувальні провідники (8).

1. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних: джерела струму, ключа, реостата, амперметра і лампи. Вольтметр приєднайте паралельно лампі.

70

2. Увімкніть струм і виміряйте силу струму в колі та напругу на лампі. Запишіть їх значення в таблицю і вимкніть струм.

3. За допомогою реостата змініть силу струму в колі і виміряйте повторно напругу на лампі. Запишіть значення сили струму і напруги. Вимкніть струм.

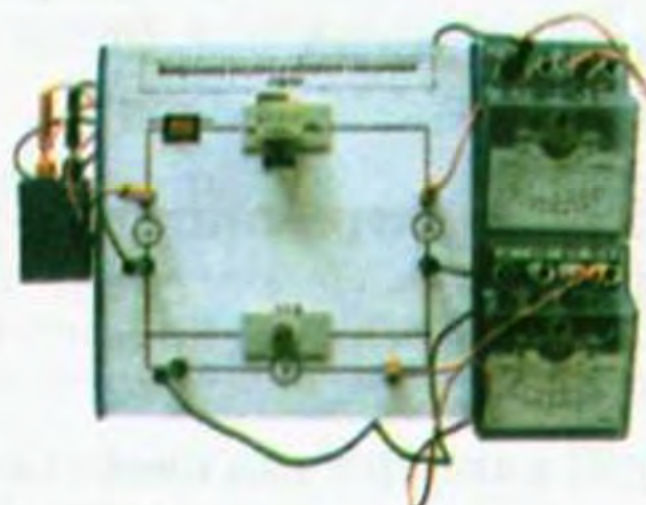
4. Обчисліть потужність електричної лампи в обох випадках і порівняйте їх значення. Поясніть, чому вони відрізняються між собою і від значення, позначеного на цоколі лампи.

### Додаткове завдання

Визначте роботу, що виконує електричний струм у лампі за 5 хв. Поясніть, які перетворення енергії при цьому відбуваються.

### Виконання роботи (варіант 2)

Обладнання (див. форзац I, б): джерело струму (2), комутаційна панель з шаблонами (1), амперметр (3), вольтметр (4), електрична лампочка (6), реостат (9), з'єднувальні провідники (14).



Мал. 70

1. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних елементів: джерела постійного струму, вимикача, реостата, амперметра та електричної лампи. Приєднайте вольтметр паралельно електричній лампі. Вигляд установки показано на малюнку 70.

2. Увімкніть вимикач. Виміряйте силу струму  $I_1$  та напругу  $U_1$  і запишіть їх у таблицю.



3. За допомогою реостата змінюйте силу струму в електричному колі. Запишіть значення напруги  $U$  і сили струму в колі  $I$  у таблицю принаймні для трьох вимірювань. Вимкніть струм.

Таблиця

№	Напруга $U$ , В	Сила струму $I$ , А	Потужність $P$ , Вт
1			
2			
3			

4. Обчисліть споживану лампою потужність  $P$  у кожному з вимірювань.

5. Результати обчислень запишіть у таблицю та зробіть висновок.

## § 19. Кількість теплоти, що виділяється у провіднику зі струмом

71

На багатьох прикладах ви переконалися в тому, що під час проходження струму провідники нагріваються – це прояв теплової дії струму.

Теплову дію електричного струму незалежно один від одного вивчали російський фізик Емілій Християнович Ленц та англійський учений Джеймс-Прескотт Джоуль. Вони експериментально встановили, що кількість теплоти, яка виділяється в провіднику під час проходження в ньому струму, пропорційна квадратові сили струму, опору провідника й часу проходження струму:

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

Цей висновок називається законом Джоуля–Ленца, а отримана формула є його математичним виразом. Формула дає можливість обчислювати кількість теплоти, що виділяється під час проходження струму на будь-якій ділянці кола, незалежно від того, які в цій ділянці відбуваються процеси.



Емілій Християнович Ленц (1804–1865) – російський фізик. Основні праці з електромагнетизму. В 1842 р. незалежно від Джоуля встановив закон теплової дії електричного струму.



Джеймс-Прескотт Джоуль (1818–1889) – англійський фізик. Праці присвячені електромагнетизму, теплоті, закону збереження енергії. В 1841 р. встановив залежність кількості теплоти, що виділяється в провіднику під час проходження струму, від інших фізичних величин.





Скориставшись законом Ома і формулою для визначення потужності струму  $P = UI$ , можна отримати ще три формули для обчислення кількості теплоти, яка виділяється в провіднику під час проходження струму:



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

Ці формули можна застосовувати у випадку, коли електрична енергія в даній ділянці кола перетворюється лише у внутрішню енергію цієї ділянки (нагрівальні прилади тощо). Коли ж, наприклад, працює електродвигун, то повна робота струму визначається виразом  $I U t$ , адже  $P = I U$ . З неї лише частина ( $I^2 R t$ ) перетвориться у внутрішню енергію, а решта – у механічну.

**Приклад.** На побутовій електричній прасці є напис «220 В, 1000 Вт». Що означає цей напис? Яка кількість теплоти виділяється в прасці за 10 хв прасування, якщо вона автоматично не вимикається?

72

Дано:

$$U = 220 \text{ В},$$

$$P = 1000 \text{ Вт},$$

$$t = 60 \text{ с} \cdot 10 = 600 \text{ с}.$$

$Q = ?$

Розв'язання

Напис на прасці означає, що при робочій напрузі 220 В потужність струму в прасці дорівнює 1000 Вт.

Кількість теплоти, що виділяється в провіднику під час проходження струму, визначається за законом Джоуля–Ленца:

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

Проте оскільки в прасці електрична енергія перетворюється лише на внутрішню енергію, то можна скористатися будь-якою формулою, наведеною в цьому параграфі. Найпростішою для цього випадку є формула:

$$Q = P t.$$

$$\text{Отже, } Q = 1000 \text{ Вт} \cdot 600 \text{ с} = 600\,000 \text{ Дж} = 600 \text{ кДж} = 0,6 \text{ МДж}.$$

**Відповідь.**  $Q = 0,6 \text{ МДж}.$



1. Чому під час проходження струму провідник нагрівається?
2. За якою формулою можна обчислити кількість теплоти у провіднику зі струмом?
3. У яких випадках для визначення кількості теплоти можна використовувати будь-яку з формул, наведених у цьому параграфі?



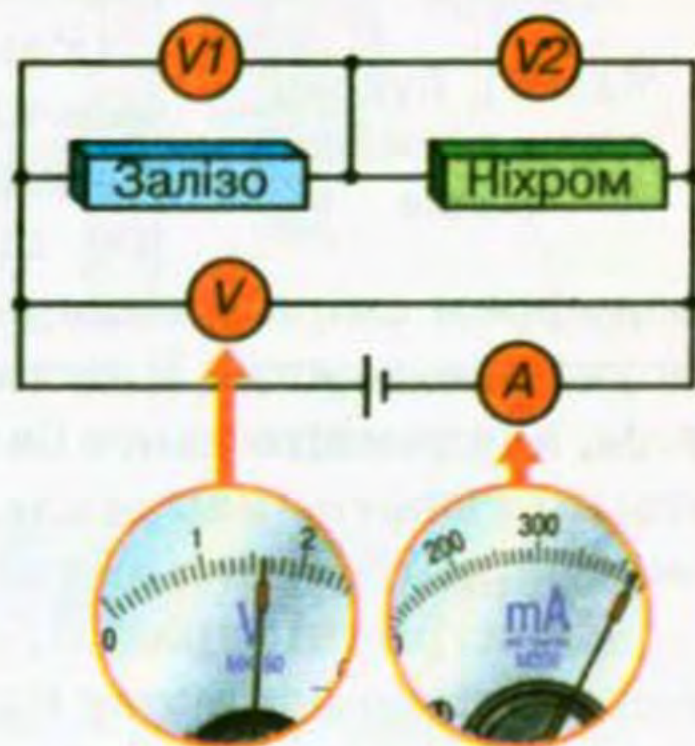
**Вправа 10**

1. Яка кількість теплоти виділяється в дротяній спіралі з опором 20 Ом за 30 хв, якщо сила струму в ній дорівнює 5 А?

2. До джерела струму приєднано три однакові за розміром (довжиною  $l$  і площею поперечного перерізу  $S$ ) провідники з міді, сталі і нікеліну. Який із провідників нагрівається найбільше? Відповідь обґрунтуйте.

3. Розгляньте написи на електричних приладах, які є у вас удома. Поясніть ці написи. Чи можна за ними визначити кількість теплоти, що виділяється під час роботи цих приладів?

4. За даними схеми електричного кола, що наведена на малюнку, і показами електровимірювальних приладів визначте: а) напруги, що показують вольтметри  $V_1$  і  $V_2$ ; б) опори кожного з провідників; в) потужності електричного струму в залізному і ніхромовому провідниках, а також повну потужність; г) в якому з провідників виділяється більша кількість теплоти.



## § 20. Застосування теплової дії струму на практиці

Найпростішими і найпоширенішими електронагрівальними приладами є електричні лампи розжарювання, які відомі ще з ХІХ ст. завдяки працям російського інженера О. М. Лодигіна та видатного американського винахідника Т. Едісона.



**Томас Алва Едісон (1847–1931)** – американський винахідник у галузі електротехніки і підприємець. Розробив і впровадив промисловий зразок електричної лампи розжарювання, винайшов електричний лічильник, збудував першу в світі електричну станцію, удосконалив телефон, розробив систему запису звуку тощо.



Спіраль сучасних ламп розжарювання виготовляють з вольфрамового дроту, температура плавлення якого близько  $3400\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $3387\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Тугоплавкий матеріал вибирають тому, що в робочому стані спіралі сучасних ламп нагріваються до  $3000\ldots 3100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При цьому утворюється яскраво-жовте світло.





Мал. 71. Будова лампи розжарювання

На малюнку 71 зображено будову лампи розжарювання, де 1 – спіраль, що є джерелом світла. Вона приварюється електричним зварюванням до двох провідників, що проходять крізь скло балона лампи 2. Один провідник з'єднується з гвинтовою нарізкою цоколя лампи 3, а інший приєднується до центральної частини цоколя, яка ізолювана від нарізки. Для з'єднання ламп з електричною мережею використовують так звані патрони.

Раніше лампи робили вакуумними – з їх балонів відкачували повітря, щоб у разі високих температур спіраль за наявності кисню швидко не згоряла. Але при цьому

вольфрам спіралі випаровувався, що призводило до швидкого псування лампи. В сучасних лампах повітря також відкачують, але замість нього балони заповнюють неактивними (інертними) газами, наприклад криптоном чи аргоном, що продовжує термін роботи ламп.

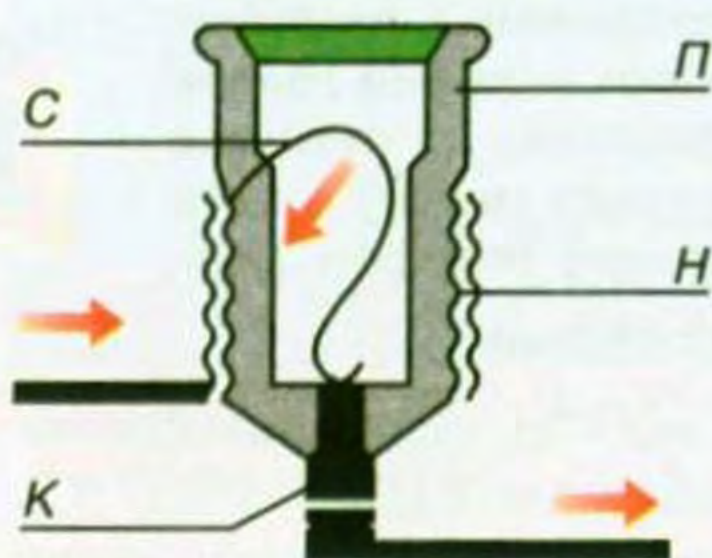
74

Електричні праски, плити, кип'ятильники тощо мають принципово однакову будову: тут обов'язковими є електричні нагрівники, які виготовляють зі сплавів із значним питомим опором (наприклад, ніхром – сплав нікелю, заліза, хрому, марганцю), та з'єднувальні провідники. Крім того, можуть бути вимикачі, різні перемикачі, регулятори і т. ін.

Дуже шкідливими для електричних кіл можуть бути короткі замикання. *Коротке замикання – це таке з'єднання частин ділянки кола, коли їх опір зменшується практично до нуля, а сила струму зростає, що призводить до псування елементів електричного кола, горіння і навіть пожежі.*

Для захисту електричних кіл від струмів короткого замикання послідовно зі споживачами електричної енергії вмикають різноманітні запобіжники.

Найпростішими є так звані плавкі запобіжники. На малюнку



Мал. 72. Пробковий плавкий запобіжник

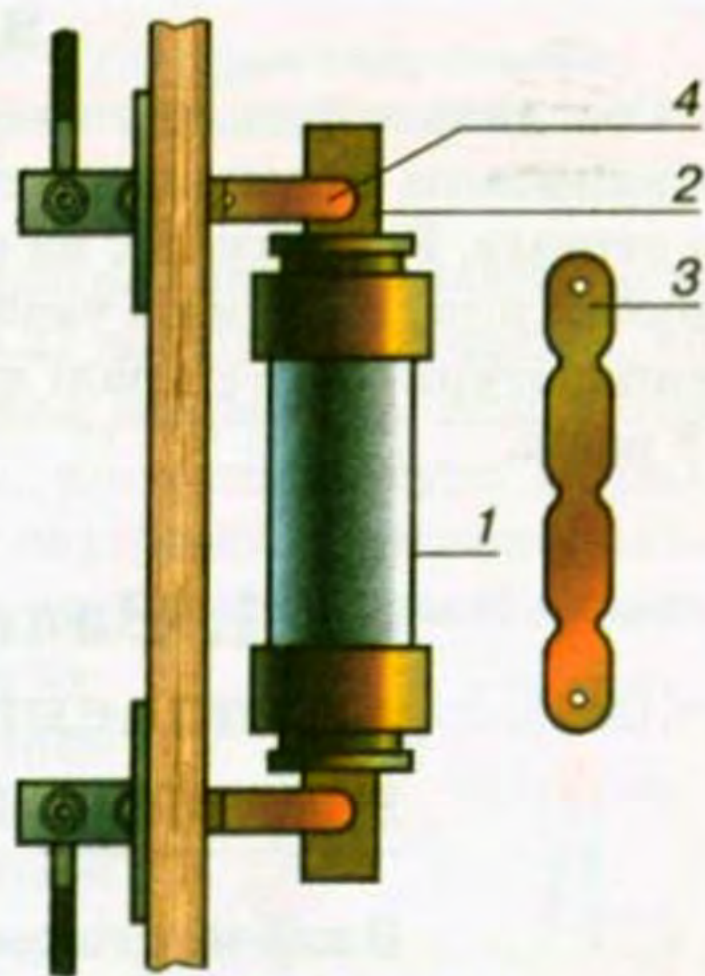
72 зображено плавкий запобіжник, основною деталлю якого є дротина С з легкоплавкого металу (наприклад, свинцю), що проходить усередині фарфорової основи П. Основа має гвинтову нарізку Н і центральний контакт К, до яких приєднана свинцева дротина. Запобіжник вкручують у патрон. Коли сила струму різко зростає, свинцева дротина швидко нагрівається і починає пла-



витися, що й спричиняє розрив кола та припинення струму в ньому.

Запобіжники можуть бути не лише зі свинцю, а й у вигляді металевих пластинок різної форми. На малюнку 73 зображено трубчастий запобіжник, розрахований на значні сили струму. Запобіжник складається з фарфорової трубки 1, яка запобігає розбризкуванню розплавленого металу в разі спрацювання запобіжника. На кінцях трубки закріплені контактні ножі 2, до яких усередині трубки приєднуються легкоплавкі пластини 3 чи шматки відповідного дроту. Ножі запобіжника вставляють у пружинні контакти (пінцети) 4, встановлені на щиті.

У телевізорах, радіоприймачах тощо, де сили струму незначні, можуть використовуватися скляні трубчасті запобіжники (мал. 74).



Мал. 73. Трубчастий запобіжник



Мал. 74. Запобіжник радіоприймача чи телевізора

**У разі перегорання запобіжник треба замінити, а не використовувати будь-які провідники, саморобні запобіжники, так звані «жучки», оскільки це небезпечно.**



Тепер часто використовують автоматичні запобіжники – електромагнітні, теплові, електронні та інші пристрої, що розмикають електричні кола, якщо сила струму в них перевищує значення, на які вони розраховані.

Якщо будь-який запобіжник спрацював, то слід вимкнути напругу, що подається до кола, перевірити коло, знайти пошкодження й усунути його. Лише після цього можна вставити новий запобіжник (чи увімкнути автоматичний) і ввімкнути напругу живлення.

1. Наведіть приклади використання теплової дії струму в побуті.
2. Яку будову мають лампи розжарювання? З чого виготовляють їх спіралі? На які напруги розраховані відомі вам лампи?
3. Що таке коротке замикання? До чого воно призводить в електричному колі чи на його ділянці?
4. Які ви знаєте запобіжники та як вони діють?





## Вправа 11

Розгляньте будь-яку лампу розжарювання, що є у вашій оселі. За написами на ній визначте опір її спіралі в робочому стані й силу струму. Розрахуйте, на яку силу струму слід поставити до неї запобіжник, маючи на увазі, що в холодному стані (за кімнатної температури) опір спіралі лампи менший, ніж у робочому, майже у 8 разів.

## § 21. Залежність опору металевих провідників від температури. Надпровідність

З вивченого раніше матеріалу ви вже знаєте, що опір провідника залежить від речовини, з якої він виготовлений, та його геометричних розмірів:  $R = \rho \frac{l}{S}$ , де  $\rho$  – питомий опір речовини,

з якої виготовлений провідник,  $l$  – довжина провідника,  $S$  – площа поперечного перерізу провідника.

Опір провідника входить до закону Ома для однорідної ділянки кола  $I = \frac{U}{R}$ , з якого й може бути визначений:  $R = \frac{U}{I}$ .

З останньої формули виходить, що опір провідника є сталим, оскільки, згідно з законом Ома, у скільки разів збільшимо напругу на кінцях провідника, у стільки ж разів зростає й сила струму в ньому.



Мал. 75. Електричне коло з лампою розжарювання

Але на практиці можна спостерігати й інші явища. Складемо електричне коло, схему якого зображено на малюнку 75. У цьому колі є джерело струму з регульованою напругою, електрична лампа, наприклад автомобільна, та вольтметр і амперметр, які показують напругу на лампі та силу струму в ній.

Установлюємо на лампі напругу  $U_1$  і відмічаємо силу струму  $I_1$ . Якщо тепер збільшити напругу, наприклад у 2 рази ( $U_2 = 2U_1$ ), то за законом Ома й сила струму повинна збільшитись у 2 рази ( $I_2 = 2I_1$ ). Але амперметр показує силу струму значно меншу, ніж  $2I_1$ . Отже, у даному разі закон Ома не справджується.

Виникла невідповідність між вашими попередніми знаннями і новим для вас фактом – закон Ома не завжди справджується. Така невідповідність у науці називається **проблемою**.

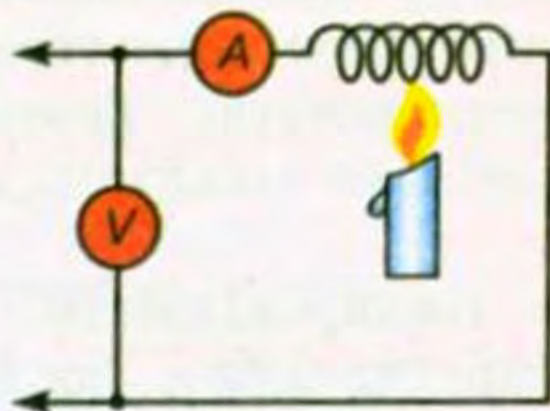


**Проблема (грец. – задача, утруднення) – складне теоретичне або практичне питання, що потребує розв'язання.**



Можна висловлювати різні припущення, які є спробою пояснити спостережуване явище. Але в ході досліду помічаємо, що при збільшеній напрузі лампа світиться яскравіше, ніж у першому випадку. Це є свідченням того, що температура спіралі лампи в другому випадку вища, ніж у першому. **Можливо, саме температура є причиною зміни опору металеві спіралі лампи.**

Як же можна перевірити таке припущення (гіпотезу)? Складаємо електричне коло (мал. 76), в якому є металевий провідник у вигляді спіралі, наприклад пружинка від кулькової ручки, і встановлюємо в колі струм певної сили. Якщо нагрівати спіраль у полум'ї свічки чи сірника, то можна помітити: під час нагрівання спіралі і за сталої напруги сила струму в колі зменшується, що свідчить про збільшення опору спіралі з підвищенням її температури.



Мал. 76. Дослідження залежності опору металевого провідника від температури

**Гіпотеза (грец. – основа, припущення) – наукове припущення, істинність якого потрібно довести.**

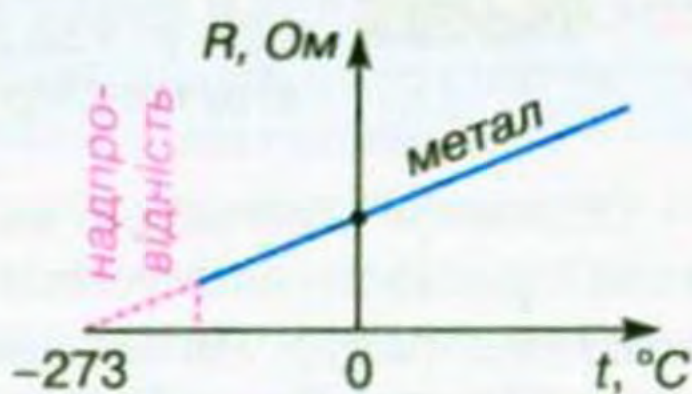


Ретельні дослідження показують, що опір металевих провідників залежить від їх температури практично лінійно  $R = R_0(1 + \alpha t)$ , де  $R_0$  – опір провідника при  $0^\circ\text{C}$  чи  $+20^\circ\text{C}$  (це зручніше для техніки). Графік такої залежності зображено на малюнку 77.

Якщо враховувати, що розміри металів під час нагрівання змінюються мало, то відповідну формулу можна записати й для питомого опору металевих провідників  $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ .

Розглянемо, що означає коефіцієнт  $\alpha$  в наведених формулах. Якщо при  $0^\circ\text{C}$  опір провідника  $R_0$ , а при  $t^\circ\text{C}$  опір його  $R$ , то відносна зміна опору, як показує експеримент,  $\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha t$ .

Коефіцієнт пропорційності  $\alpha$  називається *температурним коефіцієнтом опору*, який характеризує залежність опору речовини від її температури. Температурний коефіцієнт опору дорівнює відносній зміні опору провідника зі зміною його температури на  $1^\circ\text{C}$ . Для всіх металевих провідників  $\alpha > 0$  і мало залежить від температури.



Мал. 77. Графік залежності опору металевого провідника від температури



Чому ж зростає опір металевих провідників з підвищенням температури? Річ у тому, що під час нагрівання металу зростає інтенсивність коливань йонів кристалічної ґратки і швидкість хаотичного руху електронів.

Електрони частіше зустрічаються з йонами, що й зменшує швидкість їх напрямленого руху, який і є електричним струмом.

У техніці залежність опору металевих провідників від температури використовується в **термометрах опору**. Датчик температури (наприклад, платинова дротинка) розташовують у тих точках, де необхідно вимірювати температуру, а його опір вимірюють омметром, шкала якого градується в одиницях температури. Таких датчиків, за необхідності, може бути довільна кількість, а вимірювальний прилад – один.

**Надпровідність.** У 1911 р. голландський фізик Гейке Камерлінг-Оннес, досліджуючи властивості чистої ртуті при температурах, близьких до абсолютного нуля, відкрив нове, невідоме в науці явище: за температури 4,1 К ( $-269^{\circ}\text{C}$ ) питомий опір ртуті раптово зменшився до нуля. Таке саме явище він спостерігав у олова, свинцю, талію та ін.



Гейке Камерлінг-Оннес (1853–1926) – голландський фізик, уперше отримав температури, близькі до абсолютного нуля, зрідив гелій, відкрив явище надпровідності. Нобелівський лауреат – премія 1913 р. «За дослідження властивостей тіл при низьких температурах і отримання рідкого гелію».

Основною причиною виникнення явища надпровідності є особлива взаємодія електронів з йонами кристалічної ґратки за низьких температур. Явище надпровідності пояснили в 1957 р. американські вчені Джон Бардін, Леон Купер і Джон Роберт Шриффер, за що у 1972 р. отримали Нобелівську премію з фізики.

У наш час у техніці як надпровідник найчастіше застосовується сплав титану і ніобію, який переходить у надпровідний стан при 10 К. Але пошуки більш «високотемпературних» надпровідників відкривають нові перспективи. Японські вчені створили найефективніший на сьогоднішній день надпровідник, який з часом може стати основою глобальної науково-технічної революції. Вони отримали речовину – діборид магнію (сполука магнію з бором), яка стає надпровідною за рекордно високої температури для металів 43 К ( $-230^{\circ}\text{C}$ ).

Прогрес в отриманні надпровідних матеріалів можливий у таких напрямках:

1) передавання електроенергії на великі відстані без помітних втрат;



2) створення транспорту великих швидкостей на магнітній подушці;

3) створення потужних магнітних систем;

4) розробка надчутливих діагностичних приладів та ін.

Із прикладу дослідження надпровідності можна переконатися, що фізика ще далеко не вичерпала своїх можливостей у новій техніці й технологіях.

**Створення надпровідників з більш високою температурою може стати основою глобальної науково-технічної революції.**



1. Від чого і як залежить опір металевих провідників за сталої температури?
2. Як залежить опір металевих провідників від температури?
3. Де використовується залежність опору металевих провідників від температури?
4. Що таке надпровідність і де надпровідники можуть застосовуватися?



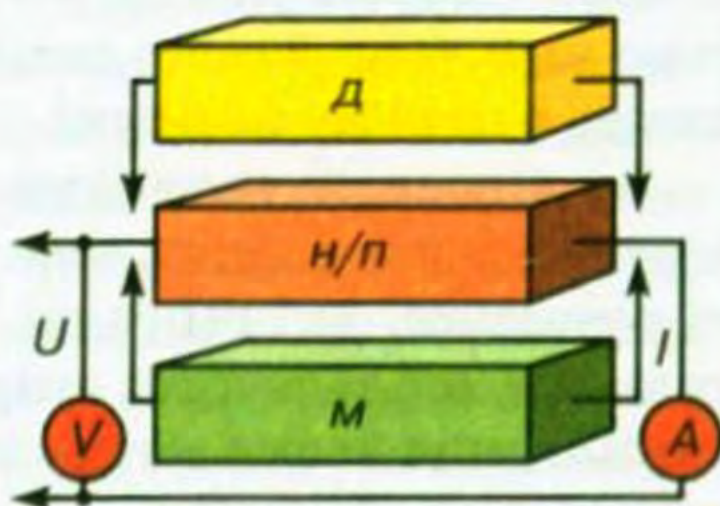
79

## § 22. Електричний струм у напівпровідниках

Ще на початку вивчення електричних явищ було помічено, що не всі тіла однаково проводять електрику: одні – добре, через що і дістали назву **провідники**, а інші – майже не проводять – їх названо **ізоляторами**, або **діелектриками**.

Але виявилось, що існують речовини, які не можна віднести ні до провідників, ні до діелектриків. Цю групу речовин назвали **напівпровідниками** і вважали, що вони практичного значення в електриці не мають. Справді, пізніші дослідження показали, що більшість напівпровідників практичного застосування в електриці не знайшли. Проте серед них були виявлені й такі, що мають надзвичайно цікаві й важливі властивості, що й спонукало до подальшого їх вивчення, а згодом і до широкого використання.

Щоб упевнитися в тому, що за питомим опором чи електропровідністю напівпровідники займають проміжне місце між провідниками (наприклад, металами) і діелектриками, можна виконати дослід, схему якого зображено на малюнку 78. Беруть три однакові за розмірами



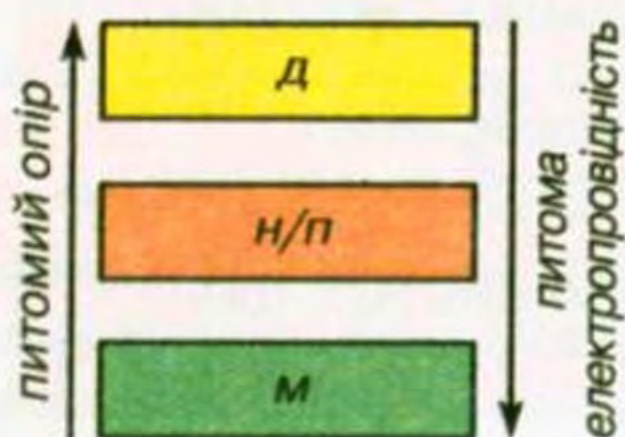
Мал. 78. Порівняння опору чи електропровідності різних речовин



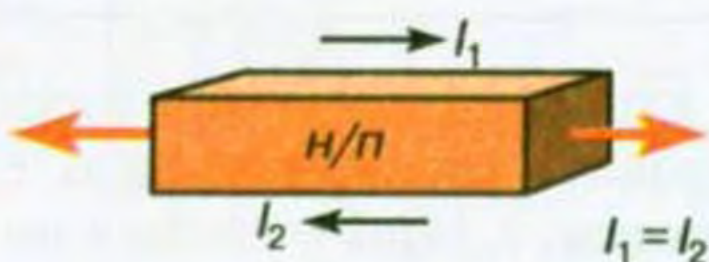
тіла: з металу (м), напівпровідникової речовини (н/п) і діелектрика (д). Підтримуючи в колі сталу напругу, вмикають по черзі тіло з металу, напівпровідникової речовини й діелектрика.



Мал. 79. Сила струму в колі за сталої напруги



Мал. 80. Порівняння значень питомих опорів та електропровідностей різних речовин



Мал. 81. Напівпровідникові речовини односторонньої провідності не мають

напівпровідникової речовини і пропускати крізь нього струм спочатку в одному, а потім у протилежному напрямі, то значення сил струму в обох випадках будуть однаковими (мал. 81).

Але існують напівпровідникові прилади, наприклад діоди<sup>1</sup> (про них мова йтиме далі), які справді проводять струм практично в одному напрямі.

За якими ж ознаками з величезної кількості речовин, що існують у природі чи можуть бути створені штучно, вибирають ті речовини, які сьогодні називають напівпровідниками? Пригадаємо, як залежить опір металевих провідників від температури. Якщо взяти металевий, наприклад залізний, провідник і нагрівати його в полум'ї свічки (мал. 82, а), то сила струму в

Якщо в коло ввімкнено металеве тіло, то сила струму досить значна – стрілка амперметра відхиляється до кінця шкали. У випадку ввімкнення діелектрика струм у колі практично відсутній, а при вмиканні напівпровідника – сила струму має проміжне значення (мал. 79).

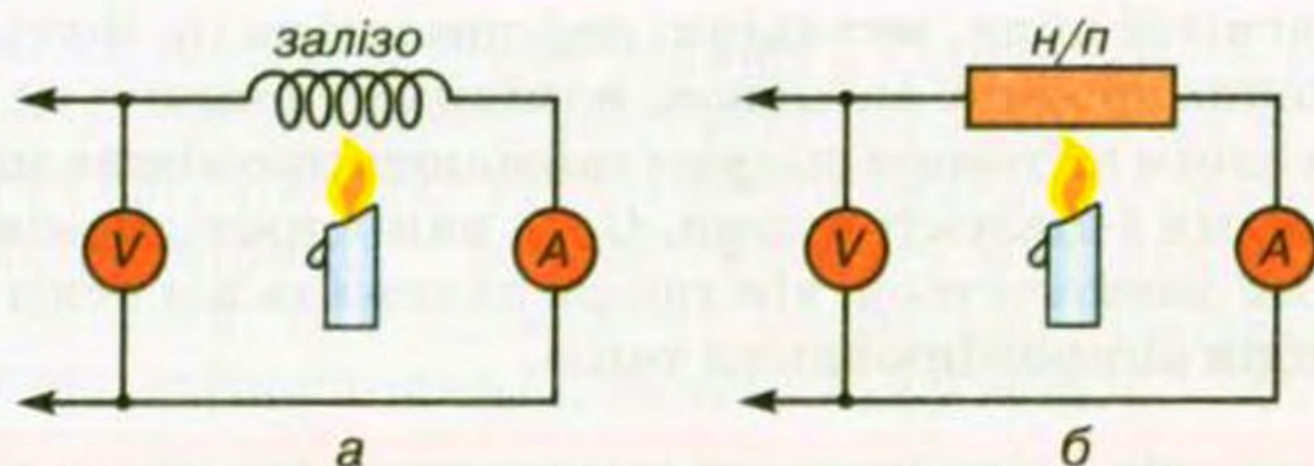
Таким чином, можна зробити висновки, що напівпровідники за питомим опором чи електропровідністю займають проміжне місце між металами (найкращими провідниками) і діелектриками:  $\rho_m < \rho_{н/п} < \rho_d$  (мал. 80).

Проте слід мати на увазі, що чіткої межі значень питомого опору металів, напівпровідників і діелектриків немає. Деякі напівпровідники за певних умов можуть бути за електричними властивостями близькими як до металів, так і до діелектриків.

Іноді слово «напівпровідник» пов'язують з тим, що нібито напівпровідники проводять струм лише в одному напрямі. Насправді, це не зовсім так. Якщо взяти тіло з на-

<sup>1</sup>Діод (грец. *di* – двічі та *od* – електрод) – прилад з двома електродом, що пропускає струм практично в одному напрямі.





Мал. 82. Порівняння залежності опору різних речовин від температури

колі зменшуватиметься. Якщо при цьому напруга на ділянці кола підтримується сталою, то можна зробити висновок, що з підвищенням температури опір металевих провідників зростає. Графік такої залежності зображено на малюнку 83.

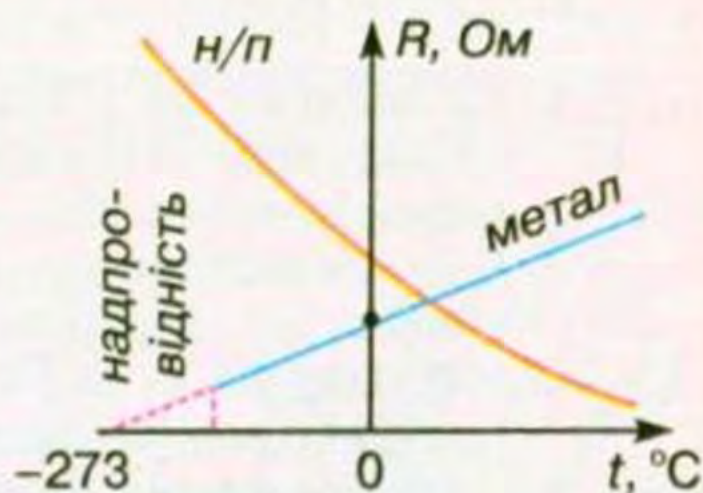
Якщо ж нагрівати напівпровідник (мал. 82, б), то сила струму в колі зростатиме. Отже, на відміну від металевих провідників, опір яких під час нагрівання зростає, опір напівпровідників зменшується з підвищенням температури (мал. 83).

Саме за цією ознакою і вибирають напівпровідникові речовини, що використовуються в сучасній техніці. Причина такої залежності полягає в тому, що під час нагрівання напівпровідників у них різко зростає кількість вільних носіїв заряду, які можуть утворювати струм.

До напівпровідників належать деякі речовини, утворені хімічними елементами (Силіцій, Германій, Селен та ін.), а також оксиди ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnO}$  та ін.), сульфідів ( $\text{PbS}$ ,  $\text{Ag}_2\text{S}$ ,  $\text{CdS}$  та ін.) та велика кількість природних і штучних речовин. Винятково важливі властивості напівпровідників зумовили їх широке використання в техніці.

Зменшення опору сірчастого срібла ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) ще в 1833 р. спостерігав видатний англійський учений М. Фарадей. Сьогодні ця властивість напівпровідників широко використовується в приладах, що називаються **термісторами** – датчиками температури в електричних термометрах, терморегуляторах тощо. Пізніше, у 1873 р., В. Сміт спостерігав зміну опору кристалічного селену під час освітлення, що стало основою для виготовлення **фоторезисторів** – складової приладів для вимірювання світлових величин, вмикання світла з настанням темряви чи його вимикання зі сходом Сонця (так звані фотореле).

Дослідження показали, що на властивості напівпровідників впливають рентгенівські промені, радіоактивне випроміню-



Мал. 83. Графіки залежності опорів металів і напівпровідників від температури



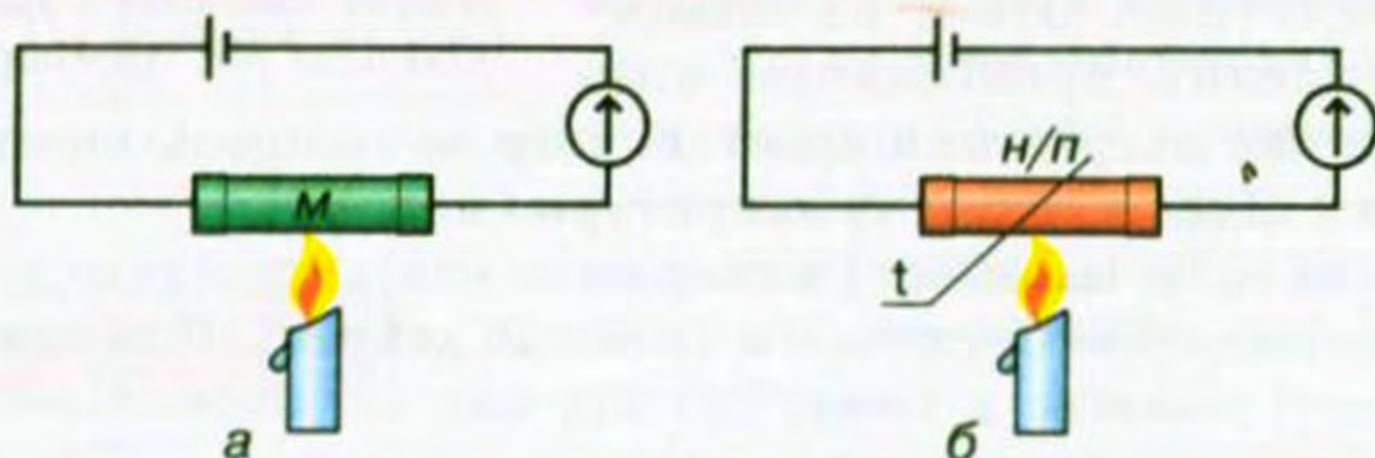
вання, магнітні поля, механічні деформації та ін. З усього сказаного можна зробити висновок: **напівпровідники** – це речовини, які за своїм питомим опором займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Опір напівпровідників під час нагрівання зменшується, він також залежить від освітленості, різних видів випромінювання тощо.



Опір металів з підвищенням температури зростає, а опір напівпровідників зменшується (принаймні у певному інтервалі температур).



1. На малюнку 84 зображено електричні кола з металевим і напівпровідниковим (термістор) резисторами. Як змінюватимуться покази гальванометрів в обох випадках, якщо резистори підігрівати?
2. Є два резистори: звичайний радіотехнічний і напівпровідниковий (термістор). Їх форма, розміри і значення опорів при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  однакові (мал. 84, а, б). Як визначити резистор, виготовлений з напівпровідникової речовини?
3. На одну площину металевої пластинки нанесена напівпровідникова речовина, наприклад селен. Як визначити цю площину?



Мал. 84. Дослідження металевого і напівпровідникового резисторів

## § 23. Електричний струм у розчинах і розплавах електролітів

Ви вже знаєте, що вільними носіями заряду в металах, які можуть створювати електричний струм, є електрони. Так само електронну провідність має й вакуум, де вільні носії заряду отримують, наприклад, завдяки термоелектронній емісії.

Провідники, під час проходження струму в яких не відбувається ніяких хімічних перетворень, називаються провідниками першого роду. Це метали, вакуумні прилади, напівпровідники.

Разом з тим існують речовини, при проходженні струму в яких відбуваються хімічні перетворення. Вони називаються провідниками другого роду. Це електроліти, йонні напівпро-



відники. Вільними носіями зарядів в електролітах, які створюють струм, є позитивно й негативно заряджені йони.

Йони в електролітах утворюються внаслідок явища **електролітичної дисоціації** – розпаду на йони молекул електролітів при розчиненні їх у полярному розчиннику (молекули таких розчинників є полярними), наприклад у воді.

**Електроліти** – хімічні речовини або їх системи, в яких проходження електричного струму зумовлене переміщенням йонів. Електроліти бувають тверді (йодисте срібло –  $\text{AgI}$ ), рідкі (розчини солей, кислот, лугів у воді та неводних розчинниках) і розплавлені ( $\text{NaOH}$  – натрій гідроксид,  $\text{MgCl}_2$  – магній хлорид та ін.).



Розглянемо розпад молекули  $\text{NaCl}$  під час розчинення у воді. Молекула солі є полярною, вона складається з позитивно зарядженого йона натрію і негативно зарядженого йона хлору (мал. 85). Цю молекулу ніби обліплюють також полярні молекули розчинника.

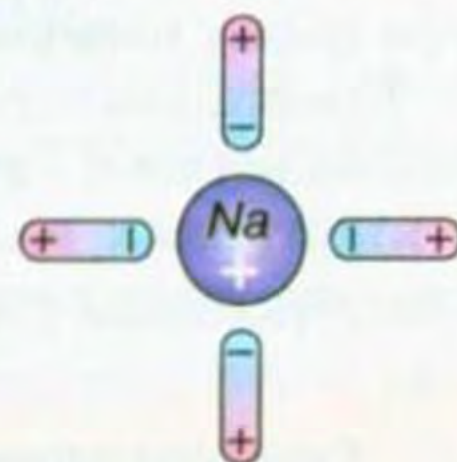


Мал. 85. Дисоціація молекули

Взаємодія між молекулами розчинюваної речовини і розчинника значно послаблює взаємодію між йонами розчинюваної речовини, і молекула може розпастися на йони. Це і є електролітична дисоціація.

Частина йонів знову об'єднується в молекули, що називається **молізацією**, або **рекомбінацією**, йонів у розчині. За певної температури в розчині встановлюється рівновага між кількістю дисоційованих і кількістю рекомбінованих молекул; кількість йонів у розчині залишається сталою. З підвищенням температури кількість дисоційованих молекул у розчині зростає.

За невисоких температур йони бувають оточені молекулами розчинника (мал. 86). Це явище називається **сольватацією**, а утворені системи – **сольватами**. Якщо розчинником є вода, то явище називається **гідратацією**. З підвищенням температури розміри сольватів зменшуються і сольватна оболонка може зникати зовсім.



Мал. 86. Сольватація

Слід зауважити, що явища дисоціації, молізації, сольватації відбуваються в електролітах незалежно від того, є в них електричний струм чи його немає.

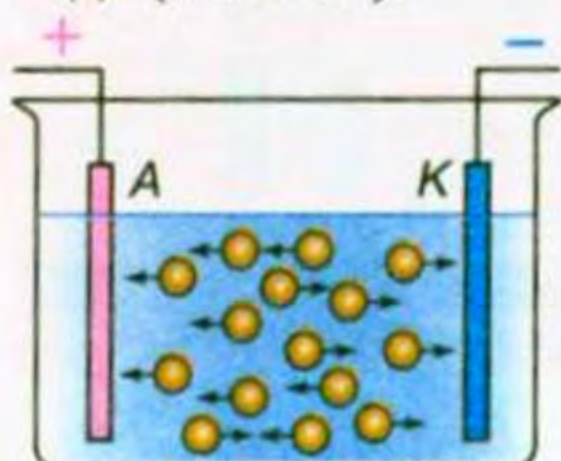
**Сольватація** (лат. *solvo* – розчиняю) – взаємодія між частинками (йонами, молекулами) розчинника і розчиненої речовини.





## Електроліз

Відкриття електролізу стало можливим після створення Вольтом батареї гальванічних елементів (1799). Уже в 1800 р. англійські дослідники У. Нікольсон і А. Карлейль відкрили електроліз: вони встановили, що під час проходження постійного струму у воді чи водних розчинах вода розкладається на водень і кисень. Пізніші дослідження були завершені у 1833 р. Майклом Фарадеєм і узагальнені ним у вигляді законів. Йони, що створюють струм в електролітах, мають назви: **аніони** (грец. – висхідні) – негативно заряджені йони, що рухаються до **анода**; **катіони** (ті, що йдуть донизу) – позитивно заряджені йони, що рухаються до **катода** (мал. 87).



Мал. 87. Струм в електролітах

Під час проходження струму через електроліт йони прямують до електродів, де можуть: виділятися на електродах, нейтралізуватися на них, вступати у вторинні реакції з електродами або з розчинником. Продукти вторинних реакцій виділяються на електродах або переходять у розчин.

У спрощеному розумінні: **виділення на електродах складових електроліту під час проходження струму в ньому називається електролізом.**



**Виділення на електродах складових електроліту під час проходження струму в ньому називається електролізом.**

## Закон електролізу

У 1833 р. М. Фарадей установив закон: **маса речовини  $m$ , що виділяється на аноді або катоді під час проходження електричного струму в електролітах, прямо пропорційна заряду  $q$ , який при цьому переноситься йонами через електроліт:  $m = kq$ .**

Коефіцієнт пропорційності  $k$  називається **електрохімічним еквівалентом даної речовини**. Він показує, яка маса речовини в кілограмах виділяється на електроді під час проходження струму, коли переноситься заряд, рівний одному кулону.



**Електрохімічний еквівалент речовини вимірюється в  $\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$  і**

**показує, яка маса даної речовини в кілограмах виділяється на електроді при перенесенні заряду в один кулон:**

$$k = \frac{m}{q}.$$



Якщо мати на увазі, що при постійному струмі в колі  $q = I\Delta t$ , де  $I$  – сила струму (ампер), а  $\Delta t$  – час проходження струму (секунди), то закон Фарадея можна записати у вигляді  $m = kI\Delta t$ .

### Застосування електролізу

Оскільки внаслідок електролізу на електродах можуть виділятися чисті речовини, то це явище широко використовується в техніці.

1) **Електрометалургія.** Виключно за допомогою електролізу отримують алюміній з розплавлених руд. У процесі електролізу одержують натрій, магній, кальцій та інші речовини.

2) **Рафінування (очищення) металів.** Для цього метал відливають у пластини і роблять їх анодами в електролітичних ваннах. Електроліт – розчин солі даного металу. За певних значень густини струму лише чистий метал виділяється на катоді. Домішки випадають в осад, з них також добувають корисні речовини. Так, наприклад, очищають мідь.

3) **Гальванопластика.** Це осадження металу на поверхні різних тіл для відтворення їх форми: форми для відливання деталей, скульптур, друкарських кліше тощо.

4) **Гальваностегія** – електролітичне нанесення певних металів чи інших речовин з метою їх захисту від корозії, відповідного оздоблення (покриття хромом, нікелем, сріблом, золотом, платиною тощо).

1. Що називають електролітичною дисоціацією? Чи відбувається дисоціація в розчині, в якому струму немає?
2. Що таке провідники першого і другого роду?
3. Сформулюйте закон Фарадея для електролізу, запишіть його формулу.



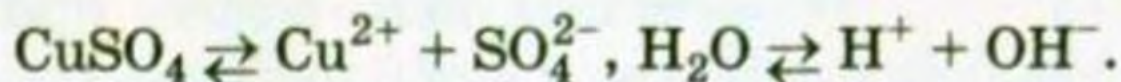
## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

### Дослідження явища електролізу

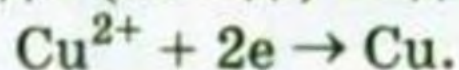
**Мета.** Експериментально визначити електрохімічний еквівалент речовини, застосувавши закон Фарадея для електролізу.

#### Вказівки до роботи

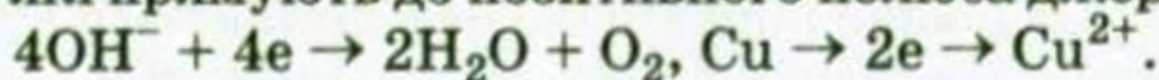
Під час проходження електричного струму у водному розчині сульфату купруму  $\text{CuSO}_4$  відбувається електролітична реакція:



На одному з електродів (катоді) осідає шар міді:



На іншому електроді (аноді) нейтральний атом міді віддає два електрони, які прямують до позитивного полюса джерела струму:





Йон міді, що утворився з нейтрального атома, переходить у розчин, тобто замість йона, запозиченого у катода, розчин отримує йон міді від анода. Унаслідок цього анод розчиняється («худне»), а катод покривається шаром міді («товстішає»).

Під час електролітичної реакції виконується **закон Фарадея для електролізу**: маса речовини  $m$ , що осідає на катоді під час проходження електричного струму  $I$  в електроліті, прямо пропорційна електричному заряду  $q$ , який при цьому переноситься йонами за час  $t$ :

$$m = kIt,$$

де  $k$  – електрохімічний еквівалент речовини, фізичний зміст якого полягає в тому, що він встановлює, яка маса речовини осідає на електроді під час електролізу при переміщенні електричного заряду 1 Кл.

### Виконання роботи (варіант 2)<sup>1</sup>

86

**Обладнання** (див. форзац I, б): джерело струму (2), комутаційна панель з шаблонами (1), амперметр (3), реостат (9), набір з електролізу (11), з'єднувальні провідники (14), терези з набором важків, мензурка з водним розчином сульфату купруму ( $\text{CuSO}_4$ ), секундомір, фільтрувальний папір.

1. За допомогою терезів виміряйте масу катода  $m_1$ . Зробіть у верхній частині катода позначку, щоб надалі не переплутати його з анодом, і закріпіть електроди в тримачах, не занурюючи їх у посудину з розчином.

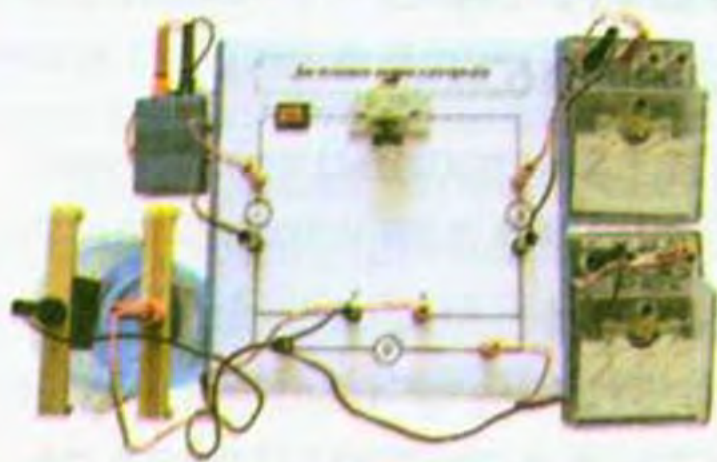
2. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних елементів: джерела постійного струму, вимикача, реостата, амперметра і посудини з катодом і анодом. Приєднайте вольтметр паралельно посудині з електродами. Вигляд установки показано на малюнку 88.

3. Опустіть електроди у посудину з водним розчином сульфату купруму  $\text{CuSO}_4$ . Увімкніть вимикач, відмітивши за годинником час початку досліду. За допомогою реостата встановіть силу струму у колі не більше, ніж 1 А, і підтримуйте її сталою протягом 15–20 хв. Вимкніть струм.

4. Вийміть катод, обережно промийте його водою, просушіть спочатку фільтрувальним папером, а потім над електроплиткою.

5. Виміряйте масу катода  $m_2$ . Результати вимірювань запишіть у таблицю.

<sup>1</sup>Зважаючи на те, що виконання цієї лабораторної роботи вимагає спеціального обладнання і практично не відрізняється від авторського варіанта, ця робота пропонується лише у варіанті 2.



Мал. 88



6. Обчисліть числове значення електрохімічного еквівалента міді за формулою:  $k = \frac{m_2 - m_1}{It}$ .

Таблиця

Сила струму $I$ , А	Час $t$ , с	Маса катода $m_1$ , кг	Маса катода $m_2$ , кг	Електрохім. еквівалент $k_{\text{вим}}$ , $10^{-7}$ кг/Кл	Електрохім. еквівалент $k_{\text{табл}}$ , $10^{-7}$ кг/Кл

7. Порівняйте значення електрохімічного еквівалента міді, отриманого під час експерименту, з табличним значенням  $k_{\text{табл}}$  і зробіть висновок.

### Додаткове завдання

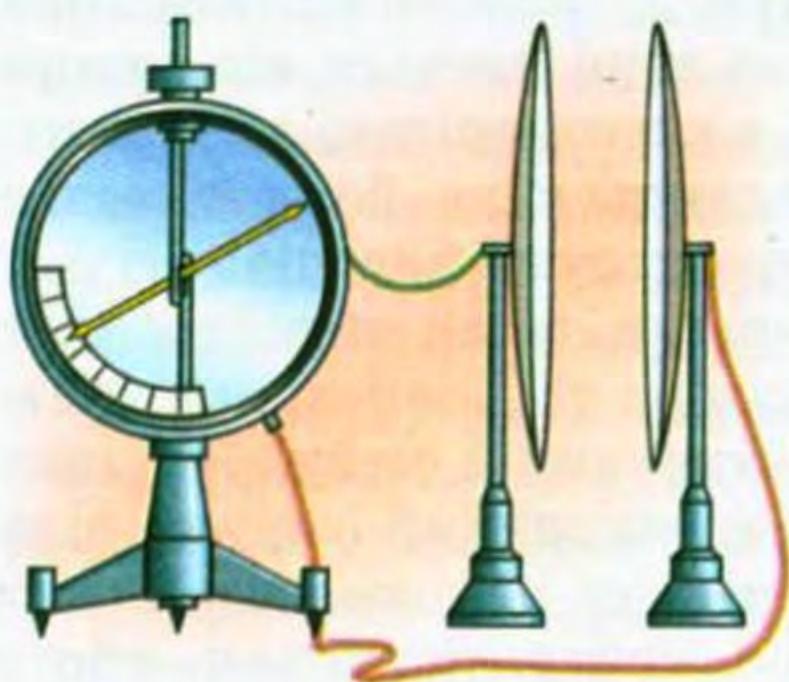
1. Визначте і запишіть інструментальні похибки і похибки відліку вимірювальних приладів: амперметра, терезів, секундоміра. Обчисліть максимальні абсолютні похибки вимірювань величин  $m$ ,  $t$ ,  $I$ .

87

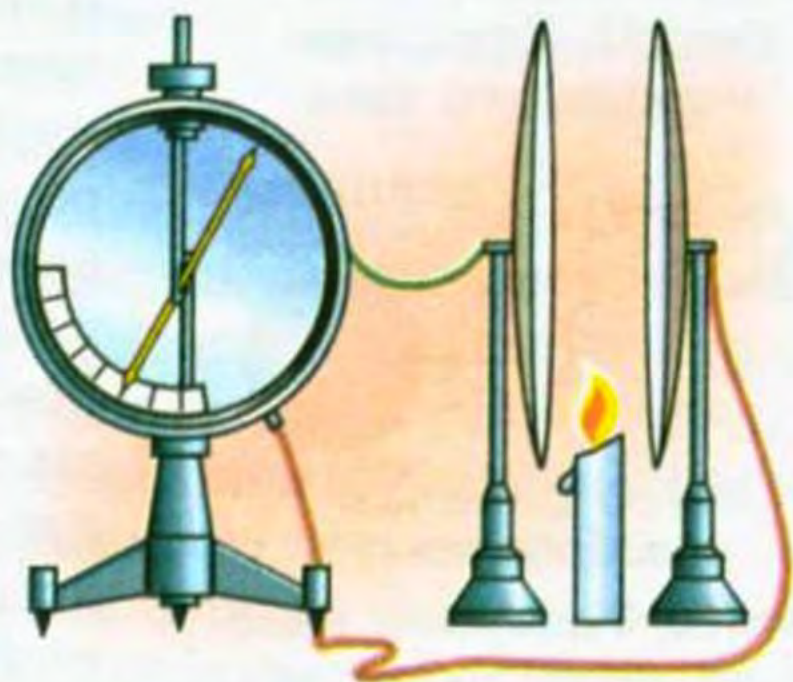
## § 24. Електричний струм у газах

Гази за нормальних умов є діелектриками, вони практично не проводять електричний струм, що зумовлено майже повною відсутністю в них вільних носіїв заряду.

Це можна підтвердити на досліді. Приєднуємо електрометр до плоского конденсатора і заряджаємо одну з його пластин – стрілка електрометра відхилиться на певний кут (мал. 89). Такий стан триватиме досить довго, хоча стрілка електрометра все ж буде опускатися. Це свідчить про наявність у повітрі навіть за звичайних умов певної кількості вільних носіїв заряду. Коли ж між пластинами помістити запалену свічку (мал. 90), то конденсатор розрядиться дуже швидко. Очевидно, що під дією високої температури в повітрі між пластинами утворилась досить



Мал. 89. Електрометр, приєднаний до конденсатора



Мал. 90. Розрядження конденсатора під дією полум'я



значна кількість вільних носіїв заряду, які під дією електричного поля потрапили на пластину і розрядили конденсатор. Нагрітий газ став провідником, і в ньому виник струм.

Електричний струм у газі називають *газовим розрядом*.



**Проходження електричного струму в газі називається *газовим розрядом*.**

## Йонізація газів

У розглянутому досліді вільні носії заряду в повітрі виникли під дією високої температури. Проте таке саме явище спостерігається і під дією різних видів випромінювань: рентгенівського, радіоактивного тощо.

Що ж відбувається з нейтральними молекулами газу під дією високої температури чи випромінювань?

Коли енергія молекули чи атома зростає, то вони при зіткненні з іншими молекулами можуть втратити один чи кілька електронів, перетворившись у позитивно заряджені йони (мал. 91).

Утворюється два вільні носії зарядів: електрон і позитивно заряджений йон.

У газах можуть утворюватися й негативні йони, коли електрони приєднуються до нейтральних молекул чи атомів (мал. 92).

Таким чином, під дією різних йонізаторів у газах утворюється три види вільних носіїв заряду: електрони та йони обох знаків. Але утворення йонів у газах принципово відрізняється від утворення їх в електролітах, де молекули розпадаються на йони внаслідок електролітичної дисоціації.

Якщо в газах перестає діяти йонізатор, то вони знову стають діелектриками і майже не проводять електричний струм: вільні носії заряду або досягають електродів і нейтралізуються, або рекомбінують, утворюючи нейтральні молекули чи атоми (мал. 93).

88



Мал. 91. Утворення пари електрон—позитивний йон



Мал. 92. Утворення негативного йона



Мал. 93. Утворення нейтральної молекули при об'єднанні позитивного йона й електрона



## Несамостійний і самостійний розряди в газах

Розрізняють два види газового розряду: *несамостійний* і *самостійний*.

За звичайних умов газ є діелектриками, оскільки в них є лише незначна кількість вільних носіїв заряду, які утворюються під дією іонізаторів, що завжди є в природі.

Тому, якщо зібрати установку, схема якої показана на малюнку 94, то струму в колі практично не буде помітно, хоча напругу можна збільшувати й до кількох сотень вольтів.

Щоб у такому колі існував струм, необхідно мати іонізатор (полум'я, радіоактивний препарат тощо), щоб унаслідок його дії утворилася певна кількість вільних носіїв заряду.

Якщо електропровідність газів створюється зовнішніми іонізаторами, то струм у газі називається **несамостійним газовим розрядом**.

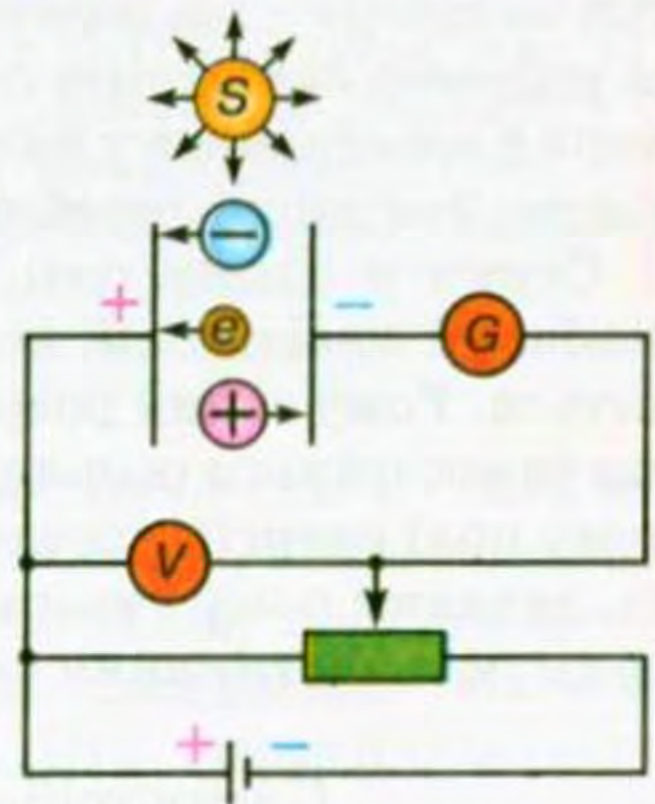
У розглянутому колі струм припиняється відразу, якщо припиняється дія іонізатора.

Якщо ж за наявності іонізатора поступово збільшувати напругу між пластинами (мал. 94), то швидкість напрямленого руху вільних носіїв заряду до пластин (електродів) буде зростати. Графік залежності сили струму в колі від напруги між електродами (вольт-амперна характеристика) зображено на малюнку 95.

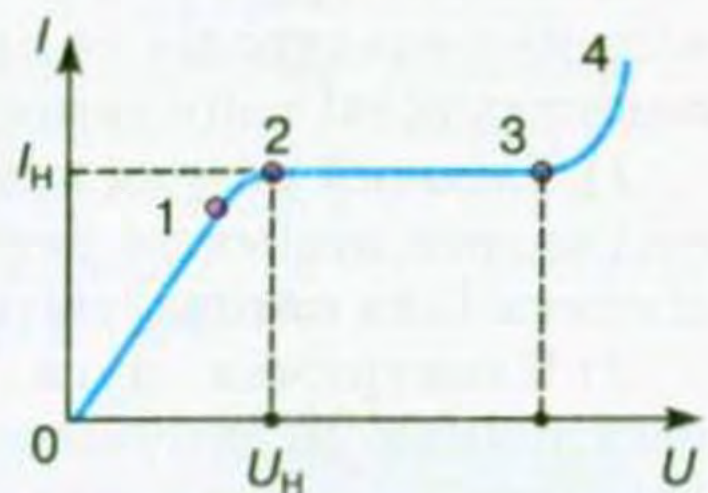
За невеликих напруг вольт-амперна характеристика є майже прямою лінією – справджується закон Ома (ділянка 0–1). У цьому випадку зі збільшенням напруги все більша кількість вільних носіїв заряду досягає електродів.

Якщо напругу збільшувати далі, то сила струму зростатиме повільніше (ділянка 1–2), що зумовлено зменшенням концентрації йонів у газі (за сталої потужності іонізатора).

Починаючи з напруги  $U_H$  сила струму вже не зростає – настає момент, коли відбувається насичення:  $I_H$  – струм насичення. Це пояснюється тим, що всі йони й електрони, створювані за рахунок дії іонізатора, досягають електродів (ділянка 2–3).



Мал. 94. Схема установки для дослідження струму в газах



Мал. 95. Вольт-амперна характеристика газового розряду



Якщо збільшувати напругу далі, сила струму в колі різко зростатиме (ділянка 3–4). Очевидно, що при цьому різко зростає йонізація газу незалежно від дії зовнішнього йонізатора.

Пояснити таку йонізацію можна так. Йони й електрони під час руху зустрічаються з нейтральними молекулами, але їх енергії недостатньо для йонізації нейтральних молекул.

Проте зі збільшенням напруги йони й електрони набувають енергій, достатніх для вибивання електронів з нейтральних молекул чи атомів – газ додатково йонізується. Таке явище називається ударною йонізацією газів. Швидкість утворених йонів і електронів в електричному полі зростає і вони знову можуть викликати ударну йонізацію, стрибкоподібно збільшуючи силу струму в колі.

Струм у цьому разі продовжує текти за рахунок ударної йонізації навіть тоді, коли дія зовнішнього йонізатора припиниться. Тому такий розряд у газі називають *самостійним*. Під час самостійного розряду позитивні йони набували в електричному полі енергії, достатньої для вибивання електронів з катода, завдяки чому утворюються додаткові носії заряду, які підтримують протікання самостійного розряду.

### Самостійні розряди різних типів та їх застосування

Залежно від властивостей і стану газу, характеру і розміщення електродів та прикладеної до електродів напруги виникають різні типи самостійних розрядів.

1) **Тліючий розряд** виникає за низьких тисків газу (десяті й соті частки міліметра ртутного стовпа). Майже вся трубка (крім ділянки біля катода) світиться однорідним світлом (мал. 96).

2) **Електрична дуга**. При стиканні двох провідників, приєднаних до потужного джерела струму, у місці контакту виділяється значна кількість теплоти, оскільки опір контакту порівняно з опором самих провідників значний (мал. 97).

Температура підвищується настільки, що в місці контакту розпочинає виділятися величезна кількість вільних електронів, тобто відбувається так звана термоелектронна емісія. Якщо тепер провідники (електроди) розсунути на певну відстань, то між ними виникне газовий розряд, який називається *електричною дугою*. Сила струму в дузі може сягати сотень і тисяч амперів при порівняно невисоких напругах. Температура в дузі може підніматися до 3500...



Мал. 96. Вигляд тліючого розряду



Мал. 97. Вигляд електричної дуги

електронів, тобто відбувається так звана термоелектронна емісія. Якщо тепер провідники (електроди) розсунути на певну відстань, то між ними виникне газовий розряд, який називається *електричною дугою*. Сила струму в дузі може сягати сотень і тисяч амперів при порівняно невисоких напругах. Температура в дузі може підніматися до 3500...



7000 °С. Тому дуга стає потужним джерелом світла, у ній можна плавити різні речовини, зварювати метали.

Значний внесок у розвиток дугового зварювання зробив вітчизняний винахідник М. М. Бенардос. Виключне значення для розвитку електрозварювання мають розробки, здійснені в Інституті електрозварювання імені Є. О. Патона, який був створений у 1934 р. в Києві.



**Микола Миколайович Бенардос (1842–1905).** Навчався у 1862–1866 рр. у Київському університеті, у 1866–1867 рр. – у Петровській землеробській і лісовій академії (Москва). Винайшов способи дугового зварювання (1881), підводного зварювання і різання, точкового і шовного контактного зварювання.



3) **Коронний розряд** виникає за атмосферного тиску біля загострених чи тонких заряджених провідників. Таке свічення нагадує форму корони, тому й дістало відповідну назву. Коронний розряд можна спостерігати навколо провідників високовольтних ліній, загострених предметів, над якими проходять заряджені хмари, тощо (мал. 98).

4) **Іскровий розряд** можна спостерігати навіть за звичайних умов, наприклад, коли короткочасно замикають провідником і розмикають гальванічний елемент чи батарею таких елементів. Але найграндіознішим іскровим розрядом є блискавка, яка виникає між зарядженими хмарами або зарядженими хмарами і землею. Максимальна сила струму в блискавці сягає десятків і сотень амперів, її тривалість порядку  $10^{-5}$  с, довжина може становити десятки кілометрів (мал. 99).



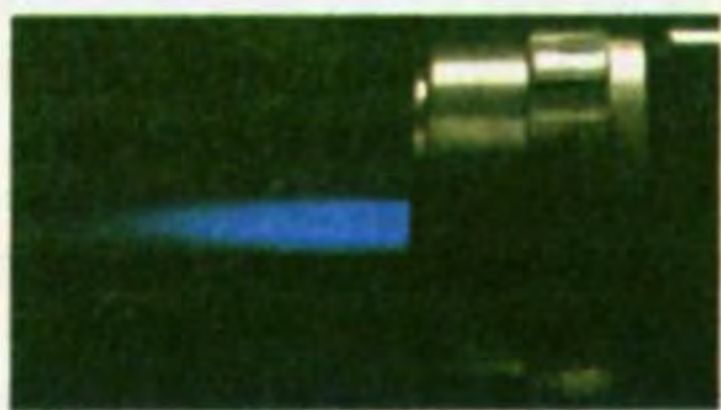
Мал. 98. Вогні Ельма



Мал. 99. Блискавка



## Плазма



Мал. 100. Плазма

Як відомо, за високих температур відбувається йонізація газів за рахунок зіткнення молекул і атомів, що швидко рухаються. Речовина переходить у стан, який називається *плазмою* (грец. – виліплене, утворене) (мал. 100). У фізиці під терміном «плазма» розуміють повністю або частково йонізований газ, у якому су-

марний електричний заряд усіх його частинок дорівнює нулю. У стані плазми перебуває більша частина об'єктів Всесвіту.

Плазма виникає під час усіх типів розрядів у газах. Вона існує в лампах денного світла, в газових лазерах, плазмотронах (для різання і зварювання металів), магнітогідродинамічних генераторах для отримання електричної енергії, у плазмових двигунах для керування рухом космічних апаратів.

Високотемпературну плазму, температура якої сягає десятки мільйонів кельвінів, використовують в установках для отримання термоядерних реакцій, що відкриває величезні перспективи в енергетиці та інших галузях.

1. Яка природа струму в газах?
2. У чому полягає різниця в утворенні йонів у газах і в електролітах?
3. Якщо гарячий газ охолодити, то він втрачає електропровідність. Чому?
4. Що таке несамоствійний розряд у газі?
5. За яких умов несамоствійний розряд переходить у самоствійний?
6. Поясніть вольт-амперну характеристику газового розряду.
7. Які види самоствійного розряду ви знаєте? За яких умов вони виникають та де застосовуються?

## § 25. Безпека людини під час роботи з електричними приладами і пристроями

Основні джерела електричної небезпеки для людини

1. Промислова електрика – електричний струм, який виробляється промисловими установками та індивідуальними джерелами струму для використання на виробництві та в побуті. Основними характеристиками такого струму, за якими визначається його небезпека, є напруга і сила струму.



2. Статична електрика – у виробничих процесах, у побуті відбувається перерозподіл заряджених частинок, які входять до складу тіл, що взаємодіють, і їх нагромадження у певних місцях. Між тілами може виникати досить висока напруга, але при розрядах сила струму незначна. При розрядах людина може відчувати уколи різної сили чи навіть удари. При цьому людина від несподіванки може доторкнутися до різних предметів і отримати травми.

3. Атмосферна електрика – природні явища, які відбуваються в атмосфері і приводять до розподілу заряджених частинок. Під час виникнення потужних потоків повітря хмари можуть заряджатися різнойменно і між ними може виникнути блискавка. Блискавки виникають і між хмарами та землею. У цьому випадку під дією зарядженої хмари біля наближених ділянок Землі нагромаджуються заряджені частинки протилежного знака. Коли напруга досягає певного значення – виникає блискавка.

В атмосфері спостерігаються також кульові блискавки у вигляді вогняних куль діаметром 10...20 см і більше. Це згусток заряджених і незаряджених частинок речовини, який при зіткненні з тілами вибухає, що може призвести до руйнувань і пожеж.

### Вплив електричного струму на організм людини

Дія електричного струму на організм людини супроводжується ураженням тканин та органів у вигляді механічних ушкоджень, електричних опіків, електрометалізації шкіри тощо.

Проходячи через тіло людини, електричний струм діє на центральну нервову систему, що призводить до ураження внутрішніх органів (серця, легенів тощо).

1. Теплова дія струму виявляється в опіках окремих ділянок тіла, сильному нагріванні кровоносних судин, нервів, серця, мозку, що призводить до серйозних розладів у діяльності організму.

2. Електрична дія струму виявляється у розкладі крові та інших речовин організму людини, що порушує його діяльність.

3. Біологічна дія струму – подразнення збудливих тканин організму, яке супроводжується мимовільним скороченням м'язів, можливим ушкодженням органів людини.

4. Чим довше струм проходить через органи людини, тим більша можливість їх ушкодження.

5. Ушкодження можуть статися й від теплової дії електричної дуги, від яскравого свічення тощо.



Сила струму по-різному впливає на організм людини. 1) Пороговий відчутний струм – найменше значення сили струму, при проходженні якого через організм людини виникає відчуття подразнення (0,6...1,5 мА при змінному струмі промислової частоти 50 Гц і 5...7 мА – при постійному струмі). При силі струму до 10 мА і частоті 50 Гц відчувається неприємне подразнення і може спостерігатися мимовільне скорочення м'язів. 2) Пороговий (невідпускаючий) струм – найменша сила струму, при проходженні якого через організм людини спостерігаються скорочення м'язів, наприклад рука не відпускає затиснений провідник (10...18 мА при змінному струмі частотою 50 Гц і 50...80 мА – при постійному струмі). При 25...30 мА утруднюється дихання, при силі струму більше 50 мА і до 100 мА порушується робота серця і спостерігається параліч дихання. **Сила струму 100 мА (50 Гц) вважається смертельною для людини.**

### Що робити при ураженні електричним струмом

94

При ураженні електричним струмом насамперед потрібно:

- вимкнути напругу вимикачем або рубильником, від'єднати аварійну ділянку або мережу загалом;
- звільнити потерпілого від струмопровідних частин, до яких він доторкається;
- не можна доторкатися до потерпілого оголеними руками: для роботи з потерпілим потрібно одягнути гумові рукавиці, обмотати руки шарфом чи іншою сухою тканиною, відтягнути його з небезпечної зони за сухий одяг, стати на гумовий килимок, користуватися сухою палицею чи дошкою. При цьому бажано користуватися однією рукою;
- винести потерпілого з небезпечної зони, викликати швидку медичну допомогу, за необхідності провести штучне дихання.

Учні, студенти, які не досягли 18-річного віку, можуть працювати з електрикою лише під постійним наглядом кваліфікованих працівників.



## Головне в розділі 2

- Електричний струм – це напрямлений рух заряджених частинок або тіл.

- Для того щоб струм існував, необхідно мати вільні носії електричних зарядів, джерело струму і замкнене електричне коло.

- У будь-якому джерелі електричного струму відбувається роз'єднання заряджених частинок за рахунок роботи сил, що не мають електричного походження.

- За електричними властивостями тіла поділяються на провідники, які добре проводять електричний струм, та ізолятори, або діелектрики, які практично не проводять струм за нормальних умов. Переважна більшість тіл навколишнього світу є поганими провідниками і поганими діелектриками.

- Багато речовин можуть бути й добрими провідниками, й добрими діелектриками залежно від умов, у яких вони перебувають (напівпровідники, гази, електроліти).

- Величина, що характеризує протидію електричному струму в провіднику, називається опором. Опір провідника залежить від матеріалу, з якого він виготовлений, його довжини  $l$  і площі поперечного перерізу  $S$ :  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

- Опір металевих провідників з підвищенням їх температури зростає, а опір напівпровідників – зменшується.

- Закон Ома для однорідної ділянки кола: сила струму в однорідній ділянці кола прямо пропорційна напрузі на ній і обернено пропорційна її опору:  $I = \frac{U}{R}$ .

- Закон Джоуля–Ленца: кількість теплоти, що виділяється в провіднику під час проходження в ньому електричного струму, пропорційна квадрату сили струму в ньому, опору провідника і часу протікання струму:  $Q = I^2 R t$ .

- Закон електролізу: маса речовини, що виділяється на аноді або катоді під час проходження електричного струму в електролітах, прямо пропорційна заряду  $q$ , який при цьому переноситься йонами через електроліт:  $m = k q$ , де  $k$  – електрохімічний еквівалент речовини.





# Розділ 3

Засвоївши матеріал цього розділу, ви будете **знати**:

- що в природі існує магнітна взаємодія;
- особливості магнітної взаємодії;
- властивості постійних магнітів;
- природу постійних магнітів;
- що магнітне поле завжди пов'язане з електричним струмом;
- що зміна магнітного поля викликає появу електричного струму в замкнених провідниках.

Ви зможете **пояснити**:

- походження магнітного поля;
- дію магнітного поля на провідник зі струмом;
- як працює електродвигун постійного струму;
- як відбувається явище електромагнітної індукції;
- застосування електромагнітної індукції в різних приладах.

Ви будете **вміти**:

- знаходити полюси постійних магнітів;
- визначати напрям магнітних ліній;
- визначати напрям сили, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі;
- визначати напрям індукційного струму в провіднику;
- пояснювати принцип дії приладів, в яких застосовується сила Ампера та електромагнітна індукція.



# МАГНІТНЕ ПОЛЕ

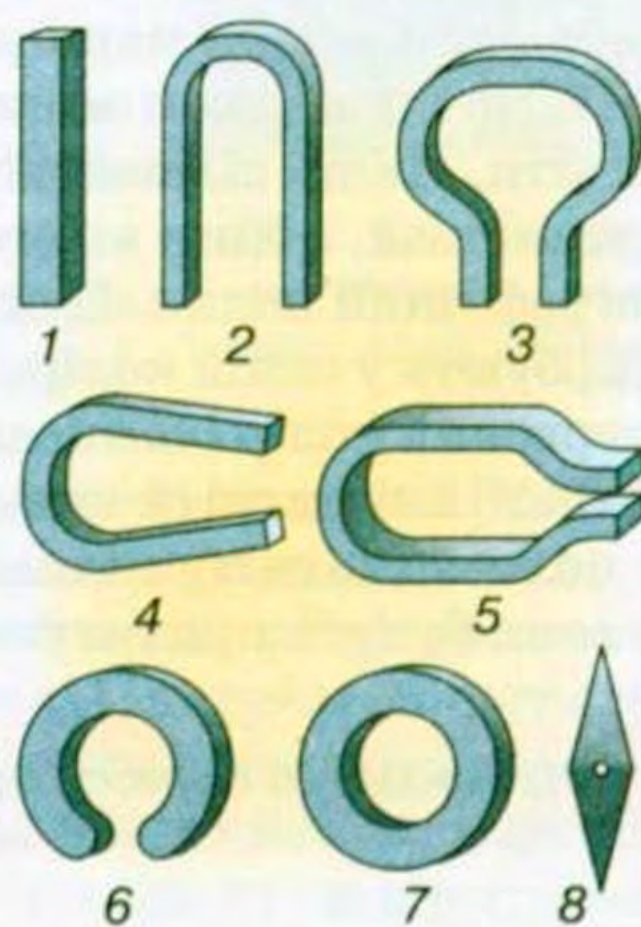
## § 26. Постійні магніти та їх взаємодія. Магнітне поле Землі

97

У давні часи люди помітили, що деякі мінерали мають властивість притягувати до себе залізні предмети. Легенда стверджує, що першим, хто помітив це явище, був пастух малоазійського міста Магнезія. Тому тіла з такими властивостями були названі *магнітами* (магнетами).

Магніти знаходять широке застосування в сучасній техніці, використовуються в науці і побуті. За формою вони можуть бути різними. На малюнку 101 показано смуговий (1), підковоподібні (2–5), кільцевий (7) магніти. В окремих випадках їх виготовляють іншої, складнішої форми (6, 8).

Дія магніту довільної форми неоднакова в різних його частинах. Якщо його піднести до залізних ошурків чи інших залізних предметів, то вони притягуватимуться до нього. Але дія магніту буде найбільшою біля його кінців (мал. 102). Ці частини магніту називають *полюсами*.



Мал. 101. Постійні магніти різної форми





Мал. 102. Дія магніту на полюсах найбільша



Мал. 103. Магнітний компас

Якщо до полюсів магніту підносити предмети, виготовлені не із заліза чи деяких інших речовин, то такої взаємодії не відбуватиметься. Магнітна взаємодія спостерігається з речовинами, які називають *феромагнетиками* (Ferrum – залізо). Феромагнетиками є чисті речовини (залізо, нікель, кобальт і деякі інші), можуть бути їх сплави, порошки тощо.

Постійним магнітом є стрілка компаса, розміщена на тонкому вістрі (мал. 103). У будь-якому місці на Землі, крім магнітних полюсів, вона завжди орієнтується однаково. Магнітні полюси Землі не точно збігаються з її географічними полюсами. Тому магнітний компас не точно показує на північ. Північний полюс Землі знаходиться поблизу південного магнітного полюса, а південний – навпаки.

Для сучасної навігації велике значення має компас із магнітною стрілкою (мал. 103). Знаючи напрям північ-південь у даному місці Землі, можна за шкалою і картою визначити напрям руху до необхідного об'єкта. Тому компас має виняткове значення в сучасній навігації, там, де треба прокладати маршрути.

Магнітні полюси мають не лише стрілки компасів, а й усі магніти. Якщо підвісити смуговий магніт на довгій нитці, то він повернеться, і один з його полюсів покаже напрям на північний географічний полюс. Цей полюс аналогічно називають *північним* і фарбують у синій колір. Протилежний кінець магніту фарбують у червоний колір і називають *південним магнітним полюсом*.

Постійні магніти взаємодіють між собою. Якщо до північного полюса магніту піднести південний полюс другого магніту, то вони будуть притягуватися один до одного.



**Різнойменні полюси постійних магнітів притягуються.**

Якщо до північного полюса магніту піднести північний полюс другого магніту, то магніти будуть відштовхуватися. Подібним чином будуть взаємодіяти і південні полюси (мал. 104).





Мал. 104. Взаємодія полюсів постійних магнітів

Однорідні полюси постійних магнітів відштовхуються.



Постійні магніти взаємодіють навіть при відсутності безпосереднього контакту між ними, на певній відстані. Це свідчить про те, що існує *магнітне поле*. Кожний магніт має власне магнітне поле.

Властивості магнітного поля інші, ніж електричного. У цьому можна перекона- тись, отримавши так звані *магнітні спектри*. Для цього покладемо постійний магніт на поверхню стола і накриємо його аркушем тонкого картону. Поверхню картону посиплемо дрібними залізними ошурками. У полі магніту вони розташу- ються певним чином, утворюючи лінії, що виходять із полюсів (мал. 105).



Мал. 105. Спектр магнітного поля смугового магніту

Ці лінії називають *лініями магнітного поля*, або *лініями магнітної індукції*. За їхньою формою можна казати про мож- ливі дії поля даного магніту: біля полюсів магніту густина магнітних ліній більша і тут дія магнітного поля сильніша.

Магнітним лініям приписують певний напрям. Якщо в магнітному полі розташувати маленьку магнітну стрілочку, то вона розміститься так, що її поздовжня вісь збігатиметься з магнітними лініями. Учені домовилися за її напрям обирати той, що «виходить» із північного полюса і «входить» у південний, за- микаючись усередині магніту. Важливо відзначити, що магнітні лінії замкнені, ніде не починаються і ніде не закінчуються. У смугового магніту вони замикаються всередині магніту. Тому не можна отримати окремо північний чи південний полюси. Шмат- ки розламаного магніту також завжди матимуть два полюси.





Мал. 106. Полюси Землі

Орієнтація магнітної стрілки в напрямі географічних полюсів Землі свідчить, що навколо Землі існує магнітне поле.

Встановлено, що один із полюсів знаходиться на півночі земної кулі і географічно є північним полюсом Землі (мал. 106). Але як магнітний – він полюс південний, бо до нього притягується північний полюс стрілки компаса. Аналогічно на південному географічному полюсі міститься північний магнітний полюс. Магнітні полюси Землі не збігаються з географічними. Вони навіть трохи рухаються по Землі. Так, зараз південний магнітний полюс Землі знаходиться за 2100 км від північного географічного полюса.

Магнітне поле перебуває в безперервних змінах. Змінюються не тільки магнітні полюси, а й інтенсивність магнітного поля. Особливо це помітно в період сонячної активності, коли з боку Сонця до Землі прямують потоки заряджених частинок, які викликають магнітні бурі. Інтенсивність магнітного поля Землі змінюється і від точки до точки поверхні. Місця, де особливо великі відхилення інтенсивності від середньої, називають *магнітними аномаліями*. Як правило, в таких місцях залягають значні поклади залізних руд на малій глибині.

Магнетизм земної кулі остаточно ще не вивчений. Відомо лише, що основну роль в магнетизмі Землі відіграють електричні струми в атмосфері та в розплавленому ядрі.

Магнітне поле надійно захищає Землю і весь живий її світ від космічного випромінювання, яке згубно діє на живі організми.

1. Які властивості постійних магнітів?
2. Як взаємодіють полюси магнітів?
3. Які є види постійних магнітів?
4. Яку частину магніту називають полюсом?
5. Який вигляд мають магнітні лінії поля?
6. Чи можна отримати магніт з одним полюсом?
7. Як розміщені магнітні полюси відносно географічних полюсів Землі?



## § 27. Магнітна дія струму. Дослід Ерстеда

Природа магнітного поля тривалий час залишалася для вчених загадкою. Пізнати її вдалося лише тоді, коли вчені дослідили електричний струм і його фізичні дії.

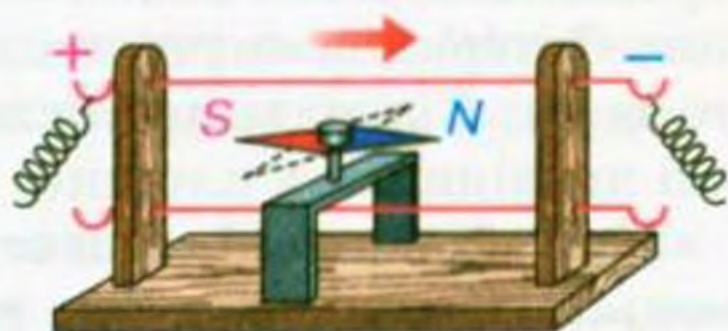


Ганс Христіан Ерстед (1777–1851) – данський фізик. Його праці присвячені електриці, акустиці, молекулярній фізиці. У 1820 р. виявив дію електричного струму на магнітну стрілку, що започаткувало електромагнетизм.



Уперше це здійснив данський фізик Г. Х. Ерстед у 1820 р. Готуючись до лекції про властивості електричного струму, він розташував металевий провідник над магнітною стрілкою на металевому вістрі.

Коли електричне коло замкнули, магнітна стрілка повернулася і зупинилася в положенні, в якому її поздовжня вісь вже не була паралельною до провідника (мал. 107). Після розмикання кола стрілка поверталася у початкове положення.



Мал. 107. Дослід Ерстеда

Сумнівів не було, що струм у провіднику діє на магнітну стрілку. Оскільки не було жодного іншого чинника, який би пояснював взаємодію між електричним струмом і магнітною стрілкою, то Ерстед припустив, що електричний струм має магнітне поле.

Отже, дослід Ерстеда про зв'язок електричного струму і магнітного поля і висновок, зроблений М. Фарадеєм, про зв'язок електричних і магнітних явищ дали поштовх у розкритті природи магнетизму. Так, французький фізик Андре-Марі Ампер висловив гіпотезу, що в усіх тілах існують колові електричні струми, які створюють власне магнітне поле. Вони орієнтовані в тілі хаотично, і тому речовина за звичайних умов не має явно виражених магнітних властивостей. Проте окремі з них можуть упорядковувати свої внутрішні магнітні поля і виявляти магнітні властивості. Найбільше це притаманно феромагнетикам.

Протіканням колових струмів у надрах Землі Ампер також пояснював магнетизм нашої планети.

Подальші дослідження будови атома і відкриття електрона підтвердили справедливості гіпотези Ампера. Тепер відомо, що колові струми у речовині створюють електрони, що рухаються замкненими орбітами в атомах, а також обертання заряджених частинок навколо своїх осей.





1. Який склад експериментальної установки в досліді Ерстеда?
2. Яку роль виконувала магнітна стрілка в досліді Ерстеда?
3. Який висновок зробили вчені з досліді Ерстеда?
4. У чому суть гіпотези Ампера?
5. Чому всі речовини взаємодіють з магнітним полем?

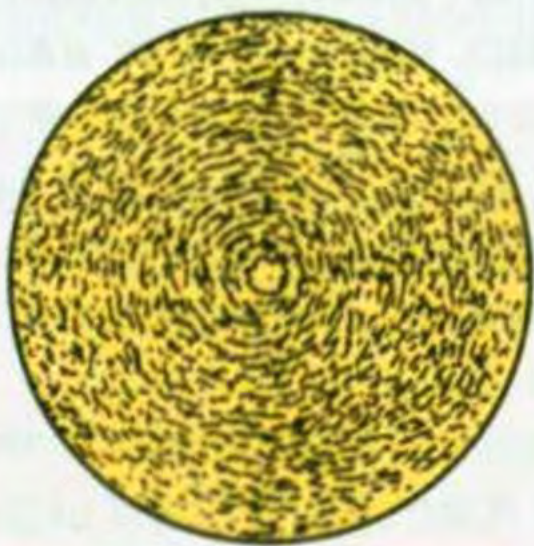
## § 28. Магнітне поле прямого провідника зі струмом

Візьмемо шматок картону і в його центрі через отвір пропустимо прямолінійний провідник. Провідник увімкнемо в електричне коло з джерела струму, реостата і вимикача. Якщо замкнути коло, у провіднику проходитиме електричний струм, силу якого можна регулювати реостатом. Не розмикаючи коло, почнемо посипати картон у місці проходження провідника залізними ошурками, струшуючи при цьому картон. Ошурки почнуть зміщуватися й утворять спектр магнітного поля. Він матиме вигляд концентричних кіл із центром на осі провідника в площині поверхні картону (мал. 108).

При збільшенні сили струму густина цих ліній збільшуватиметься, що свідчить про підвищення інтенсивності магнітного поля (мал. 109).

Для визначення напрямку магнітних ліній прямого провідника зі струмом у досліді використовують магнітну стрілку (мал. 110, а). Показаний у перерізі провідника знак «+» означає, що струм іде від спостерігача за площину малюнка. Спрямовування північного полюса стрілки вказує напрям магнітної лінії. Якщо змінити напрям струму в провіднику (мал. 110, б), то побачимо, що стрілка повернеться на  $180^\circ$ . Це свідчитиме про зміну напрямку магнітної лінії.

На малюнку 111 показано зв'язок напрямку струму і напрямку магнітної лінії за правилом свердлика (правого гвинта):

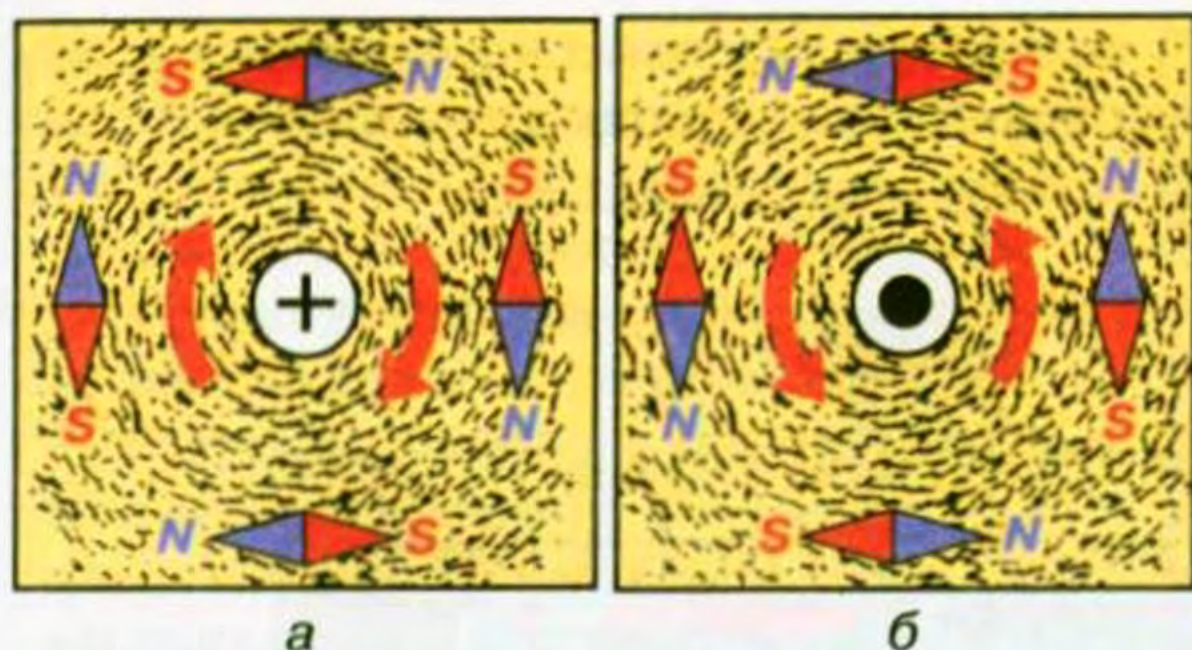


Мал. 108. Магнітний спектр прямого провідника зі струмом



Мал. 109. Графічне зображення магнітного спектра прямого провідника зі струмом





Мал. 110. Визначення напрямку магнітних ліній



Мал. 111. До правила свердлика

якщо поступальний рух правого гвинта збігається з напрямом струму в провіднику, то напрям обертання гвинта вказує напрям магнітної лінії.

Оскільки напрям магнітної лінії можна визначити магнітною стрілкою, то знаючи правило правого гвинта, можна визначити напрям струму в провіднику, не знаючи, як джерело струму увімкнуте в коло:

якщо напрям обертання правого гвинта збігається з напрямом магнітної лінії, то поступальний рух гвинта показує напрям струму в провіднику.

1. Яку форму мають магнітні лінії прямого провідника зі струмом?
2. Як формулюється правило правого гвинта?
3. Що відбувається з магнітними лініями при зміні напрямку струму в провіднику?

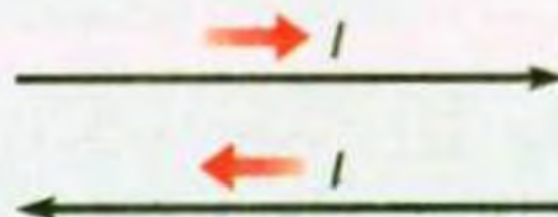


## Вправа 12

1. За малюнком 112 визначити напрям магнітних ліній поля двох паралельних провідників зі струмом.

2. За малюнком 113 визначити напрям магнітних ліній прямих провідників зі струмом.

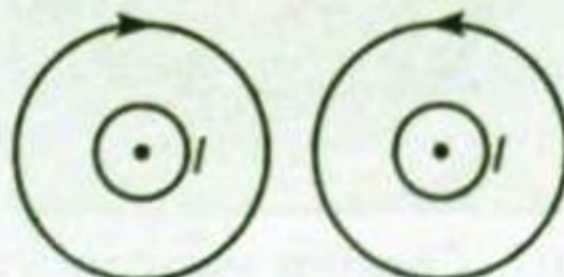
3. За малюнком 114 визначити напрям струму в провідниках, знаючи напрям магнітних ліній.



Мал. 112



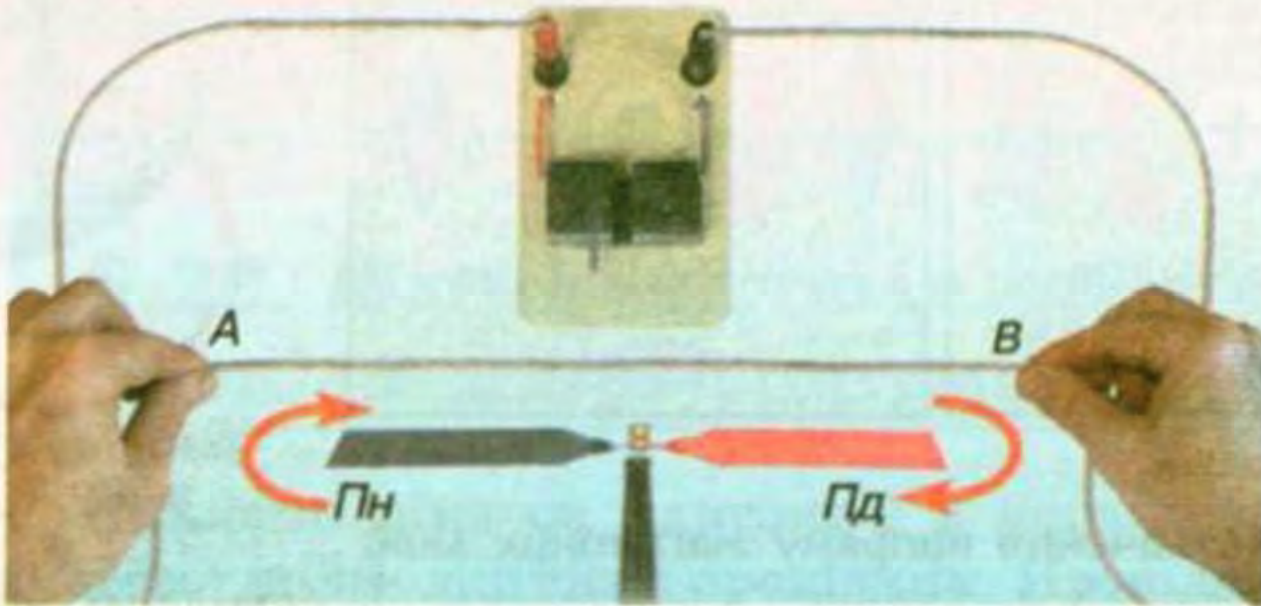
Мал. 113



Мал. 114



4. За малюнком 115 визначити полюси джерела струму, якщо стрілка південним полюсом повертається до нас.

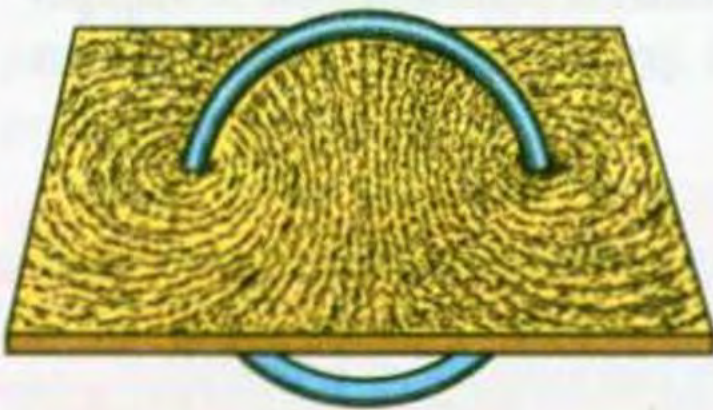


Мал. 115

## § 29. Магнітне поле котушки. Електромагніт

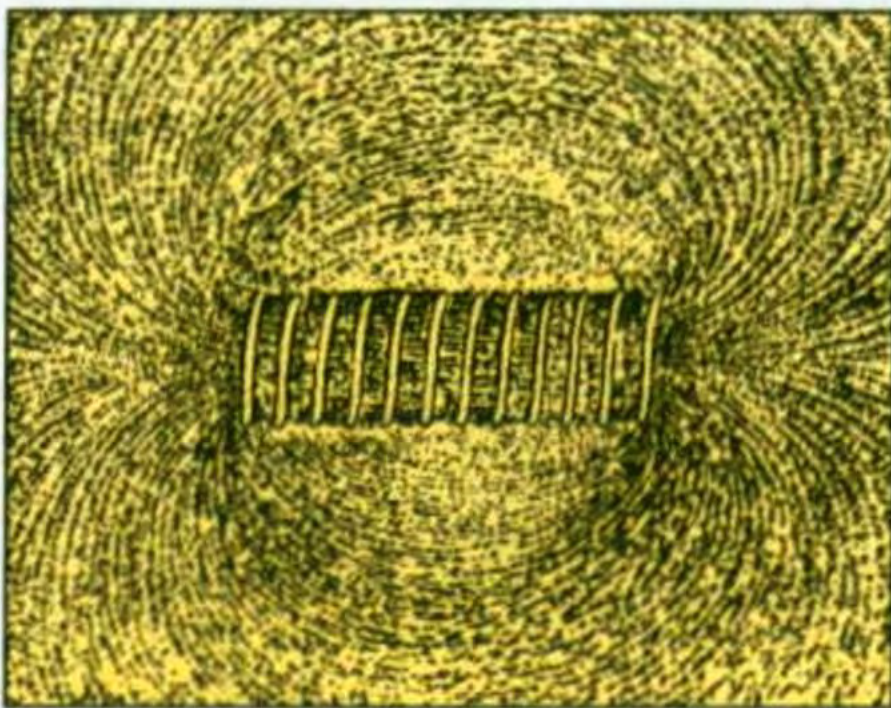
104

Інтенсивність магнітного поля прямого провідника навіть при значних струмах у ньому невисока. Використати магнітну дію такого провідника практично неможливо.

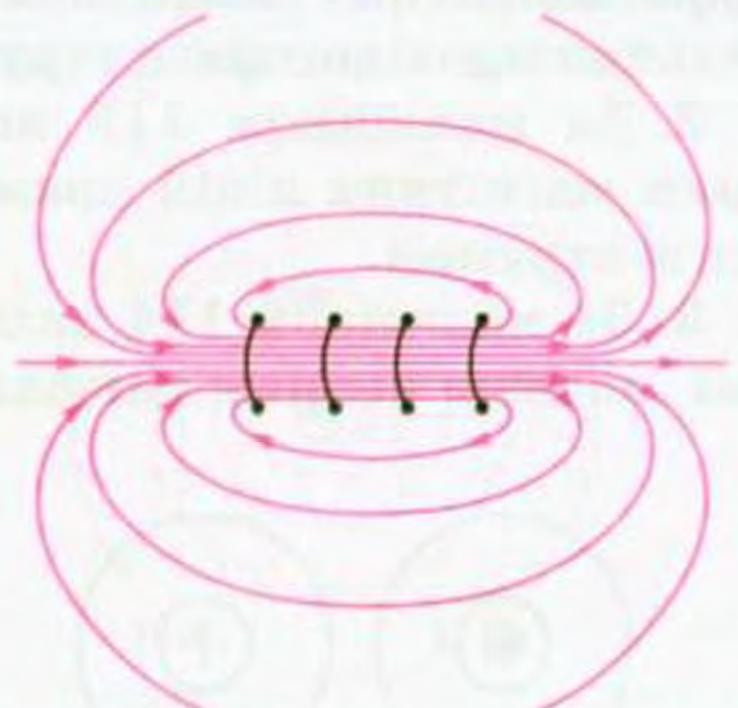


Мал. 116. Спектр магнітного поля кільцевого провідника зі струмом

Для підсилення магнітного поля провідник згинають у кільце (мал. 116) або виготовляють соленоїд (мал. 117) – котушку з багатьох витків. У соленоїді магнітні поля всіх витків додаються, і тому результуюче поле буде значно сильнішим. Розглянемо спектр магнітного поля соленоїда. Для цього пропустимо витки соленоїда через аркуш картону і ввімкнемо його в електричне



Мал. 117. Спектр магнітного поля соленоїда



Мал. 118. Графічне зображення спектра магнітного поля соленоїда



коло. Замкнемо коло і посиплемо картон залізними ошурками. Ошурки утворять спектр магнітного поля, показаний на малюнку 117.

Графічне зображення цього спектра показане на малюнку 118.

Спектр магнітного поля соленоїда має свої особливості. Усередині соленоїда лінії практично паралельні, що свідчить про однорідність поля в соленоїді. Неважко помітити, що цей спектр схожий на спектр постійного магніту. На ньому видно, що **лінії магнітного поля замкнені**.

Для визначення напрямку магнітних ліній соленоїда також застосовується правило правого гвинта:

**якщо напрям обертання гвинта збігається з напрямом струму у витках соленоїда, то його поступальний рух вказує напрям ліній магнітного поля всередині котушки.**

Магнітну дію котушки зі струмом можна значно підсилити, ввівши всередину залізне осердя. Отриманий пристрій в електротехніці називають *електромагнітом*.

Він широко застосовується в різних електромагнітних пристроях, зокрема в електромагнітних кранах (мал. 119), реле, автомобільних сигналах, електродвигунах, електрогенераторах, електромеханічних годинниках, пристроях автоматики і охорони тощо.



Мал. 119. Підіймальний кран з електромагнітом

1. Яку форму мають лінії магнітного поля котушки зі струмом?
2. Як формулюється правило правого гвинта для котушки зі струмом?
3. Яку будову має електромагніт?
4. Де застосовуються електромагніти?
5. Що спільного між магнітними спектрами смугового магніту і котушки зі струмом?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

### Складання найпростішого електромагніта і випробування його дії

**Мета.** Скласти електромагніт і дослідити його магнітну дію за допомогою магнітної стрілки на вістрі.

#### Вказівки до роботи

Магнітне поле котушки зі струмом буде тим сильнішим, чим більша сила струму проходитиме у витках і чим більша кіль-



кість витків припадає на одиницю довжини котушки. Дія магнітного поля котушки різко зростає, якщо в неї внести залізне осердя. Котушку з осердям називають *електромагнітом*.

Магнітна дія електромагнітів проявляється лише під час проходження струму в обмотці котушки. Коли ж струм вимкнути, то й магнітні властивості зникають, що зручно для практичного використання електромагнітів.

### Виконання роботи (варіант 1)

**Обладнання** (див. форзац I, а): джерело постійного струму (1 або 4), реостат (6), ключ-вимикач (7), амперметр (10), дві котушки з набору для збирання електромагніта, осердя до котушок і стальна перемичка, компас або магнітна стрілка на вістрі, з'єднувальні провідники (8).

1. Складіть електричне коло з джерела струму, котушки, реостата, амперметра і вимикача, з'єднавши всі прилади послідовно.

2. Визначте полюси котушки за допомогою магнітної стрілки і перевірте правило правого гвинта.

3. Перемістіть компас чи магнітну стрілку вздовж осі котушки на таку відстань, на якій дія котушки практично не помітна. Вставте в котушку осердя з різних речовин (залізне, мідне, алюмінієве, дерев'яне тощо) і спостерігайте дію електромагніта на стрілку.

4. Змінюючи силу струму в колі за допомогою реостата, спостерігайте дію електромагніта на стрілку.

5. Зробіть висновок.

### Додаткове завдання

1. Складіть електромагніт з двох послідовно з'єднаних котушок, закріпивши осердя на стальній перемичці.

2. Увімкніть електромагніт у коло і за допомогою компаса або магнітної стрілки визначте полюси отриманого електромагніта.

3. Дослідіть вплив напрямку струму в котушках на розміщення полюсів.

### Виконання роботи (варіант 2)

**Обладнання** (див. форзац I, б): джерело струму (2), комутаційна панель з шаблонами (1), амперметр (3), реостат (9), електромагніт з осердям (12), магнітна стрілка (13), з'єднувальні провідники (14).

1. Складіть електричне коло з послідовно з'єднаних елементів: джерела постійного струму, вимикача, реостата, котушки електромагніта й амперметра. Вигляд установки показано на малюнку 120.

2. За допомогою відомих вам правил визначте, якими повинні бути полюси котушки при протіканні в ній електричного струму певного напрямку.



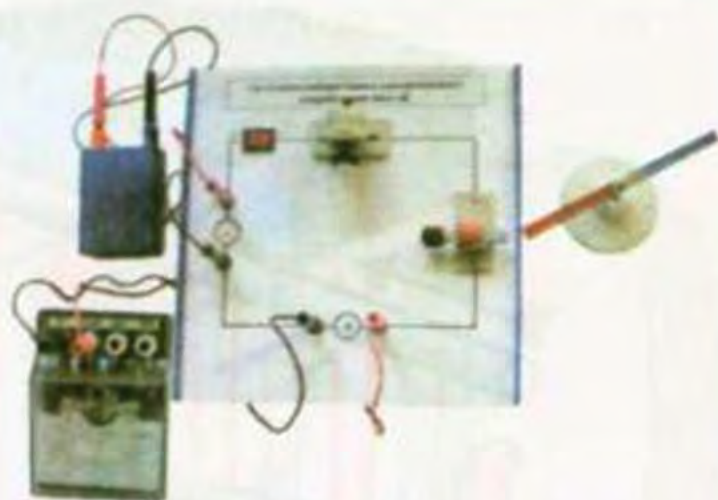
3. Увімкніть струм. За допомогою компаса або магнітної стрілки визначте магнітні полюси котушки зі струмом. Вимкніть струм. Порівняйте результати з вашими передбаченнями.

4. Дослідіть залежність магнітної взаємодії котушки зі струмом і магнітної стрілки від сили струму.

5. Дослідіть залежність магнітної взаємодії котушки зі струмом і магнітної стрілки від відстані між ними.

6. Вставте залізне осердя в котушку і спостерігайте за дією електромагніта на стрілку.

7. Зробіть висновки.



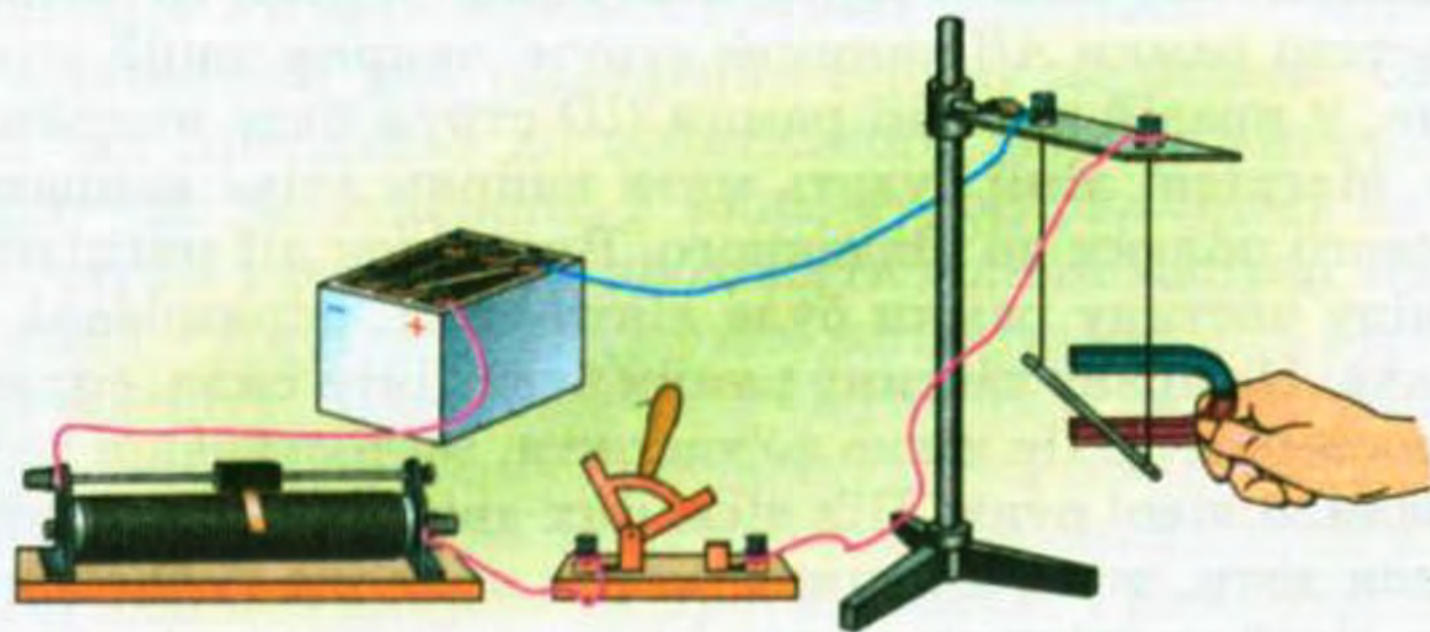
Мал. 120

## § 30. Дія магнітного поля на провідник зі струмом

107

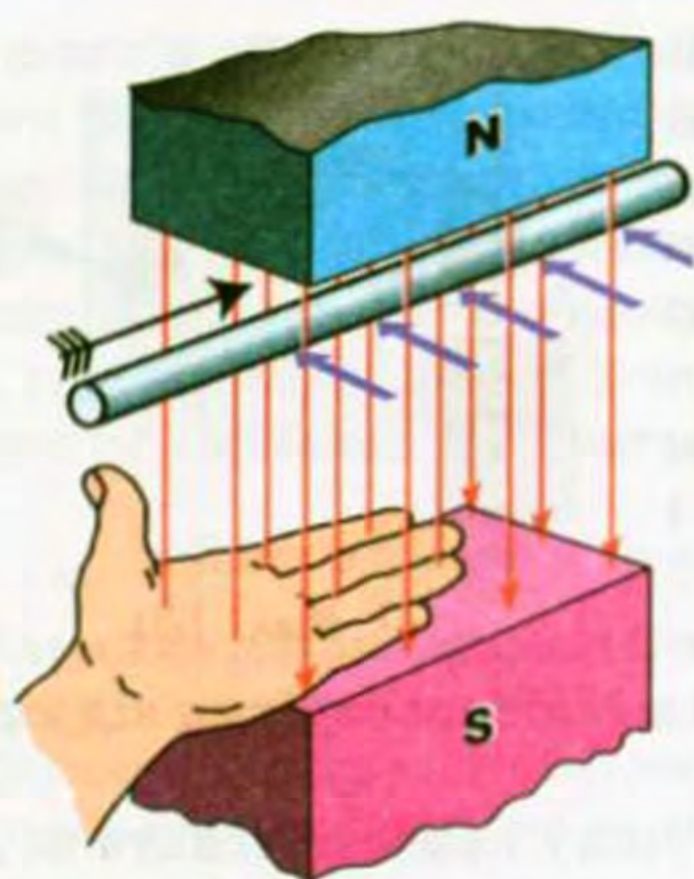
Закріпимо металевий прямолінійний провідник на двох гнучких провідниках, з'єднаних з електричним колом із джерела струму, вимикача і реостата. Біля провідника розмістимо підковоподібний постійний магніт так, щоб провідник був у магнітному полі (мал. 121).

Замкнувши коло, побачимо, що провідник починає рухатися. Отже, на провідник зі струмом у магнітному полі діє сила. Цю силу зазвичай називають силою Ампера. Змінимо напрям струму в провіднику. Напрямок сили, яка діє на провідник, зміниться на протилежний. Подібного можна досягти, повернувши магніт на  $180^\circ$ . Отже, маємо справу з трьома взаємозв'яз-

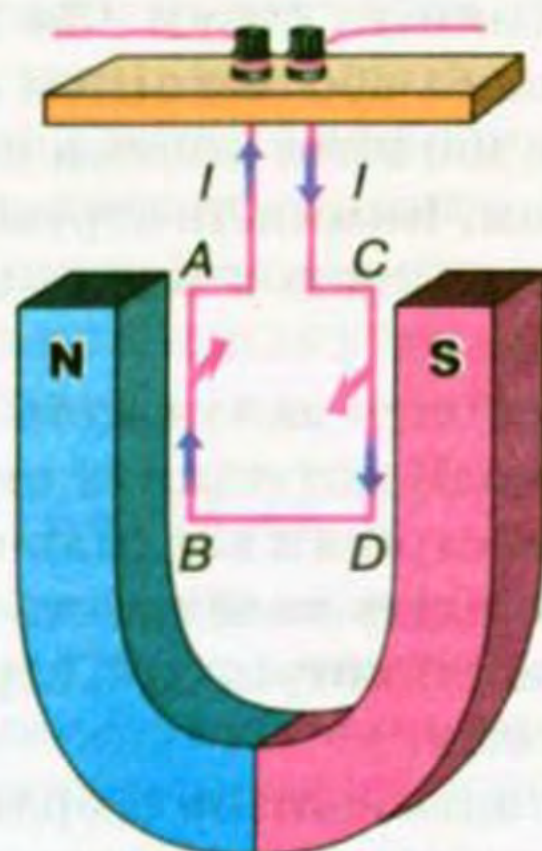


Мал. 121. Дія магнітного поля на провідник зі струмом





Мал. 122. До правила лівої руки



Мал. 123. Рамка зі струмом у магнітному полі

заними фізичними величинами: силою, напрямом магнітних ліній і напрямом струму. Зв'язок між цими величинами встановлюється правилом лівої руки (мал. 122):

якщо розмістити ліву руку так, щоб магнітні лінії входили в долоню, а випростані пальці показували напрям струму в провіднику, то відставлений великий палець вказує напрям сили, яка діє на провідник.

Значення сили Ампера залежить від сили струму в провіднику, його довжини та інтенсивності магнітного поля.

Дію магнітного поля на провідник зі струмом використовують у різних електромагнітних пристроях, зокрема двигуні постійного струму. Основною частиною двигуна є рамка з ізолюваного дроту.

На малюнку 123 зображено установку з рамкою, яка знаходиться в полі постійного магніту. Рамка закріплена на тонких провідниках, а тому може обертатися. Якщо замкнути коло, то в лівій частині рамки  $AB$  виникне струм, напрямлений вгору. Відповідно, у правій частині рамки  $CD$  струм буде напрямлений униз. Магнітні лінії будуть мати напрям зліва направо — від північного полюса до південного. Внаслідок дії магнітного поля на ліву частину рамки буде діяти сила, спрямована від спостерігача. На праву частину рамки буде діяти сила, спрямована до спостерігача. Це легко перевірити, застосувавши до малюнка правило лівої руки. Під дією цих двох сил рамка почне повертатися доти, доки площа рамки не стане перпендикулярною до ліній магнітного поля.

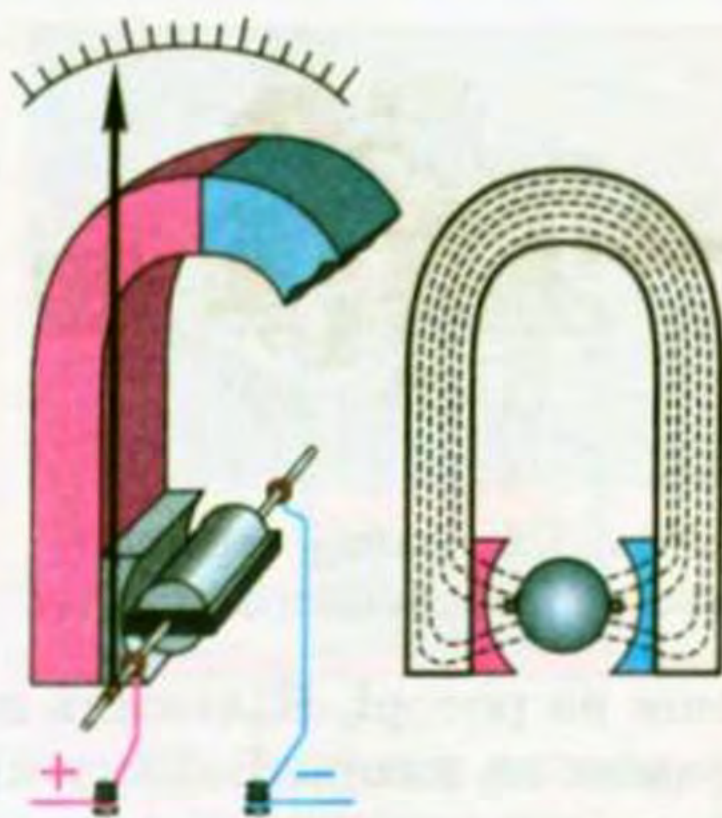
Прикладом використання взаємодії провідника зі струмом і магнітного поля є електровимірювальний прилад магніто-



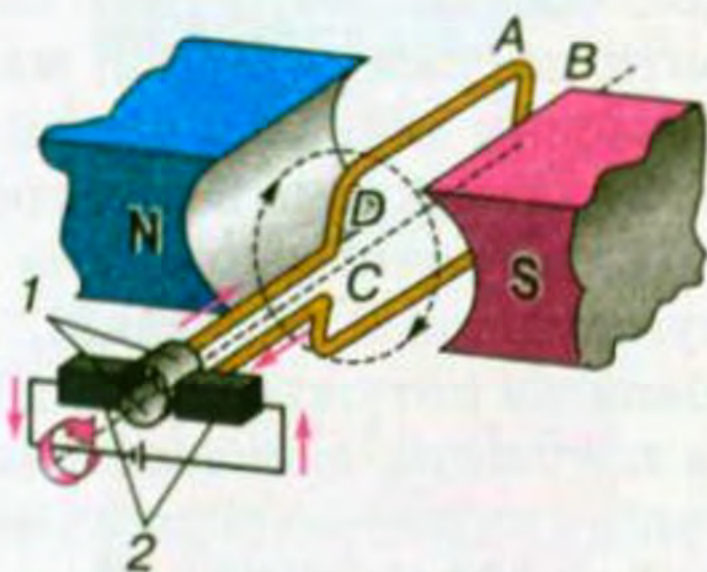
електричної системи (мал. 124). Він складається з постійного магніту і дротяної рамки між його полюсами. До рамки прикріплено дві металеві спіральні пружини, які підводять струм до рамки. При проходженні струму провідниками рамки виникає сила, пропорційна силі струму в рамці. Повертання рамки спричиняє деформацію пружин і виникнення сили пружності. Повертання рамки припиниться тоді, коли сила магнітної взаємодії буде компенсована силою пружності. За кутом повертання рамки можна визначити силу струму в рамці. Для цього кожен прилад має одну або кілька шкал, проградуєваних заздалегідь.

Якщо зробити так, щоб рамка оберталася безперервно, доки замкнене коло живлення, то отримаємо пристрій для перетворення енергії електричного струму в механічну енергію. Такий пристрій називають **електричним двигуном** (мал. 125).

Принцип дії електродвигуна постійного струму можна зрозуміти за допомогою його моделі. Ця модель має прямокутну рамку  $ABCD$ , на якій намотано декілька десятків витків ізоляованого дроту. Кінці обмотки приєднані до двох півкілець. До кожного півкілця  $1$  притискається пружна пластинка – щітка  $2$ . Щітки призначені для підведення струму до рамки. Одна щітка весь час приєднана до позитивного полюса джерела струму, друга – до негативного. У випадку, зображеному на малюнку 125, струм у рамці буде проходити в лівій частині від  $D$  до  $A$ , а в правій – від  $B$  до  $C$ . Рамка має легкорухому вісь і розміщена в полі магніту. Взаємодіючи з магнітним полем, рамка почне обертатися. При цьому приєднані до неї півкілця повернуться разом з нею і кожне притиснеться до іншої щітки. Струм у рамці змінить напрям на протилежний, і рамка здійснить наступні півоберта. Оскільки процес зміни напрямку струму в рамці буде повторюватися, рамка обертатиметься неперервно в одному напрямі.



Мал. 124. Будова електро-  
вимірювального приладу  
магнітоелектричної системи



Мал. 125. Модель електро-  
двигуна постійного струму





Мал. 126. Розріз електро-  
двигуна постійного струму

Двигун постійного струму складається з двох основних частин: якоря і статора (мал. 126).

Якір виготовляють із спеціальної електротехнічної сталі, в його поздовжніх пазах укладають деяку кількість рамок із дроту. На якорі встановлюють і колектор – циліндр із мідних, ізольованих одна від одної пластин, які з'єднані з кінцями ра-

мок на роторі. Кількість пар таких пластин дорівнює кількості рамок на якорі. Велику кількість рамок встановлюють для забезпечення рівномірного обертання якоря двигуна. У новітніх електродвигунах роль колектора виконують спеціальні електронні схеми. Магнітне поле у двигуні створюється електромагнітом, який кріпиться до корпусу двигуна. Ґрунтовні дослідження магнітних властивостей речовини дали змогу створити потужні постійні магніти, які застосовуються в багатьох сучасних двигунах постійного струму, для створення магнітного поля, зокрема в електростартерах сучасних автомобілів.

Електричні двигуни за конструкцією нескладні, прості в обслуговуванні і керуванні, екологічно безпечні, мають великий діапазон потужності – від міліватів (в годинниках), до мегаватів (в потужних екскаваторах і на електротранспорті). З усіх двигунів лише електродвигуни мають коефіцієнт корисної дії, близький до 100 %. Він у кілька разів вищий, ніж у теплових двигунів.

1. Чому обертається рамка зі струмом у магнітному полі?
2. З яких частин складається електродвигун?
3. Для чого призначений колектор у двигуні постійного струму?
4. Де застосовуються двигуни постійного струму?
5. Чим створюється магнітне поле у двигуні постійного струму?
6. Які переваги електродвигуна перед іншими двигунами?

## § 31. Електромагнітна індукція

Ознайомившись із результатами дослідів Ерстеда, М. Фарадей записав собі у записник: «Перетворити магнетизм в електрику». Цей запис Фарадей здійснив після міркувань про взаємозв'язок між магнітними і електричними явищами. Він думав приблизно так: «Якщо електрика (електричний струм) породжує магнетизм (магнітне поле), то чи не породжує магнетизм електрику?».

Скористаємося гіпотезою Фарадея і проведемо дослід, подібний до дослідів Ерстеда. Але замість джерела струму приєднаємо гальванометр (мал. 127).



Почнемо рухати провідник відносно магніту, переміщуючи його в магнітному полі. Відхилення стрілки, яке при цьому буде спостерігатися, засвідчить виникнення струму в провіднику.

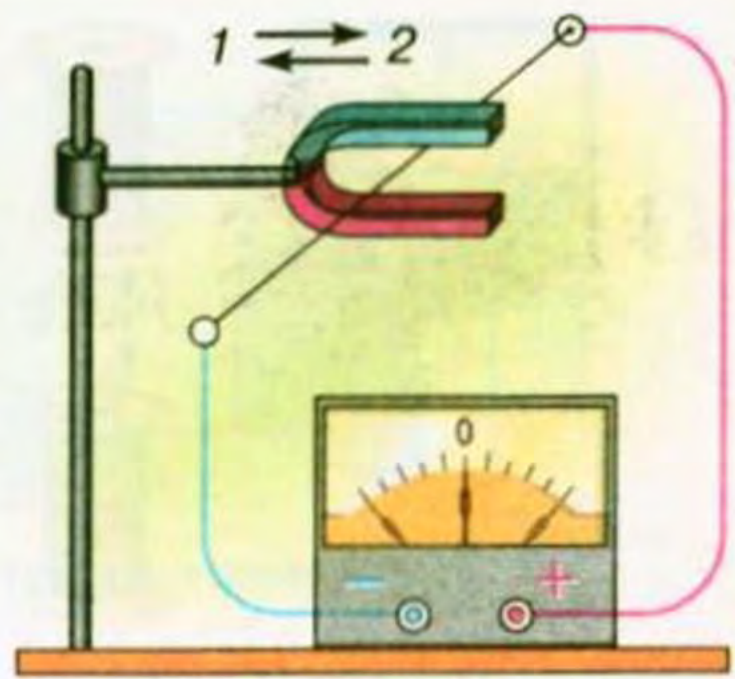
Явище виникнення електричного струму в замкненому колі при зміні магнітного поля називають *електромагнітною індукцією*. Струм, який виникає при електромагнітній індукції, називають *індукційним*.

Напрямок індукційного струму в прямому провіднику залежить від напрямку руху провідника і від напрямку магнітних ліній поля, які він перетинає. Переконатися в цьому можна, повернувши в описаному перед цим досліді магніт на  $180^\circ$ . Зв'язок між напрямом струму, магнітних ліній і напрямом руху провідника визначається за правилом правої руки (мал. 128).

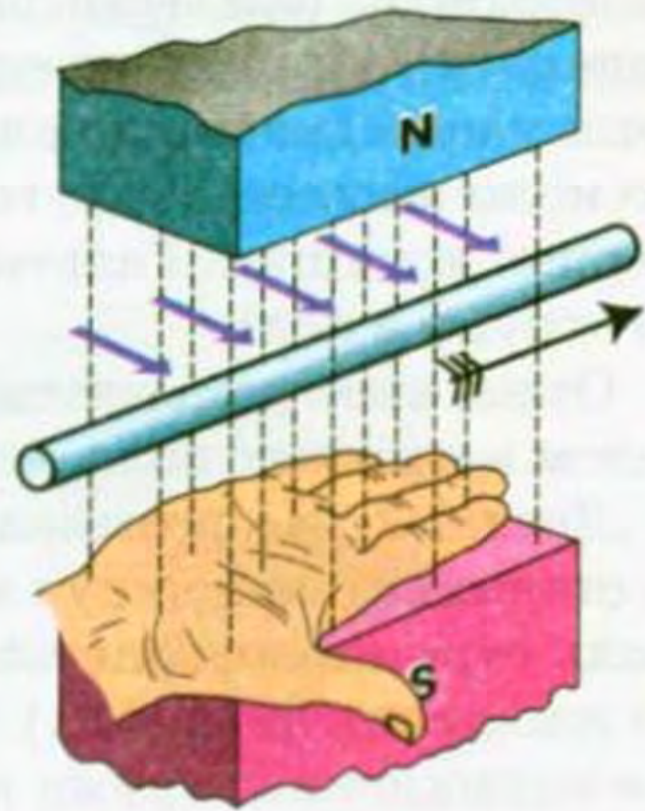
Якщо лінії магнітного поля входять у долоню правої руки, а відставлений великий палець показує напрям руху провідника, то випрямлені чотири пальці вкажуть напрям струму в провіднику, якщо він буде частиною замкненого кола.

Індукційний струм буде виникати й тоді, коли постійний магніт буде переміщатися відносно провідника (мал. 129).

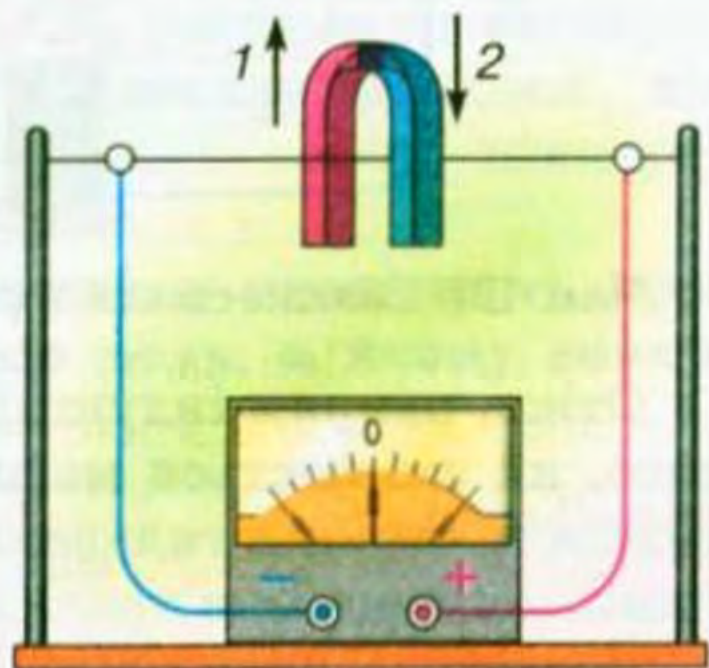
Після численних спроб і пошуків Фарадею вдалося спланувати і провести низку дослідів, які підтвердили його гіпотезу про «перетворення магнетизму в електрику», і дослідити закономірності явища. Проведені Фарадеєм досліді показали, що явище електромагнітної індукції спостерігається внаслідок будь-яких змін магнітного поля.



Мал. 127. Провідник рухається в магнітному полі

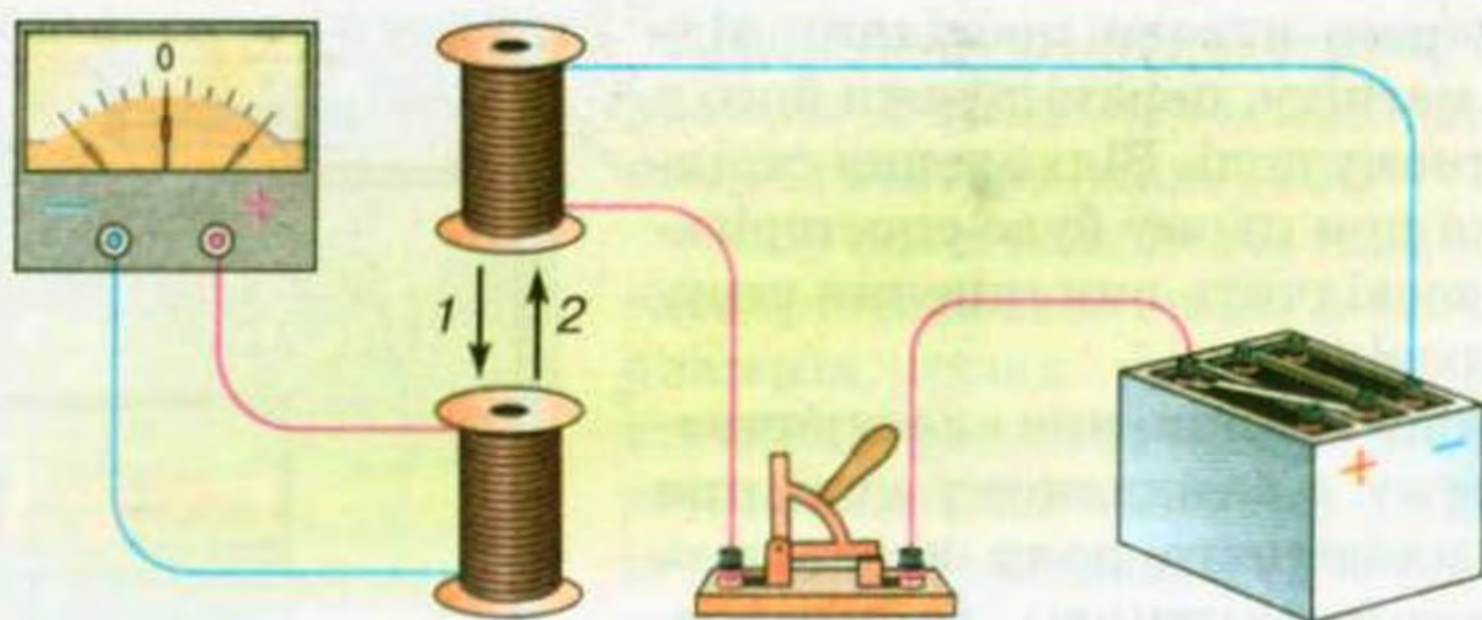


Мал. 128. До правила правої руки



Мал. 129. Магніт рухається відносно провідника





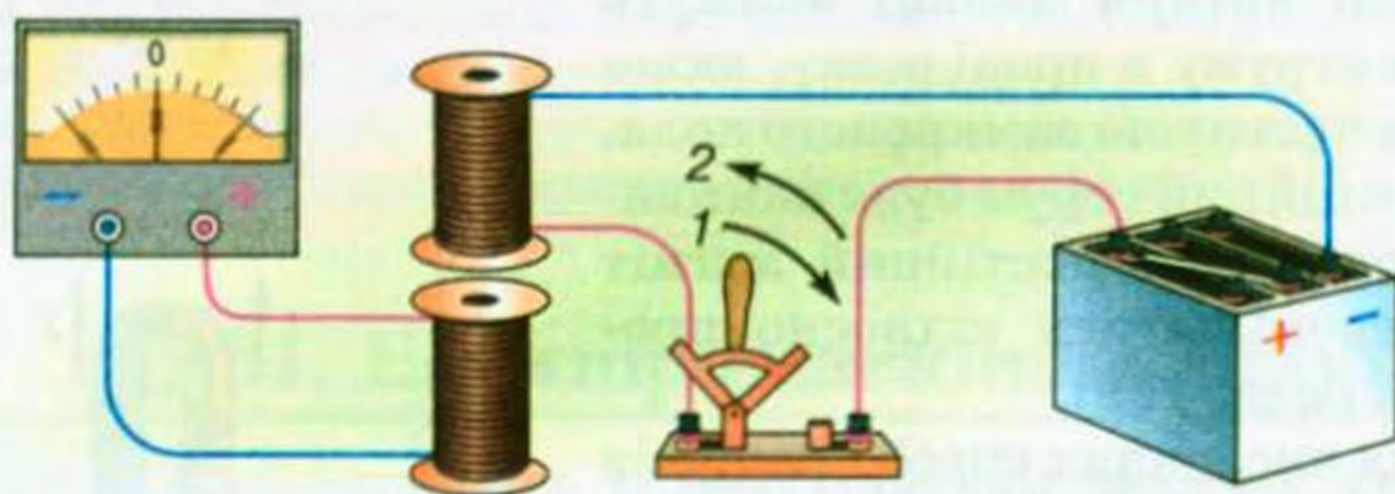
Мал. 130. Рухається котушка зі струмом

Для глибшого розуміння явища електромагнітної індукції варто виконати і проаналізувати описані нижче досліди.

**Дослід 1.** Візьмемо котушку з великою кількістю витків і приєднаємо її кінці до клем гальванометра (мал. 130). Іншу котушку приєднаємо до джерела струму через вимикач. Замкнемо коло живлення другої котушки і почнемо наближати її до першої котушки. Гальванометр покаже наявність електричного струму в колі.

Отже, електромагнітна індукція не залежить від того, що є джерелом магнітного поля – котушка зі струмом чи постійний магніт.

**Дослід 2.** Не розмикаючи кола живлення другої котушки, поставимо її на першу і відмітимо напрям відхилення стрілки. Коли стрілка повернеться до нульової поділки, розімкнемо коло живлення (мал. 131). І в цьому випадку гальванометр покаже виникнення струму в першій котушці, але напрям його буде протилежний попередньому.

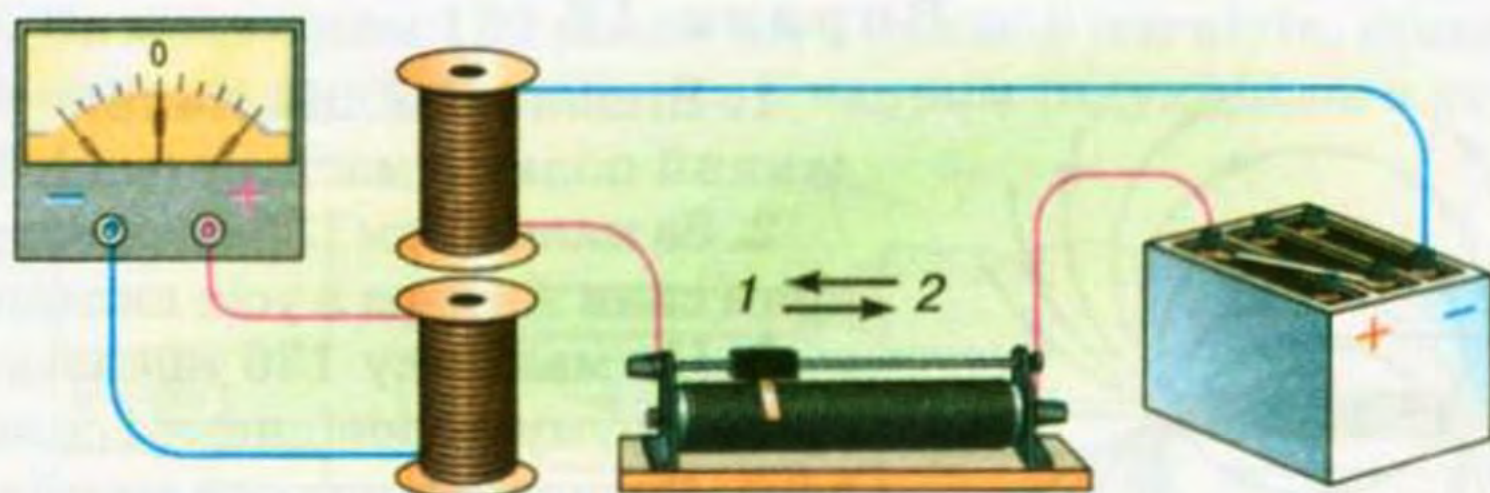


Мал. 131. Замикається і розмикається коло живлення котушки

Отже, напрям індукційного струму в котушці залежить від того, як змінюється магнітне поле: при зростанні його інтенсивності стрілка гальванометра буде відхилятися в один бік, при зменшенні – в протилежний.

**Дослід 3.** У коло другої котушки ввімкнемо реостат (мал. 132). Пересуваючи повзунок реостата, змінюватимемо силу струму в ній. Гальванометр покаже виникнення електричного струму в

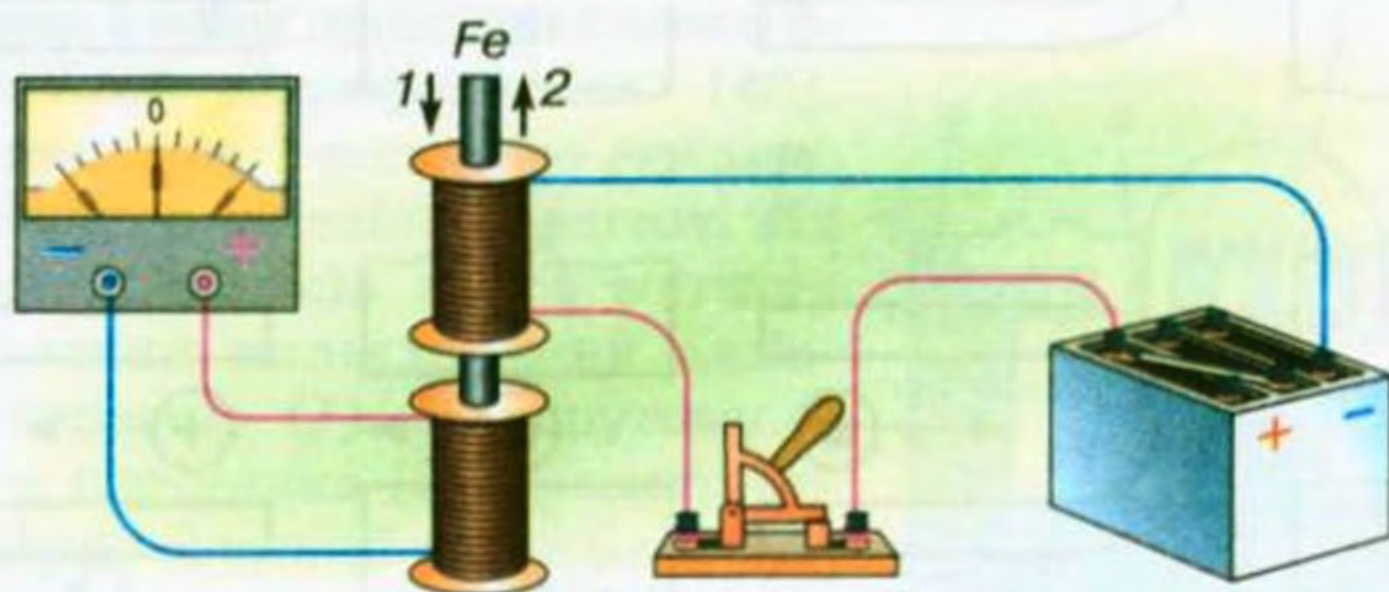




Мал. 132. Змінюється сила струму в котушці

першій котушці. Сила індукційного струму буде тим більшою, чим швидше буде рухатися повзунок реостата. Отже, сила індукційного струму в котушці залежить від швидкості зміни магнітного поля.

**Дослід 4.** Не змінюючи установки попереднього досліду, спочатку внесемо в другу котушку залізний стержень, а потім почнемо його виймати (мал. 133).



Мал. 133. Рухається залізний стержень

Гальванометр і в цьому випадку покаже виникнення індукційного струму в першій котушці, оскільки переміщення осердя викликатиме зміну магнітного поля.

Детальні дослідження й узагальнення результатів експериментів дали підстави зробити Дж. Максвеллу висновок, що явище електромагнітної індукції описує закон електромагнітної індукції:

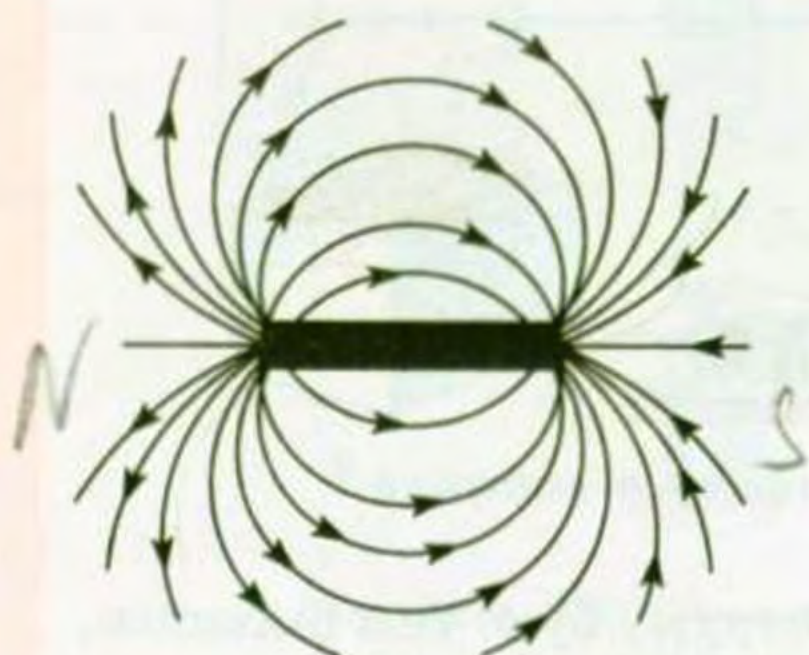
**сила струму, індукованого в замкненому провіднику, пропорційна швидкості зміни магнітного поля, в якому знаходиться провідник.**

1. Що називається електромагнітною індукцією?
2. Від чого залежить напрям індукційного струму?
3. Про що свідчить явище електромагнітної індукції?
4. Який зміст закону електромагнітної індукції?





### Вправа 13



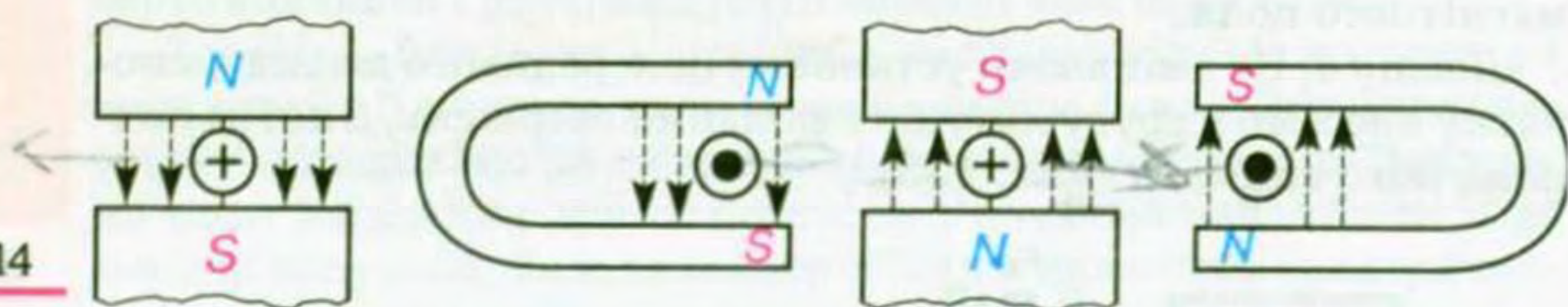
Мал. 134

1. Визначити північний і південний полюси магніту (мал. 134).

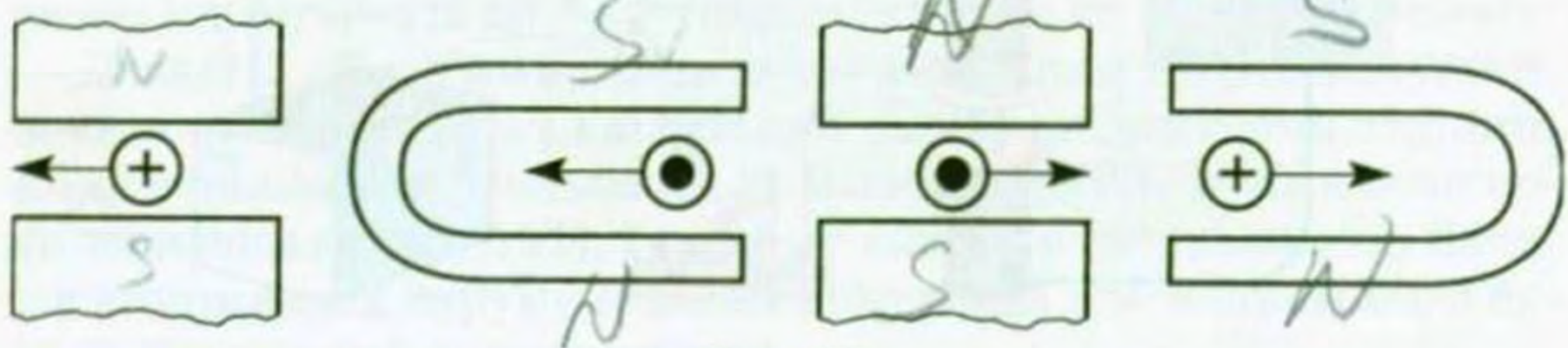
2. За малюнком 135 визначити напрям сили Ампера в усіх випадках.

3. На малюнку 136 показано напрям струму в провіднику і сили Ампера. Визначити полюси магнітів.

114



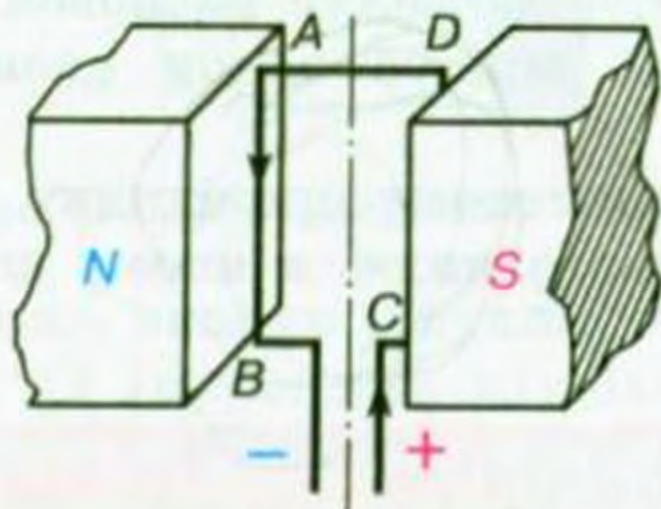
Мал. 135



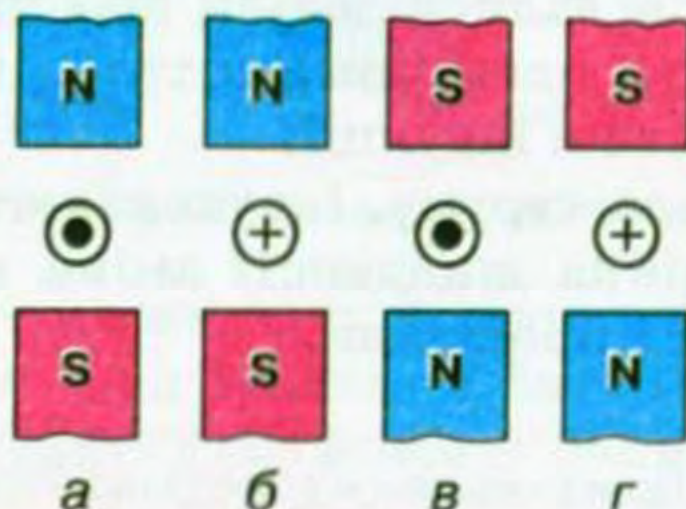
Мал. 136

4. Як обертатиметься рамка, зображена на малюнку 137? Яким чином можна змінити напрям її обертання?

5. За малюнком 138 визначити напрям руху провідника, якщо показано напрям індукційного струму в ньому.



Мал. 137



Мал. 138

пробач  
20.05.15



6. За малюнком 139 визначити полюси магнітів, якщо показано напрям руху провідника і напрям індукційного струму в ньому.

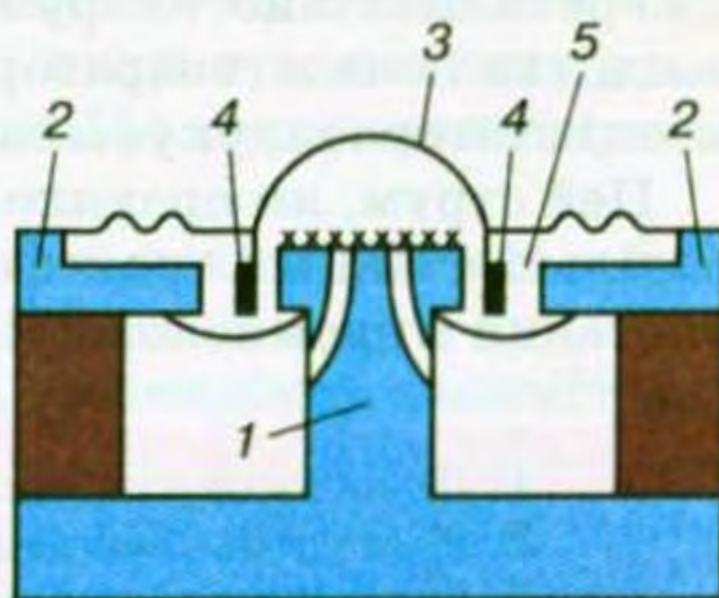


Мал. 139

## § 32. Динамічний мікрофон і електроmechanічний генератор електричного струму

Явище електромагнітної індукції широко застосовується в сучасній техніці і побуті.

Одним з таких прикладів є електродинамічний мікрофон (мал. 140). Обов'язковою частиною такого мікрофона є постійний магніт. На одному з полюсів цього магніту закріплений циліндричний залізний стержень (1). На другому – залізна пластинка (2). Діаметр отвору дещо більший за діаметр циліндра. Внаслідок цього між стержнем і стінками отвору пластинки утворюється кільцева щілина (5). Над стержнем знаходиться мембрана (3), яка під дією звуку може коливатися. До мембрани прикріплена невелика котушечка з ізолюваного дроту (4). Вона міститься в кільцевій щілині (5), де на неї діє сильне магнітне поле. Виводи котушечки приєднані до спеціальних клем, за допомогою яких мікрофон приєднують до інших електричних кіл, зокрема до електронного підсилювача. Зміщення котушки в щілині викликає в ній індукційний струм, значення якого змінюється залежно від коливань мембрани.

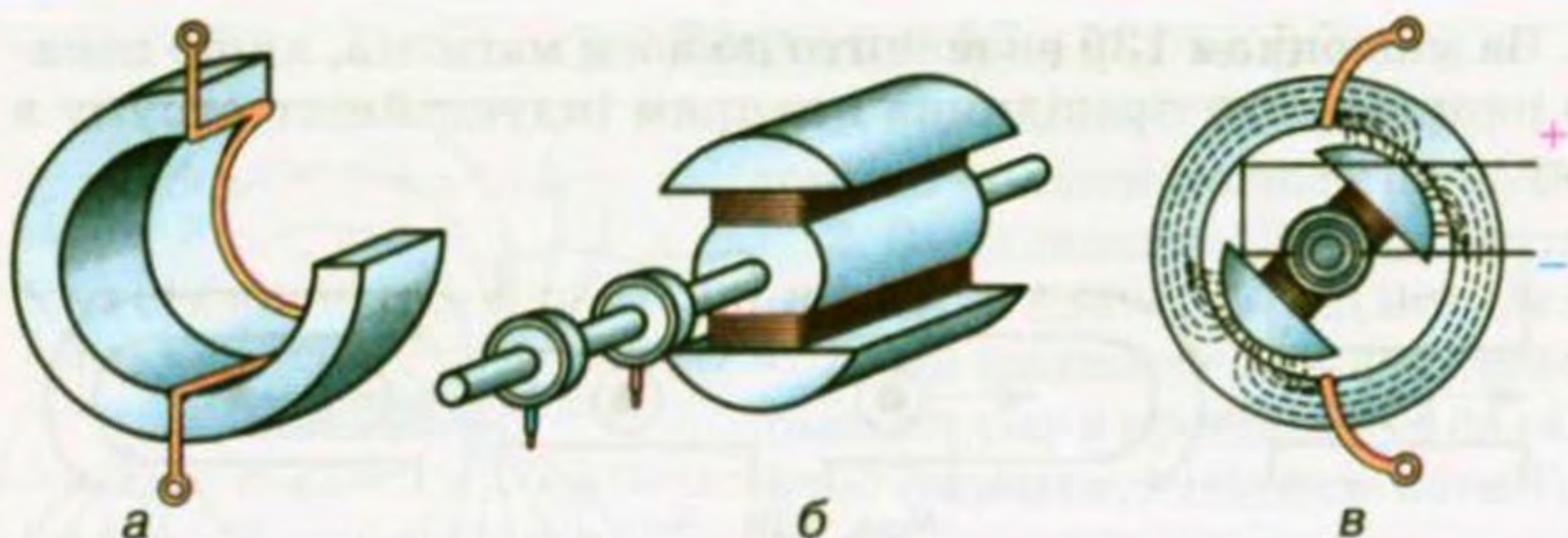


Мал. 140. Схема будови електродинамічного мікрофона

На явищі електромагнітної індукції побудовані сучасні перетворювачі механічної енергії в електричну. Ці перетворювачі отримали назву електроmechanічних генераторів. Існує два типи електроmechanічних генераторів. Найпоширенішими з них є генератори змінного струму, які працюють на великих електростанціях.

На явищі електромагнітної індукції побудовані сучасні перетворювачі механічної енергії в електричну. Ці перетворювачі отримали назву електроmechanічних генераторів. Існує два типи електроmechanічних генераторів. Найпоширенішими з них є генератори змінного струму, які працюють на великих електростанціях.





Мал. 141. Схема будови генератора

Конструктивно вони мало чим відрізняються від електродвигунів і також складаються з ротора і статора. У потужних генераторах статор – це циліндр з пазами на внутрішній поверхні, в які вкладаються провідники (мал. 141, а). Магнітне поле створює ротор, приєднаний до парової турбіни, яка обертається. Струм до котушки ротора подається від стороннього джерела постійного струму (мал. 141, б). При обертанні ротора магнітне поле в генераторі весь час змінює свій напрям і в обмотці статора індукуються електричний струм (мал. 141, в).

Цей струм, як правило, подається від генераторів через розподільчі станції і трансформатори в електромережі для використання в промисловості та в побуті.

116

1. Де застосовується явище електромагнітної індукції?
2. Яка будова електродинамічного мікрофона?
3. Яка будова електромеханічного генератора?
4. Яку функцію виконує ротор генератора?
5. Яка роль статора в генераторі струму?
6. Який струм індукуються в статорі генератора?



## Головне в розділі 3

- Рухомі електрично заряджені тіла створюють магнітне поле.

- У природі існують матеріали, які створюють навколо себе магнітне поле. Їх називають магнітами. Магніти мають полюси – північний і південний.

- Магніти взаємодіють між собою таким чином, що різноіменні полюси притягуються, а однойменні – відштовхуються.

- Магнітне поле має замкнені магнітні лінії. Щоб визначити їх напрям, застосовують правила свердлика або лівої руки.

**Правило свердлика:** якщо поступальний рух правого гвинта збігається з напрямом струму в провіднику, то напрям обертання гвинта вказує напрям магнітної лінії.

**Правило лівої руки:** якщо розмістити ліву руку так, щоб магнітні лінії входили в долоню, а випростовані пальці показували напрям струму в провіднику, то відставлений великий палець вказує напрям сили, яка діє на провідник.

- При будь-якій зміні магнітного поля в замкнених провідниках виникає електричний струм. Це явище називається електромагнітною індукцією.

- Сила індукційного струму залежить від швидкості зміни магнітного поля.

- Провідники, по яких тече струм, взаємодіють з магнітним полем, в якому вони перебувають.

- Земля має власне магнітне поле і є великим природним магнітом.

- Властивості магнітного поля мають численні застосування в техніці, на виробництві та в побуті. На них побудовано принцип дії електровимірювальних приладів, електродвигунів, електромагнітів тощо.





# Розділ 4

Засвоївши матеріал цього розділу, ви будете **знати**:

- про протонно-нейтронну модель атомного ядра, види радіоактивного випромінювання, закон радіоактивного розпаду;
- фізичні величини, що характеризують активність радіонуклідів, йонізуючу дію радіоактивного випромінювання;
- вплив радіоактивного випромінювання на живі організми; рівні радіоактивного фону, допустимі для життєдіяльності людського організму.

Ви зможете **пояснити**:

- природу радіоактивних перетворень ядер;
- принцип дії лічильника йонізуючого випромінювання;
- перетворення енергії, що відбуваються на атомних електростанціях;
- екологічні проблеми, що виникають у процесі використання ядерної енергії.

Ви будете **здатні**:

- оцінити активність радіонуклідів, обчислити потужність радіоактивного випромінювання;
- вимірювати фізичні величини, що характеризують радіоактивний фон;
- розв'язувати задачі, застосовуючи формули дозиметрії.





# АТОМНЕ ЯДРО ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА

119

Сучасна фізика своїм розвитком завдячує головним чином відкриттям, що були зроблені наприкінці XIX – початку XX ст. і пов'язані з явищами, зумовленими будовою атома. Саме в цей час у фізиці було здобуто наукові факти, які привернули увагу вчених до мікросвіту. Це – відкриття X-променів (1895 р., В. К. Рентген, І. Пулюй), названих пізніше рентгенівським випромінюванням, електрона (1897 р., Дж. Дж. Томсон), радіоактивності (1896 р., А. Беккерель). Вони остаточно поставили під сумнів класичні уявлення про будову речовини та неподільність атома і спонукали учених до поглиблення знань про явища, що відбуваються на атомному рівні.

Для атомної фізики характерні відстані, сумірні з розміром атома ( $\sim 10^{-10}$  м) або атомного ядра ( $\sim 10^{-15}$  м).



За висловом Н. Бора, на небосхилі класичної фізики кінця XIX ст. було лише дві «хмаринки» – експериментально доведений факт існування електрона в структурі атома і явище радіоактивності, які змусили вчених переглянути фундаментальні уявлення про будову речовини. Так зароджувалася *атомна фізика*, яка дала поштовх розвитку таких сучасних галузей, як квантова механіка, мікроелектроніка, нанотехнології, ядерна енергетика, фізика елементарних частинок тощо.



## § 33. Атом і атомне ядро. Дослід Резерфорда

З часів Демокрита і до кінця XIX ст. в науці панувала думка про неподільність атома. І хоча окремими вченими, зокрема хіміком А. Лавуаз'є, вона ставилася під сумнів, експериментального підтвердження складної будови атома не існувало. У 1897 р. англійський фізик Дж. Томсон відкрив електрон як складову частинку атома і носія найменшого електричного заряду. Він припустив, що атом – це позитивно заряджена куля, всередині якої містяться негативно заряджені електрони. Рівномірність їх розподілу в об'ємі атома і рівність позитивного й негативного зарядів забезпечують електричну нейтральність атома.

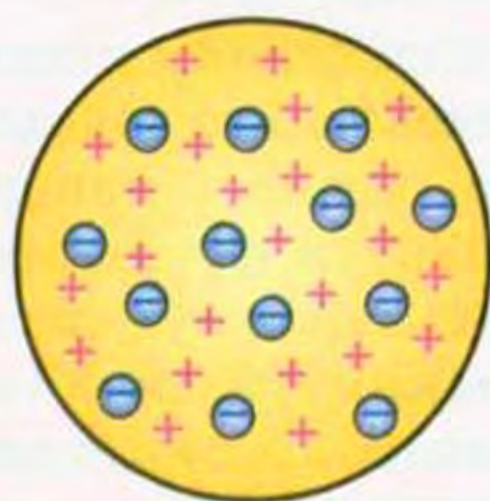
120



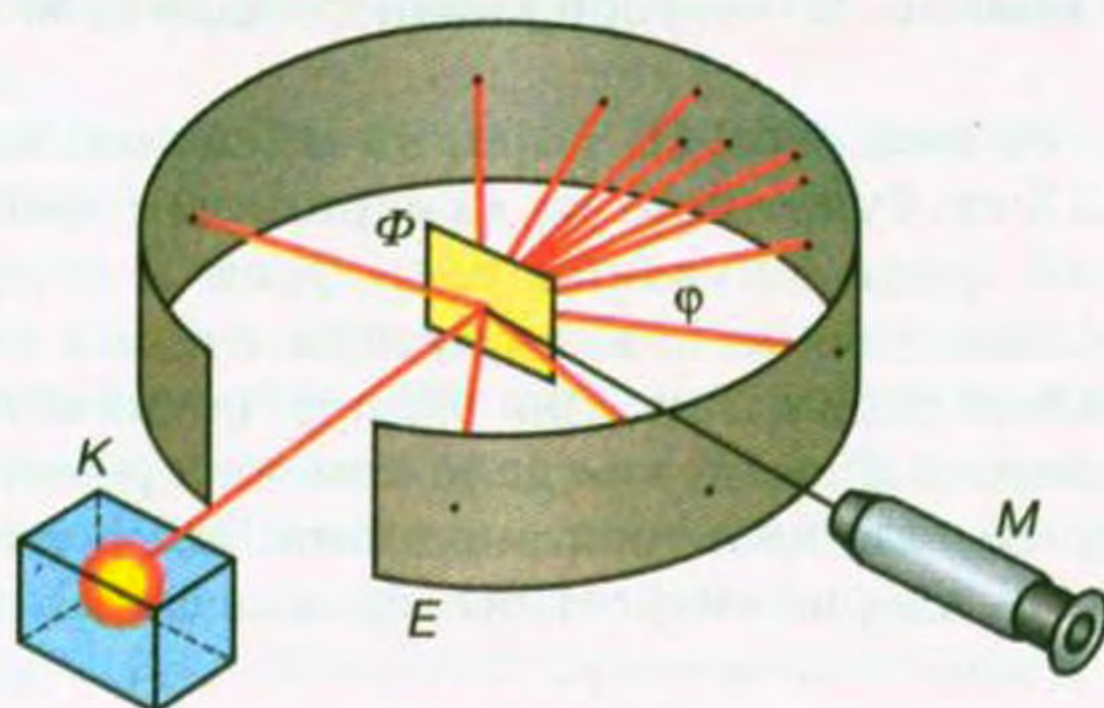
Модель атома Дж. Томсона інколи називають «пудинговою» – за аналогією з традиційним британським пирогом з родзинками.

Проте така модель атома мала свої обмеження і не відповідала дослідним фактам, отриманим на той час фізиками. Запропонувати реальну модель атома вдалося лише після дослідів Е. Резерфорда, який у 1911 р. досліджував разом зі своїми співробітниками проходження зарядженими частинками тонких металевих пластинок. Було встановлено, що позитивно заряджені частинки відхиляються певним чином від прямолінійної траєкторії.

У досліді Е. Резерфорда (мал. 142) вузький пучок позитивно заряджених частинок спрямовувався на тонку золоту чи платинову фольгу  $\Phi$ , навколо якої розміщувався екран  $E$ . При по-



Модель атома  
Дж. Томсона



Мал. 142. Схема досліду Резерфорда



траплянні частинки на нього в цьому місці фіксувалися спалахи. За допомогою оптичного пристрою  $M$  можна було спостерігати за спалахами і вимірювати кути відхилення  $\varphi$  заряджених частинок.

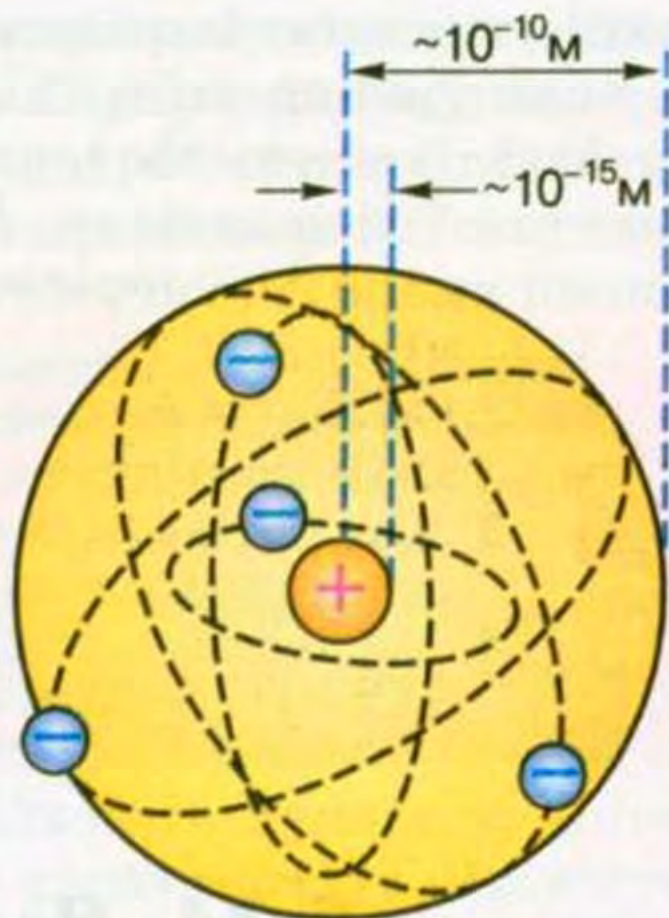
Більшість із них рухалася майже прямолінійно (кут відхилення  $\varphi$  становив  $1...2^\circ$ ). Проте незначна їх частина відхилялася на більші кути (понад  $30^\circ$ ); були зафіксовані навіть такі частинки (одна з десяти тисяч), які після розсіювання змінювали напрям руху на протилежний ( $\varphi > 90^\circ$ ).

Щоб пояснити отримані результати, Е. Резерфорд припустив, що атом є складним утворенням: у його центрі знаходиться позитивно заряджене ядро, навколо якого обертаються електрони (мал. 143). За розрахунками в ядрі зосереджена практично вся маса атома (понад 99,95 %), але його розміри набагато менші за атом (майже в 100 000 разів). Вимірювання показали, що лінійні розміри атома становлять близько  $10^{-10}$  м, а радіус його ядра дорівнює приблизно  $10^{-15}$  м.

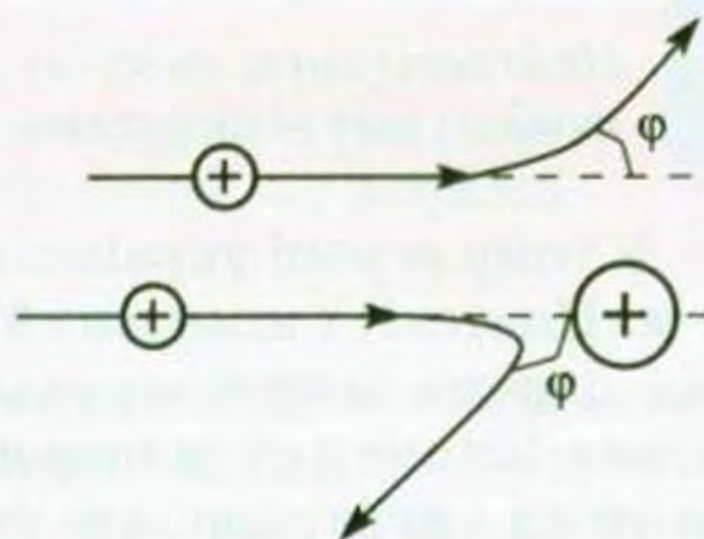
Таким чином, на підставі отриманих експериментальних даних Е. Резерфорд запропонував *ядерну модель атома*, яка узгоджувалася з результатами його дослідів і пояснювала багато інших явищ, пов'язаних із будовою атома.

Справді, швидкі позитивно заряджені частинки легко долають простір електронних оболонок атомів, не відчуючи з їхнього боку значного впливу, і тому майже не відхиляються від прямолінійної траєкторії руху. Проте, коли вони пролітають досить близько від позитивно зарядженого ядра, кулонівська взаємодія між ними зростає і змушує їх відхилитися на певний кут  $\varphi$  (мал. 144).

Таким чином, атом є складним утворенням, що складається з ядра і електронів, які обертаються навколо нього. В атомному ядрі зосереджена практично вся маса атома і увесь його позитивний заряд, що відповідає порядковому номеру хімічного елемента, який він представляє. Позитивно заряджене ядро завдяки силі кулонівської взає-




Мал. 143. Ядерна модель атома



Мал. 144. Траєкторія руху позитивних частинок




модії утримує на орбітах електрони в тій кількості, щоб атом був електрично нейтральним. Він має доволі складну структуру електронних оболонок, яку визначають закони сучасної квантової фізики. Існує й інший опис моделі атома – як електронної хмари, що перебуває в електричному полі ядра.

- 
1. Які відкриття стали поштовхом у розвитку сучасної фізики?
  2. У чому полягає суть дослідів Е. Резерфорда?
  3. Чим відрізняється ядерна модель атома, запропонована Е. Резерфордом, від «пудингової» моделі атома Дж. Томсона?
  4. За рахунок чого заряджені частинки в досліді Е. Резерфорда відхилялися від прямолінійної траєкторії руху?

## § 34. Ядерна модель атома

Подальші дослідження будови атома переконали вчених у тому, що ядро атома також має складну будову. Ядерна модель атома, запропонована Е. Резерфордом для пояснення отриманих ним результатів, набула розвитку.

У 1919 р. було відкрито нову частинку – *протон*, який має позитивний заряд, що чисельно дорівнює заряду електрона, проте його маса значно більша. Було встановлено, що вона дорівнює масі ядра Гідрогену. Цей факт і те, що атомні маси ізотопів кратні масі ядра Гідрогену, дали підстави Е. Резерфорду припустити, що ядра атомів усіх хімічних елементів складаються з протонів. Ця гіпотеза добре узгоджувалася з експериментальними даними щодо властивостей Гідрогену. Проте виникли труднощі при поясненні будови ядер більш важких хімічних елементів. Тому було зроблене припущення, що до складу ядра атома входять також частинки, які не мають електричного заряду, а їх маса близька до маси протонів. Їх назвали нейтронами. У 1932 р. англійський фізик Дж. Чедвік експериментально підтвердив існування таких частинок.



**Нейтрон** (англ. *neutron*, від лат. *neuter* – ні той ні інший), тобто який не має ні позитивного, ні негативного електричного заряду.

У тому ж році український учений Д. Д. Іваненко (народився в м. Полтаві) і німецький фізик В. Гейзенберг незалежно один від одного запропонували *протонно-нейтронну модель* ядра атома. Згідно з цією моделлю атомне ядро утворюють нуклони – протони і нейтрони, які утримуються один біля одного завдяки ядерним силам, що діють між ними. Загальна кількість нуклонів у ядрі, тобто сума протонів і нейтронів, дорівнює масово-



му числу  $A$  (атомній масі хімічного елемента); кількість протонів дорівнює його зарядовому числу  $Z$  (порядковому номеру хімічного елемента в Періодичній таблиці елементів Д. І. Менделєєва); кількість нейтронів визначається різницею  $N = A - Z$ .

У сучасній фізиці протони і нейтрони називають **нуклонами** (від лат. *nukleus* – ядро), а самі атомні ядра хімічних елементів **нуклідами**.

В ядерній фізиці для позначення атомних ядер використовують символ хімічного елемента  $X$ , якому належить атом, з відповідними індексами, тобто у вигляді  ${}^A_ZX$ . Зліва вгорі – масове число  $A$ , яке визначає загальну кількість нуклонів; зліва внизу вказують зарядове число  $Z$ , яке характеризує кількість протонів. Наприклад, найлегший ізотоп гідрогену – Протій, ядро якого складається з одного протона, позначають  ${}^1_1\text{H}$ ; ядро атома Оксигену, яке має 16 нуклонів, позначають  ${}^{16}_8\text{O}$ .

Кількість нуклонів у ядрі дорівнює масовому числу  $A$  хімічного елемента. Кількість протонів дорівнює зарядовому числу ядра  $Z$ . Кількість нейтронів  $N = A - Z$ .


Нині науці відомо понад 3000 ядер хімічних елементів, більшість з яких отримано в лабораторних умовах. Вони відрізняються один від одного або кількістю протонів, або кількістю нейтронів, або тим і іншим. Емпірично побудована Періодична система елементів Д. І. Менделєєва насправді містить глибокий теоретичний зміст, пов'язаний саме зі структурою ядер хімічних елементів. Порядок їх розташування визначається виключно зарядовим числом  $Z$ , тобто кількістю протонів у ядрі. Разом з тим під одним ім'ям в одній і тій самій клітинці періодичної системи може знаходитися кілька ізотопів, які відрізняються масовим числом  $A$ , тобто різною кількістю нейтронів. Наприклад, існує три стабільні ізотопи Оксигену  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{17}_8\text{O}$ ,  ${}^{18}_8\text{O}$ , які присутні в природі в різних кількісних пропорціях.

**Ізотопи** (від грец. *isos* – однаковий і *topos* – місце) – різновиди атомів одного й того самого хімічного елемента, що відрізняються атомними масами.

Отже, протонно-нейтронна модель ядра є однією з найбільш продуктивних в ядерній фізиці. Вона дала можливість ученим пояснити явища, які з позицій класичної фізики не могли бути витлумачені, наприклад періодичність властивостей ядер і механізм ядерних перетворень. Завдяки цій моделі та іншим пос-



тулатам фізики Періодична система елементів Д. І. Менделєєва отримала фізичну інтерпретацію щодо її побудови. Проте вона також має свої обмеження, оскільки неспроможна дати тлумачення властивостей важких ядер і пояснити всі типи взаємодії нуклонів у ядрі. Тому існують й інші моделі атомних ядер (наприклад, крапельна), проте й вони, як будь-які моделі, мають свої обмеження і межі застосування в поясненні властивостей атомних ядер.


- 
1. Дайте стислу характеристику протона і нейтрона. Чим вони відрізняються один від одного?
  2. У чому полягає суть протонно-нейтронної моделі ядра?
  3. Що таке нуклон? Як знайти число протонів і нейтронів за допомогою таблиці Менделєєва?
  4. Що таке ізотопи? Поясніть їх утворення з точки зору протонно-нейтронної моделі їхніх ядер.

## § 35. Радіоактивність.

### Види радіоактивного випромінювання

Дослідження природних і штучно отриманих ізо-топів показали, що в природі існують стабільні й нестабільні хімічні елементи. Ця їхня якість зумовлена співвідношенням протонів і нейтронів у ядрі. Легкі ядра мають приблизно однакову їх кількість, і тому вони стабільніші. У важких ядер кількість нейтронів більша, що спричиняє зростання енергії ядра, якого воно намагається позбутися. Тому ядра важких елементів, як правило, нестабільні.

Виявлено лише 264 ядра атомів хімічних елементів, які стабільні, тобто не перетворюються в ядра інших хімічних елементів чи ізотопи. Решта зазнають різних видів самочинних перетворень завдяки випромінюванню мікрочастинок або шляхом поділу на більш стійкі утворення, які належать до середньої частини Періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва. Така їх здатність до самочинних перетворень називається *радіоактивністю*.



**Радіоактивність** – від лат. *radio* – випромінюю та *activus* – діяльний.

Уперше її спостерігав у 1896 р. французький фізик А. Беккерель, досліджуючи солі урану. Він помітив, що вони випромінюють промені, які мають підвищену проникну здатність: закрита



чорним папером фотопластинка «засвічувалася» під їх дією, ніби перебувала на світлі. Пізніше, у 1898 р. французькі фізики М. Склодовська-Кюрі і П. Кюрі відкрили два нові радіоактивні елементи – полоній і радій, які випромінювали мікрочастинки.

Радіоактивність буває природною, яка спостерігається за звичайних умов, і штучною, коли радіоактивні перетворення відбуваються внаслідок бомбардування ядер стабільних ізотопів протонами, нейтронами, іншими частинками або ядрами хімічних елементів. З фізичного погляду принципової відмінності між ними немає, оскільки механізм радіоактивних перетворень у них однаковий.

#### Позначення мікрочастинок:

${}^4_2\text{He}$  – альфа-частинка;  
 ${}^1_0n$  – нейтрон;  
 ${}^1_1p$  – протон;  
 ${}^0_{-1}e$  – електрон;  
 ${}^0_1e$  – позитрон.



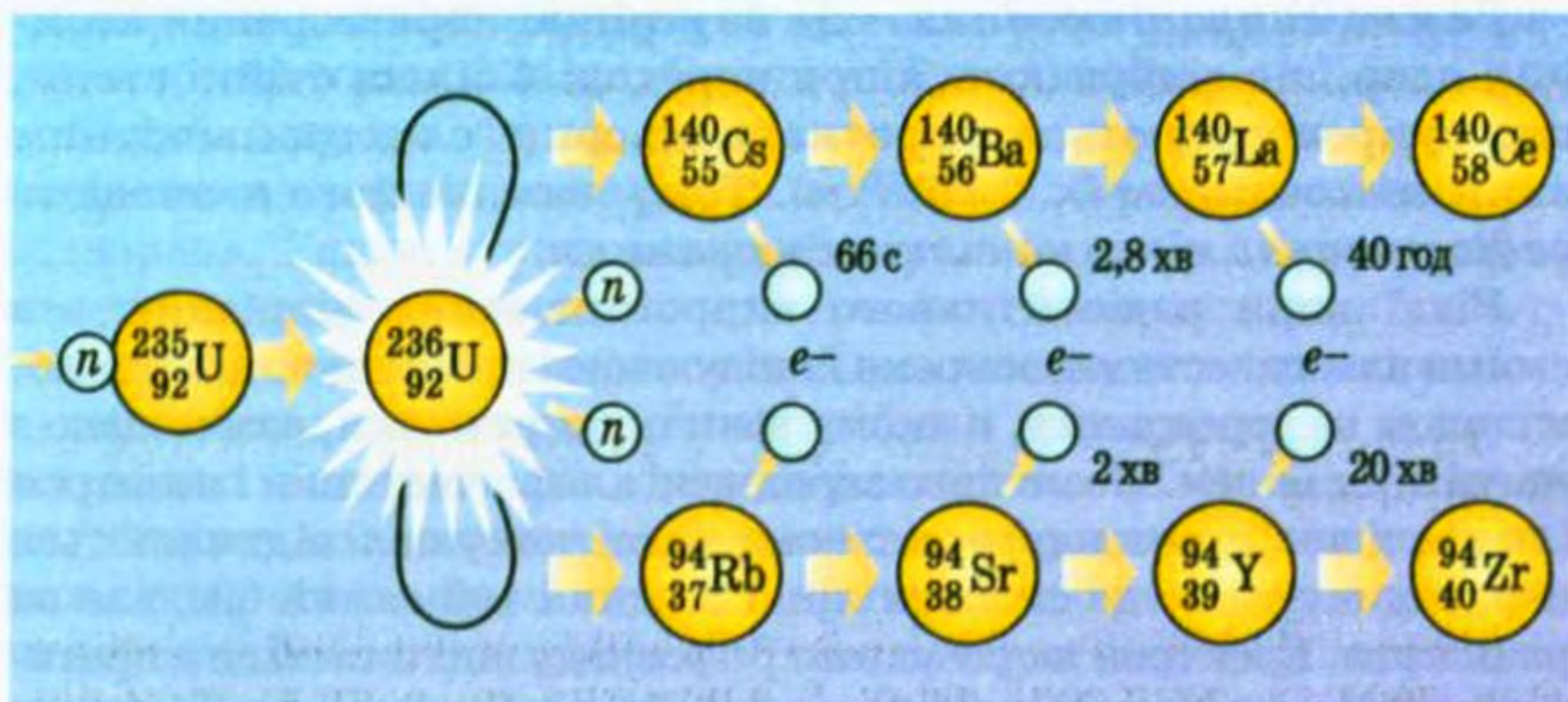
125

Наприклад, ядро Урану  ${}^{235}_{92}\text{U}$  при захопленні нейтрона може розділитися на два неоднакові більш легкі уламки (мал. 145), які розлітаються в різні боки, вивільняючи значну енергію і випромінюючи мікрочастинки.

Самочинний поділ ядер Урану  ${}^{235}_{92}\text{U}$  відкрили у 1940 р. російські вчені Г. М. Фльоров і К. А. Петржак.



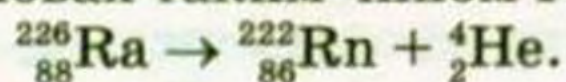
Радіоактивне випромінювання виникає внаслідок спонтанного поділу ядер окремих елементів або під час альфа- чи бета-розпаду ядра та гамма-випромінювання.



Мал. 145. Один з варіантів поділу ядра Урану



Під час *альфа-розпаду* відбувається перетворення нестійкого ізотопу в інший хімічний елемент, що супроводжується також утворенням ядра атома Гелію. Наприклад, у природних умовах таким чином Радій перетворюється в Радон:

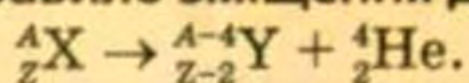


**Ядро атома Гелію інколи ще називають *альфа-частинкою*.**

Якщо брати до уваги, що внаслідок альфа-розпаду зарядове число ядра  $Z$  зменшується на 2, а його масове число  $A$  – на 4, то можна застосувати правило, за яким визначають ядро хімічного елемента, що утворилося. При цьому енергія, яка виділяється за рахунок альфа-розпаду, розподіляється між ядром атома Гелію (альфа-частинкою) і ядром нового елемента.



**Правило зміщення для альфа-розпаду:**



126

*Бета-розпад* відбувається під час утворення нового хімічного елемента внаслідок перетворення нуклонів усередині ядра – нейтрона в протон, чи навпаки, протона в нейтрон. Існує два різновиди бета-розпаду:

- 1)  $\beta^-$ -розпад, унаслідок якого випромінюється електрон;
- 2)  $\beta^+$ -розпад, унаслідок якого випромінюється позитрон – частинка, яка має таку саму масу, що й електрон, і позитивний електричний заряд, рівний заряду електрона.



**Позитрон** – це елементарна частинка, що має масу, рівну масі електрона; його заряд рівний заряду електрона, але позитивний.

*Гамма-випромінювання* – це внутрішні перетворення атомних ядер, що відбуваються при переході в більш стійкі стани, які супроводжуються короткохвильовим електромагнітним випромінюванням ( $\lambda < 10^{-10}$  м). Тому частіше його називають *радіоактивним гамма-випромінюванням*.

Різні види радіоактивного випромінювання відрізняються своїми властивостями, зокрема йонізуючою і проникною здатністю, впливом на середовище, в якому вони поширюються, взаємодією з магнітним полем. Позитивно заряджені альфа-частинки і позитрон (як наслідок  $\beta^+$ -розпаду) в сильному магнітному полі відхиляються перпендикулярно до силових ліній в один і той самий бік, але на різні кути. Електрон як результат  $\beta^-$ -розпаду відхиляється в протилежний бік, оскільки має негативний заряд. Гамма-промені поширюються в магнітному полі, не відхиляючись від прямолінійної



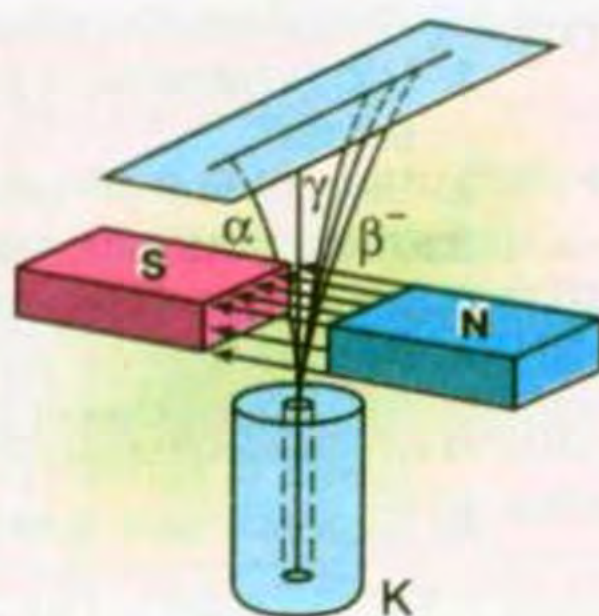
траєкторії, оскільки не мають електричного заряду (мал. 146).

Поширюючись у речовині, вони по-різному взаємодіють із нею. Альфа-частинки завдяки значній енергії утворюють на своєму шляху численні йони, взаємодіючи з електронними оболонками атомів. Тому вони швидко втрачають її і мають малу довжину пробігу: навіть у повітрі вона сягає лише кількох сантиметрів. Альфа-частинки фактично повністю затримуються навіть аркушем паперу. Проте вони дуже небезпечні при потраплянні в сам організм – легені, шлунок, на шкіру, оскільки за рахунок своєї енергії легко збуджують атоми, викликають дисоціацію молекул, що може шкідливо впливати на нього.

Бета-випромінювання також мають малу проникну здатність, проте значно більшу, ніж альфа-промені. Завдяки великій швидкості електрони і позитрони мають більшу довжину пробігу в середовищі. Наприклад, у повітрі вона може дорівнювати кільком метрам. Внаслідок зіткнень з атомами речовини бета-частинки швидко втрачають енергію, і тому їхня проникна здатність також невелика – до кількох сантиметрів у твердих тілах і рідинах. Навіть щільна тканина одягу майже повністю поглинає бета-випромінювання і зовсім не пропускає альфа-промені.

Найбільшу проникну здатність має короткохвильове гамма-випромінювання. Взаємодіючи з електронними оболонками атомів, воно спричиняє утворення швидких електронів, які йонізують середовище. Оскільки воно високоенергетичне, то фактично без перешкод поширюється в повітрі. У твердих тілах і рідинах воно поглинається сильніше. Наприклад, гамма-промені з довжиною хвилі приблизно  $10^{-12}$  м ослаблюються в 10 разів шаром води завтовшки 24 см, бетону – 12 см, свинцю – 1,3 см.

Таким чином, через свою нестабільність більшість ядер хімічних елементів виявляють здатність до радіоактивних перетворень. Радіоактивне випромінювання, що їх супроводжує, має різну природу і властивості. Альфа- і бета-частинки, що утворюються в результаті розпаду ядра, мають невисоку проникну здатність, але завдяки йонізаційним можливостям можуть шкідливо впливати на організм людини. Поширюючись у магнітному полі, вони відхиляються перпендикулярно до силових ліній, оскільки мають електричний заряд. Гамма-промені не взаємодіють із магнітним полем, оскільки електрично нейтральні. Вони мають високу проникну й іонізаційну здатність і тому найбільш небезпечні для організму людини.



Мал. 146. Альфа-, бета- і гамма-промені в магнітному полі





1. Що називається радіоактивністю? Які види радіоактивності бувають?
2. Чим зумовлені радіоактивні перетворення ядер?
3. У чому полягає механізм альфа- і бета-розпаду?
4. Які види променів характеризують радіоактивне випромінювання?
5. Які радіоактивні перетворення можуть відбуватися з ядрами? Дайте їх характеристику.
6. Ядром атома якого хімічного елемента є альфа-частинка?

## § 36. Активність радіонуклідів. Закон радіоактивного розпаду

128

Розпад атомних ядер, викликаний радіоактивністю, веде до того, що з часом кількість атомів даного ізотопу зменшується, оскільки утворюються нові хімічні елементи. У різних радіонуклідів це відбувається неоднаково за часом: одні зникають швидше, в інших цей процес триває довше. Ця властивість ядер називається *активністю радіонукліда* (позначається літерою  $A$ ). Вона фактично характеризує інтенсивність радіоактивних перетворень даного хімічного елемента, тобто кількість розпадів його атомних ядер за одиницю часу. Якщо взяти, що за 1 с відбувається один акт розпаду, то така одиниця активності радіонукліда в СІ називається *беккерель* (Бк).

Беккерель – дуже мала одиниця. Тому на практиці часто використовують кратні одиниці, наприклад кілобеккерель (кБк), мегабеккерель (МБк) та ін. Інколи користуються позасистемною одиницею активності – *кюри* (Ки):  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$  або  $1 \text{ Бк} = 2,7027 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$ . Це відповідає активності 1 г ізотопу радону  $^{226}\text{Ra}$ .



1 Ки дорівнює активності такого радіонукліда, в якого щосекунди відбувається  $3,7 \cdot 10^{10}$  розпадів ядер.

Було встановлено, що існує залежність активності радіоактивних нуклідів від часу – *закон радіоактивного розпаду*. З'ясувалося, що для кожної радіоактивної речовини існує певний інтервал часу, протягом якого кількість її ядер зменшується вдвоє. Цю величину назвали *періодом напіврозпаду*  $T$ . Тобто якщо в початковий момент часу було  $N$  радіоактивних ядер, то за період напіврозпаду  $T$  їхня кількість зменшиться вдвоє і дорівнюватиме  $N/2$ . Ще через такий самий час  $T$  їх буде вже  $N/4$  і т. д. Цей закон має статистичний характер і тому відображає середній час життя достатньо великої кількості атомних ядер і не може бути застосований для окремих ядер хімічних елементів.



Кожний радіоактивний ізотоп має свій певний період напіврозпаду (табл.).

Таблиця

## Період напіврозпаду деяких радіоактивних ізотопів

Хімічний елемент	Символ ізотопу	Період напіврозпаду	Хімічний елемент	Символ ізотопу	Період напіврозпаду
Гідроген	${}^3_1\text{H}$	12,3 року	Кальцій	${}^{45}_{20}\text{Ca}$	164 доби
Літій	${}^8_3\text{Li}$	0,8 с	Стронцій	${}^{90}_{38}\text{Sr}$	27,7 року
Карбон	${}^{14}_6\text{C}$	5600 років	Йод	${}^{131}_{53}\text{I}$	8,08 доби
Азот	${}^{13}_7\text{N}$	10,1 хв	Цезій	${}^{137}_{55}\text{Cs}$	26,6 року
Натрій	${}^{24}_{11}\text{Na}$	15 год	Вольфрам	${}^{185}_{74}\text{W}$	78,5 доби
Калій	${}^{40}_{19}\text{K}$	$25 \cdot 10^9$ років	Золото	${}^{198}_{79}\text{Au}$	2,7 доби
Хлор	${}^{36}_{17}\text{Cl}$	$3,1 \cdot 10^5$ років	Ртуть	${}^{205}_{80}\text{Hg}$	5,5 хв

129

Період напіврозпаду Урану  ${}^{238}_{92}\text{U}$  дорівнює 4,5 млрд років, Радію  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  – 1600 років, Полонію  ${}^{218}_{84}\text{Po}$  – лише 3 хв.

Очевидно, що активність радіонукліда  $A$  пов'язана з періодом його напіврозпаду  $T$ : чим менший період напіврозпаду, тим інтенсивніше відбувається радіоактивний розпад, тобто тим вища активність радіонукліда. Ці дві величини пов'язані між собою співвідношенням:

$$A = \frac{0,693N}{T},$$

де  $N$  – кількість атомних ядер радіонукліда.

За законом радіоактивного розпаду можна оцінити вік Землі. Відомо, що радіоактивний Уран у кінцевому рахунку перетворюється в стабільний свинець. Якщо обчислити відносний вміст у ґрунті радіоактивних ядер урану і стабільних ядер продуктів їхнього розпаду, то можна встановити, що вік нашої планети сягає приблизно 4,5 млрд років.

1. Що таке активність радіонукліда? В яких одиницях вона вимірюється?
2. Що характеризує період напіврозпаду радіонукліда? Яким чином він пов'язаний з його активністю?
3. У чому полягає суть закону радіоактивного розпаду?




## § 37. Йонізуюча дія радіоактивного випромінювання

При поширенні в середовищі радіоактивне випромінювання виявляє йонізуючу дію, оскільки воно взаємодіє з атомами і молекулами речовини. Залежно від виду випромінювання (альфа-, бета- чи гамма-випромінювання) та його енергії воно має різну йонізуючу здатність. Тому для характеристики цих його властивостей і впливу на речовину використовують спеціальні дозиметричні величини. Основною з них є *поглинута доза випромінювання*, яка визначається енергією, що надається йонізуючим випромінюванням 1 кг речовини:

$$D = \frac{E}{m}.$$

Поглинута доза випромінювання в СІ вимірюється в *греях* (Гр): 1 Гр – це така доза випромінювання, за якої 1 кг речовини поглинає енергію 1 Дж:  $1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ . Позасистемною одиницею поглинутої дози випромінювання є *рад*:  $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$ .

У дозиметричних вимірюваннях продовжують використовувати позасистемну одиницю *рентген* (позначається Р). Ця одиниця характеризує здатність випромінювання створювати в сухому повітрі електричний заряд:  $1 \text{ Р} = 2,57976 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ .

 При дозі 1 Р в 1 см<sup>3</sup> сухого повітря за нормальних умов утворюється  $2,08 \cdot 10^9$  пар йонів.

Інтенсивність поглинання радіоактивного випромінювання характеризується величиною, що називається *потужністю дози*.

Вона визначає приріст поглинутої дози за одиницю часу:  $N = \frac{D}{t}$ .

Вплив радіоактивного випромінювання на живі організми показав, що різні його види мають неоднаковий біологічний ефект. Це зумовлено різною їх йонізуючою здатністю. Важкі альфа-частинки, хоча й мають малу проникну здатність, проте спроможні утворити на одиниці шляху більше йонів, ніж гамма-випромінювання. У клітинах живих організмів унаслідок йонізації відбуваються біохімічні зміни, що можуть призвести до утворення нових радикалів, які відсутні у звичайній клітині. Тому порушується її функція поділу, може відбутися злоякісне переродження клітини тощо.

Щоб урахувати руйнівний вплив радіоактивного випромінювання на живу тканину, ввели поняття *еквівалентної дози*



випромінювання. Ця величина визначається множенням поглинутої дози випромінювання на коефіцієнт відносної біологічної ефективності:  $D_e = kD$ . Цей коефіцієнт визначається експериментально з урахуванням енергії випромінювання. Наприклад, для бета- і гамма-випромінювання він дорівнює 1, а для альфа-частинок, залежно від їхньої енергії, він може досягати 20.

**Коефіцієнт відносної біологічної ефективності інколи називають коефіцієнтом якості.**



Еквівалентна доза випромінювання вимірюється в зівертах (Зв). За розміром зіверт і грей однакові. Однак це не означає, що відповідні величини – еквівалентна і поглинута дози випромінювання – також рівні. Одиниця еквівалентної дози враховує коефіцієнт відносної біологічної ефективності випромінювання.

1 Зв – це така еквівалентна доза будь-якого виду випромінювання, яка при поглинанні в 1 кг біологічної речовини створює такий самий ефект, що й поглинута доза 1 Гр гамма-випромінювання. Інколи в дозиметричних вимірюваннях користуються позасистемною одиницею *бер* (біологічний еквівалент рада):  $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$ .

131

**Для рентгенівського і гамма-випромінювання  
 $1 \text{ бер} = 1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$ .**



Таким чином, йонізуюча здатність радіоактивного випромінювання залежить від його виду та енергії, яку воно має. Різний вплив альфа-, бета- і гамма-випромінювання на живі клітини враховується завдяки введенню коефіцієнта відносної біологічної ефективності, який визначає еквівалентну дозу випромінювання, що діє на живий організм.

1. Як впливає радіоактивне випромінювання на речовину?
2. Які дозиметричні величини характеризують радіоактивне випромінювання? Наведіть їх одиниці.
3. Чим пояснити різну дію альфа-, бета- і гамма-випромінювання на живі клітини?
4. Чим відрізняється еквівалентна доза випромінювання від поглинутої?





## § 38. Основи дозиметрії. Природний радіоактивний фон та його вплив на живі організми

Біологічна дія різних видів радіоактивного випромінювання на живі організми неоднакова навіть при однаковій поглинутій дозі. Тому для оцінювання радіаційної небезпеки для живих організмів слід ураховувати вид йонізуючого випромінювання та його потужність.

У дозиметрії прийнято їх порівнювати з рентгенівським чи гамма-випромінюванням завдяки введенню коефіцієнта відносної біологічної ефективності та еквівалентної дози випромінювання. Ці величини дають можливість оцінити вплив радіаційного випромінювання на живі організми за йонізуючою дією на клітину.

132

Залежно від поглинутої дози випромінювання в організмі можуть виникати різні радіобіологічні ефекти. Вони можуть проявитися через багато років після опромінення (як злоякісні утворення) або навіть у наступних поколіннях за рахунок мутації.

Установлено, що різні людські органи і тканини неоднаково реагують на радіоактивне опромінення. Найуразливішими є статеві залози, кістковий мозок, шлунок і легені. Наприклад, за однакової еквівалентної дози рак у легенях може виникнути скоріше, ніж у щитоподібній залозі, а опромінення статевих залоз небезпечно через ризик генетичних змін.

Існують *гранично допустимі для людини дози*. Це найбільше значення еквівалентної дози за календарний рік, за якої рівномірне опромінення людини впродовж 50 років не може викликати несприятливих змін у стані її здоров'я. Для населення гранично допустимою дозою систематичного опромінення встановлена еквівалентна доза 1 мЗв, або 0,1 бер за рік.



**Симптоми гострої променевої хвороби у людини можуть з'явитися при дозі 1...2 Зв на все тіло.**

Смертельною для людського організму вважається еквівалентна доза 600 бер. При цьому слід враховувати час, протягом якого вона отримана: якщо опромінення короткотривале і діє на все тіло, то відповідна доза буде значно меншою.



**При опроміненні тіла людини дозою 1 Зв відбуваються зміни в крові; 2...5 Зв викликає облисіння та білокрів'я; 3 Зв за 30 днів спричиняє смерть у 50 відсотках випадків.**



Через *природний радіаційний фон* (космічні промені, радіоактивні ізотопи земної кори, випромінювання радону в атмосфері, промислові радіаційні забруднення тощо) усе живе на планеті Земля постійно перебуває під дією радіоактивного випромінювання. Так, радіаційний фон в Україні залежно від регіону характеризується потужністю  $0,1 \dots 0,3 \frac{\text{мкЗв}}{\text{год}}$  (в окремих регіонах, зокрема біля гранітних кар'єрів чи покладів уранової руди, він може мати більші значення).

Слід зазначити, що вплив радіоактивного випромінювання на живі організми має не лише негативні наслідки. У малих дозах воно широко застосовується у лікуванні на мікробіологічному рівні, наприклад для опромінення злоякісних пухлин з метою руйнування ушкоджених клітин. У різних галузях промисловості йонізуюче випромінювання застосовують для діагностики матеріалів (інтроскопія, дефектографія). У харчовій промисловості воно використовується для стерилізації інструментів і продуктів харчування. В агротехнологіях завдяки радіоактивному опроміненню викликають мутацію генів тварин і рослин, створюючи біологічні об'єкти із заданими властивостями. Крім того, дослід з вирощування рослин в умовах обмеження радіації показали, що їх розвиток сповільнюється і продуктивність знижується. Тобто на Землі під дією природного радіоактивного фону відбулася еволюція живої природи таким чином, що відсутність радіації негативно позначається на розвитку організмів.

133

1. Завдяки яким властивостям радіоактивного випромінювання відбувається його біологічний вплив на живі організми?
2. Чи однаково реагує людський організм на різні види радіоактивного випромінювання?
3. Які чинники визначають дію альфа-, бета- і гамма-випромінювання на живі організми?
4. Чому існує небезпека при радіаційному опроміненні людини? Які допустимі норми опромінення людини?

### Вправа 14

1. Який склад мають ядра атомів Al, Au, Cs?
2. Чим відрізняється ядро атома Урану-235 від ядра атома Урану-238?
3. Атомна маса Хлору дорівнює 35,45 а. о. м. Хлор має два ізотопи:  $^{35}_{17}\text{Cl}$  і  $^{37}_{17}\text{Cl}$ . Яке процентне їх співвідношення?
4. Ізотопи яких елементів утворюються з радіоактивного ізотопу  $^7_3\text{Li}$  після його бета-електронного розпаду та наступного альфа-розпаду? Запишіть ці реакції розпаду.



5. Активність радіоактивного елемента за 8 діб зменшилася в 4 рази. Який у нього період напіврозпаду?

6. Період напіврозпаду радіоактивної міді становить 10 хв. Яка частка від початкової її кількості залишиться через 1 год?

7. Які ядра народжуються з радіоактивного Радію  $^{226}_{88}\text{Ra}$  внаслідок п'яти альфа-розпадів і чотирьох бета-електронних розпадів?

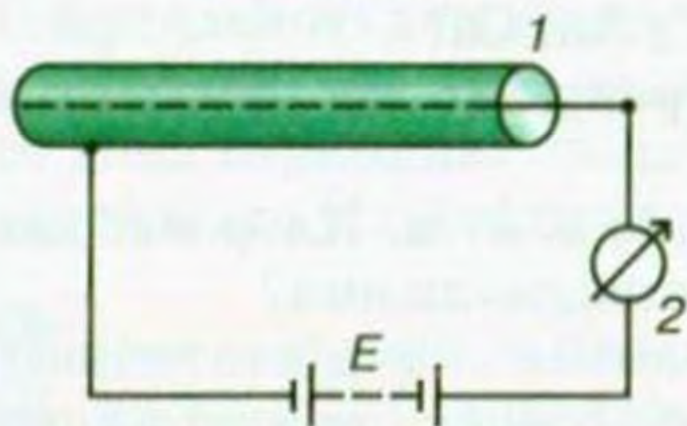
8. Потужність дози гамма-випромінювання в зоні радіоактивного зараження дорівнює  $0,2 \frac{\text{мкГр}}{\text{год}}$ . Скільки часу може перебувати людина в цій зоні, якщо гранична доза дорівнює 0,25 Гр?

## § 39. Дозиметри

Вимірювання характеристик радіоактивного випромінювання здійснюють за допомогою приладів, які називаються *дозиметрами* (мал. 147). Основним їх конструктивним елементом (мал. 148) є пристрій 1 для реєстрації іонізуючого випромінювання. Найчастіше з цією метою використовують лічильники Гейгера. Це, як правило, металеві циліндричні трубки, заповнені повітрям або газом, всередині яких є тонкий



Мал. 147. Дозиметри-радіометри



Мал. 148. Схема дозиметра

дріт. Таким чином, цей пристрій являє собою циліндричний конденсатор, до електродів якого прикладена висока напруга. Частинка, потрапляючи в такий конденсатор, йонізує газ між його обкладками, внаслідок чого виникає несамостійний газовий розряд. Цей короткочасний розряд викликає в колі імпульс струму, який фіксується вимірювальним пристроєм 2. За силою струму можна оцінити інтенсивність йонізуючого випромінювання. Залежно від фізичної величини, що вимірюється, шкала дозиметра може бути проградуйована за різними дозиметричними величинами – питомою активністю радіонукліда, поглинутою або еквівалентною дозою випромінювання, потужністю дози випромінювання тощо.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

### Вивчення будови дозиметра і проведення дозиметричних вимірювань

**Мета.** Ознайомитися з принципом дії дозиметрів-радіометрів і за їх допомогою здійснити дозиметричні вимірювання радіаційного фону у кімнаті і на місцевості.

#### Вказівки до роботи

Радіоактивне випромінювання, яке часто також називають йонізуючим випромінюванням, – це природне явище, властиве оточуючому середовищу. На людину постійно впливає випромінювання радіаційного фону Землі та космосу, природних радіоактивних матеріалів, що знаходяться у ґрунті тощо. Має місце також вплив випромінювання техногенного походження, наприклад внаслідок забруднення території радіоактивними викидами.

Для проведення дозиметричних вимірювань радіоактивного випромінювання використовують прилади, які називаються радіометрами (для вимірювання поглинутої або еквівалентної дози радіоактивного випромінювання) і дозиметрами (для вимірювання потужності дози випромінювання та активності радіонуклідів). Оскільки в обох цих приладах датчиком є йонізаційний лічильник Гейгера, інколи їх роблять комбінованими і тоді називають дозиметрами-радіометрами.

У повсякденному житті людина найчастіше зустрічається з небезпекою  $\beta$ - та  $\gamma$ -випромінювання. Тому більшість приладів для контролю радіаційного випромінювання вимірює вплив саме цих видів випромінювання.

За допомогою дозиметрів і радіометрів можна оцінити радіаційну ситуацію на місцевості чи в приміщеннях і контролювати радіаційну безпеку населення. З цією метою вимірюють природний радіаційний фон, тобто потужність дози випромінювання для даної місцевості. Щоб вірогідніше його оцінити, необхідно зробити не менше 5 вимірювань потужності дози на відкритій місцевості і обчислити її середнє значення. Безпечним вважається радіаційний фон менше  $0,30 \text{ мкЗв/год}^1$ .

При оцінюванні радіаційної безпеки в приміщенні слід порівняти природний радіаційний фон зі значеннями потужності дози радіоактивного випромінювання в кімнаті. Якщо вони приблизно збігаються, то це означає, що додаткових джерел радіаційного забруднення в приміщенні немає. Якщо ж вони суттєво відрізняють-

<sup>1</sup> В окремих регіонах він може бути вищим. Проте в такому випадку варто враховувати граничну річну дозу опромінення, яка не може бути вищою за 0,5 бер.



ся, необхідно шукати місце, де значення потужності дози завищене, і проводити там профілактичні заходи (наприклад, витерти пил і зробити вологе прибирання кімнати з миючими засобами).

### Виконання роботи (варіант 1)

**Обладнання:** комбінований прилад для вимірювання йонізуючого випромінювання з інструкцією, зразки ґрунту або інших об'єктів.

1. Ознайомтеся з інструкцією дозиметричного приладу і відповідно до неї з'ясуйте, які дозиметричні величини можна виміряти за його допомогою.

2. Зробіть пробне вмикання приладу і підготуйте його до роботи.

3. Виміряйте природний радіаційний фон місцевості і обчисліть приблизну річну дозу опромінення, яку отримує місцеве населення за рік. Порівняйте її з гранично допустимою і зробіть висновок.

4. Виміряйте середню потужність дози випромінювання у класній кімнаті або іншому робочому приміщенні за 10–20 показами приладу в різних місцях і порівняйте це значення з природним радіаційним фоном.

5. У разі необхідності знайдіть місце радіоактивного забруднення, повідомте про це вчителя.

### Виконання роботи (варіант 2)

**Обладнання.** Дозиметр-радіометр МКС-0,5 «Терра-П».

Ознайомтеся з інструкцією до приладу. З'ясуйте його призначення, порядок роботи, основні характеристики. Після цього приступайте до виконання завдань.

**Завдання 1.** *Вимірювання потужності еквівалентної дози (ПЕД)  $\gamma$ -випромінювання.*

1. Для вимірювання ПЕД  $\gamma$ -випромінювання розмістіть дозиметр метрологічною міткою «+» у напрямі до об'єкта, що обстежується. Увімкніть його в потрібний режим, після чого автоматично встановлюється значення гранично допустимого рівня ПЕД  $\gamma$ -випромінювання 0,30 мкЗв/год, що відповідає максимально допустимому рівню для приміщень згідно з Нормами радіаційної безпеки України (НРБУ-97).

2. Не змінюючи орієнтації дозиметра відносно об'єкта, зробіть 5 вимірювань ПЕД через кожні 10 с після початку вимірювання.

3. Знайдіть середнє значення ПЕД. Результати вимірювань та обчислень запишіть у таблицю 1.

4. Порівняйте отримане середнє значення ПЕД з максимально допустимим значенням гранично допустимого рівня ПЕД випромінювання і зробіть висновок.



Таблиця 1

№	Час, с	ПЕД, мкЗв/год	Середнє значення ПЕД, мкЗв/год
1	10		
2	20		
3	30		
4	40		
5	50		

**Завдання 2. Оцінювання поверхневого забруднення  $\beta$ -радіонуклідами.**

1. Для оцінювання поверхневого забруднення  $\beta$ -радіонуклідами дозиметр увімкніть в режим вимірювання ПЕД  $\gamma$ -випромінювання. Зорієнтуйте його вікно, що знаходиться навпроти детектора, паралельно обстежуваній поверхні і розмістіть його на мінімальній відстані від неї.

2. Зробіть два вимірювання: перше – з відкритим вікном детектора, друге – із закритим кришкою-фільтром.

3. Не змінюючи розміщення дозиметра відносно об'єкта, зробіть 5 вимірювань ПЕД через кожні 10 с після початку вимірювання.

4. Обчисліть різницю між першим і другим вимірюваннями поверхневого забруднення  $\beta$ -радіонуклідами (наявність різниці значень між першим і другим вимірюваннями свідчить про забрудненість обстежуваного об'єкта радіонуклідами).

5. Знайдіть середнє арифметичне значення різниці поверхневого забруднення  $\beta$ -радіонуклідами.

6. Результати вимірювань запишіть у таблицю 2 і зробіть висновок.

Таблиця 2

№	Час, с	З відкритим вікном $x_1$ , мкЗв/год	Із закритим кришкою-фільтром вікном $x_2$ , мкЗв/год	$\Delta x = x_1 - x_2$ , мкЗв/год	Середнє значення $\Delta x$ , мкЗв/год
1	10				
2	20				
3	30				
4	40				
5	50				



## § 40. Ядерна енергетика. Будова АЕС

Енергетика – це основа економіки будь-якої держави. За способом виробництва енергії ця галузь промисловості визначає рівень науково-технічного розвитку країни. Сьогодні в світі дві третини електроенергії виробляють теплові електростанції (ТЕС), приблизно однакова частка (по 17 %) належить гідроелектростанціям (ГЕС) і атомним електростанціям (АЕС), решта (приблизно 2 %) – іншим електрогенеруючим системам. Світова ядерна енергетика налічує понад 400 енергогенеруючих ядерних реакторів, сумарна потужність яких понад 350 ГВт. З них 15 реакторів працюють в Україні на чотирьох атомних електростанціях: найбільшій в Європі Запорізькій АЕС (6 енергетичних блоків), Південноукраїнській АЕС (3 блоки), Рівненській АЕС (4 блоки) і Хмельницькій АЕС (2 блоки).

Людство зробило суттєвий крок уперед, коли змогло приборкати ядерну енергію. У 1942 р. під керівництвом Е. Фермі у США було збудовано перший ядерний реактор, в якому здійснена керована реакція поділу ядер Урану.

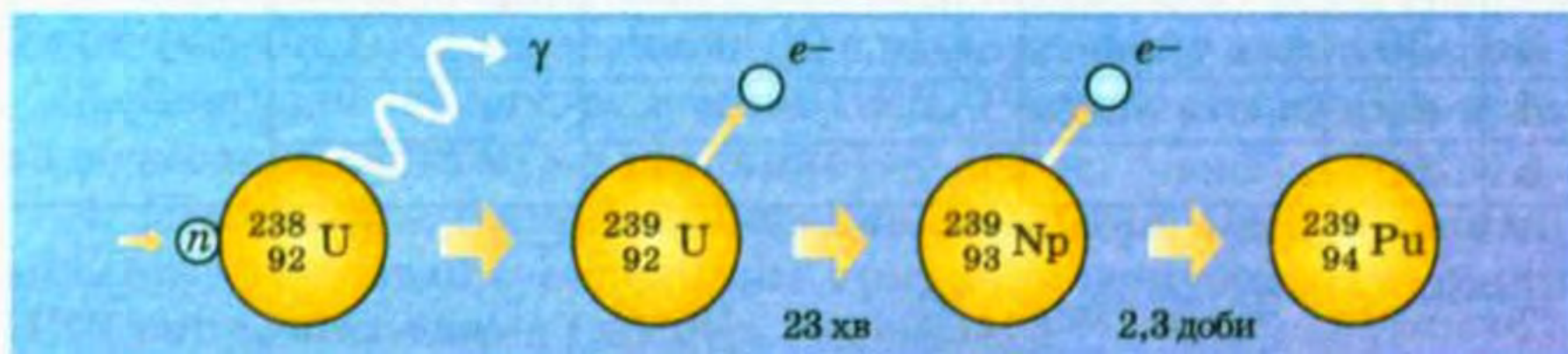
138



Перша в світі атомна електростанція потужністю 5 МВт (Обнінськ, Росія) була збудована в 1954 р. під керівництвом І. В. Курчатова.

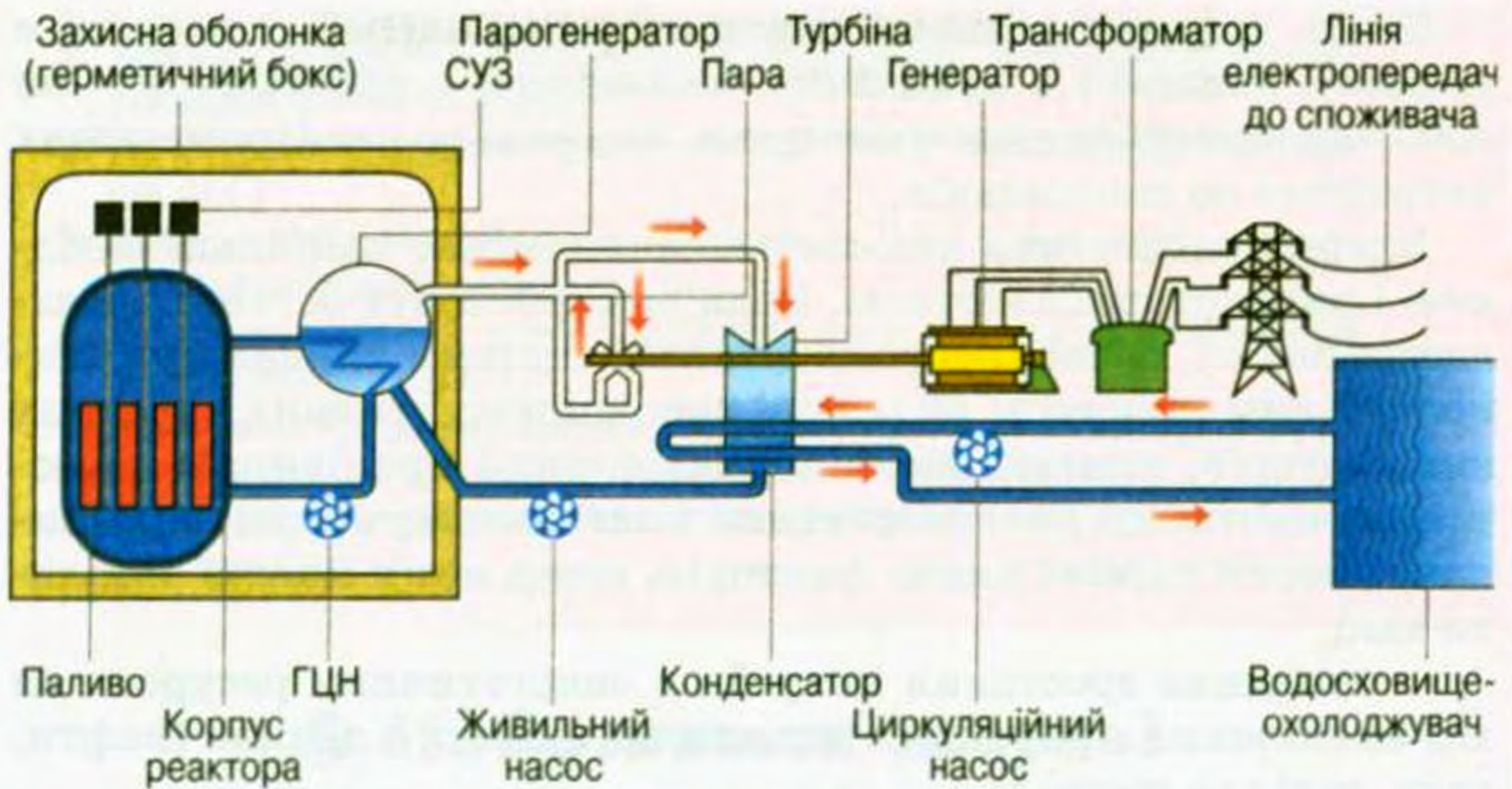
Однією з ядерних реакцій, що використовується в сучасних реакторах, є перетворення ізотопу Урану-238 після захоплення ядром нейтрона в трансуранові елементи – нестабільний нептуній і згодом, після бета-розпаду його ядра, у відносно стабільний плутоній-239 (мал. 149).

В основі дії атомних електростанцій лежить перетворення енергії, вивільненої від поділу ядер радіоактивних ізотопів, в електроенергію. Основними конструктивними елементами АЕС є ядерний реактор, що складається з активної зони, де власне відбувається ядерна реакція, парогенератор, турбіна, електричний генератор (мал. 150).



Мал. 149. Ядерна реакція поділу Урану





Мал. 150. Будова АЕС

В Україні в основному використовують так звані водо-водяні реактори (ВВЕР), в яких вода використовується як теплоносій парогенераторного циклу. В активну зону такого реактора завантажують ядерне паливо у вигляді тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) – пресованих паливних «таблеток» збагаченого Урану, вміщених у сталеві чи цирконієві оболонки.

139

**Якщо всі ядра 1 г ізотопу Урану здійснять поділ, то виділиться енергія, еквівалентна 23 тис. кВт-год теплової енергії.**



Енергія, що виділяється в результаті поділу ядер Урану, розжарює ТВЕЛі і тому потребує постійного відведення. Для їх охолодження завдяки спеціальним технологічним каналам через активну зону під високим тиском прокачують воду. За допомогою води як теплоносія, яка нагрівається майже до 300 °С, енергія передається парогенератору, в якому утворюється насичена пара. Вона під значним тиском спрямовується по паропроводу на лопатки парової турбіни (пригадайте з курсу фізики 8 класу принцип дії парової турбіни), що спричинює обертання генератора, який, власне, і виробляє електроенергію. Відпрацьована пара конденсується, утворена вода охолоджується і знову потрапляє до активної зони для охолодження ТВЕЛів. Оскільки в реакторі під час поділу ядер Урану виділяється значна енергія, для її відведення необхідно багато води. Тому АЕС, як правило, будують біля великих водосховищ, використовуючи для технологічного циклу вироблення електроенергії їхні запаси води.

**Потужність ядерного реактора в 1 МВт відповідає ядерній реакції поділу Урану, за якої відбувається  $3 \cdot 10^{16}$  актів поділу ядер за 1 с.**





Отже, завдяки кільком перетворенням енергії – ядерної в теплову, теплової в механічну, механічної в електричну – на АЕС виробляється електроенергія, яка далі по електромережах потрапляє до споживачів.

Ядерна енергетика вважається економічно найбільш вигідною і високотехнологічною. Вона використовує останні досягнення науки, сучасні автоматизовані системи управління технологічним процесом на основі високопродуктивних сучасних комп'ютерів, вимагає високої кваліфікації працівників. Зростанню частки ядерної енергетики в загальному обсязі виробництва енергії сприяє низка факторів, серед яких можна виділити такі:

- невпинне зростання потреби в енергетичних ресурсах на тлі зменшення природних запасів органічного палива (нафти, газу, вугілля тощо);

- надзвичайно висока енергоздатність ядерного палива: 1 кг урану енергетично еквівалентний 20 т кам'яного вугілля найвищої якості;

140

- значно менше забруднення навколишнього середовища, ніж від спалювання звичайного палива (лише 2...6 г  $\text{CO}_2$  на 1 кВт-год енергії, що приблизно в 100 разів менше за викиди при використанні вугілля чи нафти);

- різке подорожчання видобутку органічного палива і розвідки нових його покладів;

- практично необмежені запаси радіоактивних ізотопів, які можуть використовуватися в ядерній енергетиці.

Зокрема, викиди в навколишнє середовище забруднюючих речовин з українських АЕС є незначними порівняно з тепловими електростанціями. Індивідуальна доза опромінення населення від експлуатації АЕС не перевищує 80 мкЗв, тобто лише 8 відсотків від нормативно визначеної гранично допустимої дози опромінення населення, що становить 1 мЗв. Реальні величини викидів і скидів радіоактивних речовин АЕС становлять менше 10 відсотків від нормативно визначеного ліміту. Колективна доза, яку нині отримує населення України від виробництва електроенергії на ТЕС, значно більша, ніж від виробництва електроенергії на АЕС. Так, спеціалісти МАГАТЕ (Міжнародна організація з атомної енергетики), оцінюючи ризики для здоров'я населення від різних типів електростанцій, установили, що смертність на 1 ГВт потужності в рік, зумовлена виробництвом електроенергії на ТЕС, що працює на газі, у 2–30 разів, а на вугіллі й нафті в 30–300 разів вища, ніж від ядерної енергетики. Крім того, спалювання органічного палива на ТЕС веде до парникового ефекту через викиди в атмосферу до 20 млрд тонн  $\text{CO}_2$  на рік.





1. Яка частка ядерної енергетики в загальному обсязі світового виробництва електроенергії?
2. Де вперше збудували ядерний реактор? Де була збудована перша АЕС?
3. Яке призначення ядерного реактора на АЕС? З яких конструктивних елементів він складається?
4. Які перетворення енергії відбуваються під час виробництва електроенергії на АЕС?
5. Яких умов треба дотримуватися, щоб ядерна реакція була керованою?
6. Чому ядерну енергетику вважають перспективною у виробництві електроенергії?

## § 41. Розвиток ядерної енергетики в Україні. Екологічні проблеми ядерної енергетики

141

Українська ядерна енергетика – молода галузь. Її історія налічує трохи більше 30 років, з 1977 р., коли був пущений перший реактор Чорнобильської АЕС. Ядерна енергетика посідає чільне місце в економіці України – майже половина електроенергії виробляється на її атомних електростанціях (мал. 151). Загальна потужність українських АЕС дорівнює 15 ГВт, і вони



Мал. 151. Карта АЕС





Мал. 152. Річне виробництво електроенергії в Україні у період 2005—2030 рр., млрд кВт-год

щорічно виробляють понад 80 мільярдів кВт-год електроенергії, що складає майже половину виробництва електроенергії в країні. За кількістю реакторів та їх сумарною потужністю Україна посідає сьоме місце у світі та четверте – в Європі.

Держава постійно дбає про розвиток ядерної енергетики в Україні. У 2006 р. була прийнята Енергетична стратегія України до 2030 р., згідно з якою цій галузі надано пріоритет у перспективному нарощуванні енергетичних потужностей. Стратегією планується збереження частки виробництва електроенергії на рівні 50 відсотків від сумарного річного виробництва електроенергії в Україні (мал. 152). Для цього треба підвищити потужність нині діючих АЕС до 29,5 ГВт. З цією метою необхідно побудувати нові АЕС, оновити існуючі реактори більш сучасними і потужнішими, а також продовжити експлуатацію діючих енергетичних блоків, що вичерпали свій ресурс.

Таке рішення має відповідні підстави – власна сировинна база, потенційні можливості щодо створення нових і реконструкції старих енергетичних потужностей на АЕС, підвищення рівня безпеки на них та їх стабільною роботою впродовж останніх років тощо. Крім того, воно зумовлено також наявними технічними, фінансовими та екологічними проблемами теплової енергетики.

Ядерна енергетика – це не лише атомні електростанції, а й широка промислова інфраструктура з видобутку уранової руди, виготовлення ядерного палива, виробництво цирконію для ТВЕЛів, поводження з відпрацьованим ядерним паливом, різноманітний спектр екологічних заходів і безпеки експлуатації АЕС тощо. В Україні існують елементи ядерно-паливного



циклу переробки уранової руди, які нині на третину забезпечують існуючі потреби в ядерному паливі, решта закуповується в Росії. Також налагоджено виробництво цирконію та його сплавів, обсяги якого достатні для задоволення потреб українських АЕС у ТВЕЛАх.

Разом з тим залишається невирішеною проблема поводження з радіоактивними відходами, їхньої переробки, зберігання і захоронення. У її вирішенні вже зроблено перші кроки. Наприклад, на Запорізькій АЕС збудовано сховище відходів ядерного палива «сухого» типу, яке дає можливість їхнього довгострокового проміжного зберігання. Для українських АЕС першочерговим завданням є модернізація наявних і створення нових технологічних ліній попередньої та глибокої переробки радіоактивних відходів, розгортання робіт з вилучення зі сховищ і перероблення раніше накопичених відходів.

Експлуатація АЕС потребує запровадження широкого спектра засобів контролю і радіаційної безпеки, оскільки наслідки через їх нехтування можуть бути катастрофічними, як це сталося 26 квітня 1986 року на Чорнобильській АЕС. Унаслідок порушення технологічного циклу ядерного реактора під час випробувального експерименту ядерна реакція стала некерованою, відбувся вибух, який повністю зруйнував четвертий блок АЕС, і стався викид радіоактивних речовин в атмосферу. У зруйнованому реакторі продовжувалися неконтрольовані ядерні й хімічні реакції з виділенням теплоти, що призвело до виверження продуктів горіння, серед яких були радіоактивні елементи (ізотопи Урану, Плутонію, Йоду, Стронцію, Цезію тощо), і зараження ними значних територій України, Білорусії, Росії.

143

**З 2001 р. Чорнобильська АЕС не працює, всі її енергетичні блоки виведено з експлуатації. Зараз продовжуються роботи з консервації зруйнованого блока, створення над ним захисного укриття.**



Ця аварія вважається найбільшою за всю історію ядерної енергетики як за кількістю людей, що загинули і постраждали від неї, так і за економічним збитком. Наслідки трагедії відчуються до сих пір.

За офіційним розслідуванням причинами аварії вважаються:

- конструктивні недоробки реактора, особливо в системах безпеки;
- низка порушень, якої припустився персонал станції під час проведення експериментальних випробувань, що призвели до трагічних наслідків;
- недосконалість системи захисту реактора, яка практично не спрацювала в тих умовах і не вплинула на перебіг подій;



– погана інформованість персоналу станції про небезпеку, яку несуть наслідки порушення умов експлуатації реактора.

Зважаючи на трагічні наслідки Чорнобильської катастрофи, стратегія розвитку ядерної енергетики в Україні спрямована насамперед на вирішення екологічних проблем і забезпечення безпеки експлуатації АЕС. Сьогодні рівень безпеки, досягнутий на українських АЕС, відповідає вимогам МАГАТЕ, що підтверджено численними експертизами міжнародних експертів. Проте потенційні можливості його підвищення не вичерпано, зокрема в питаннях забезпечення функцій управління ядерною реакцією, тепловідведення з реакторної установки та безпечного зберігання відходів ядерного палива. Подальше забезпечення екологічної безпеки здійснюється в напрямі удосконалення локального, регіонального та глобального контролю і прогнозу радіаційної обстановки; періодичної переоцінки впливів АЕС на навколишнє середовище; встановлення більш жорстких вимог щодо радіаційної безпеки.

144

Проте поряд з прихильниками ядерної енергетики, які у своїх переконаннях керуються об'єктивними даними про її переваги перед іншими видами енергетики, існують також її противники, які посилаються на катастрофічні наслідки неправильної експлуатації АЕС. Так, деякі країни (Швеція, Бельгія, Німеччина) прийняли політичне рішення про відмову від ядерної енергетики на користь відновлювальних джерел енергії і закриття на своїх територіях діючих АЕС. Австрія, Нідерланди, Італія, Польща та Іспанія заборонили будівництво нових станцій. Проте світова енергетична криза змушує ці країни виваженіше ставитися до ядерної енергетики: у більшості цих країн досі продовжують працювати АЕС. Наприклад, у Швеції і Бельгії в структурі споживання електроенергії майже 50 відсотків належить ядерній енергетиці, а Німеччина, яка має 17 реакторних установок, займає одне з провідних місць серед країн з ядерною енергетикою.



**Загалом у світі 32 країни виробляють електроенергію на АЕС. Найбільше енергетичних ядерних реакторів мають: США – 104; Франція – 59; Японія – 55; Росія – 31. Ще 24 реактори зараз будується в різних країнах світу, 17 з них в Азії.**

Слід зазначити, що альтернативні відновлювальні джерела енергії, незважаючи на свою привабливість, не в змозі забезпечити всі енергетичні потреби сучасної економіки. Крім того, собівартість виробленої ними енергії досить висока. Вони також створюють екологічні проблеми. Наприклад, ГЕС порушують екосистеми річок і цим зашкоджують природі; сонячні батареї містять багато шкідливих речовин, які не піддаються утилізації, тощо.





1. Дайте загальну характеристику ядерної енергетики України, підтвердивши це відповідними даними.
2. У чому суть Енергетичної стратегії України до 2030 р. щодо ядерної енергетики?
3. Що вам відомо про Чорнобильську катастрофу? Назвіть головні її причини.
4. Які основні завдання стоять перед ядерною енергетикою України щодо екологічної безпеки АЕС?
5. Чи існує альтернатива розвитку ядерної енергетики в Україні та які її перспективи?

## Головне в розділі 4

1. Експериментальні дослідження Е. Резерфорда та його співробітників, відкриття X-променів В. К. Рентгеном (1895 р.), радіоактивності А. Беккерелем (1896 р.), електрона Дж. Томсоном (1897 р.) і науковий доробок інших учених створили підґрунтя для розвитку на початку ХХ ст. атомної фізики. Запропонована Е. Резерфордом у 1911 р. ядерна модель атома передбачає, що *атом складається з позитивно зарядженого ядра, навколо якого обертаються електрони.*

У свою чергу атомне ядро, в якому зосереджена практично вся маса атома, складається з нуклонів – протонів і нейтронів, які утримуються один біля одного завдяки ядерним силам, що діють між ними. Протонно-нейтронна модель атома визначає, що *загальна кількість нуклонів дорівнює масовому числу  $A$ ; кількість протонів дорівнює заряду ядра  $Z$ , а кількість нейтронів  $N = A - Z$ .*

2. У природі існують стабільні та нестабільні хімічні елементи. Ядра важких елементів, як правило, нестабільні. Тому вони є радіоактивними ізотопами і можуть самочинно перетворюватися в інші хімічні елементи завдяки випромінюванню мікрочастинок або шляхом поділу на більш стійкі утворення. Це явище називається *радіоактивністю.*

3. Існує природна і штучна радіоактивність. За механізмами перетворення ядра вони нічим не відрізняються і мають три види: альфа-, бета-розпад і гамма-випромінювання. Під час альфа-розпаду перетворення нестійкого ізотопу в інший хімічний елемент супроводжується випромінюванням ядра атома Гелію, яке назвали альфа-частинкою. При бета-розпаді відбувається випромінювання ядром електрона чи позитрона, внаслідок чого утворюється новий хімічний елемент. Перетворення атомних ядер, що відбуваються при переході в більш стійкі стани, як правило, супроводжується *гамма-випромінюванням*, тобто короткохвильовим електромагнітним випромінюванням ( $\lambda < 10^{-10}$  м).



4. Характерною ознакою радіоактивних ізотопів є *активність радіонукліда*  $A$ , яка визначається кількістю розпадів атомних ядер за 1 с і вимірюється в беккерелях. За законом радіоактивного розпаду для кожної радіоактивної речовини існує певний інтервал часу, протягом якого кількість її ядер зменшується вдвоє. Цей час називається *періодом напіврозпаду*  $T$ , і він пов'язаний з активністю радіонукліда співвідношенням  $A = \frac{0,693N}{T}$ , де  $N$  – кількість атомних ядер нукліда.

5. Для характеристики впливу радіоактивного випромінювання на речовину використовують такі дозиметричні величини:

- *поглинута доза випромінювання*, яка вимірюється в греях і визначає енергію, надану йонізуючим випромінюванням 1 кг речовини;

- *потужність дози випромінювання*, яка характеризує інтенсивність радіоактивного випромінювання за одиницю часу;

- *еквівалентна доза випромінювання*, яка завдяки введенню коефіцієнтів біологічної ефективності враховує руйнівний вплив радіоактивного випромінювання на живу тканину (вимірюється в зівертах, інколи використовують позасистемну одиницю бер).

Існують *гранично допустимі* для людини *دوزи радіоактивного випромінювання*. Це найбільше значення еквівалентної дози за календарний рік, за якого рівномірне опромінення людини впродовж 50 років не може викликати у неї несприятливих змін у стані здоров'я. Для населення гранично допустимою дозою систематичного опромінення встановлена еквівалентна доза 1 мЗв, або 0,1 бер за рік.

6. Розвиток сучасної економіки значною мірою залежить від енергетичного забезпечення, значна частка якого (17 % світового виробництва) належить ядерній енергетиці. В Україні ядерній енергетиці належить майже половина виробництва електроенергії.

В основі дії атомних електростанцій лежить перетворення енергії, вивільненої від поділу ядер радіоактивних ізотопів, в електроенергію. Основними конструктивними елементами атомних електростанцій є ядерний реактор, що складається з активної зони, де власне відбувається ядерна реакція, парогенератор, турбіна, електричний генератор.

Незважаючи на те що ядерна енергетика є найбільш екологічно привабливою, вона несе й небезпеку, особливо при порушенні умов експлуатації і недбалому ставленні до радіаційної безпеки. Зокрема, через це 26 квітня 1986 року сталася трагедія на Чорнобильській АЕС, наслідки якої спостерігаються досі.



## УЗАГАЛЬНЮЮЧІ ЗАНЯТТЯ

### § 42. Фізична картина світу

Пізнання природи, зокрема методами фізики, веде до створення загальних уявлень про навколишній світ на основі набутих знань. Відображення фізичною наукою загальних властивостей матерії, взаємозв'язків між об'єктами і явищами природи у вигляді фундаментальних понять, законів і теорій називається *фізичною картиною світу* (ФКС). Вона складає основу наукового світогляду й окреслює на певному історичному етапі розвитку науки узагальнені уявлення про рух і взаємодію матерії, її будову і форми існування, простір і час, закономірності перебігу фізичних явищ і процесів.

В історичному перебігу розвитку фізичного знання змінювалися фундаментальні положення і теорії, що покладалися в основу тлумачення навколишнього світу, тобто змінювалася сама ФКС. Спочатку вона ґрунтувалася на тих уявленнях про механічний рух і взаємодію тіл, що панували в науці спочатку в античній фізиці (Арістотель, Архімед), а згодом у класичній фізиці (Г. Галілей, І. Ньютон). Так зароджувалася механічна картина світу.

**Механічна картина світу** ототожнювала матерію з речовиною. Існували також певні уявлення про світло: одні вважали його потоком корпускул (І. Ньютон), інші – коливаннями в особливому середовищі – ефірі, який заповнює весь світовий простір (Х. Гюйгенс). Ще тоді висувалася ідея, що світ – це матерія, яка перебуває в русі. Проте рух сприймався одnobічно, як механічне переміщення тіл. Навіть природу теплоти намагалися пояснити суто механічним рухом мікрочастинок, з яких складаються всі тіла. Ученими визнавалася відносність руху, і тому спокій трактувався як відносний стан руху тіла в певній системі відліку. У цьому зв'язку вважалось, що тіла можуть рухатися з будь-якою швидкістю, причому її значення не має верхньої межі. Це твердження на початку ХХ ст. спростувала теорія відносності, яка довела, що граничною швидкістю руху у будь-якій системі відліку є швидкість світла у вакуумі. Цей постулат спеціальної теорії відносності суттєво змінив уявлення про простір і час.

У механічній картині світу простір і час трактують як абсолютні сутності, що існують незалежно і відокремлено від тіл. За тлумаченням І. Ньютона, простір – це пустота, в якій перебувають усі тіла; а час – це рівномірний плин тривалості, який ніяк не пов'язаний з явищами і процесами, що відбуваються з матерією. Пізніше це ньютонівське твердження також було спростовано теорією відносності.



Взаємодія тіл обґрунтовано стала основою побудови класичної механіки І. Ньютона. Проте визнавалася лише гравітаційна взаємодія як універсальна, що передається миттєво без будь-якого посередника (принцип далекодії). Тобто фактично заперечувалася інша форма існування матерії – поле.

Оскільки відкриті І. Ньютоном закони механіки пояснювали і передбачали перебіг більшості фізичних явищ, їх вважали універсальними і такими, що можуть застосовуватися в усій царині фізичного світу. Сформована до початку XVIII ст. механічна картина світу надала можливість пояснити більшість явищ і процесів. Фізичний світ, незрозумілий раніше через розрізненість і неоднозначність фізичного знання, завдяки їй постав цілісним і передбачуваним. На той час здавалося, що в цьому світі перебіг фізичних явищ і процесів має цілком зрозуміле пояснення з позицій класичних уявлень про рух і взаємодію тіл, а фізичні теорії, що тоді панували в науці, спроможні дати тлумачення всім спостережуваним явищам.

148

Проте наприкінці XVIII ст. учені починають активно досліджувати електричні явища і магнетизм: Ш. Кулон відкриває закон взаємодії електричних зарядів, Г. Ом встановлює закони постійного струму, Х. Ерстед виявляє зв'язок електричних і магнітних явищ, А. Ампер відкриває закон взаємодії струмів і висуває гіпотезу про електричну природу магнетизму, М. Фарадей відкриває явище електромагнітної індукції тощо. Нарешті, Дж. Максвелл створює теорію електромагнетизму, в якій поряд з речовиною пропонується інша форма матерії – поле.

Електромагнітна картина світу розширює уявлення вчених про рух, визнаючи, крім переміщення, й іншу форму руху матерії – поширення електромагнітних хвиль. Установлюється, що частинки можуть рухатися зі швидкістю, меншою за швидкість світла у вакуумі, але більшою за швидкість світла в середовищах. Таким чином, на відміну від механічної картини світу, світлові хвилі розглядаються не відокремлено від матерії, а органічно, як особливу її форму у вигляді електромагнітних коливань, які збуджуються в просторі.

Проте окремі теоретичні положення електромагнітної картини світу вступають у протиріччя з дослідними фактами. Зокрема, це стосується поняття нерухомого ефіру, запозиченого з механічної картини світу як ньютонівське розуміння абсолютного простору і часу. Завдяки йому вчені намагалися пояснити поширення електромагнітних хвиль. Проте таке тлумачення ефіру суперечило результатам експериментів А. Майкельсона і Е. Морлі з вимірювання швидкості світла, і тому з часом було спростовано.

На початку XX ст. у фізиці відбувається докорінний перегляд класичних уявлень про закономірності навколишнього світу. Цьо-



му сприяло утвердження засад спеціальної теорії відносності, які виклав А. Ейнштейн, та відкриття, зроблені у фізиці мікросвіту. Вони фактично визначають сучасні уявлення про **фізичну картину світу**, основні засади якої відображають такі положення.

1. Оточуючий нас світ багатоманітний і неоднозначний за властивостями і закономірностями. На рівні мікросвіту ( $< 10^{-8}$  м) основними структурними його об'єктами є атоми і молекули та елементарні частинки, з яких вони складаються. Поділ матерії на два види – речовину і поле – прийняте головним чином для макросвіту ( $10^{-8} \div 10^{20}$  м), оскільки для мікросвіту можливе їх взаємне перетворення. Для мегасвіту ( $> 10^{20}$  м) характерна гравітаційна та електромагнітна взаємодії космічних об'єктів – галактик, реліктових випромінювань тощо.

Таким чином, сучасна фізика визнає різноманітність форм і видів матерії, що виявляється в її взаємозв'язках і взаємних перетвореннях. При цьому не існує єдиного універсального виду взаємодії: гравітаційна, електромагнітна, сильна і слабка взаємодії відрізняються на кожному зі структурних рівнів фізичного світу інтенсивністю, радіусом дії, сферою прояву. Усі вони передаються з кінцевою швидкістю, що дорівнює швидкості світла, завдяки відповідним полям, які є їх матеріальними носіями.

2. Сучасна фізична картина світу тлумачить рух як зміну взагалі, якій притаманні специфічні форми. Фізичними формами руху матерії є: механічний рух як зміна механічного стану тіла (його координат і швидкості); тепловий рух як зміна термодинамічного стану тіл, яка виявляється в зміні його параметрів (температура, тиск, об'єм); процеси, пов'язані з рухом і взаємодією заряджених тіл, випромінюванням і поглинанням електромагнітних хвиль, зміни властивостей речовини під дією електромагнітного поля; взаємне перетворення елементарних частинок.

Кожна з цих форм руху якісно своєрідна і не може бути зведена до іншої. Так, тепловий рух – це не звичайне переміщення мікрочастинок речовини, а їх хаотичний рух, який підпорядкований особливим статистичним законам і не може бути пояснений динамічними законами руху окремих частинок.

Кожна форма руху характеризується енергією особливого виду (механічною, внутрішньою, електричною тощо), яка зберігає своє значення за будь-яких змін. Збереженню підлягають й інші величини, що характеризують різні властивості матерії – маса, електричний заряд тощо.


Таким чином, сучасна фізична картина світу ґрунтується на якісній своєрідності і взаємозв'язку різних форм руху матерії, перетворення яких одна в одну супроводжується збереженням основних її характеристик. Кожній формі руху властиві свої



специфічні закони, які не можуть бути універсальними для всіх рівнів організації матерії.

3. Сучасна фізика переглянула класичні уявлення про простір і час, взаємно пов'язавши їх в єдине ціле. Теорія відносності наділила їх відносністю властивостей та залежністю від руху матерії. Відповідно до цього маса тіла не є величиною сталою, як це передбачала класична механіка Ньютона, а залежить від швидкості руху тіла.

Такі загальні риси сучасної фізичної картини світу, які постійно удосконалюються і формуються фізичною наукою. Не все ще в ній вивірено і глибоко пізнано. Не можна її вважати також гармонійною й логічно завершеною. Вона весь час уточнюється і доповнюється, оскільки, за висловом А. Ейнштейна, не може бути кінця винахідливості людського розуму у боротьбі за більш повне розуміння законів, які управляють фізичними явищами.

- 
- 150
1. Які історичні етапи становлення фізичної картини світу?
  2. Чому першою сформувалася механічна картина світу?
  3. Що спільного і відмінного в механічній і електромагнітній картинах світу?
  4. Що характерно для сучасної фізичної картини світу?
  5. Чи може бути побудована колись завершена фізична картина світу?

## **§ 43. Вплив фізики на суспільний розвиток і науково-технічний прогрес**

За свою багатовікову історію людство пережило багато революцій, зокрема і в науковій сфері. Наукові революції, що відбувалися впродовж суспільного розвитку людства, несуть позитивний потенціал змін у пізнанні світу, відкритті нових законів і теорій, створенні нових технологій і технічних засобів, які дають поштовх науково-технічному прогресу. Так, закони механіки, відкриті багато років тому, є основою проектування сучасних машин і механізмів, споруд і мостів. Розвиток термодинаміки як теорії теплоти, розпочатий у XVIII ст., сприяє створенню нових теплових машин і двигунів, які досі визначають перспективи розвитку енергетики і транспорту. Закони електродинаміки, сформульовані в XIX ст., й донині визначають основні напрями розвитку електротехніки та електроніки, радіозв'язку. Досягнення атомної фізики, бурхливий розвиток якої почався в XX ст., відкрили можливості для використання ядерної енергії і створення нової галузі – нанотехнологій.



Упродовж свого існування фізика завжди була тісно пов'язана з різними науками, особливо з математикою. Багато розділів сучасної математики виникли завдяки необхідності розв'язування різноманітних задач, які з'явилися в процесі фізичних досліджень. Наприклад, щоб створити теоретичну основу класичної динаміки, І. Ньютон використав математичні моделі, які дали поштовх до відкриття нової математичної теорії, яка називається диференціальне числення.

Фізику вважають основою природничих наук, оскільки багато фізичних теорій відіграли визначальну роль у їхньому становленні як наук. Зокрема, з розвитком фізичного знання відбувалося перетворення споглядальної астрономії в сучасну астрофізику, а завдяки розвитку радіофізики виникла радіоастрономія, яка значно розширила наші уявлення про Всесвіт.

Сучасна біологія досягла останнім часом значних успіхів завдяки використанню у своїх дослідженнях засобів і методів, запозичених у фізиків (електронні і протонні мікроскопи, рентгеноструктурний аналіз, нейтронографія тощо).

Відкриття квантової фізики стало основою теорії хімічних зв'язків, яка пояснює в хімії і молекулярній біології існування і перетворення молекул та внутрішніх кліткових структур.

Досягнення фізики визначають вагомий її вплив на розвиток техніки і технологій. Так, теоретичним підґрунтям розвитку інформатики є кібернетика і теорія систем, а її практичним втіленням в електронно-обчислювальній техніці вона завдячує фізиці. Саме у фізичних лабораторіях народжується більшість пристроїв, що використовують у засобах комп'ютерної техніки (напівпровідникові інтегральні схеми, магнітні й оптичні носії інформації, рідкокристалічні дисплеї тощо).

Останнім часом досягнення атомної фізики і споріднених природничих наук знайшли реальне втілення в новому науковому напрямі, який називається *нанотехнологіями*. Зважаючи на їхнє значення в науково-технічному прогресі, інколи їх називають новою промисловою революцією.

Уперше термін «нанотехнології» увів у науковий обіг у 1974 р. японський фізик Н. Танигучі для опису надтонкої (нанометрової) обробки матеріалів. Пізніше це слово поширили також і на механізми, розміри яких менші за 1 мкм.

**Слово «нанометр» характеризує розміри, сумірні значенню  $10^{-9}$  м.**



Ученими-матеріалознавцями в процесі досліджень з мініатюризації різних пристроїв було встановлено, що речовина може мати зовсім інші властивості, якщо вона складається з дуже маленьких частинок. Такі мікрочастинки, розміри яких від



1 до 1000 нанометрів, називають *наночастинками*, а матеріали, які вони утворюють, – наноматеріалами. Наприклад, наночастинки деяких органічних матеріалів, тонкий шар яких вкриває напівпровідникові матеріали, демонструють незвичні оптичні властивості, які використовують у виробництві сонячних батарей на основі надтонких плівок. Крім того, останнім часом в оптиці почали широко використовувати композитні матеріали, виготовлені на основі наночастинок (так звані нанокompозити), які дають змогу управляти світловими променями, зокрема змінювати частоту світла.



У 2002 р. на Кубку Девіса з тенісу вперше були використані м'ячі, виготовлені на основі нанотехнологій.

152

У виготовленні надміцних матеріалів часто використовують нанокристали – полікристалічні матеріали з розмірами кристалічних зерен (монокристалів) 5...10 нм. Їх отримують шляхом стиснення дисперсних порошків в атмосфері інертних газів, завдяки чому утворюються неупорядковані зони кристалів, які визначають їх характерні властивості. Властивості таких нанокристалів нагадують аморфні тіла: вони мають досить високу пластичність при значній їх міцності. Їх застосування досить різноманітне – від технологічного використання таких матеріалів у різних виробках, що вимагають поєднання міцності і пластичності (наприклад, деталі поршневої групи двигунів внутрішнього згоряння), до суто наукового – у дослідженнях властивостей твердих тіл, мікрочастинки яких перебувають у незв'язаному стані.

Останнім часом, у зв'язку з необхідністю мініатюризації електронних приладів, почала бурхливо розвиватися мікроелектроніка. Ця галузь знань займається вивченням і створенням інтегральних електронних пристроїв (так званих мікросхем, або чіпів), які поєднують у собі ознаки різних електронних приладів, одні з яких перетворюють сигнали (діоди, транзистори тощо), інші сприяють управлінню ними (резистор, конденсатори тощо). Така інтегральна мікросхема являє собою багатофункціональний пристрій, на поверхні якого розміром усього в кілька сантиметрів одночасно функціонують мільйони приладів. Сучасні технології дають змогу досягти ще більшої мініатюризації мікросхем. У 2007 р. один з найбільших виробників мікропроцесорів для сучасних комп'ютерів Intel почав випускати інтегральні мікросхеми, найменший



Ступінь мініатюризації інтегральних мікросхем, досягнутий наприкінці ХХ ст., характеризується значенням порядку 1 млн елементів у кристалі мікронного розміру.



структурний елемент яких має розміри 45 нм. Нині перед науковцями фірми стоїть завдання досягти мініатюризації в 5 нм.

Існують різні технології виготовлення мікросхем. Наприклад, за допомогою локального впливу на окремі ділянки кристалу напівпровідника (опромінення електронними чи іонними пучками, лазерного випромінювання) через спеціальні маски-матриці відбувається вибіркове травлення або локальна дифузія домішок, внаслідок чого окремі ділянки кристалу набувають властивостей тих чи інших елементів схем. За іншою технологією на поверхню твердого тіла шар за шаром наносять тонкі плівки різної конфігурації з різних матеріалів. Взаємодія атомів різних речовин на межі цих плівок формує елементи мікросхем, які виконують функції електронних приладів. У мікроелектроніці, особливо в нанoeлектроніці, широко практикують також гібридне виготовлення мікросхем, коли поєднують кілька технологій та отримують функціональні чіпи високого ступеня інтеграції.

Фізику називають двигуном науково-технічного прогресу, оскільки залежно від її досягнень відбувається розвиток інших наук, а результати фізичних досліджень суттєво впливають на техніко-технологічне забезпечення господарської діяльності держави. Розвиток фізичної науки є провідним чинником у суспільному прогресі людства. Тому передові країни світу приділяють цій галузі наукового знання особливу увагу. В Україні зосереджено значний науковий потенціал, зокрема в царині фізичної науки. Завдяки результатам фундаментальних досліджень її наукові школи відомі в усьому світі.

1. Чому фізику називають фундаментом природничих наук? Наведіть приклади взаємозв'язку фізики з іншими науками.
2. Який з напрямів сучасної фізики вважають одним з найперспективніших?
3. У чому полягає фізична суть нанотехнології?
4. Які досягнення мікроелектроніки стали найвагомішими за останні роки?
5. Наведіть власні приклади останніх досягнень фізичної науки, які стали рушійною силою в науково-технічному прогресі.





## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

### А

Активність радіонукліда 128  
Альфа-розпад 126  
Альфа-частинка 126  
Ампер 33  
*Ампер А.* 34  
Амперметр 35  
Атом 120  
Атомна електростанція 138

### Б

Беккерель 128  
*Беккерель А.* 125  
*Бенардос М.* 91  
Бер 131  
Бета-розпад 126  
Блискавка 6

### В

Ват 68  
Ватметр 68  
Ват-секунда 68  
Вольт 40  
*Вольта А.* 40  
Вольтметр 41

### Г

Гамма-випромінювання 126  
*Гейзенберг В.* 122  
Грей 130  
Грім 6

### Д

Джерела струму 25  
Джоуль 67  
*Джоуль Д.* 71  
Доза випромінювання еквівалентна 130  
— — поглинута 130  
— гранично допустима 132  
Дозиметр 134  
Дослід Е. Резерфорда 120  
Дослід Ерстеда 23

### Е

*Едісон Т.* 73  
Електризація через вплив 18  
Електрика, електризація 7  
Електричне коло 27  
— поле 12  
Електричний двигун 30, 109  
Електричний струм 23  
— — в електролітах 82  
— — у газах 32, 89  
— — в металах 32  
— — в напівпровідниках 79  
Електромагніт 105  
Електромагнітна індукція 111  
Електромагнітна картина світу 148  
Електромагнітне реле 105  
Електрон 8  
Електроскоп, електрометр 10, 11  
Елементарні частинки 7, 149  
*Ерстед Г.* 23

### З

Закон Джоуля–Ленца 71  
— Кулона 12  
— Ома 48  
— радіоактивного розпаду 128  
Запобіжники 28, 74  
Запорізька АЕС 143  
Заряд 7, 10  
Зарядження і розрядження тіл 8, 10  
Зіверт 131

### І

*Іваненко Д.* 122  
Ізотопи 9, 123

### Й

Йон 16  
*Йоффе А.* 16

### К

Коефіцієнт відносної біологічної ефективності 131  
Коефіцієнт якості 131



Коротке замикання 74

Кулон 34

*Кулон Ш.* 13

Кюрі 128

*Кюрі П.* 125

## Л

Лампа розжарювання 74

*Ленц Е.* 71

Лічильник Гейгера 134

## М

Магніт 97

Магнітні взаємодії 98

Магнітне поле 99

Механічна картина світу 147

Модель атома ядерна 121

– ядра протонно-нейтронна 122

Молекула 7, 130

## Н

Надпровідність 78

Нанотехнології 151

Напруга 39

Напрямок струму 32

Нейтрон 122

Номограма 63

Нуклон 123

## О

Ом 46

*Ом Г.* 48

Опір 44

## П

Паралельне з'єднання провідників 61

Період напіврозпаду 129

Питомий опір речовини 46

Південноукраїнська АЕС 138

Позитрон 126

Послідовне з'єднання провідників 57

Потужність дози випромінювання 130

– струму 67

Правило зміщення 126

– лівої руки 108

– правої руки 111

– свердлика 103

Провідники і непровідники (ізолятори, діелектрики) 11

Протон 8, 122

*Пулюй І.* 119

## Р

Рад 130

Радіаційний фон природний 133

Радіоактивне випромінювання 125

Радіоактивність 124

– природна 125

– штучна 125

*Резерфорд Е.* 120

Резистор 28, 38

Рентген 130

*Рентген В.* 119

Реостат 53

Рівненська АЕС 138

Робота струму 67

## С

Сила Ампера 34

– електрична 12

– струму 35

Силкові лінії (лінії індукції) магнітного поля 99

*Скłodовська-Кюрі М.* 125

Спонтанний поділ ядер 125

## Т

Температурний коефіцієнт опору 77

*Томсон Дж.* 120

## Ф

Фізична картина світу 149

## Х

Хмельницька АЕС 138

## Ч

*Чедвік Дж.* 122

Чорнобильська АЕС 141

– катастрофа 143

## Я

Ядерна енергетика 138

Ядерний реактор 138

– – водо-водяний 139

Ядерна модель атома 121, 122

Ядро атома 121



## ВІДПОВІДІ

Вправа 1. 5.  $9 \cdot 10^{-3}$  Н. 6. 6 Н.

Вправа 4. 2.  $U = 4$  В – при перенесенні частинками, що створюють струм, заряду в 1 Кл, виконується робота 4 Дж;  $I = 2$  А – за 1 с через поперечний переріз провідника переноситься заряд у 2 Кл.

Вправа 5. 1. Довший провідник має у 8 разів більший опір. 2.  $112 \cdot 10^{-2}$  Ом = 1,12 Ом. 3. 151 Ом; коли спіраль плитки нагріється, то її опір стане більшим.

Вправа 6. 1. 4,4 А. 6. 0,04 В;  $0,02$  (Ом  $\cdot$  мм<sup>2</sup>)/м.

Вправа 8. 1. а) 1 –  $S1$ ,  $S3$ ,  $S5$  – резистор  $R1$ ;  $S2$ ,  $S5$  – резистор  $R2$ ; 2 –  $S1$ ,  $S5$  – послідовно резистори  $R1$  і  $R3$  або  $S2$ ,  $S3$ ,  $S4$  – послідовно  $R2$  і  $R4$ ; 3 –  $S2$ ,  $S4$  – послідовно з'єднані резистори  $R2$ ,  $R3$  і  $R4$ ; 4 –  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ,  $S5$  – резистори  $R1$  і  $R2$  з'єднані паралельно; 5 –  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ,  $S4$  –  $R1$  і  $R2$  з'єднані паралельно, а  $R4$  – послідовно з ними; 6 –  $S1$ ,  $S4$ ,  $S5$  –  $R1$  і послідовно з ним паралельно з'єднані  $R3$  і  $R4$ ; б) 1 – 10 Ом; 2 – 20 Ом; 3 – 30 Ом; 4 – 5 Ом; 5 і 6 – 5 Ом. 2. а) Одна лампа –  $S2$ ; дві лампи –  $S1$  і  $S2$ ; три лампи –  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ; б) 0,28 А; 0,56 А; 0,84 А.

156

Вправа 9. 1. Якщо на лампі написано 2,5 В, 0,15 А, то а) 0,375 Вт; б) 337,5 Дж; в) 0,15 А і 16,7 Ом. 2. Вважаємо, що опір вольтметрів набагато більший від опору резисторів, а опір амперметра набагато менший, щоб їхніми опорами у задачі можна було нехтувати. 1. Усі вимикачі розімкнено або замкнено лише вимикач  $S1$ :  $I = 0$ ;  $U_1 = U_2 = 0$ ;  $U_3 = 120$  В. 2. Замкнено лише вимикачі: а)  $S2$ :  $I = 12$  А;  $U_1 = 120$  В;  $U_2 = U_3 = 0$ ; б)  $S3$ :  $I = 4$  А;  $U_1 = U_2 = U_3 = 40$  В; в)  $S1$  і  $S2$ :  $I = 24$  А;  $U_1 = U_2 = 120$  В,  $U_3 = 0$ ; г)  $S1$ ,  $S2$  і  $S3$ :  $I = 36$  А;  $U_1 = U_2 = U_3 = 120$  В. 3. Див. 2: 1–0; 2 а) 1440 Вт = 1,440 кВт; б) 480 Вт = 0,480 кВт; в) 2,880 кВт; г) 4,320 кВт.

Вправа 10. 1. 900 000 Дж = 900 Кдж = 0,9 мДж. 2. а) Нікеліновий; б) мідний.

Вправа 14. 1. Al:  $p = 13$ ,  $n = 14$ ; Au:  $p = 79$ ,  $n = 118$ ; Cs:  $p = 55$ ,  $n = 78$ . 2. В Урану-238 нейтронів на 3 більше. 3. 91 %, 9 %. 4.  ${}^7_4\text{Be}$ ;  ${}^3_2\text{He}$ . 5. 4 доби. 6. 1,6 %. 7.  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ . 8. 125 год.



# З М І С Т

---

Дорогий друже! .....	3
----------------------	---

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

### Розділ 1. Електричне поле

Світ електрики .....	5
§ 1. Електризація тіл. Електричний заряд. Два роди зарядів. ....	7
§ 2. Взаємодія заряджених тіл. Провідники і непровідники електрики	10
§ 3. Електричне поле. Закон Кулона .....	12
§ 4. Дискретність електричного заряду. Електрон .....	14
§ 5. Йони. Зарядження тіл .....	16
Головне в розділі 1 .....	21

### Розділ 2. Електричний струм

§ 6. Що таке електричний струм .....	23
§ 7. Джерела електричного струму .....	25
§ 8. Електричне коло .....	27
§ 9. Дії електричного струму .....	29
§ 10. Природа електричного струму. Напрямок струму .....	31
§ 11. Сила струму та її вимірювання .....	33
§ 12. Електрична напруга та її вимірювання .....	39
§ 13. Електричний опір. Залежність опору провідників від їх геометричних розмірів і речовини. Питомий опір .....	44
§ 14. Закон Ома для однорідної ділянки кола .....	48
§ 15. Реостати .....	53
§ 16. Послідовне з'єднання провідників .....	57
§ 17. Паралельне з'єднання провідників .....	61
§ 18. Робота і потужність електричного струму .....	67
§ 19. Кількість теплоти, що виділяється у провіднику зі струмом ...	71
§ 20. Застосування теплової дії струму на практиці .....	73
§ 21. Залежність опору металевих провідників від температури. Надпровідність .....	76
§ 22. Електричний струм у напівпровідниках .....	79
§ 23. Електричний струм у розчинах і розплавах електролітів .....	82
§ 24. Електричний струм у газах .....	87
§ 25. Безпека людини під час роботи з електричними приладами і пристроями .....	92
Головне в розділі 2 .....	95



### **Розділ 3. Магнітне поле**

§ 26. Постійні магніти та їх взаємодія. Магнітне поле Землі . . . . .	97
§ 27. Магнітна дія струму. Дослід Ерстеда . . . . .	101
§ 28. Магнітне поле прямого провідника зі струмом . . . . .	102
§ 29. Магнітне поле котушки. Електромагніт . . . . .	104
§ 30. Дія магнітного поля на провідник зі струмом . . . . .	107
§ 31. Електромагнітна індукція . . . . .	110
§ 32. Динамічний мікрофон і електроmechanічний генератор електричного струму . . . . .	115
Головне в розділі 3 . . . . .	117

### **Розділ 4. Атомне ядро. Ядерна енергетика**

§ 33. Атом і атомне ядро. Дослід Резерфорда . . . . .	120
§ 34. Ядерна модель атома . . . . .	122
§ 35. Радіоактивність. Види радіоактивного випромінювання . . . . .	124
§ 36. Активність радіонуклідів. Закон радіоактивного розпаду . . . . .	128
§ 37. Йонізуюча дія радіоактивного випромінювання . . . . .	130
§ 38. Основи дозиметрії. Природний радіоактивний фон та його вплив на живі організми . . . . .	132
§ 39. Дозиметри . . . . .	134
§ 40. Ядерна енергетика. Будова АЕС . . . . .	138
§ 41. Розвиток ядерної енергетики в Україні. Екологічні проблеми ядерної енергетики . . . . .	141
Головне в розділі 4 . . . . .	145
Узагальнюючі заняття . . . . .	147
§ 42. Фізична картина світу . . . . .	147
§ 43. Вплив фізики на суспільний розвиток і науково-технічний прогрес . . . . .	150
Алфавітний покажчик . . . . .	154
Відповіді . . . . .	156



*Навчальне видання*

КОРШАК Євгеній Васильович  
ЛЯШЕНКО Олександр Іванович  
САВЧЕНКО Віталій Федорович

## **ФІЗИКА**

**9 клас**

**Підручник для загальноосвітніх  
навчальних закладів**

*Рекомендовано Міністерством освіти  
і науки України*

**Видано за рахунок державних коштів.  
Продаж заборонено**

Редактори *М. Зубченко, Н. Дашко*  
Обкладинка, макет, ілюстрації *В. Марущинця*  
Художній редактор *В. Марущинець*  
Технічний редактор *В. Олійник*  
Коректори *І. Іванюсь, Л. Леуська*  
Комп'ютерна верстка *Н. Корсун*