

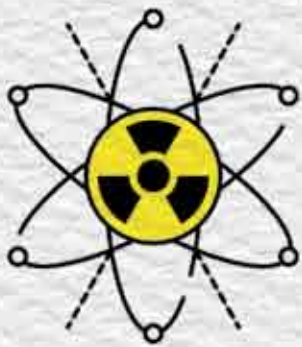
Оріон



Тетяна Засекіна, Дмитро Засекін

Фізика

Профільний рівень



11

УДК 53*кл11(075.3)
3-36

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(наказ Міністерства освіти і науки України від 12.04.2019 № 472)

ВИДАНО ЗА РАХУНОК ДЕРЖАВНИХ КОШТІВ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО

Засекіна Т. М.

3-36 Фізика (профільний рівень, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.) : підруч. для 11 кл. закладів загальної середньої освіти / Т. М. Засекіна, Д. О. Засекін. — К. : УОВЦ «Оріон», 2019. — 304 с. : іл.

ISBN 978-617-7712-51-9.

УДК 53*кл11(075.3)

Передмова

Шановні старшокласники й старшокласниці! У цьому році ви завершуєте вивчення шкільного курсу фізики. Проте ця наука супроводжуватиме вас усе життя. Адже нині будь-яка галузь господарства (інформаційні технології, промисловість, медицина, сільське господарство) й навіть гуманітарна сфера життя суспільства використовує сучасне технологічне устаткування, автоматизовані пристрої. Сьогодні наукові дослідження здійснюються не лише в академічних установах, а й у компаніях та офісах сучасного виробництва товарів для промисловості, сільського господарства, медицини, сфери послуг, побуту. Сьогодні наша країна потребує молодих людей, які прагнуть успіху, здатні шукати способи вдосконалення того чи того процесу, вносити зміни, порівнювати й аналізувати різні підходи, вирішувати проблеми, працювати в команді. У пригоді вам стануть знання, здобуті в старшій школі на уроках фізики: ваше вміння глобально мислити, бачити проблему цілісно, пов'язувати та систематизувати факти й події.

А щоб вивчати ці науки було захопливо й зрозуміло, ми намагалися в тексті підручника наводити не лише наукові факти, теорії та пояснення, а й проблемні запитання, описи природних явищ чи технологічних процесів. Вони спонукатимуть вас шукати відповіді, аналізувати й пояснювати. Зважаючи на те, що нам часто доведеться пригадувати раніше вивчений матеріал як із фізики, так і з інших предметів, а також те, що ви маєте навчитися самостійного пошуку інформації, що розширить ваш світогляд і допоможе зрозуміти наш складний і таємничий світ, у підручнику є рубрика «Електронний додаток», яка містить необхідний додатковий матеріал. З «Електронним додатком» можна ознайомитися за посиланням <https://bitly.su/BZMTOVKM> або за допомогою QR-кодів, які містяться в тексті підручника.

1. Для цього встановіть програму-розпізнавач на свій телефон і запустіть її.
2. Наведіть об'єктив камери на картинку QR-коду. Код розпізнається автоматично або після натиснення на кнопку (Snapshot) для активації сканера.
3. Інформація, зашифрована в QR-коді, з'явиться на екрані мобільного телефону.

Та не обмежуйте цим пошук потрібної інформації. Готуючись до уроків, навчальних проектів, ви маєте навчитися працювати з багатьма джерелами, уміти оцінювати її вірогідність і надійність джерел, аналізувати, опрацьовувати, інтерпретувати. Виконуючи роботи фізичного практикуму, ви матимете нагоду використовувати як сучасне фізичне обладнання, так і звичайні, а інколи й підручні засоби. Головне — навчитися застосовувати набуті природничо-наукові знання й методологію дослідницької діяльності щоб пояснювати світ природи через виявлення проблеми та пошук способів її розв'язання.

І першим серйозним випробовуванням міцності ваших знань і вмінь буде зовнішнє незалежне оцінювання, готуючись до якого, ви маєте насамперед навчитися розв'язувати фізичні задачі. Цьому виду діяльності радимо приділити особливу увагу! Підручник містить достатню кількість прикладів розв'язування задач, вправ із запитаннями й задачами різного виду. Особливу увагу варто приділити комбінованим задачам, які потребують знань з усіх розділів фізики.

Сподіваємося, що вивчення фізики за цим підручником буде для вас цікавим і нескладним.

ЗМІСТ

Передмова	3
Розділ 1. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА	6
§ 1. Електричний струм. Закон Ома для однорідної ділянки кола	6
§ 2. Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола	13
§ 3. Робота й потужність електричного струму	18
§ 4. Правила Кірхгофа	22
§ 5. Електричний струм у металах	31
§ 6. Термоелектричні явища	35
§ 7. Електричний струм у напівпровідниках	39
§ 8. Напівпровідникові прилади та їх застосування	43
§ 9. Електричний струм у рідинах	49
§ 10. Електричний струм у газах	52
§ 11. Електричний струм у вакуумі	56
§ 12. Магнітна взаємодія. Закон Ампера	61
§ 13. Магнітне поле	63
§ 14. Дія магнітного поля на прямолінійний провідник і рамку зі струмом	69
§ 15. Дія магнітного поля на рухоми заряджену частинку	73
§ 16. Магнітні властивості речовини	79
§ 17. Електромагнітна індукція	83
§ 18. Закон електромагнітної індукції	87
§ 19. Самоіндукція	92
§ 20. Енергія магнітного поля. Взаємозв'язок електричного і магнітного полів	95
Розділ 2. КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ	102
§ 21. Вільні електромагнітні коливання	102
§ 22. Затухаючі електромагнітні коливання	107
§ 23. Автоколивання	109
§ 24. Змінний струм	112
§ 25. Активний опір у колі змінного струму	117
§ 26. Конденсатор у колі змінного струму	119
§ 27. Котушка індуктивності в колі змінного струму	123
§ 28. Електричне коло змінного струму з активним і реактивним навантаженнями	126
§ 29. Робота і потужність змінного струму	128
§ 30. Резонанс у колі змінного струму	133
§ 31. Генератори. Трифазний струм	135
§ 32. Трансформатор	139
§ 33. Електромагнітні хвилі	143
§ 34. Властивості електромагнітних хвиль	149
§ 35. Використання електромагнітних хвиль	151

Розділ 3. ОПТИКА	160
§ 36. Світлові хвилі. Основні фотометричні величини	160
§ 37. Інтерференція світла	166
§ 38. Інтерференційні картини в тонких пластинках і плівках	170
§ 39. Дифракція світла	178
§ 40. Дисперсія світла	186
§ 41. Поляризація світла.	188
§ 42. Відбиття світла. Дзеркала	193
§ 43. Заломлення світла	200
§ 44. Лінзи	205
§ 45. Оптичні прилади та системи	209
§ 46. Гіпотеза квантів Планка. Фотон	219
§ 47. Фотоефект	222
§ 48. Тиск світла.	229
§ 49. Явища, що пояснюються квантовими властивостями світла	231
Розділ 4. КВАНТОВА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА	236
§ 50. Будова атома	236
§ 51. Теорія атома Гідрогену за Бором	238
§ 52. Спектри. Спектральний аналіз	242
§ 53. Хвильові властивості матерії	245
§ 54. Основні положення квантової механіки	248
§ 55. Фізичні основи побудови періодичної системи хімічних елементів.	252
§ 56. Рентгенівське випромінювання	258
§ 57. Квантові генератори та їх застосування	262
§ 58. Атомне ядро	265
§ 59. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду	270
§ 60. Ядерні реакції	276
§ 61. Методи реєстрації йонізуючого випромінювання.	281
§ 62. Біологічна дія радіації та захист від йонізуючого випромінювання	285
§ 63. Елементарні частинки	287
Практикум	293
Відповіді	299
Предметний покажчик	303

Розділ 1

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

У 10 класі ми вивчали електричні явища, зумовлені нерухомими електричними зарядами. Але для практичної діяльності людини набагато цікавіші явища, пов'язані з рухомими електричними зарядами, зокрема електричний струм. Переконаймося, що між електричним і магнітним явищами існує тісний зв'язок, який має назву «явище електромагнітної індукції». Це явище стало основою для всієї електротехніки та радіотехніки.

§1

Електричний струм. Закон Ома для однорідної ділянки кола

Електричний струм. Рухомі носії зарядів у провіднику переміщуються під дією зовнішнього електричного поля доти, доки не вирівняються потенціали всіх точок провідника. Проте якщо у двох точках провідника якимось чином штучно підтримувати різні потенціали, то це поле забезпечуватиме безперервний рух зарядів: позитивних — від точок з більшим потенціалом до точок з меншим потенціалом, а негативних — навпаки. Коли ця різниця потенціалів не змінюється із часом, то в провіднику встановлюється *постійний електричний струм*.

Пригадаймо з курсу фізики 8 класу деякі відомості про електричний струм.

Упорядкований рух вільних зарядів у провіднику називається **електричним струмом провідності**, або **електричним струмом**.

Основними умовами існування електричного струму є:

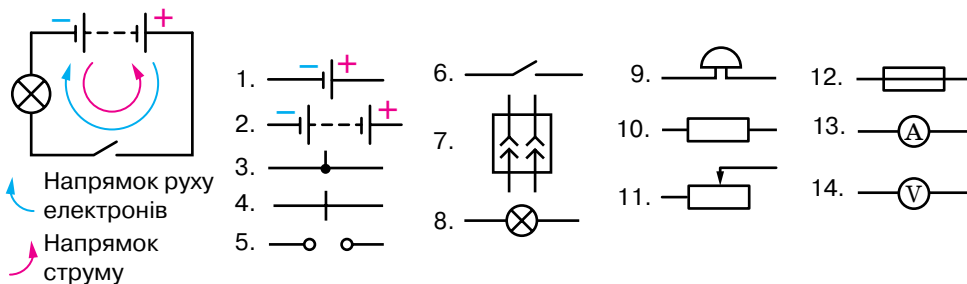
- ▶ наявність вільних заряджених частинок;
- ▶ наявність джерела струму, що створює електричне поле, дія якого зумовлює напрямлений рух вільних заряджених частинок;
- ▶ замкненість електричного кола, що забезпечує циркуляцію вільних заряджених частинок.

Залежно від величини питомого опору, який речовини чинять постійному струму, вони поділяються на провідники, напівпровідники, діелектрики.

Залежно від середовища розрізняють особливості проходження електричного струму, зокрема в металах, рідинах і газах, де носіями струму можуть бути вільні електрони, позитивні й негативні йони.

Повне електричне коло (мал. 1) містить джерело і споживачі електричного струму, пристрій для замикання (розмикання) електричного кола. За напрямком струму в колі умовно обирають напрямок від позитивного

полюса джерела струму до негативного (реальний рух носіїв струму — електронів — відбувається у зворотному напрямку).



Мал. 1. Схема електричного кола й умовні зображення елементів електричних кіл:

1 — гальванічний елемент або акумулятор; 2 — батарея гальванічних елементів або акумуляторів; 3 — з'єднання провідників; 4 — перетин провідників (без з'єднання); 5 — затискачі для під'єднання споживача електричного струму (клеми); 6 — вимикач (електричний ключ); 7 — розетка; 8 — електрична лампа; 9 — електричний дзвоник; 10 — провідник, що має деякий опір (резистор); 11 — реостат; 12 — плавкий запобіжник; 13 — електровимірювальний прилад (амперметр); 14 — електровимірювальний прилад (вольтметр)

Основними фізичними величинами, що характеризують електричний струм, такі.

Сила струму¹ I — фізична величина, яка характеризує швидкість перерозподілу електричного заряду в провіднику й визначається відношенням заряду q , що проходить через будь-який переріз провідника за час t , до величини цього інтервалу часу, $I = \frac{q}{t}$.

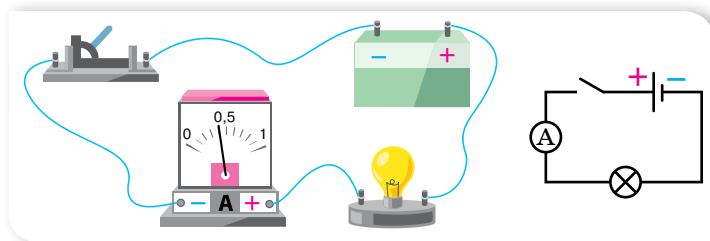
Одиниця сили струму — ампер, $1 \text{ А} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}}$.

1 А дорівнює силі струму, який, проходячи у двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини та малої площі поперечного перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликає би на кожній ділянці провідників довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

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

Силу струму в колі вимірюють за допомогою спеціального приладу — амперметра, котрий вмикають послідовно з провідником, у якому вимірюють силу струму (мал. 2, с. 8). Не можна приєднувати амперметр до кола, де немає споживача струму.

¹ Термін «сила струму» запропонували задовго до встановлення наукових положень електродинаміки. Він дещо невдалий, оскільки жодного стосунку до «сили» не має.



Мал. 2. Вмикання амперметра в електричне коло

Електричний опір R — це фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти проходженню електричного струму.

Одиниця електричного опору — ом, 1 Ом.

Опір провідника залежить від його фізичних параметрів — довжини l , площі поперечного перерізу S та від питомого опору речовини ρ , з якої його виготовлено: $R = \rho \frac{l}{S}$.

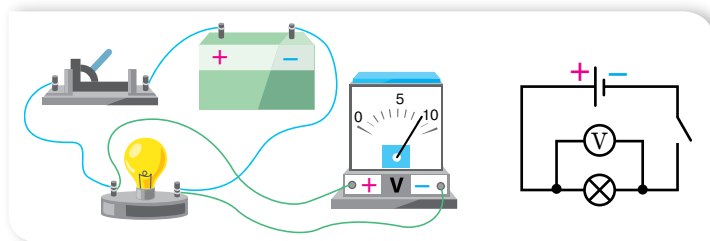
Питомий опір характеризує електричні властивості речовини. Значення питомого опору речовини зумовлене хімічною природою речовини та істотно залежить від температури. Одиниця питомого опору в СІ — ом-метр, 1 Ом · м.

Виникнення струму в провіднику зумовлює наявність різниці потенціалів $\phi_1 - \phi_2$, яку ще називають напругою.

Напруга U — це фізична величина, яка визначається роботою електричного поля з переміщення одиничного позитивного заряду між двома точками поля, $U = \frac{A}{q}$.

Одиниця напруги — вольт, 1 В.

Прилад для вимірювання напруги називають вольтметром. Вольтметр приєднують до електричного кола паралельно ділянці кола, на якій необхідно виміряти напругу (мал. 3).



Мал. 3. Вмикання вольтметра в електричне коло

Закон Ома для однорідної ділянки кола. Закон Ома встановлює залежність сили струму від різниці потенціалів (електричної напруги) між

двома фіксованими точками електричного кола. Відкритий у 1826 р. Георгом Омом. Відповідно до особливостей електричних кіл, закон Ома має кілька формулювань.

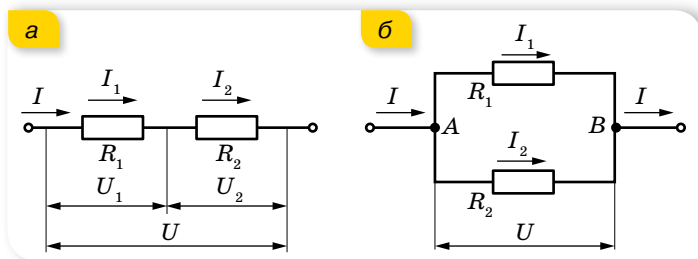
Коло постійного струму можна розбити на окремі ділянки. Ті ділянки, що не містять джерел струму, називають *однорідними*. Ділянки, що включають джерела струму, називають відповідно *неоднорідними*. Для однорідної ділянки кола сила струму I прямо пропорційна напрузі на даній ділянці кола U й обернено пропорційна її опору R :

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

Послідовне і паралельне з'єднання провідників. Пригадаймо співвідношення між струмами й напругами на ділянках кола з послідовним і паралельним з'єднанням провідників (табл. 1).

Таблиця 1

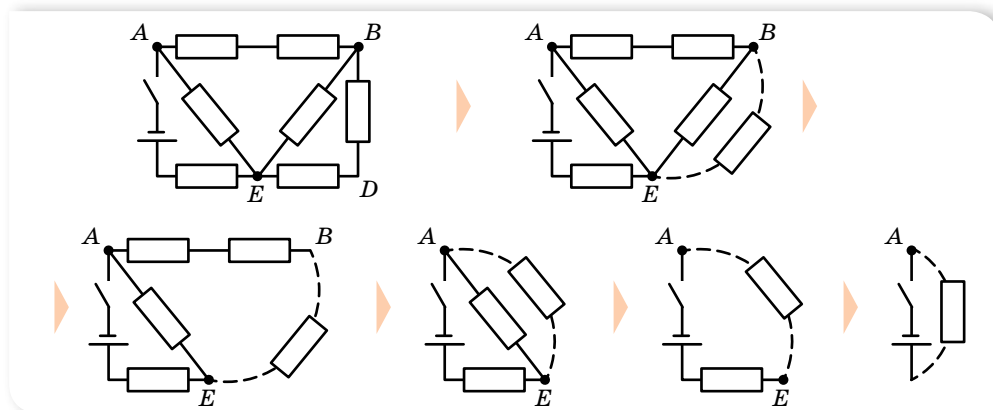
У разі послідовного з'єднання провідників (мал. 4, а) виконуються такі співвідношення:	У разі паралельного з'єднання провідників (мал. 4, б) виконуються такі співвідношення:
1) сила струму в усіх провідниках однакова, $I = I_1 = I_2$;	1) спад напруг на окремих провідниках і на всьому з'єднанні — однакові: $U = U_1 = U_2$;
2) напруга на всьому з'єднанні дорівнює сумі спадів напруг на кожному провіднику, $U = U_1 + U_2$;	2) сила струму до розгалуження дорівнює сумі сили струму в кожному провіднику, $I = I_1 + I_2$;
3) напруга на кожному провіднику прямо пропорційна опорам провідників, $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$;	3) сила струму в окремих провідниках обернено пропорційна опорам цих провідників, $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$;
4) загальний опір з'єднання дорівнює сумі опорів кожного провідника, $R = R_1 + R_2$. У випадку з'єднання N провідників їх загальний опір $R = \sum_{i=1}^N R_i$.	4) величина, обернена до загального опору, дорівнює сумі обернених величин опорів кожного провідника, $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. У випадку з'єднання N провідників $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$.



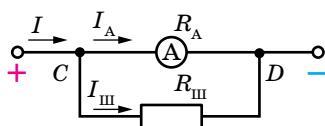
Мал. 4. З'єднання провідників:
а — послідовне; б — паралельне

Еквівалентні схеми. Розв'язування задач на обчислення опорів складних з'єднань провідників варто починати з аналізу схеми та пошуку в ній якихось двох або більше провідників, з'єднаних один з одним. Якщо в схемі вдалося відшукати ділянку з такими провідниками, то її замінюють одним провідником, опір якого еквівалентний цим кільком і може бути легко розрахований за простою формулою. У результаті дістають простішу схему. Цей прийом повторюють доти, поки не залишиться лише один провідник, опір якого еквівалентний опору всього кола. Хід такого спрощення відображено на малюнку 5. Після визначення еквівалентного опору можна визначити силу струму в нерозгалуженій частині кола, коли задано напругу, підведену до схеми.

Часто в задачах треба визначити розподіл струмів і напруг в окремих вітках і на ділянках кола. Для цього потрібно розгорнути найпростішу (останню) схему малюнку 5 у вихідну і, переходячи в зворотному напрямку від однієї схеми до іншої, визначити за законами послідовного й паралельного з'єднань розподіли струмів між вітками та напруг на ділянках та окремих елементах кола.



Мал. 5. Обчислення загального опору складного з'єднання шляхом послідовних спрощень



Мал. 6.
Схема під'єднання шунта

Розширення меж вимірювальних приладів. Для вимірювання сили струму, що перевищує значення, на яке розрахований прилад, тобто для розширення меж його вимірювання, до амперметра підключають шунт, який на малюнку 6 позначено $R_{\text{ш}}$.

Шунт — це звичайний резистор, який під'єднують до приладу паралельно. Визначимо опір шунта, який необхідно підключити до амперметра у випадку, якщо потрібно виміряти силу струму, що в n разів перевищує силу струму, на яку розрахований прилад, тобто $n = \frac{I}{I_A}$. Опір амперметра позначимо R_A . У цьому разі сила струму I , яку вимірюють, дорівнює сумі струмів,

що проходять через шунт й амперметр: $I = I_A + I_{\text{ш}}$. Оскільки I_A менша від вимірюваної I в n разів, то ціна поділки амперметра (якщо шкала приладу рівномірна) зростає також в n разів. Тобто відхиленню стрілки амперметра на одну поділку відповідатиме в n разів більша сила струму.

За законом Ома для ділянки кола: $R_{\text{ш}} = \frac{U}{I_{\text{ш}}}$. Ураховуючи, що $I_{\text{ш}} = I - I_A$

та $U = U_A = I_A R_A$, отримаємо: $R_{\text{ш}} = \frac{I_A}{I - I_A} R_A$. Оскільки $I = n I_A$, остання

формула набуде вигляду $R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n - 1}$.

А струм, який тече через шунт, дорівнюватиме:

$$I_{\text{ш}} = n I_A - I_A = (n - 1) I_A.$$

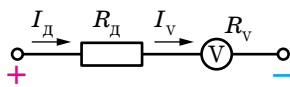
Розширення меж вимірювання вольтметра здійснюють за допомогою підключення до приладу резистора (який називають додатковим опором). Додатковий опір R_d під'єднують до вольтметра послідовно (мал. 7), тому сила струму в ньому та на приладі — однакові: $I = I_d = I_v$.

Напруга, яку вимірює вольтметр U , дорівнює сумі напруг на вольтметрі U_v (U_v — максимальна напруга, яку може виміряти вольтметр) та на додатковому опорі U_d : $U = IR + IR_v$, звідки $R_d = \frac{U - IR_v}{I}$, де I — максимально допустима сила

струму для вольтметра, яку розраховують за формулою $I = \frac{U_v}{R_v}$.

Якщо позначити збільшення межі вимірювання вольтметра через n ($n = \frac{U}{U_v}$) і підставити значення I та n у формулу додаткового опору, отри-

маємо: $R_d = R_v \frac{U - U_v}{U_v} = R_v (n - 1)$. Тоді напруга на додатковому опорі дорівнює $U_d = U - U_v = U_v (n - 1)$. Використовуючи резистори для розширення меж вимірювання вольтметра й амперметра, можна досить легко й економічно вигідно збільшити межі їх вимірювання, що дає змогу використовувати дані прилади в колах, параметри яких перевищують межі вимірювання цих пристроїв.



Мал. 7. Схема під'єднання додаткового опору



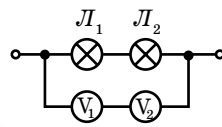
ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Сформулюйте умови виникнення та існування електричного струму.
2. Схарактеризуйте такі фізичні величини: сила струму, напруга, електричний опір.
3. Які співвідношення справджуються в разі послідовного й паралельного з'єднання провідників?
4. Як можна збільшити верхню межу вимірювання вольтметра; амперметра?



Експериментуємо

1. Як, використовуючи два вольтметри, шкали яких розраховані до 150 В, виміряти напругу на ділянці кола, якщо вона перевищує 200 В?
2. До двох послідовно з'єднаних ламп під'єднано вольтметри так, як показано на малюнку 8. Показання першого вольтметра — 6 В, другого — 20 В. Опір першого вольтметра 4000 Ом. Визначте опір другого вольтметра.
3. Маємо: електричну лампу, реостат, ключ, вольтметр, джерело струму. Накресліть схему з'єднання елементів кола, щоб за допомогою реостата можна було регулювати силу струму, що проходить через лампу, а за допомогою вольтметра — вимірювати сумарну напругу на реостаті та лампі.



Мал. 8



Приклади розв'язування задач

Задача. У схемі, наведеній на малюнку 9, а, $R_1 = 3$ Ом, $R_2 = 9$ Ом, $R_3 = R_4 = 6$ Ом, $R_5 = 4$ Ом, $R_6 = 6$ Ом. Визначте опір цього кола.

Дано:

$$R_1 = 3 \text{ Ом}; R_2 = 9 \text{ Ом}$$

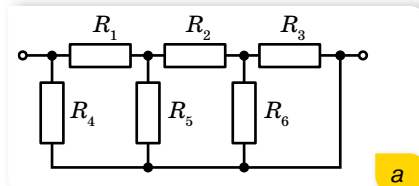
$$R_3 = R_4 = 6 \text{ Ом}$$

$$R_5 = 4 \text{ Ом}; R_6 = 6 \text{ Ом}$$

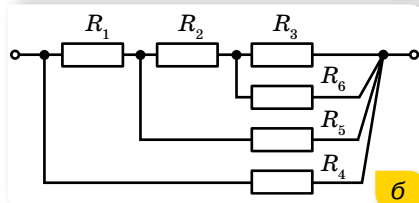
$$R - ?$$

Розв'язання:

Зобразимо схему трохи інакше (мал. 9, б). Тепер обчислення опору кола зводиться до знаходження опору паралельного та послідовного з'єднання провідників і не становить труднощів:



а



б

$$R_{3-6} = \frac{R_3 \cdot R_6}{R_3 + R_6}, R_{3-6} = 3 \text{ Ом};$$

$$R_{2-3-6} = R_2 + R_{3-6}, R_{2-3-6} = 12 \text{ Ом};$$

$$R_{5-2-3-6} = \frac{R_5 \cdot R_{2-3-6}}{R_5 + R_{2-3-6}}, R_{5-2-3-6} = 3 \text{ Ом};$$

$$R_{1-5-2-3-6} = R_1 + R_{5-2-3-6}, R_{1-5-2-3-6} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_{4-1-5-2-3-6} = \frac{R_4 \cdot R_{1-5-2-3-6}}{R_4 + R_{1-5-2-3-6}},$$

$$R_{4-1-5-2-3-6} = 3 \text{ Ом}.$$

Мал. 9. Схеми: а — до умови задачі; б — еквівалентна

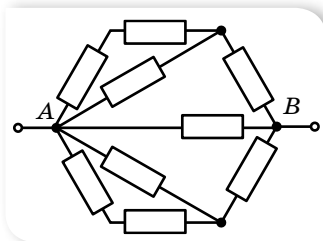
Відповідь: 3 Ом.



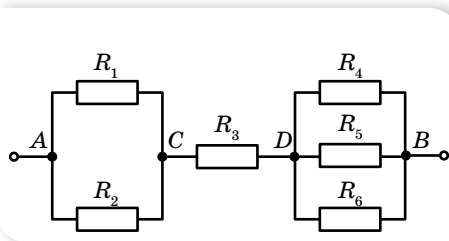
Вправа 1

1. Чотири провідники опором по 1,5 Ом кожний необхідно з'єднати так, щоб отримати опір 2 Ом. Як це здійснити?
2. Два провідники за послідовного з'єднання мають опір 27 Ом, за паралельного — 6 Ом. Визначте опір цих провідників.
3. Коло складене з дев'яти однакових провідників за схемою, показаною на малюнку 10. Загальний опір дорівнює 1,5 Ом. Визначте опір одного провідника.

4. Визначте розподіл струмів і напруг електричного кола (мал. 11), якщо напруга $U = 48$ В, а опір резисторів $R_1 = R_3 = 3$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, $R_4 = 5$ Ом, $R_5 = 10$ Ом, $R_6 = 30$ Ом.

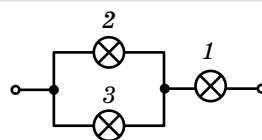


Мал. 10



Мал. 11

5. Електричну лампу опором 240 Ом, розраховану на напругу 120 В, треба живити від мережі напругою 220 В. Якої довжини ніхромовий провідник перерізом $0,55$ мм² треба ввімкнути послідовно з лампою?
6. До кола, зображеного на малюнку 12, підведено напругу 90 В. Опір лампи 2 дорівнює опорів лампи 1, а опір лампи 3 — у 4 рази більший за опір лампи 1. Сила струму, яка споживається від джерела, дорівнює $0,5$ А. Визначте опір кожної лампи, напругу на лампах 2 і 3, а також силу струму в них.
7. Кабель складається з двох сталевих провідників перерізом $0,6$ мм² кожний і чотирьох мідних провідників перерізом $0,85$ мм² кожний. Визначте спад напруги на кожному кілометрі кабелю, якщо сила струму дорівнює $0,1$ А.
8. Який додатковий опір необхідно під'єднати до вольтметра, опір якого $1,5$ кОм, щоб ціна поділки його шкали збільшилась у п'ять разів?
9. У скільки разів збільшиться верхня межа шкали вольтметра, опір якого 1 кОм, якщо приєднати до нього послідовно додатковий опір 9 кОм?

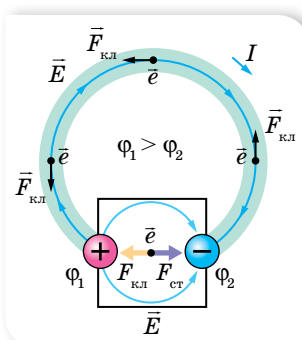


Мал. 12

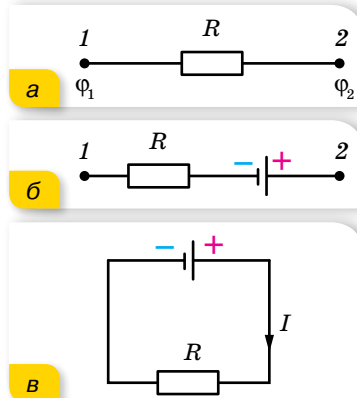
§2

Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола

Електрорушійна сила. Якщо під'єднати до полюсів джерела провідник, то, завдяки наявності різниці потенціалів, вільні електрони провідності, не припиняючи хаотичного руху, під дією кулонівських сил почнуть рухатися напрямлено — від кінця провідника з нижчим потенціалом до кінця з вищим, тобто від негативного полюса джерела струму до позитивного (мал. 13). Але сили електричного поля не можуть перемістити електричні заряди між полюсами всередині джерела, оскільки діють на них у протилежний бік. Тому всередині джерела, крім електричних сил $F_{кл}$, діють ще й сторонні сили $F_{ст}$. Природа



Мал. 13. Рух носіїв заряду в повному електричному колі



Мал. 14. Електричне коло:
 а — однорідна ділянка;
 б — неоднорідна ділянка;
 в — повне коло, що містить
 зовнішню та внутрішню
 частини

сторонніх сил може бути різною: у хімічних елементах — це дія хімічних реакцій, у фотоелементах — дія сонячного випромінювання, в електрогенераторах — зміна магнітного потоку.

Сторонні сили переміщують негативні заряди від позитивного полюса батареї до негативного та протидіють електричним силам, які прагнуть вирівняти потенціали на полюсах. Завдяки цьому заряди циркулюють по замкненому колу, створюючи струм. Як було зазначено в попередньому параграфі, ділянку кола, у якій заряди рухаються під дією кулонівських сил, називають *однорідною* (мал. 14, а), а ту, в якій носії заряду рухаються під дією як кулонівських, так і сторонніх сил, — *неоднорідною* (мал. 14, б). Якщо з'єднати кінці неоднорідної ділянки, отримаємо повне коло, в якому ту частину замкненого кола, де заряди рухаються під дією кулонівських сил (електростатичної різниці потенціалів), називають *зовнішньою*, а ту, в якій носії заряду рухаються під дією сторонніх сил, — *внутрішньою*. Полюси джерела струму розділяють внутрішню та зовнішню ділянки кола (мал. 14, в).

На переміщення зарядів затрачається відповідна робота $A_{\text{ст}}$, яку виконують сторонні сили. Що більший заряд переміщується, то більша робота затрачається. Іншими словами, $A_{\text{ст}} \sim q$ або, використовуючи знак рівності, $A_{\text{ст}} = \varepsilon q$, де ε — постійний коефіцієнт пропорційності, що характеризує відповідне джерело й називається *електрорушійною силою джерела*¹ (скорочено ЕРС).

Електрорушійна сила ε — це фізична величина, що характеризує енергію сторонніх сил джерела струму й вимірюється роботою сторонніх сил (тобто сил неелектростатичного походження), виконаною для переміщення одиничного позитивного електричного заряду, $\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$.

Одиниця електрорушійної сили — вольт, $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$.

Унаслідок розділення всередині джерела позитивних і негативних зарядів джерело набуває запасу потенціальної електричної енергії, яка витрачається на виконання роботи з переміщення зарядів по всьому колу.

¹ Термін «електрорушійна сила» виник до того, як були з'ясовані процеси, що відбуваються в електричному колі. Як видно з означення, ідеться про енергетичну характеристику джерела, а не про силу.

Робота сторонніх сил дорівнює сумі робіт, що виконуються з переміщення заряду на внутрішній і зовнішній ділянках кола.

У джерелах струму постійно відбувається розділення позитивних і негативних зарядів, які зосереджуються на його полюсах, що спричинює появу електричного поля (стаціонарного). Властивості цього поля відрізняються від електричного поля нерухомих зарядів, яке ми вивчали в електростатиці. У таблиці 2 подано порівняння властивостей електричних полів рухомих і нерухомих зарядів.

Таблиця 2

Електростатичне поле нерухомих зарядів	Стаціонарне електричне поле рухомих зарядів
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Лінії напруженості є <i>незамкненими</i>. ▶ Робота поля по замкненому контуру <i>дорівнює нулю</i> (є потенціальним) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Має <i>замкнені</i> лінії напруженості. ▶ Робота поля з переміщення заряду вздовж замкненої лінії напруженості <i>не дорівнює нулю</i> (не є потенціальним). Таке поле називають вихровим

Закон Ома для повного кола. Джерело струму, як і будь-який провідник, має певний опір, який називають *внутрішнім опором* джерела й позначають r , на відміну від опору зовнішнього кола R .

Відповідно до закону Ома для зовнішньої і внутрішньої ділянок кола, можна записати: $U_{\text{вн}} = Ir$, $U_{\text{зн}} = IR$. Тоді $\varepsilon = IR + Ir$, сума спадів напруг на зовнішній і внутрішній ділянках кола дорівнює ЕРС джерела.

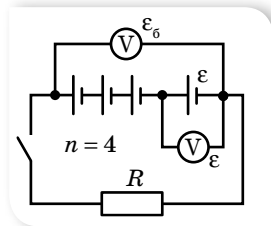
Співвідношення, записане у вигляді $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$, називають *законом*

Ома для повного кола: сила струму в замкненому електричному колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела струму й обернено пропорційна повному опору кола.

Отже, сила струму в колі залежить від трьох величин, дві з яких (ЕРС і внутрішній опір) характеризують джерело, а третя залежить від самого кола. Якщо користуватися певним джерелом електричної енергії, то ε і r можна вважати сталими величинами. Якщо змінювати опір зовнішнього кола, то відповідно змінюватиметься сила струму I в колі та спад напруги IR на зовнішній частині кола. Зі збільшенням опору зовнішнього кола сила струму зменшується, напруга ж зростає. Якщо $R = \infty$ (коло розімкнене), то $I = 0$, спад напруги всередині джерела відсутній, а напруга на полюсах джерела дорівнює його ЕРС. На цьому ґрунтується наближене вимірювання ЕРС джерела. Вольтметр приєднують до полюсів джерела в разі розімкненого зовнішнього кола. До того ж вольтметр показує спад напруги IR на самому собі. А оскільки опір вольтметра зазвичай дуже великий, тобто $R \gg r$, $U = IR \approx \varepsilon$. Що більший опір вольтметра порівняно з внутрішнім опором джерела струму, то точнішим буде виміряне значення ЕРС.

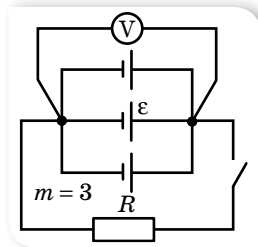
Послідовне і паралельне з'єднання джерел струму. На практиці однакові джерела струму з'єднують у батарею (табл. 3, с. 16).

У разі послідовного з'єднання джерел струму в батарею (мал. 15) позитивний полюс попереднього джерела з'єднують з негативним полюсом наступного.



Мал. 15

У разі паралельного з'єднання джерел струму в батарею (мал. 16) всі їхні позитивні полюси приєднують до однієї клема, а негативні — до іншої.



Мал. 16

ЕРС батареї дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС елементів

Заряди, які проходять через один елемент живлення, не потрапляють в інші, тобто ЕРС батареї дорівнює ЕРС одного елемента

Закон Ома для всього кола з послідовним з'єднанням однакових елементів живлення: $I = \frac{\varepsilon n}{R + rn}$, де n — кількість елементів; ε — ЕРС одного елемента, r — внутрішній опір одного елемента

Закон Ома для кола з однаковими паралельно з'єднаними елементами живлення:

$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{m}}$, де m — кількість елементів, ε — ЕРС одного елемента, r — внутрішній опір одного елемента

У разі змішаного з'єднання однакових елементів живлення в батарею закон Ома:

$$I = \frac{\varepsilon n}{R + \frac{rn}{m}}$$

Коротке замикання. Зі зменшенням опору зовнішнього кола, $R \rightarrow 0$, максимального значення набуває сила струму $I_{\text{к.з}} = \frac{\varepsilon}{r}$. Цей випадок називають *коротким замиканням*.

Для джерел, де порівняно малий внутрішній опір (наприклад, у свинцевих акумуляторах $r \approx 0,1 \div 0,001$ Ом), сила струму короткого замикання може досягти дуже великих значень. Провідники можуть розплавитись, а саме джерело — вийти з ладу. Особливо небезпечні короткі замикання в освітлювальних мережах, що живляться від трансформаторних підстанцій, ЕРС яких вимірюється сотнями вольтів. Сила струму короткого замикання в них може сягати кількох тисяч амперів.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. У чому полягає фізична суть електрорушійної сили джерела струму? Що вона характеризує? Яким вольтметром і за яких умов можна виміряти ЕРС джерела струму безпосередньо? **2.** Розкажіть про енергетичні перетворення в електричному колі. **3.** Чи може тривалий час існувати електричний струм у колі, якщо на рухливі носії заряду діють тільки кулонівські сили? Чим електричне поле провідника зі струмом відрізняється від електричного поля нерухомих зарядів?



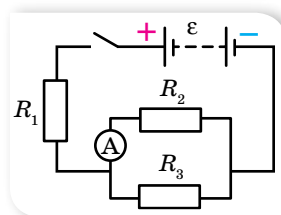
Експериментуємо

1. Перевірте на досліді, як залежить напруга на затискачах джерела струму від опору зовнішнього кола. Побудуйте графік цієї залежності. Обладнання доберіть самостійно.
2. У вашому розпорядженні — батарея акумуляторів з ЕРС, що дорівнює ε , вольтметр і великий набір резисторів найрізноманітніших опорів R . За допомогою цього обладнання визначте внутрішній опір r батареї. Перевірте ваш спосіб на досліді.



Приклади розв'язування задач

Задача. Батарея акумуляторів з ЕРС $\varepsilon = 2,8$ В включена в коло за схемою, яка показана на малюнку 17, де $R_1 = 1,8$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 3$ Ом. Амперметр показує силу струму $I_2 = 0,48$ А. Визначте внутрішній опір батареї. Опором амперметра знехтуйте.



Мал. 17

Дано:

$$\varepsilon = 2,8 \text{ В}$$

$$R_1 = 1,8 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 2 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 3 \text{ Ом}$$

$$I_2 = 0,48 \text{ А}$$

$$r = ?$$

Розв'язання:

Внутрішній опір батареї можна визначити із закону

Ома для повного кола: $I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{зар}} + r}$, $r = \frac{\varepsilon - IR_{\text{зар}}}{I}$. Оскільки

$I = I_1 = I_2 + I_3$, спочатку визначимо силу струму в третьому

провіднику, а потім загальну: $\frac{R_2}{R_3} = \frac{I_3}{I_2}$, $I_3 = I_2 \cdot \frac{R_2}{R_3}$.

Таким чином, $I = I_2 \cdot \frac{R_3 + R_2}{R_3}$.

Оскільки R_1 з'єднано послідовно з розгалуженням, то маємо:

$R_{\text{зар}} = R_1 + R_{\text{екв}}$, де $R_{\text{екв}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$. Отже, $R_{\text{зар}} = \frac{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3}{R_2 + R_3}$. Тоді

будемо мати: $r = \frac{\varepsilon R_3}{I_2(R_3 + R_2)} - \frac{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3}{R_2 + R_3}$. Підставляючи числові

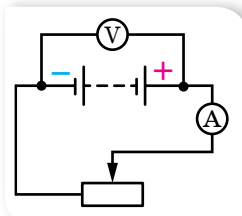
значення, розрахуємо r : $r = \frac{2,8 \text{ В} \cdot 3 \text{ Ом}}{0,48 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом}} - \frac{1,8 \text{ Ом} \cdot 5 \text{ Ом} + 6 \text{ Ом}^2}{5 \text{ Ом}} = 0,5 \text{ Ом}$.

Відповідь: $r = 0,5$ Ом.



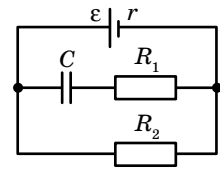
Вправа 2

1. Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму склали коло за схемою, зображеною на малюнку 18. За деякого положення ковзного контакту реостата амперметр показав 0,5 А, а вольтметр — 4 В. Коли контакт перемістили трохи ліворуч, амперметр показав 0,9 А, а вольтметр — 3,6 В. Обчисліть ЕРС і внутрішній опір джерела.



Мал. 18

- Джерелом струму в колі є батарея з ЕРС 30 В. Напруга на клеммах батареї $U = 18$ В, а сила струму в колі $I = 3$ А. Визначте зовнішній R і внутрішній r опори електричного кола.
- У провіднику опором 2 Ом, приєднаному до елемента з ЕРС 1,1 В, проходить струм 0,5 А. Яка сила струму під час короткого замикання елемента?
- Визначте заряд на обкладках конденсатора (мал. 19), якщо ЕРС джерела ε , його внутрішній опір r . Опори резисторів R_1 та R_2 відомі. Ємність конденсатора — C .
- Вольтметр, приєднаний до затискачів джерела струму, показав 6 В. Коли до тих самих затискачів приєднали лампу, вольтметр почав показувати 3 В. Що покаже вольтметр, якщо замість однієї приєднати дві такі самі лампи, з'єднані послідовно; паралельно?



Мал. 19

§ 3

Робота й потужність електричного струму

Робота й потужність електричного струму. Електричне поле, створюючи впорядкований рух заряджених частинок у провіднику, виконує роботу, яку прийнято називати *роботою струму*.

Робота електричного струму A — фізична величина, що характеризує зміну електричної енергії струму — перетворення її на інші види.

Одиниця роботи електричного струму — джоуль, 1 Дж.

У побуті та техніці використовують також позасистемну одиницю — кіловат-годину (кВт · год), $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Якщо розглядати зовнішню ділянку електричного кола, то робота струму визначається як $A = qU = UI t$, де q — заряд, що пройшов через поперечний переріз провідника за час t , U — електрична напруга на ділянці кола, I — сила струму в ній.

Якщо на ділянці кола, якою проходить струм, не виконується механічна робота й не відбуваються хімічні реакції, то результатом роботи електричного струму буде тільки нагрівання провідників. Нагрітий провідник унаслідок теплообміну віддає отриману енергію в навколишнє середовище. Згідно із законом збереження енергії, кількість виділеної теплоти дорівнює роботі струму, $Q = A$ — й обчислюється за **законом Джоуля — Ленца**: кількість теплоти Q , що виділяється за час t в провіднику з опором R під час проходження по ньому струму силою I , дорівнює $Q = I^2 R t$.

Скориставшись законом Ома $I = \frac{U}{R}$, математично можна отримати

й такі формули закону Джоуля — Ленца: $Q = \frac{U^2 t}{R}$ і $Q = UI t$. Проте, якщо

в колі виконувється механічна робота або відбуваються хімічні реакції, ці формули використовувати не можна.

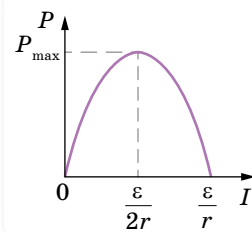
Потужність електричного струму P — фізична величина, що характеризує здатність електричного струму виконувати певну роботу й вимірюється роботою, виконаною за одиницю часу, $P = \frac{A}{t}$, тут A — робота електричного струму, t — час, за який цю роботу виконано.

Потужність у зовнішній ділянці електричного кола можна також визначити за формулами $P = UI$, $P = I^2R$, $P = \frac{U^2}{R}$, де U — електрична напруга, I — сила струму, R — електричний опір ділянки кола.

Одиниця потужності — ват, $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.

Якщо коло складається з кількох споживачів, то за будь-якого їх з'єднання загальна потужність струму в усьому колі дорівнює сумі потужностей окремих споживачів. Це варто взяти до уваги. У побуті ми користуємося потужними електричними приладами. Якщо одночасно їх увімкнути, то загальна потужність може перевищувати ту, на яку розрахована електрична мережа в помешканні.

З'ясуємо, у якому разі в електричному колі виділяється максимальна потужність. Скористаємося графічним способом, і для цього запишемо закон Ома для повного кола в такому вигляді: $\varepsilon = IR + Ir$. Помноживши обидві частини рівняння на I , отримуємо: $\varepsilon I = I^2R + I^2r$, де εI — повна потужність, яку розвиває джерело струму, I^2R — потужність споживачів зовнішньої ділянки кола, I^2r — потужність, яку споживає внутрішня частина кола. Отже, потужність, яка споживається зовнішньою частиною кола, становить: $P = \varepsilon I - I^2r$. Графіком залежності $P(I)$ є парабола (мал. 20), вершина якої має координати $\left(\frac{\varepsilon}{2r}; \frac{\varepsilon^2}{4r}\right)$. Із графіка видно, що максимальна



Мал. 20. Графік залежності потужності, що споживається в зовнішній частині кола, від сили струму

потужність споживається в зовнішньому колі за сили струму $I = \frac{\varepsilon}{2r}$ і дорівнює нулю, коли $I = 0$, і $I = \frac{\varepsilon}{r}$.

Порівнюючи формули $I = \frac{\varepsilon}{2r}$ і $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$, бачимо, що максимальна потужність споживається зовнішнім навантаженням у випадку, коли $R = r$.

Коефіцієнт корисної дії джерела струму. Коефіцієнт корисної дії джерела струму η визначається як відношення потужності P_{κ} , яку споживає

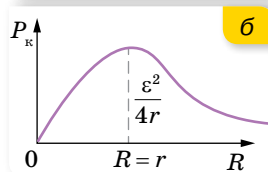
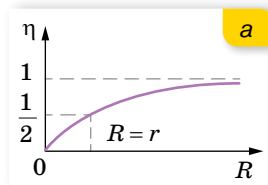
зовнішня частина кола (корисна потужність), до повної потужності $P_{\text{п}}$, яку розвиває джерело струму: $\eta = \frac{P_{\text{к}}}{P_{\text{п}}}$.

Оскільки корисна потужність $P_{\text{к}} = IU$, а повна $P_{\text{п}} = I\varepsilon$, отримуємо: $\eta = \frac{U}{\varepsilon}$. Ураховуючи, що $U = \varepsilon - Ir$, $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$, тобто $U = \varepsilon \left(1 - \frac{r}{R+r}\right) = \frac{\varepsilon R}{R+r}$, маємо: $\eta = \frac{R}{R+r}$.

Залежність коефіцієнта корисної дії джерела струму η від зовнішнього опору R графічно має вигляд, як на малюнку 21, а.

Аналіз формули та графіка $\eta(R)$ показує, що $\eta \rightarrow 1$ коли $\frac{r}{R} \ll 1$. Тобто для збільшення ККД джерела необхідно за можливості зменшити його внутрішній опір.

Залежність корисної потужності $P_{\text{к}}$ від зовнішнього опору R набуває вигляду $P_{\text{к}} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}$. Графік залежності $P_{\text{к}}(R)$ зображено на малюнку 21, б.



Мал. 21. Графіки залежності: а — $\eta(R)$; б — $P_{\text{к}}(R)$



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. У якій з двох ламп, потужністю 100 Вт чи 75 Вт, протікає струм більшої сили?
2. Як визначається потужність електричного струму на різних ділянках повного кола?
3. За яких умов робота електричного струму та кількість теплоти, що виділяється під час проходження струму, мають однакове значення?



Приклади розв'язування задач

Задача. У мережу з напругою 220 В послідовно підключили дві лампи потужністю 60 і 250 Вт, кожна з яких розрахована на напругу 110 В. Як розподілиться напруга на лампах? Яку потужність споживає кожна лампа? Яка кількість теплоти виділиться за 30 хв роботи кожної лампи?

Дано:

$$U = 220 \text{ В}$$

$$U_1 = U_2 = 110 \text{ В}$$

$$n = 2$$

$$P_1 = 60 \text{ Вт}$$

$$P_2 = 250 \text{ Вт}$$

$$t = 1800 \text{ с}$$

$$U'_1 - ?; U'_2 - ?$$

$$P'_1 - ?; P'_2 - ?$$

$$Q'_1 - ?; Q'_2 - ?$$

Розв'язання:

Напруга на кожній з послідовно з'єднаних ламп прямо пропорційна їх опорам. Тому спочатку розрахуємо опір кожної лампи: $R_1 = \frac{U_1^2}{P_1}$, $R_2 = \frac{U_2^2}{P_2}$, $\frac{U'_1}{U'_2} = \frac{R_1}{R_2}$. Оскільки

ки $U'_1 + U'_2 = U$, то $\frac{U'_1}{U - U'_1} = \frac{R_1}{R_2}$.

За законом Ома визначимо силу струму в лампах:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}.$$

Підставляючи числові значення, визначимо опір кожної з ламп і напруги в них:

$$R_1 = \frac{(110 \text{ В})^2}{60 \text{ Вт}} \approx 200 \text{ Ом}, \quad R_2 = \frac{(110 \text{ В})^2}{250 \text{ Вт}} \approx 48 \text{ Ом},$$

$$\frac{U'_1}{220 \text{ В} - U'_1} \approx \frac{200 \text{ Ом}}{48 \text{ Ом}}, \quad U'_1 \approx 177 \text{ В}, \quad U'_2 = 43 \text{ В}.$$

Визначимо силу струму в лампах: $I \approx \frac{220 \text{ В}}{248 \text{ Ом}} \approx 0,9 \text{ А}.$

Знаючи силу струму в лампах, їх опір і час світіння, розрахуємо потужності, які мають лампи за їх послідовного підключення, і кількість виділеної теплоти:

$$P'_1 = IU'_1; \quad P'_1 = 0,9 \text{ А} \cdot 177 \text{ В} \approx 159 \text{ Вт}, \quad P'_2 = IU'_2; \quad P'_2 = 0,9 \text{ А} \cdot 43 \text{ В} = 39 \text{ Вт},$$

$$Q'_1 = IU'_1 t; \quad Q'_1 = 0,9 \text{ А} \cdot 177 \text{ В} \cdot 1800 \text{ с} \approx 290 \text{ кДж},$$

$$Q'_2 = IU'_2 t; \quad Q'_2 = 0,9 \text{ А} \cdot 43 \text{ В} \cdot 1800 \text{ с} \approx 70 \text{ кДж}.$$

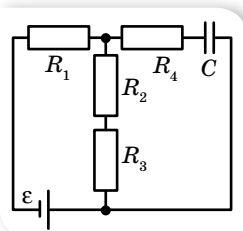
А чи звернули ви увагу на те, що напруга на одній з ламп виявилася 177 В? До чого це може призвести в реальних умовах?

Відповідь: $U'_1 \approx 177 \text{ В}, \quad U'_2 = 43 \text{ В}; \quad P'_1 \approx 159 \text{ Вт}, \quad P'_2 = 39 \text{ Вт}, \quad Q'_1 \approx 290 \text{ кДж}, \quad Q'_2 \approx 70 \text{ кДж}.$



Вправа 3

1. Визначте внутрішній опір та ЕРС джерела струму, якщо за сили струму 30 А потужність у зовнішньому колі становить 180 Вт, а за сили струму 10 А ця потужність дорівнює 100 Вт.
2. Від генератора, що має ЕРС 250 В і внутрішній опір 0,1 Ом, необхідно протягти до споживача двопроводову лінію завдовжки 100 м. Яку масу алюмінію треба використати для виготовлення підвідних проводів, якщо споживач має максимальну потужність 22 кВт і розрахований на напругу 220 В?
3. Джерело струму, що має ЕРС 9 В і внутрішній опір 1 Ом, живить через реостат три паралельно з'єднані лампи, розраховані на напругу 6,3 В і силу струму 0,3 А. Реостат поставлено в таке положення, що лампи працюють у номінальному режимі. Одна з ламп вийшла з ладу. У скільки разів змінилася потужність кожної з двох ламп, які залишилися, порівняно з номінальною?
4. Джерело струму замикають спочатку на опір 2 Ом, а потім — на опір 8 Ом. І в першому і в другому випадках в опорах за одиницю часу виділяється однакова кількість теплоти. Визначте внутрішній опір джерела струму.
5. Визначте ККД джерела електричної енергії з ЕРС 1,45 В і внутрішнім опором 0,4 Ом за сили струму 2 А.
6. Джерело струму під час короткого замикання дає силу струму 1,5 А. Якщо джерело замкнути на зовнішній опір 4 Ом, то потужність струму в зовнішньому колі буде дорівнювати 1 Вт. Визначте ЕРС і внутрішній опір джерела струму.
7. Лампи, опори яких дорівнюють 3 Ом і 12 Ом, по черзі приєднували до деякого джерела струму, і вони споживали однакову потужність. Визначте внутрішній опір джерела та ККД кола в кожному випадку.
8. Вважаючи відомими величини, вказані на схемі (мал. 22), визначте заряд на конденсаторі. Як зміниться величина заряду, якщо R_1 і R_2 вимкнути?



Мал. 22

§ 4

Правила Кірхгофа

Правила Кірхгофа. Розглянемо електричне коло постійного струму, в якому є точки з'єднання декількох провідників (мал. 23). Ці точки (a і d) називають вузлами, або точками розгалуження. Відповідно електричні кола такого вигляду називають *розгалуженими*.

Стосовно складних розгалужених кіл застосовують правила Кірхгофа, сформульовані в 1847 р. Густавом Кірхгофом. Це два положення, які дають змогу обчислювати струми, напруги та ЕРС ділянок складних розгалужених кіл постійного струму.

Перше правило випливає із закону збереження електричного заряду й називається *правилом вузлів*:

Алгебраїчна сума струмів I_k , що сходяться в будь-якій точці розгалуження (вузлі), дорівнює нулю, $\sum_{k=1}^n I_k = 0$, де n — кількість провідників, що сходяться в точці розгалуження.

До того ж додатними вважаються струми, що напрямлені до точки розгалуження, від'ємними — струми, що виходять з неї.

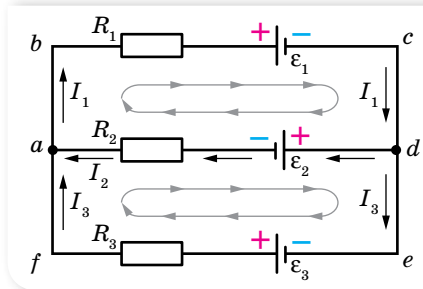
Друге правило називають *правилом контурів*. Будь-яке складне розгалужене коло можна поділити на прості (що не мають розгалужень). Наприклад, у колі на малюнку 23 є два прості кола (їх називають контурами): $cdab$, $defa$.

Друге правило Кірхгофа:

У будь-якому довільно вибраному замкненому контурі алгебраїчна сума добутків сил струмів I_k на опори R_k відповідних ділянок контура (спадів напруги) дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС у цьому контурі,

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i.$$

Щоб скласти рівняння, скориставшись другим правилом, треба, по-перше, у складному електричному колі виділити довільні замкнуті контури, по-друге, умовно вибрати певний напрямок обходу контура (за годинниковою стрілкою або проти годинникової стрілки). До того ж струм вважають додатним, якщо його напрямок збігається з вибраним напрям-



Мал. 23. Схема розгалуженого кола

ком обходу контура; додатними вважають також ті ЕРС, що підвищують потенціал, у напрямку обходу контура, тобто коли напрямок обходу збігається з переходом від від'ємного полюса джерела струму до додатного, у протилежному випадку ЕРС цього джерела буде від'ємною.

Наприклад, для кола, зображеного на малюнку 23, система рівнянь для визначення трьох невідомих струмів I_1, I_2, I_3 має такий вигляд:

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0;$$

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2;$$

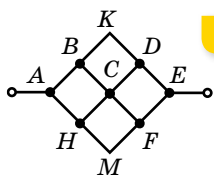
$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3.$$

Часто, коли в складній схемі не вдається виявити ні послідовно, ні паралельно з'єднаних провідників, для визначення загального опору кола можна скористатися двома властивостями електричного кола: а) у будь-якому колі точки, що мають однакові потенціали, можна сполучити у вузол або роз'єднати. Від цього не зміняться опір всього кола та сила струму в окремих ділянках, оскільки струм між точками з однаковими потенціалами не проходить, проте такі зміни схеми часто значно спрощують розрахунки; б) робота по переміщенню одиничного заряду з однієї точки однорідного кола в іншу не залежить від опору провідників, по яких переміщаються носії заряду, а визначається лише різницею потенціалів між цими точками. Який би не було вибрано шлях переміщення носіїв заряду по однорідному колу, алгебраїчна сума спадів напруги на окремих ділянках цього кола дорівнює різниці потенціалів між початковою та кінцевою точками, $\varphi_1 - \varphi_2 = \sum U_i = \sum I_i R_i = U_0$, де I_i і R_i — сили струму й опори окремих ділянок кола. Але це твердження справедливе лише тоді, коли на носії заряду діють лише електричні сили й на ділянці немає джерел електрорушійної сили.

Симетричні кола. Відшукання точок з однаковими потенціалами полегшує встановлення властивостей симетрії схеми. Симетричними називають схеми, в яких можна провести вісь (площину) симетрії, що ділить схему на дві частини. Одна з цих частин є дзеркальним відображенням іншої. У схемах, що мають вісь або площину симетрії, завжди є точки з однаковими потенціалами.

Якщо схема симетрична відносно осі (площини), проведеної через точки, до яких підведено напругу (повздовжня площина симетрії), то точки з однаковими потенціалами лежать на кінцях симетричних провідників, оскільки крізь них проходять однакові струми. Якщо ж схема симетрична відносно осі (площини), перпендикулярної до лінії, на якій лежать точки, до яких підведено напругу, тобто схема має поперечну вісь (площину) симетрії, то однаковий потенціал мають усі точки, що лежать на перетині цієї осі (площини) з провідниками. Це впливає з того, що робота електричних сил з переміщення заряджених частинок не залежить від форми шляху.

Відшукавши на схемі точки з однаковими потенціалами, треба сполучити їх (якщо вони були роз'єднані) або роз'єднати (якщо точки були



а



б

Мал. 24. Симетрична
схема з'єднання
провідників (а)
та її еквівалентна
схема (б)

сполучені), після чого дістаємо еквівалентну схему, яка складається з послідовно і паралельно сполучених провідників.

Наприклад, необхідно визначити опір ділянки кола між точками A і E (мал. 24, а), (опори провідників однакові). У ділянці кола не можна визначити елементи з послідовним чи паралельним з'єднанням, але схема має вісь симетрії, причому її вхід і вихід лежать на цій осі. Унаслідок цього симетричні відносно цієї осі точки (B і H), (D і F), (C , K і M) мають однакові потенціали. З'єднавши точки з однаковими потенціалами, дістанемо схему, еквівалентну вихідній (мал. 24, б).

Методи визначення параметрів складних електричних кіл. Розв'язуючи задачі на закони постійного струму в складних електричних

колах, важливо правильно враховувати співвідношення між знаками електрорушійних сил, що діють у колі, і напрямками струмів. Якщо ЕРС створюють струм того ж напрямку, що й струм, який проходить по колу, то їх беруть зі знаком «+». Якщо ж джерело ЕРС увімкнено так, що струм від цього елемента протилежний до напрямку струму в зовнішньому колі, то у формулі перед значенням цієї ЕРС ставлять знак мінус.

Слід розрізняти поняття напруги та спаду напруги. Напруга відрізняється від спаду напруги на тих ділянках кола, де діють сторонні сили. У цьому випадку до роботи сил електричного поля додається робота сторонніх сил з відповідним знаком.

Таким чином, залежно від умови задачі, закон Ома можна записати в трьох різних формах:

- для ділянки кола, яка не містить джерела ЕРС, різниця потенціалів на кінцях ділянки $U = IR$;
- для ділянки кола, яке містить джерело ЕРС, $U = \varepsilon - IR$. Тут $U = \varphi_+ - \varphi_-$, де φ_+ — потенціал кінця ділянки з боку позитивного полюса батареї, а φ_- — з боку негативного; R — опір ділянки, I — сила струму, причому такого напрямку, що всередині джерела він тече від «-» до «+». Якщо ж струм тече в протилежному напрямку, то формула набуває вигляду $U = \varepsilon + IR$;
- для замкненого кола $\varepsilon = I(R + r)$, де R та r — опори зовнішньої та внутрішньої ділянок замкненого кола.

Щоб розрахувати параметри складних кіл, коли в колах немає точок з однаковими потенціалами, що дало б змогу спростити коло, й особливо у випадку, коли в колах є кілька з'єднаних між собою джерел струму, користуються правилами Кірхгофа та методами суперпозиції, вузлових потенціалів, контурних струмів, переходом від трикутника з n провідників до еквівалентної зірки з n провідників тощо.

Метод суперпозиції полягає в тому, що сила струму в будь-якій вітці визначається алгебраїчною сумою сил струмів, створюваних у цій вітці кожним джерелом окремо, так, ніби це джерело є єдиним у цьому колі.

Розв'язання задачі обмежується тим, щоб визначити сили струму від кожного джерела окремо й потім визначити їх алгебраїчну суму.

Суть *методу вузлових потенціалів*: один вузол можна «заземлити», від цього розподіл струмів у вітках не зміниться. Тоді кількість вузлів, потенціали яких необхідно визначити, зменшується на одиницю, оскільки потенціал одного вузла вже відомий і дорівнює нулю. Якщо кількість вузлів в електричному колі дорівнює k , то необхідно скласти $(k - 1)$ рівнянь за формулою закону Ома для ділянки кола (тобто виразити всі сили струмів у колі через вузлові потенціали). До одержаних рівнянь записати рівняння першого правила Кірхгофа для вузлів і розв'язати утворену систему відносно невідомих.

Для визначення сил струмів у складних колах з кількома вузловими точками і ЕРС застосовують *метод контурних струмів*, який дає можливість скоротити кількість розв'язуваних рівнянь. Припускають, що у вітках, які входять до складу двох суміжних контурів, проходять два контурні струми, з яких один становить собою струм одного із суміжних контурів, а другий — другого контура. Справжній струм у розглядуваній вітці визначається як сума або різниця цих двох струмів залежно від їх взаємного відносного напрямку.

Якщо в складному колі опори R_1 , R_2 і R_3 утворюють трикутник (мал. 25, а), то для визначення еквівалентного опору можна застосувати *метод переходу від трикутника до еквівалентної зірки*. Задачу вирішують через заміну опорів R_1 , R_2 і R_3 між вузловими точками a , b і c еквівалентними опорами R_a , R_b і R_c , з'єднаними зіркою (мал. 25, б), причому

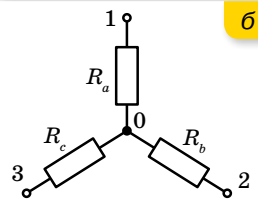
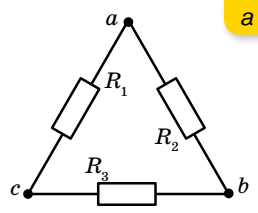
$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad R_b = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad R_c = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Іноді до спрощення складної схеми веде заміна з'єднання опорів у вигляді зірки еквівалентним трикутником опорів. У такому випадку:

$$R_1 = R_a + R_c + \frac{R_a R_c}{R_b}; \quad R_2 = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}; \quad R_3 = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}.$$

Розв'язуючи *задачі на визначення потужності струму*, особливу увагу слід приділяти правильному вибору вихідної формули для розраховування потужності. Повну потужність струму розраховують за формулою $P = IU$. Потужність струму, яка витрачається лише на теплову дію струму, обчислюють за формулою $P = I^2 R$. Якщо ж ідеться про потужність струму, що виділяється на ділянці кола, то треба скористатися формулою

$P = \frac{U^2}{R}$. Нарешті, потужність, яку розвиває джерело електричної енергії, визначають за формулою $P = \varepsilon I$.



Мал. 25.
Схеми з'єднання
провідників:
трикутником (а);
зіркою (б)

У кожному із цих випадків потрібно з'ясувати, які з величин задано в умові задачі, які треба визначити, і дібрати відповідне співвідношення для розрахунків. Під час розв'язування задач на обчислення потужності, яка виділяється в зовнішньому колі, часто буває доцільно скористатися тим, що ця потужність буде максимальною тоді, коли зовнішній опір кола дорівнює внутрішньому опорю джерела.

Основною розрахунковою формулою розв'язування *задач на теплову дію струму* є формула закону Джоуля — Ленца. Але тут також важливо спочатку з'ясувати, якою з формул закону Джоуля — Ленца зручніше скористатися. Якщо ділянка кола не містить джерел струму, то кількість теплоти, яка виділяється на цій ділянці, можна обчислювати за формулами

$$Q = IUt \text{ і } Q = \frac{U^2}{R} t. \text{ Формула ж } Q = I^2Rt \text{ дає змогу обчислювати кількість}$$

теплоти, яка виділяється струмом на будь-якій ділянці кола, незалежно від процесів, що відбуваються в ній. Іншими словами, перші дві формули визначають кількість теплоти, яка виділяється в колі, за умови, що вся енергія струму перетворюється на внутрішню енергію, якщо ж за рахунок енергії струму виконується механічна робота або відбуваються хімічні процеси, то кількість виділеної в колі теплоти обчислюється тільки за формулою $Q = I^2Rt$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Що називають вузлами розгалуженого електричного кола? **2.** На яких законах ґрунтується перше правило Кірхгофа? **3.** Що таке спад напруги на ділянці кола? **4.** Які ЕРС у контурах вважають додатними, а які — від'ємними? **5.** Якщо в результаті розв'язування задачі отримано від'ємне значення сили струму, то що це означає?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Визначте сили струмів в резисторах R_1 , R_2 , R_3 (мал. 26, а), якщо $R_1 = 16$ Ом, $R_2 = 12$ Ом, $R_3 = 10$ Ом, $\varepsilon_1 = 5$ В, $r_1 = 4$ Ом, $\varepsilon_2 = 6$ В, $r_2 = 3$ Ом.

Дано:

$$R_1 = 16 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 12 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 10 \text{ Ом}$$

$$\varepsilon_1 = 5 \text{ В}$$

$$r_1 = 4 \text{ Ом}$$

$$\varepsilon_2 = 6 \text{ В}$$

$$r_2 = 3 \text{ Ом}$$

$$I_1 \text{ — ?}$$

$$I_2 \text{ — ?}$$

$$I_3 \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Скориставшись *методом суперпозиції*, вважатимемо, що ЕРС другої батареї дорівнює нулю, і визначимо розподіл струмів, зумовлений першою батареєю (мал. 26, б).

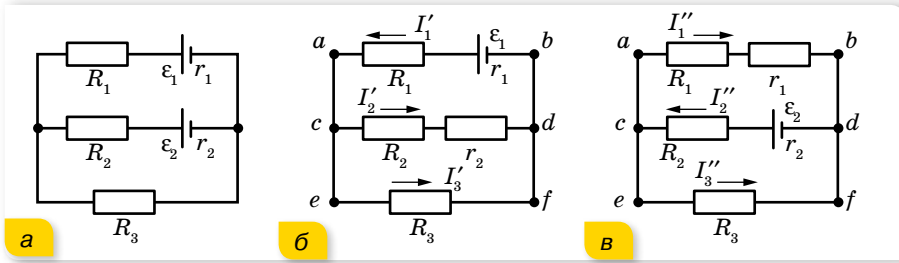
Замінімо опори R_2 , R_3 та r_2 еквівалентним опором:

$$R' = \frac{(R_2 + r_2)R_3}{R_2 + r_2 + R_3}, R' = 6 \text{ Ом.}$$

$$\text{Тоді } I_1' = \frac{\varepsilon_1}{R' + R_1 + r_1}, I_1' \approx 0,192 \text{ А.}$$

Напруга між точками c і d дорівнює

$$U_{cd} = \varepsilon_1 - I_1'(r_1 + R_1), U_{cd} = 1,15 \text{ В.}$$



Мал. 26

Тепер вважатимемо, що ЕРС першої батареї дорівнює нулю, й аналогічно визначимо розподіл струмів, зумовлений другою батареєю (мал. 26, в).

$$I_1'' = 0,092 \text{ А}, I_2'' = 0,277 \text{ А}, I_3'' = 0,185 \text{ А}.$$

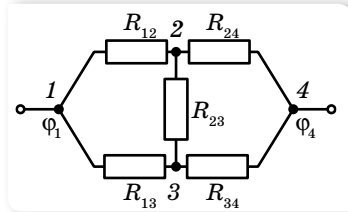
Результуючий розподіл струмів у колі:

$$I_1 = I_1' - I_1'' = 0,1 \text{ А}, I_2 = I_2' - I_2'' = 0,2 \text{ А},$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' = 0,3 \text{ А}.$$

Відповідь: $I_1 = 0,1 \text{ А}$, $I_2 = 0,2 \text{ А}$, $I_3 = 0,3 \text{ А}$.

Задача 2. В електричному колі (мал. 27) $R_{12} = 4 \text{ Ом}$, $R_{24} = 1 \text{ Ом}$, $R_{13} = 2 \text{ Ом}$, $R_{34} = 3 \text{ Ом}$, $R_{23} = 2 \text{ Ом}$ і $\varphi_1 - \varphi_4 = 15 \text{ В}$. Обчисліть силу струму, що проходить по кожній вітці.



Мал. 27

Дано:

$$R_{12} = 4 \text{ Ом}; R_{24} = 1 \text{ Ом}$$

$$R_{13} = 2 \text{ Ом}; R_{34} = 3 \text{ Ом}$$

$$R_{23} = 2 \text{ Ом}$$

$$\varphi_1 - \varphi_4 = 15 \text{ В}$$

$$I_{12} - ?; I_{24} - ?; I_{13} - ?$$

$$I_{34} - ?; I_{23} - ?$$

Розв'язання:

Скористаємось *методом вузлових потенціалів*.

Позначимо потенціали вузлів цього кола через φ_1 , φ_2 , φ_3 та φ_4 . Потенціал однієї з точок кола завжди можна вважати таким, що дорівнює нулю. Тоді, оскільки $\varphi_1 - \varphi_4 = 15 \text{ В}$, то можна вважати, що $\varphi_1 = 15 \text{ В}$, а $\varphi_4 = 0$. Потенціали φ_2 та φ_3 не відомі.

Виразимо всі сили струмів у колі через вузлові потенціали:

$$I_{12} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_{12}} = \frac{15 - \varphi_2}{4}, \quad I_{24} = \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R_{24}} = \frac{\varphi_2}{1},$$

$$I_{13} = \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{R_{13}} = \frac{15 - \varphi_3}{2}, \quad I_{34} = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{R_{34}} = \frac{\varphi_3}{3},$$

$$I_{23} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_{23}} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}.$$

За законом Кірхгофа для сил струмів можна записати:

$$I_{12} = I_{24} + I_{23}, \quad I_{34} = I_{13} + I_{23}.$$

Взявши до уваги ці співвідношення, отримуємо:

$$\frac{15 - \varphi_2}{4} = \frac{\varphi_2}{1} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}, \quad \frac{\varphi_3}{3} = \frac{15 - \varphi_3}{2} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}.$$

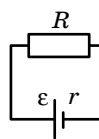
Розв'язавши цю систему з двох рівнянь, дістанемо значення невідомих потенціалів: $\varphi_2 = 4,2$ В та $\varphi_3 = 7,2$ В.

Підставивши ці значення в рівності, які виражають сили струмів через вузлові потенціали, отримаємо: $I_{12} = 2,7$ А, $I_{24} = 4,2$ А, $I_{13} = 3,9$ А, $I_{34} = 2,4$ А та $I_{23} = -1,5$ А.

Сила струму I_{23} від'ємна, це означає, що вона напрямлена не від вузла 2 до вузла 3, як ми припустили, склавши рівняння, а в протилежному напрямку.

Відповідь: $I_{12} = 2,7$ А; $I_{24} = 4,2$ А; $I_{13} = 3,9$ А; $I_{34} = 2,4$ А; $I_{23} = -1,5$ А.

Задача 3. ЕРС акумулятора — ε , а внутрішній опір — r . Визначте: а) різницю потенціалів U на клеммах акумулятора, якщо на зовнішньому опорі (мал. 28) виділяється потужність P (поясніть неоднозначність відповіді); б) залежність ККД η акумулятора та корисної потужності P_{κ} від зовнішнього опору R . Накресліть графіки залежності $\eta(R)$ та $P_{\kappa}(R)$. Визначте максимальне значення P_{\max} і встановіть, за якого R воно досягається.



Мал. 28

Дано:

ε, r, P, R

U — ?; $\eta(R)$ — ?

$P_{\kappa}(R)$ — ?

P_{\max} — ?; R — ?

Розв'язання:

а) На зовнішньому опорі R виділяється потужність

$$P = IU, \text{ де } U = \varepsilon - Ir, \text{ а } I = \frac{\varepsilon - U}{r}. \text{ Тобто } P = \frac{\varepsilon U - U^2}{r}.$$

Розв'язавши квадратне рівняння, отримуємо: $U_{1,2} = \frac{\varepsilon}{2} \pm \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{4} - Pr}$.

Два значення U пояснюються тим, що та сама потужність P може виділятися на різних зовнішніх опорах (R_1 чи R_2) при відповідних силах струму (I_1 та I_2).

б) ККД визначається за формулою $\eta = \frac{U}{\varepsilon}$, де $U = \varepsilon - IR$, $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$,

тобто $U = \varepsilon \left(1 - \frac{r}{R+r}\right) = \frac{\varepsilon R}{R+r}$, і тоді $\eta = \frac{R}{R+r}$.

Графік залежності $\eta(R)$ наведено на малюнку 29, а.

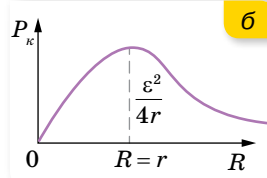
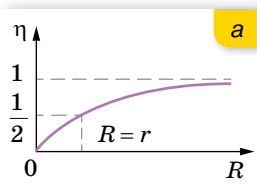
Корисна потужність $P_{\kappa} = \frac{U^2}{R}$. Ураховуючи, що

$U = \varepsilon - IR$, а $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$, тобто $U = \frac{\varepsilon R}{R+r}$, формула

для корисної потужності набуває вигляду $P_{\kappa} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}$.

Графік залежності $P_{\kappa}(R)$ зображено на малюнку 29, б.

Максимальне значення P_{\max} можна визначити двома способами.



Мал. 29. Графіки залежності: а — $\eta(R)$; б — $P_{\kappa}(R)$

I спосіб. Дослідимо на мінімум функцію $\frac{1}{P_{\kappa}} = \frac{(R+r)^2}{\varepsilon^2 R} = \frac{1}{\varepsilon^2} \left(R + \frac{r^2}{R} + 2r \right)$.

Оскільки $\left(\sqrt{R} - \frac{r}{\sqrt{R}} \right)^2 \geq 0$, то $R + \frac{r^2}{R} \geq 2r$, а тому $\left(R + \frac{r^2}{R} + 2r \right) = 4r$

і мінімум досягається, очевидно, якщо $R = r$. Отже, $P_{\max} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$.

II спосіб. Корисна потужність:

$$P_{\kappa} = \frac{\varepsilon U - U^2}{r} = \frac{1}{r} \left[\frac{\varepsilon^2}{4} - \left(U - \frac{\varepsilon}{2} \right)^2 \right].$$

Із цього виразу видно, що P_{κ} максимальне, коли $\left(U - \frac{\varepsilon}{2} \right)^2 = 0$, тобто

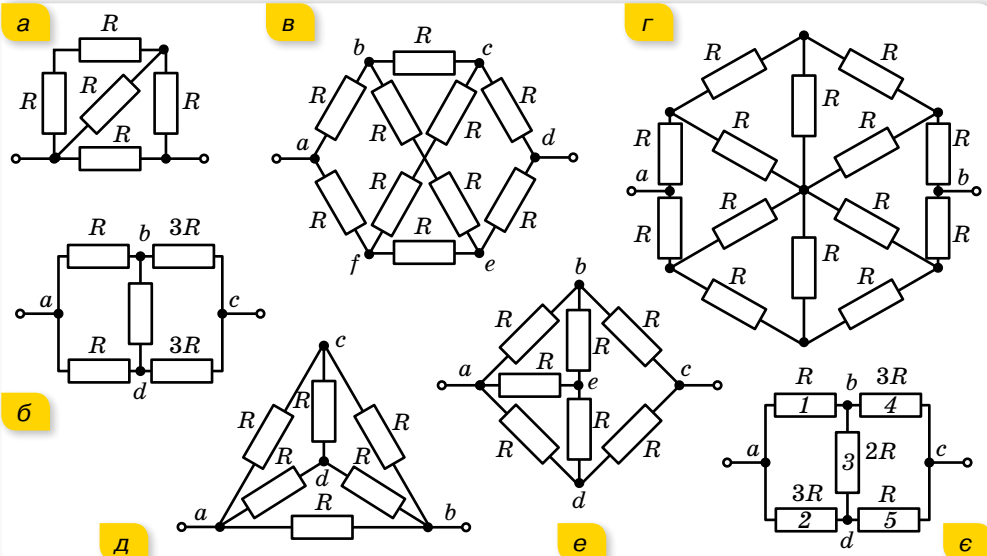
коли $U = \frac{\varepsilon}{2}$. До того ж $P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$, а $R_{\max} = \frac{U^2}{P_{\max}} = \frac{\varepsilon^2}{4 \left(\frac{\varepsilon^2}{4} \right)} = r$.

Відповідь: $U_{1,2} = \frac{\varepsilon}{2} \pm \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{4} - Pr}$; $\eta = \frac{R}{R+r}$; $P_{\kappa} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}$; $P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$; $R=r$.



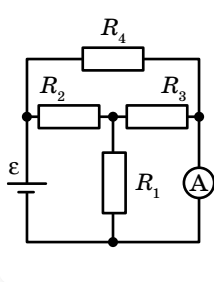
Вправа 4

1. Визначте загальний опір ділянки кола в кожному з випадків, зображених на малюнку 30. Опір кожного провідника — 1 Ом.

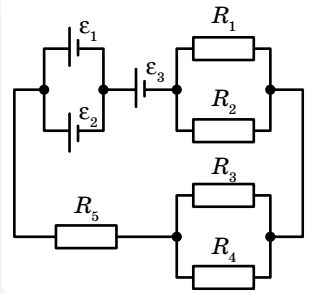


Мал. 30

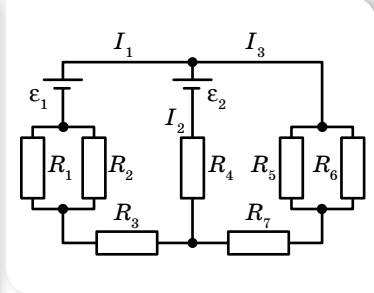
- Що покаже амперметр у схемі (мал. 31), якщо $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 15 \text{ Ом}$, $\varepsilon = 30 \text{ В}$? Опором амперметра знехтуйте.
- Визначте силу струму I в колі (мал. 32), якщо в кожного елемента $\text{EPC} = 2,2 \text{ В}$, а внутрішній опір 20 мОм . $R_1 = R_2 = 2 \text{ Ом}$, $R_3 = 6 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$ та $R_5 = 0,9 \text{ Ом}$.
- Визначте струми в ділянках кола I_1 , I_2 , I_3 (мал. 33), якщо $\varepsilon_1 = 27 \text{ В}$, $\varepsilon_2 = 30 \text{ В}$, $r_1 = 30 \text{ мОм}$, $r_2 = 50 \text{ мОм}$, $R_1 = R_2 = R_5 = 8 \text{ Ом}$, $R_3 = 1,97 \text{ Ом}$, $R_4 = 2,95 \text{ Ом}$, $R_6 = 12 \text{ Ом}$, $R_7 = 1,2 \text{ Ом}$.



Мал. 31

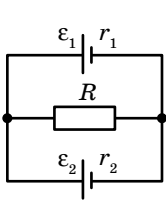


Мал. 32

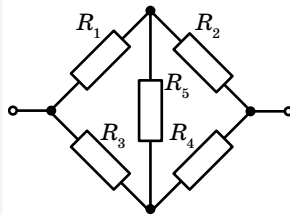


Мал. 33

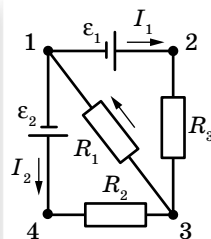
- У колі, зображеному на малюнку 34, $\varepsilon_1 = 2 \text{ В}$, $\varepsilon_2 = 1 \text{ В}$, $r_1 = 1 \text{ Ом}$, $r_2 = 0,5 \text{ Ом}$, $R = 0,5 \text{ Ом}$. Визначте розподіл струмів.
- У колі, зображеному на малюнку 35, $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 40 \text{ Ом}$, $R_4 = 20 \text{ Ом}$. До кола прикладено напругу $U = 60 \text{ В}$. Через ділянку з опором R_2 проходить струм 4 А . Визначте опір R_5 .
- У схемі, зображеній на малюнку 36, $\varepsilon_1 = 2 \text{ В}$, $\varepsilon_2 = 2,4 \text{ В}$, $R_1 = 50 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 15 \text{ Ом}$. Визначте силу струму для кожної ділянки кола. Внутрішнім опором джерел струму знехтуйте.
- У схемі (мал. 37) визначте всі сили струмів, якщо $\varepsilon = 1,5 \text{ В}$, $r = 0,1 \text{ Ом}$, $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 1,6 \text{ Ом}$, $R_3 = R_5 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 1,2 \text{ Ом}$.



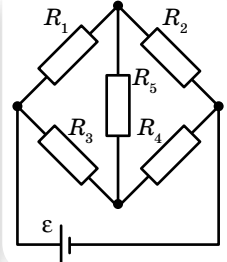
Мал. 34



Мал. 35



Мал. 36



Мал. 37

- До батареї, EPC якої 50 В і внутрішній опір 5 Ом , під'єднано зовнішнє навантаження, яке дає можливість змінювати струм у колі від 0 до 10 А послідовно через 1 А . Побудуйте графіки залежності сили струму від: а) потужності струму, що виділяється джерелом на зовнішньому навантаженні; б) потужності, що споживається джерелом; в) повної потужності; г) ККД джерела.
- EPC джерела — 24 В , опір зовнішньої ділянки кола — 10 Ом , спад напруги на джерелі — 4 В . Визначте напругу на затискачах джерела, потужність, що споживається зовнішнім навантаженням, потужність втрат енергії в джерелі та повну потужність.



Виконємо навчальні проекти

- ▶ Заходи та засоби безпеки під час роботи з електричними пристроями.
- ▶ Чому автомобілі з «електричним серцем» захоплюють світ?
- ▶ Сучасні українські вчені, які зробили вагомий внесок у розвиток фізики й астрономії.
- ▶ Технології електрозбереження на рівнях: робочого місця, власного житла, населеного пункту, регіону, країни, планети.
- ▶ Струм лікує? Вплив струму на організм людини.
- ▶ Дива провідників та ізоляторів. Чи проводить пластмаса електричний струм?

§5

Електричний струм у металах

Класична та квантова теорії провідності металів. Численні експерименти з електрики, виконані різними вченими в XIX—XX ст., стали підґрунтям для створення теорії електричної провідності металів. Вона дістала назву *класичної електронної теорії електропровідності металів*. Класична електронна теорія спирається на кілька фундаментальних припущень, зокрема:

- 1) усі метали мають кристалічну будову;
- 2) простір між вузлами кристалічної ґратки заповнений електронним газом (так називають сукупність вільних електронів (електронів провідності), що втратили зв'язки з атомами, яким вони належали);
- 3) у середньому кожний атом металу втрачає один електрон (іншими словами, концентрація електронів провідності в металах дорівнює кількості атомів в одиниці об'єму металу, $n_e = n_a$);
- 4) до електронного газу в металах застосовні всі закони молекулярно-кінетичної теорії, тобто електронний газ розглядається як ідеальний газ;
- 5) рух вільних електронів у металі підпорядковується класичним законам механіки;
- 6) у разі зіткнення електронів з йонами електрони повністю передають їм свою кінетичну енергію.

Незважаючи на те, що деякі припущення спотворюють дійсну картину електропровідності металів, на підставі цієї теорії все ж вдалося пояснити основні закони проходження електричного струму в металах.

Більш точний опис (зокрема й тих процесів, які не могла пояснити класична теорія) дає *квантова теорія провідності твердих тіл*. Оскільки з поняттями квантової фізики ми детальніше ознайомимося в кінці нашого курсу, то обмежимося лише деякими положеннями квантової теорії провідності металів. У квантовій теорії, на відміну від класичної, вважають:

- 1) енергія електронів змінюється певними порціями, тобто електрони можуть мати лише певні «дозволені» значення енергій;

- 2) середня кінетична енергія електронного газу з наближенням до абсолютного нуля не залежить від температури;
- 3) рух електронів у твердому тілі не є рухом частинок у звичайному, класичному розумінні, а є поширенням електронних хвиль.

Квантова теорія провідності більш точно описує явища електропровідності твердих тіл, проте і вона є наближеною.

Пояснення електропровідності металів на основі класичної електронної теорії провідності. Спираючись на основні положення класичної електронної теорії, розглянемо закономірності електричного струму в металах.

Як йони кристалічної ґратки, так і електрони беруть участь у тепловому русі. Йони здійснюють теплові коливання поблизу положень рівноваги — вузлів кристалічної ґратки. Вільні електрони рухаються хаотично і під час свого руху стикаються з йонами ґратки. У результаті таких зіткнень устанавлюється термодинамічна рівновага між електронним газом і йонами ґратки. Згідно з класичною теорією, можна оцінити середню швидкість теплового руху електронів за формулами молекулярно-кінетичної теорії. За кімнатної температури вона наближено дорівнює $10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. У зовнішньому електричному полі в металевому провіднику, крім теплового руху електронів, виникає їхній упорядкований рух. Оцінимо швидкість упорядкованого руху електронів у металевому провіднику, скориставшись прийомом, який ми використовували для виведення основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів.

За час Δt через поперечний переріз провідника S пройдуть усі електрони, які містяться в об'ємі $V = S\bar{v}\Delta t$, де \bar{v} — середня швидкість упорядкованого руху електронів.

Кількість електронів N у виділеному об'ємі можна визначити через їхню концентрацію n :

$$N = nV.$$

Підставивши значення об'єму V , отримаємо:

$$N = n\bar{v}\Delta t S.$$

Якщо за час Δt через поперечний переріз провідника площею S проходить N електронів, то загальний заряд, який вони переносять, $q = eN = en\bar{v}\Delta t S$.

Оскільки сила струму визначається формулою $I = \frac{q}{\Delta t}$, то $I = en\bar{v}S$.

Звідки середня швидкість упорядкованого руху електронів $\bar{v} = \frac{I}{enS}$.

Оцінимо величину швидкості впорядкованого руху електронів для мідного провідника з площею перерізу 1 мм^2 , по якому проходить струм силою 1 А . Зауважимо, що $n_e = n_a$ і для міді концентрація атомів становить величину порядку 10^{29} м^{-3} .

Підставляючи значення вказаних величин, отримуємо:

$$\bar{v} = \frac{1 \text{ А}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \approx 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Як видно з розрахунків, швидкість упорядкованого руху електронів майже в 10^9 разів менша від швидкості їх теплового (хаотичного руху). Але з практики відомо, що всі електроприлади, увімкнені в коло, починають працювати одночасно (відразу після замикання кола). Звідси випливає, що *швидкість поширення електричного струму в провіднику і швидкість упорядкованого руху електронів в ньому — це не одне й те саме!*

Класична теорія провідності пояснює механізм проходження електричного струму в металевих провідниках. За відсутності електричного поля у провіднику електрони беруть участь у тепловому (хаотичному) русі. У разі створення на кінцях провідника різниці потенціалів на електрони діє електрична сила $\vec{F} = e\vec{E}$, що надає їм прискорення, яке вони швидко втрачають через зіткнення з йонами кристалічної ґратки. У результаті встановлюється деяка середня швидкість упорядкованого руху електронів — її називають *середньою швидкістю дрейфу*. Як відомо, тепловий рух електронів не припиняється ніколи, тому електрони з величезними швидкостями рухаються в усіх напрямках, і на тлі цього хаотичного руху відбувається повільний «дрейф» у напрямку, протилежному напрямку напруженості електричного поля. Швидкість поширення електричного поля в провіднику (як і швидкість поширення будь-якого електромагнітного випромінювання) становить близько $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. Отже, кожний вільний електрон металу починає «дрейф», відчувши дію електричного поля, практично в мить замикання кола.

Класична теорія провідності пояснює також механізм виникнення електричного опору металевих провідників. Опір металів зумовлений взаємодією електронів, що рухаються в провіднику, з йонами кристалічної ґратки. У процесі взаємодії електрони втрачають частину енергії, яку вони отримують в електричному полі. Ця енергія перетворюється на внутрішню енергію. Отже, під час проходження по металевому провіднику електричного струму він нагрівається. З підвищенням температури амплітуда коливань йонів зростає, і частішими стають співударі електронів з йонами. Тому можна стверджувати, що опір металів має залежати від температури.

Залежність опору металів від температури. Досліджуючи явище проходження електричного струму через металеві провідники в курсі фізики основної школи, ми встановили залежність опору металів від температури, а саме: $R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$, де R_0 — опір провідника за $T = 273 \text{ К}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$), R — опір за температури T , ΔT — різниця температур, α — температурний коефіцієнт опору.

У процесі нагрівання провідника збільшення його довжини та площі перерізу взаємно компенсуються, тому здебільшого змінюється питомий опір: $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$. Зміна питомого опору речовини характеризується сталою для цієї речовини величиною — температурним коефіцієнтом опору α . Він дорівнює відносній зміні питомого опору провідника за його

нагрівання на 1 К, $\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T}$, тут ρ_0 — питомий опір за температури $T = 273 \text{ К}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$), а ρ — питомий опір за температури T .

Для чистих металів температурні коефіцієнти опору відрізняються мало і приблизно дорівнюють $0,004 \text{ К}^{-1}$. Температурні коефіцієнти опору сплавів значно менші, ніж у чистих металів. Існують спеціальні сплави, опір яких майже не змінюється зі зміною температури. Такими сплавами є константан, манганін. Температурний коефіцієнт опору в манганіні майже в 400 разів менший, ніж у міді. Властивості цих матеріалів використовують для виготовлення точних електровимірювальних приладів та еталонів опору. Для вимірювання температури використовують термометри опору.

Надпровідність. У 1911 р. голландський фізик Гейке Камерлінг-Оннес уперше виявив зникнення електричного опору у ртуті за її охолодження до температури, нижчої від $4,12 \text{ К}$. У 1913 р. цей ефект було виявлено в білого олова (за температури $3,69 \text{ К}$) та свинцю ($7,26 \text{ К}$). У лабораторних дослідженнях у посудині Дьюара¹ з рідким гелієм протягом трьох років зберігалось надпровідне свинцеве кільце зі струмом без джерела живлення. За цей час найчутливіші прилади не виявили жодного зменшення значення сили струму в кільці. Це явище дістало назву *надпровідності*.

Надпровідність — властивість деяких провідників стрибкоподібно зменшувати питомий опір до нуля за умови охолодження нижче певної *критичної* температури.

Речовини в надпровідному стані мають надзвичайно цікаві властивості. Про одну з них ми вже сказали — у кільцевому провіднику в надпровідному стані сила струму може не змінюватись як завгодно довго без джерела живлення. Другою важливою особливістю надпровідників є неможливість створити всередині речовини в надпровідному стані магнітне поле. Зовнішнє магнітне поле не проникає всередину надпровідників. І третя особливість надпровідників — надпровідний стан руйнується в достатньо сильному магнітному полі.

Дослідження надпровідності триває й досі.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Чим зумовлена провідність металів? **2.** Як рухаються електрони провідності в металічному провіднику, коли в ньому: а) немає електричного поля; б) створене електричне поле? **3.** Чому на всіх ділянках електричного кола прилади починають діяти майже

¹ *Дьюарівська посудина* (термос) — ємність, стінки якої мають високу теплоізоляційну здатність. Посудина Дьюара була винайдена шотландським фізиком і хіміком сером Джеймсом Дьюаром в 1892 р. Перші дьюарівські посудини для комерційного використання випустили в 1904 р., коли була заснована німецька компанія «Термос» (нім. Thermos GmbH).

миттєво, незважаючи на малу швидкість дрейфу електронів? **4.** Коли через спіраль електричної лампи протікає більший електричний струм: у момент увімкнення чи коли вона починає світитись? **5.** У чому полягає явище надпровідності металів, які ефекти підтверджують його існування?



Експериментуємо

- Є моток тонкого мідного дроту (без ізоляції). Визначте довжину дроту й площу поперечного перерізу. Обладнання: терези, омметр.
- В одній непрозорій коробці міститься електрична лампа, клеми якої виведено назовні коробки, в іншій — резистор. Визначте, у якій з коробок міститься резистор. Обладнання: джерело струму, міліамперметр, два мілівольметри, з'єднувальні провідники, вимикач.
- Побудуйте графік залежності опору нитки розжарення електричної лампи від сили струму в ній. Обладнання: електрична лампа на 3,5 В, джерело струму (батарейка) на 3,5 В, амперметр, реостат, з'єднувальні провідники, вимикач.



Вправа 5

- Опір 100-ватної електролампи, що працює під напругою 120 В, у розжареному стані в 10 разів більший, ніж у холодному. Визначте її опір у холодному стані (за $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$) і середній температурний коефіцієнт опору, якщо температура розжарення нитки $t_2 = 2000\text{ }^\circ\text{C}$.
- Визначте довжину нікелінового провідника діаметром 0,5 мм, який використали для виготовлення нагрівального приладу, що має опір 48 Ом за температури $800\text{ }^\circ\text{C}$. Температурний коефіцієнт опору нікеліну $\alpha = 2,1 \cdot 10^{-4}\text{ K}^{-1}$, а питомий опір його $\rho = 0,42 \cdot 10^{-6}\text{ Ом} \cdot \text{м}$.
- Мідний і графітовий стержні однакової товщини з'єднані послідовно. За якого співвідношення їхніх довжин опір цієї системи не буде залежати від температури?
- На скільки відрізняється опір лінії електропередачі взимку та влітку, якщо її виготовлено із залізного дроту перерізом S ? Температура змінюється від $-t$ до t . Довжина дроту за $0\text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює l_0 . Як зміниться відповідь, якщо врахувати лінійне розширення дроту за нагрівання?

§ 6

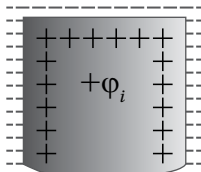
Термоелектричні явища

Робота виходу електронів з металу. У 1961 р. Яків Ілліч Френкель висунув гіпотезу для пояснення природи сил, які утримують електрони в металах. Він припустив, що електрони, обертаючись навколо ядер атомів, утворюють негативно заряджений шар на поверхні металу. Розміщені глибше ядра атомів утворюють позитивно заряджений шар. Електричне поле цього подвійного шару, немов у плоскому конденсаторі, діє на вільні електрони із силою, напрямленою всередину металу.

Отже, біля поверхні металу існує «електронна хмарка», заряджена негативно (мал. 38, а; с. 36). Товщина цієї хмарки є величиною одного порядку з розміром атома (10^{-10} м). При цьому метал, охоплений негативною



а



б

Мал. 38.

а — «електронна хмарка»;

б — подвійний поверхневий шар

електронною хмаркою, відносно вакууму заряджений позитивно (мал. 38, б). Позитивний потенціал внутрішньої частини металу відносно вакууму називають *внутрішнім потенціалом*.

Потенціальну енергію вільних електронів у вакуумі (поза металом) прийнято вважати за нуль, тоді всередині металу з позитивним внутрішнім потенціалом потенціальна енергія електронів провідності від'ємна, $W = -e\varphi_i$. Тому стверджують, що електрони провідності в металах перебувають у потенціальній ямі з плоским дном (мал. 39) (плоским через те, що поверхневий шар утворює електричне поле, подібне до поля плоского конденсатора).

Для виходу електрона з металу у вакуум потрібно подолати потенціальний бар'єр — поле подвійного поверхневого шару. Це потребує додаткової енергії, яка має бути не меншою від глибини потенціальної ями. Таку енергію електрони провідності можуть дістати внаслідок освітлення металу (*зовнішній фотоефект*), нагрівання (*термоелектронна емісія*), бомбардування поверхні металу потоком електронів у вакуумі (*вторинна електронна емісія*), під дією сильного електричного поля (*автоелектронна емісія*) тощо.

Найменша додаткова енергія, яку необхідно передати електрону провідності в металі для його виходу у вакуум, називається *роботою виходу*. Робота виходу дорівнює глибині потенціальної ями, $A_i = e\varphi_i$.



Мал. 39. Потенціальна яма

Контактна різниця потенціалів. Той факт, що різні метали мають неоднакові внутрішні потенціали φ_i , є основою явища, яке дістало назву *контактної різниці потенціалів*.

Ще в 1797 р. італійський фізик Алессандро Вольта довів, що в місці контакту (дотику) двох різних металів виникає різниця потенціалів, яку тепер називають контактною. Досліджуючи різні метали, А. Вольта розмістив їх у ряд (ряд Вольта), у якому кожний наступний метал у контакті з будь-яким попереднім електризується негативно (набуває негативного потенціалу):

+ Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd –

Наприклад, залізо в контакті зі свинцем, оловом чи цинком завжди набуває негативного потенціалу.

Експериментально Вольта відкрив два закони:

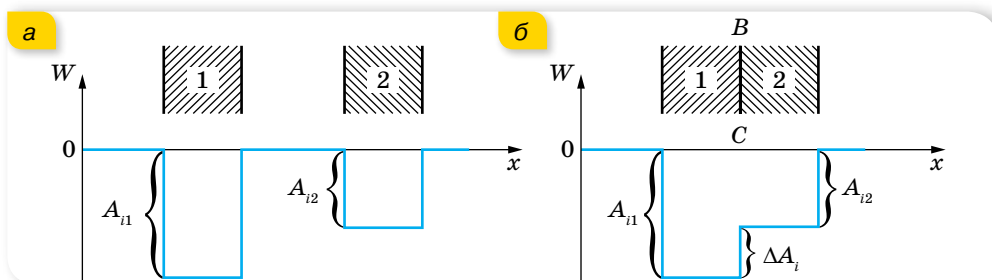
Перший. Унаслідок дотику двох провідників з різних металів між ними виникає контактна різниця потенціалів, величина якої залежить від хімічного складу речовини провідників та їх температури.

Другий. Контактна різниця потенціалів, що виникає на кінцях розімкненого кола, складеного з кількох послідовно з'єднаних металевих провідників, які перебувають за однакової температури, не залежить від хімічного складу проміжних провідників і дорівнює контактній різниці потенціалів крайніх провідників.

Це означає, що на кінцях розімкненого кола, складеного, наприклад, з перших п'яти металів ряду Вольта, контактна різниця потенціалів буде такою самою, як і за контакту свинцю з алюмінієм.

Причинами виникнення контактної різниці потенціалів є: 1) різна робота виходу електронів із цих металів; 2) неоднакова густина електронного газу в них.

Розглянемо, до чого приводить відмінність у роботі виходу електронів з металів. Нехай є пластинки 1 і 2, виготовлені з різних металів, причому $A_{11} > A_{12}$. Їх енергетичні діаграми (залежність зміни потенціальної енергії електрона від координати x над поверхнею металу) зображено на малюнку 40, а.



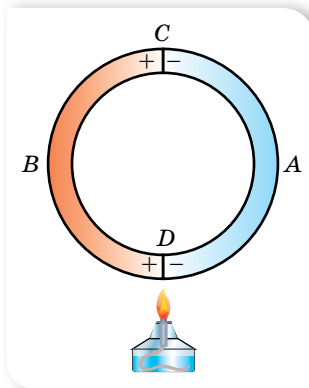
Мал. 40. а — енергетичні діаграми двох різних металів;
 б — енергетична діаграма їх контакту

Наблизимо ці пластинки так, щоб вони дотикались. Тоді потенціальна крива енергетичної діаграми матиме вигляд, зображений на малюнку 40, б. З діаграми видно, що для переходу з металу 1 у метал 2 електрон має виконати роботу ΔA_i . Енергії теплового руху і за кімнатної температури може бути достатньо для подолання цього бар'єра, але під час переходу з металу 1 у метал 2 електрони повинні подолати потенціальну сходинку, а під час переходу з металу 2 в метал 1 електрони самі «скочуються». Із цього випливає, що справа наліво має переходити більше електронів, ніж у зворотний бік. Тому метал 1 заряджається негативно, а метал 2 — позитивно, тобто між ними виникає електричне поле. Це поле зосереджене в тонкому перехідному шарі між металами. Воно гальмує перехід електронів з металу 2 в метал 1. Тому потоки в обидва боки вирівнюються — встановлюється динамічна рівновага.

Контактна різниця потенціалів, зумовлена різною роботою виходу електронів з контактуючих металів, може досягти кількох вольт і практично не залежить від температури.

Контактна різниця потенціалів між металами, яка зумовлена різною концентрацією вільних електронів у цих металах, не перевищує кількох сотих часток вольт і зростає з підвищенням температури.

Термоелектрорушійна сила. З другого закону Вольта випливає важливий висновок: у замкненому колі, що складається з довільного числа твердих провідників з електронним механізмом провідності, усі контакти яких перебувають за однакової температури, результуюча контактна різниця потенціалів дорівнює нулю. Якщо ж температури контактів будуть різні, у колі виникає електрорушійна сила. Уперше таке явище спостерігав у 1821 р. німецький фізик Томас Зеєбек (1770–1831).



Мал. 41. Нагрівання спаю з двох провідників

Справді, розглянемо замкнене коло (мал. 41) з двох електронних провідників A і B з різними концентраціями електронів ($n_B > n_A$). Якщо підігріти контакт (спай) D , то в ньому додаткова кількість електронів перейде з металу B в метал A , і контактна різниця потенціалів у з'єднанні D зросте. Оскільки в металі A на кінці D електронів стало більше, то вони прямуватимуть до кінця C .

Збільшення концентрації електронів на кінці C спричинить їх перехід з металу A в метал B через контакт (спай) C . Звідси вони по металу B перейдуть до контакту D . Якщо температуру контакту весь час підтримувати більшою, ніж контакту C , то по замкненому колу відбуватиметься напрямлений рух електронів (у нашому випадку — проти руху стрілки годинника). У такому колі діє електрорушійна сила (її називають *термоелектрорушійною*).

Термоелектрорушійна сила (термо-ЕРС) — це ЕРС, що виникає в замкненому колі, складеному з різнорідних металів, і зумовлена різними температурами контактів.

Величина термо-ЕРС прямо пропорційна різниці температур контактів. Точнішу залежність термо-ЕРС від різниці температур установив у 1863 р. професор Київського університету Михайло Петрович Авенаріус (1835–1895).

Зауважимо, що термо-ЕРС невелика й досягає для металів лише кількох сотисячних часток вольт на один градус різниці температур контактів у колі. Значно більшу термо-ЕРС мають напівпровідники. Це пояснюється тим, що концентрація електронів у напівпровідниках залежить від температури.

У 1834 р. французький фізик Жан Пельтьє (1785–1845) відкрив інше термоелектричне явище, обернене до ефекту Зеєбека. Якщо в електричному колі, складеному з неоднакових електронних провідників, пропускати постійний струм від зовнішнього джерела (наприклад, від акумулятора), то між контактами цього кола виникає різниця температур. Іншими словами, під час проходження постійного струму по неоднорідному колу відбувається перенесення теплоти від одного контакту до іншого. У результаті один контакт охолоджується, інший — нагрівається.

Застосування термоелектричних явищ у науці й техніці. У сучасній науці й техніці широко використовуються прилади й устаткування, дія яких ґрунтується на термоелектричних явищах.

Прилад, що складається з двох відповідно дібраних металевих провідників (чи напівпровідників) для утворення термо-ЕРС, називається *термопарою* (або термоелементом).

Металеві термопари використовують для вимірювання температури.

Перші спроби практично використати явище Пельтьє було зроблено ще 1838 р., коли російський фізик Емілій Християнович Ленц (1804–1865) на контакті вісмуту із сурмою за допомогою електричного струму заморозив краплину води. Тепер розроблено і створено найрізноманітніші прилади, дія яких ґрунтується на явищі Пельтьє, зокрема термоелектричні холодильники.

Термоелектричні явища застосовують у медицині, радіоелектроніці.

Піонером і лідером досліджень у галузі термоелектрики в Україні є академік НАН України Лук'ян Іванович Анатичук. Ним ініційовано створення Інституту термоелектрики, що нині підпорядкований Національній академії наук та Міністерству освіти і науки України. У 1994 р. створено Міжнародну термоелектричну академію, до складу якої увійшли провідні спеціалісти з 20 країн світу — США, Англії, Франції, Японії, Італії, Росії, України та інших держав. Анатичук Л. І. — президент цієї академії.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

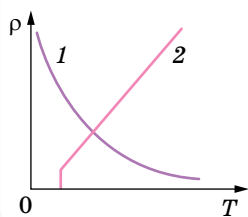
1. Що називають внутрішнім потенціалом металу? Які явища ним зумовлені? **2.** Сформулюйте закони Вольта. **3.** Що називають роботою виходу електрона з металу? Назвіть способи виривання електронів з поверхні металу. **4.** Що таке контактна різниця потенціалів? Від чого вона залежить? **5.** Які явища належать до термоелектричних? Чи можна вважати процес нагрівання провідника внаслідок проходження електричного струму термоелектричним явищем? Наведіть приклади практичного використання термоелектричних явищ.



Електричний струм у напівпровідниках

Власна й домішкова провідності напівпровідників. Як відомо з курсу фізики 8 класу, до напівпровідників належать речовини, що за питомим опором займають проміжне місце між провідниками й ізоляторами (діелектриками). До напівпровідників належить значно більше речовин, ніж до провідників і діелектриків разом. Напівпровідниками є ряд хімічних елементів (Силіцій, Германій, Селен тощо) та деякі оксиди, сульфід, телуриди.

Питомий опір напівпровідників з підвищенням температури не зростає, як у металів, а навпаки, різко зменшується. На малюнку 42 (с. 40)



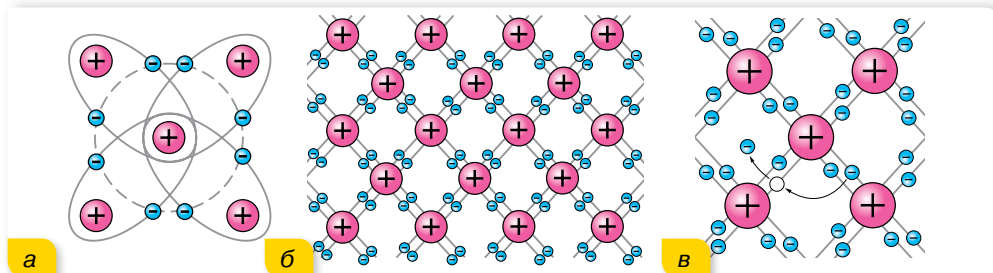
Мал. 42.
Залежності
питомого опору
від температури для
напівпровідника (1)
та провідника (2)

наведено залежності питомого опору від температури для напівпровідника (1) та для металу (2).

Як видно з графіка, з наближенням до абсолютного нуля питомий опір напівпровідника різко зростає, тобто за низьких температур напівпровідник поводить себе як діелектрик. Зі збільшенням температури питомий опір напівпровідників швидко зменшується за експоненціальним законом. Електропровідність напівпровідників залежить також від освітленості (фотопровідності) і від уведення в них атомів деяких інших елементів (домішок).

Пояснимо властивості напівпровідників, розглянувши їхню будову на прикладі чотиривалентного елемента Германію (мал. 43, а). Взаємодія пари сусідніх атомів у кристалі германію здійснюється завдяки ковалентному (парноелектронному) зв'язку (мал. 43, б).

У темряві та за низьких температур усі електрони задіяні в ковалентних зв'язках. Вільних носіїв у кристалі напівпровідника немає, тому кристал не проводить струм, і його опір великий. За цих умов кристал є ізолятором. За підвищення температури кристала (або під дією опромінення світлом, рентгенівськими променями, або за впливу сильних електричних чи магнітних полів) деякі ковалентні зв'язки руйнуються. На місці кожного розірваного зв'язку утворюється вакантне місце з нестачею електрона (мал. 43, в). Така конфігурація називається *діркою*. Електрони й дірки рухаються хаотично. Електрони займають місця дірок (рекомбінують) або вивільняються, розриваючи парноелектронні зв'язки (генеруються вільні електрони й дірки). Процеси генерації та рекомбінації відбуваються безперервно.



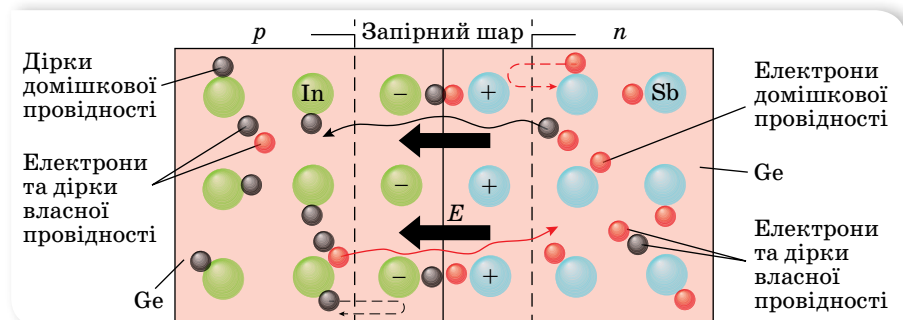
Мал. 43. Схеми: а — будови атома Германію; б — парноелектронного зв'язку в кристалі германію; в — утворення пари електрон-дірка

Якщо такий кристал підключити до джерела струму, то вільні електрони будуть рухатись до позитивного полюса джерела. Поки діє електричне поле, розриваються міжатомні зв'язки — з них вивільняються валентні електрони, залишаючи дірки, а розірвані раніше міжатомні зв'язки (дірки) заповнюються електронами, що вивільнилися з інших міжатомних зв'язків. Виникає враження, що в напівпровіднику, крім руху електронів (*n*-провідність), існує рух позитивно заряджених частинок — дірок (*p*-провідність).

Провідність чистих напівпровідників, що не мають ніяких домішок, називають *власною провідністю напівпровідників*. Власна провідність напівпровідників невелика, оскільки малою є кількість вільних носіїв струму — електронів і дірок. Дуже важлива особливість напівпровідників полягає в тому, що за наявності домішок у них поряд із власною провідністю виникає додаткова — *домішкова провідність*. Домішки, що легко віддають електрони, а отже, збільшують кількість вільних електронів, називають *донорними домішками*. Напівпровідники, в яких електрони є *основними* носіями заряду, називають *напівпровідниками n -типу*. Домішки, що приймають електрони, називають *акцепторними*. Напівпровідники з переважанням діркової провідності над електронною називають *напівпровідниками p -типу*. Змінюючи концентрацію домішок, можна істотно змінити кількість носіїв заряду того чи того знака, а отже, створити напівпровідники з переважною концентрацією або позитивно, або негативно заряджених носіїв.

Електронно-дірковий перехід, його властивості й застосування. Цікаві явища спостерігаються в місці контакту напівпровідників n - і p -типів. Контакт таких двох напівпровідників називають p - n -переходом.

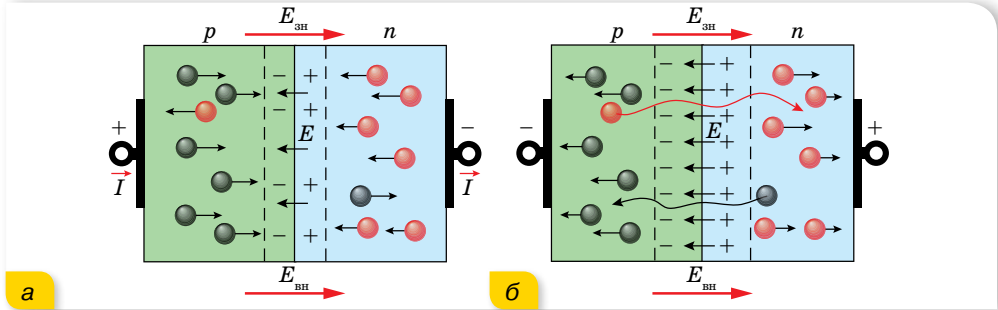
З'єднаємо два напівпровідники: один з донорною, а другий з акцепторною домішкою (мал. 44).



Мал. 44. Рух носіїв заряду в місці контакту напівпровідників n - і p -типів

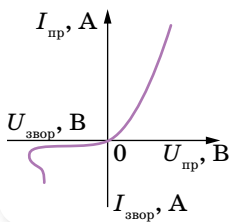
Відразу ж почнеться рух через контакт: електрони переходитимуть з напівпровідника n -типу (де їх багато) у напівпровідник p -типу, а дірки — навпаки (на малюнку 44 це відображено суцільними хвилястими стрілочками). Ця дифузія електронів і дірок відбувалася би до повного вирівнювання їх концентрацій в обох контактуючих напівпровідниках, якби ці частинки не переносили зарядів. Дійсно, унаслідок такого переміщення n -область заряджається позитивно, а p -область — негативно. Виникає контактна різниця потенціалів. Електричне поле перешкоджає дальшій дифузії основних носіїв через межу, відкидаючи основні носії назад у свої області (пунктирні стрілочки на малюнку 44). Крім того, оскільки частина електронів, що перейшли в p -область, рекомбінувала з дірками, і відповідна рекомбінація відбулася в n -області, то утворився шар, збіднений носіями заряду, опір якого досить великий, — *запірний шар*.

Ділянку контакту напівпровідників n - і p -типів провідності називають p - n -переходом, основною властивістю якого є одnobічна провідність. Якщо подати напругу на напівпровідники так, щоб до напівпровідника p -типу під'єднався позитивний полюс батареї, а до напівпровідника n -типу — негативний, то поле в переході буде ослаблене, запірний шар звузиться або зникне і дифузійні потоки основних носіїв (дірок з p -області й електронів з n -області) прямуватимуть через перехід. Такий перехід називають *прямим* (мал. 45, а). Сила струму за збільшення напруги зростає дуже швидко, і закон Ома не виконується.



Мал. 45. Механізм дії прямого (а) та зворотного (б) переходу

Під'єднаємо полюси батареї навпаки (мал. 45, б). У цьому разі зовнішня напруга збігається за знаком з контактною різницею потенціалів. Зовнішнє поле підсилює поле p - n -переходу, і дифузійні потоки основних носіїв струму через перехід значно зменшуються. Струм I в колі стане незначним за тієї ж напруги U , оскільки струм через p - n -перехід забезпечується неосновними носіями заряду, провідність зразка стає незначною, а опір великим. Цей перехід називають *зворотним*.



Мал. 46. Вольт-амперна характеристика p - n -переходу

На вольт-амперній характеристиці залежність сили прямого струму від напруги зображено лінією, що зростає в додатному напрямку осі напруг U (мал. 46). Після перемикування полюсів батареї, коли потенціал напівпровідника p -типу стає від'ємним, а потенціал напівпровідника n -типу — додатним, опір переходу зростає, а струм стає незначним. Сила зворотного струму майже не змінюється в разі зміни напруги. Різке збільшення зворотного струму на краю кривої пов'язане з пробоем напівпровідника.

? ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. Як виникають електронна та діркова провідність напівпровідників? 2. Чому зменшується питомий опір напівпровідників з підвищенням температури? 3. Чому в напівпровіднику з домішковою провідністю існують як основні, так і неосновні носії електричного струму? 4. Є напівпровідникова пластинка з домішковою провідністю. Як дослідним шляхом визначити, якого типу — n - чи p - — є цей напівпровідник?

§ 8

Напівпровідникові прилади та їх застосування

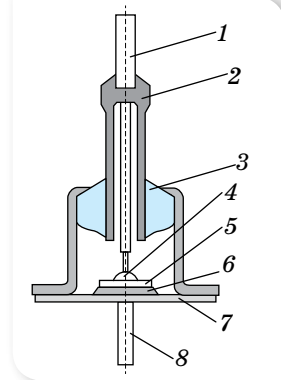
Стрімкий розвиток техніки і технологій став можливим завдяки використанню напівпровідникових приладів. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми є основою сучасної обчислювальної техніки, комп'ютерів. Коротко розглянемо основні типи напівпровідникових приладів та їх застосування.

Напівпровідниковий діод. В одну поверхню кристалу напівпровідника вплавають домішку щоб створити $p-n$ -перехід. Так утворюють *напівпровідниковий діод*. На малюнку 47 зображено будову індій-германієвого діода.

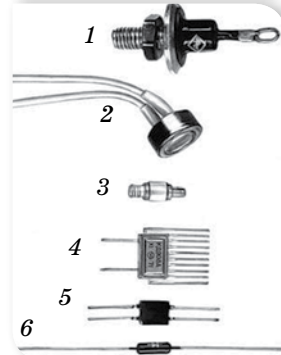
Основна його частина — монокристалічна пластинка германію 5, до одної з поверхонь якої приварено краплю індію 4. Пластинка германію припаяна оловом 6 до основи металевого корпуса 7, який захищає кристал від зовнішнього впливу. Один контактний вихід 8 з'єднаний з пластинкою германію, а інший контактний вихід 1 — з краплею індію. Він проходить у металевій трубці 2, вплавленій у скляний ізолятор 3.

У такому діоді утворюється дещо інший $p-n$ -перехід, ніж розглянутий у попередньому параграфі. Тут реалізується контакт між напівпровідником з власною провідністю (германієм) і шаром напівпровідника, що утворився після сплавляння індію з германієм, тобто напівпровідника з домішковою провідністю p -типу. Але всі діоди мають однобічну провідність, завдяки чому широко використовуються в електроприладах. Різні типи напівпровідникових діодів зображено на малюнку 48.

Стабілітрони. Стабілітрон — це теж діод, але призначений він не для випрямлення змінного струму, хоч і може виконувати таку функцію, а для стабілізації, тобто підтримки постійної напруги в колах живлення радіоелектронної апаратури. Знайшли широке застосування кремнієві стабілітрони, які будовою і принципом роботи аналогічні випрямляючим діодам. Але працює стабілітрон не на прямій ділянці вольт-амперної характеристики, як випрямляючий діод, а на зворотній вітці, де значні зміни зворотного струму через прилад супроводжуються незначними змінами зворотної напруги.



Мал. 47.
Схема будови
індій-германієвого
діода



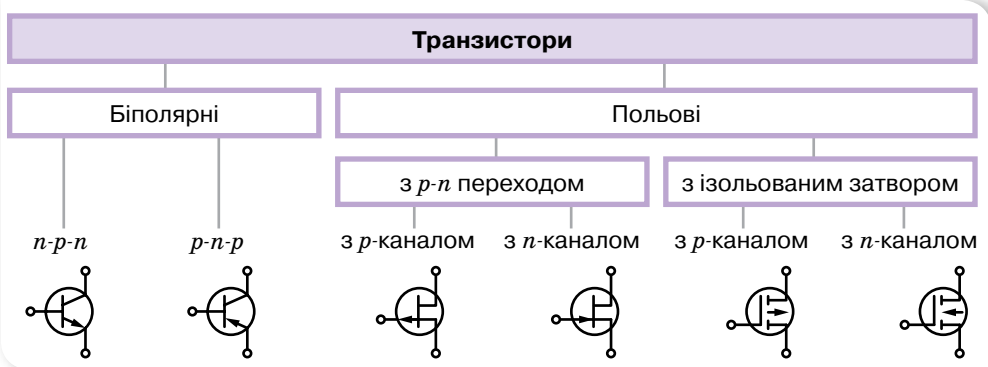
Мал. 48. Напівпровідникові діоди:
1 — випрямний діод;
2 — фотодіод;
3 — діод надвисокої частоти;
4 і 5 — діодні матриці;
6 — імпульсний діод

Термо- і фоторезистори. Прилади, дія яких ґрунтується на використанні залежності опору напівпровідників від температури, дістали назву *терморезисторів* (або *термісторів*).

Терморезистор вмикається в електричне коло того або того пристрою. Його опір значно перевищує опір інших елементів кола і, що найголовніше, сильно залежить від температури. Зміна температури терморезистора спричинює зміну сили струму в колі. Це дає можливість застосовувати терморезистори в різних схемах і створювати автоматичні пристрої для дистанційного вимірювання та регулювання температури, пожежної сигналізації, контролю за температурним режимом механізмів тощо.

У *фоторезисторах* використовується залежність опору напівпровідників від освітлення. Це дає змогу застосовувати їх у різного виду реле (для автоматичного вмикання і вимикання пристроїв, для підрахунку та сортування виробів на конвеєрах тощо).

Транзистори. Термін «*транзистор*» утворений з двох англійських слів: *transfer* — перетворювач і *resistor* — опір. У спрощеному вигляді транзистор є пластиною напівпровідника з ділянками з різною електропровідністю. Існують польові й біполярні транзистори (мал. 49).

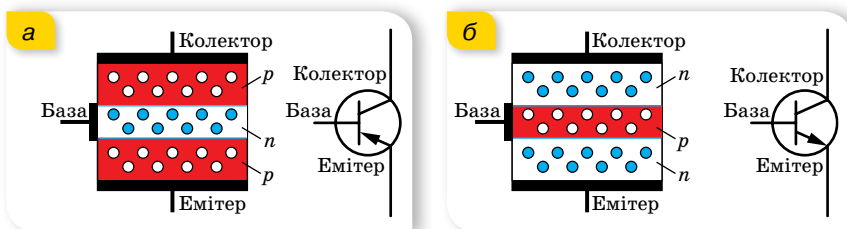


Мал. 49. Класифікація основних типів транзисторів та позначення їх на схемах

Відмінності між ними полягають у способі керування: польові керуються електричним полем, біполярні — струмом. Розглянемо детальніше принципи їх дії.

Біполярним транзистором називається електроперетворювальний напівпровідниковий прилад, що має у своїй структурі два взаємодіючі *p-n*-переходи й три зовнішніх виводи. Якщо крайні області з дірковою електропровідністю, а середня з електронною (мал. 50, а), то такий прилад називають транзистором *p-n-p*-типу. В *n-p-n*-транзисторах, навпаки, крайні ділянки з електронною електропровідністю, а між ними — область з дірковою електропровідністю (мал. 50, б).

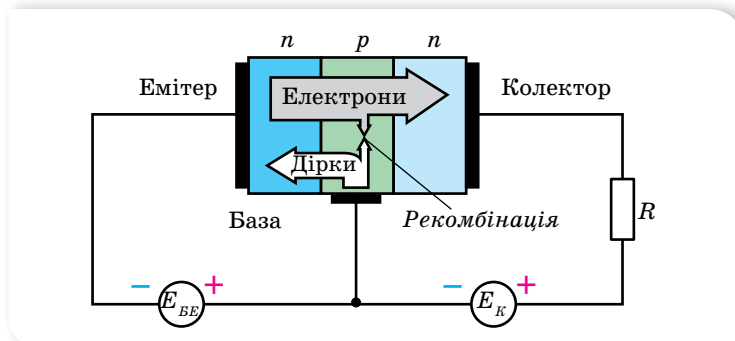
Виводи транзистора називаються *емітером*, базою та *колектором*. На схемах емітер позначається стрілкою, яка вказує напрямок струму, що проходить через транзистор.



Мал. 50. Схема будови та умовне позначення на схемах транзисторів $p-n-p$ -типу (а) і $n-p-n$ -типу (б)

Дія транзистора ґрунтується на використанні двох $p-n$ -переходів між базою та емітером і базою та колектором, тому його і називають «біполярним». Тип $n-p-n$ транзисторів набув найбільшого поширення, порівняно з $p-n-p$ -типом, завдяки кращим характеристикам і параметрам. Це пов'язано з тим, що в $n-p-n$ пристроях головна роль відведена електронам, що забезпечують усі електричні процеси. Їхня рухливість у 2–3 рази вища, ніж у дірок. Крім того, властивості будь-якого приладу поліпшуються за рахунок того, що площа переходу колектора істотно перевищує площу переходу емітера.

Розглянемо роботу транзистора $n-p-n$ -типу (мал. 51). До переходу база–емітер прикладають пряму напругу, під дією якої електрони n -області емітера спрямовуються в базу, створюючи струм емітера. Оскільки вони є неосновними носіями в базі, то легко проникають через $p-n$ -перехід між базою та колектором. В електричному колі колектора формується струм колектора I_K , значення якого пропорційне емітерному струму, $I_K = \alpha I_E$.



Мал. 51. Принцип дії біполярного $n-p-n$ транзистора

База виготовляється достатньо тонкою (частки мікрона), щоб носії заряду не встигли прорекомбінувати. Рекомбінує 1–5% випущених емітером електронів з дірками бази, що викликає струм бази I_B . Цей струм є небажаним і навіть шкідливим. Згідно з першим законом Кірхгофа, між струмами електродів біполярного транзистора завжди є справедливим співвідношення: $I_E = I_B + I_K$.

Практичне значення має керування колекторним струмом потоком електронів, інжекттованих через емітерний перехід. Звідси впливає

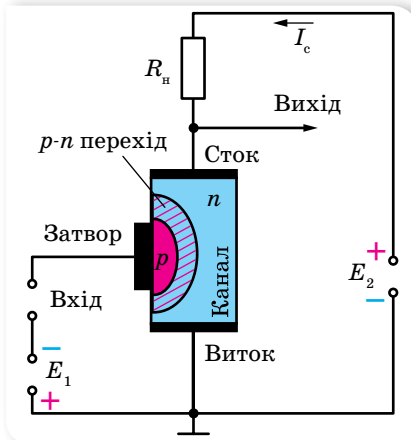
головна властивість біполярного транзистора як керівного (активного) елемента: залежність вихідного (колекторного) струму від вхідної змінної величини (струму емітера або напруги на емітерному переході).

Якщо між базою та емітером прикласти запірну напругу, то струм через ділянку колектор–емітер не протікатиме.

Залежно від того, в яких станах перебувають переходи транзистора, розрізняють режими його роботи. Оскільки в транзисторі є два переходи (емітерний і колекторний) і кожний з них може перебувати у двох станах (відкритому та закритому), розрізняють чотири режими роботи транзистора:

- ▶ відсікання, якщо обидва переходи закриті (максимальний опір);
- ▶ насичення, якщо обидва переходи відкриті (мінімальний опір);
- ▶ активний (режим підсилення), якщо на емітерний перехід подана пряму напругу зміщення, а на колекторний — зворотну (опір змінюється від мінімального до максимального);
- ▶ інверсний, якщо емітерний перехід закритий, а колекторний — відкритий.

До *польових транзисторів* належать пристрої, в яких управління всіма процесами здійснюється електричним полем. У своїй конструкції ці прилади мають три контакти: виток, сток і затвор. Між виток і стоком в кристалі напівпровідника, з якого виготовлений польовий транзистор, розташований *канал*, через який тече струм транзистора. Канал виконується з напівпровідника одного типу, *n* або *p*. Управління струмом, що проходить через канал, здійснюється шляхом зміни провідності каналу, яка залежить від напруги між затвором і витком. На відміну від біполярних транзисторів, у яких струм транзистора від емітера до колектора тече послідовно через два *p-n*-переходи, у польових транзисторах струм тече через канал, який утворюється в напівпровіднику одного типу провідності, а через *p-n*-переходи не тече.



Мал. 52. Принцип дії полярного транзистора з керуючим *p-n* переходом

Зважаючи, що напрямок струму в польовому транзисторі: від витку — через канал — до стоку, й управління струмом здійснюється напругою між затвором і витком, то витік відповідає емітеру біполярного транзистора: сток — колектору, а затвор — базі.

Зміна провідності каналу може здійснюватися двома способами. Залежно від цього польові транзистори поділяють на два основні види: транзистори з керуючим *p-n*-переходом і транзистори з ізольованим затвором.

Розглянемо принцип дії польового транзистора з керуючим *p-n*-переходом. (мал. 52). Дія цього приладу ґрунтується на залежності товщини *p-n*-переходу

від прикладеної до нього напруги. Оскільки p - n -перехід (запірний шар) майже цілком позбавлений рухомих носіїв заряду, його провідність майже дорівнює нулеві. Таким чином, у пластинці напівпровідника утвориться струмопровідний канал, перетин якого залежить від товщини p - n -переходу (запірного шару). Якщо увімкнути джерело живлення E_2 , як показано на малюнку, то через пластинку напівпровідника між невідпрямляючими контактами потече струм від витоку до стоку.

Напівпровідникова область, що використовується для управління величиною струму, який протікає через канал, називається затвором. До кожної з областей приєднуються виводи, що носять відповідні назви (витоку, стоку і затвора). Величина струму в каналі (при E_2 і $R_{\text{н}} = \text{const}$) залежить від опору пластинки між стоком і витокком, тобто від ефективної площі поперечного перерізу каналу.

Джерело E_1 створює від'ємну напругу на затворі, що спричиняє збільшення товщини p - n -переходу та зменшення перетину каналу. Зі зменшенням перетину каналу збільшується опір між витокком і стоком та знижується величина струму I_C . А зменшення напруги на затворі викликає зменшення опору каналу і зростання струму I_C . Отже, струм, що протікає через канал, можна змінювати (модулювати).

Нині широкого поширення набули польові транзистори з ізольованим затвором, так звані МДН-транзистори (метал — діелектрик — напівпровідник) або МОН-транзистори (метал — окисел — напівпровідник).

Транзистор винайшли в 1947 р. Джон Бардін і Волтер Браттейн під керівництвом Вільяма Шоклі з Bell Labs (*Bell Labs* — американська корпорація, великий дослідницький центр у сфері телекомунікацій, електронних і комп'ютерних систем, заснована в 1925 р.), за що отримали Нобелівську премію з фізики. Винахід транзистора став провідним у розвитку обчислювальної техніки (зокрема комп'ютерів). Завдяки напівпровідниковим діодам і транзисторам вдалося досягти збільшення надійності в роботі обчислювальної техніки і, що найголовніше, — зменшення габаритів і маси приладів.

Помітний внесок у створення транзистора зробив відомий вчений з України професор — Вадим Євгенович Лошкар'єв (1903–1974), який відкрив біполярну дифузію носіїв електричного заряду в напівпровідниках. Вадим Євгенович Лошкар'єв разом з українським ученим Корнієм Денисовичем Товстюком створили наукову школу з підготовки фахівців у галузі фізики напівпровідників.

Поява інтегральних схем, або кремнієвих чипів, у 70-ті роки ХХ ст. ознаменувала ще один великий етап в розвитку обчислювальної техніки, оскільки інтегральна схема здатна замінити тисячі транзисторів (мал. 53).



Мал. 53. Комп'ютерна плата з інтегральними мікросхемами

Інтегральна мікросхема — мініатюрний мікроелектронний виріб, елементи якого нерозривно зв'язані конструктивно, технологічно та електрично. Виконує певні функції перетворення і складається зі щільно упакованих та електрично з'єднаних між собою елементів і компонентів, які є одним цілим за вимогами до випробувань та експлуатації (мал. 54).

Розрізняють напівпровідникові, плівкові гібридні інтегральні схеми, які за видом оброблювальної інформації поділяють на цифрові та аналогові, за складністю і якістю оцінки — на малі, середні, великі та надвеликі. Надвелика інтегральна схема (НВІС) — інтегральна мікросхема зі ступенем інтеграції понад 1000 елементів у кристалі. Одна така інтегральна схема містить в собі десятки тисяч транзисторів, і всі вони розміщуються на кристалі кремнію, меншому за ніготь людини.

Світлодіод (англ. *LED* – *light-emitting diode*) — напівпровідниковий пристрій, що випромінює світло, коли через нього проходить електричний струм (мал. 55). Як і звичайний напівпровідниковий діод, світлодіод має *p-n*-перехід. У разі пропускання електричного струму у прямому напрямку носії заряду — електрони та дірки — рекомбінують з випромінюванням світлових частинок — фотонів. Колір випромінюваного світла світлодіодів залежить від хімічного складу використаного у світлодіоді напівпровідника.



Мал. 54. Мініатюрний дрон з мікрочіпом



Мал. 55. Світлодіоди



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Де застосовують напівпровідники? Наведіть приклади напівпровідникових приладів. **2.** Які типи транзисторів ви знаєте? **3.** Як вдається керувати величиною струму колектора в біполярному транзисторі; у польовому транзисторі?



Експериментуємо

У двох непрозорих коробках вміщено по одному резистору, клеми яких виведено назовні. Визначте, в якій з коробок міститься напівпровідниковий резистор. Обладнання: термістор, омичний резистор, джерело живлення, гальванометр, реостат, сухий спирт, з'єднувальні провідники, вимикач.

§9

Електричний струм
у рідинах

Електролітична дисоціація. Електроліз. З курсів хімії та фізики основної школи ми дізналися, що речовини поділяють на *електроліти* та *неелектроліти*. Електроліти — це речовини, що мають йонну провідність. Але у твердому стані йони міцно зв'язані один з одним, оскільки мають протилежні електричні заряди, тому їх рухливість ускладнена. У розплаві або розчині рухливість йонів збільшується. У розчині під впливом полярних молекул води речовина-електроліт розпадається на позитивно й негативно заряджені йони.

Розпад деяких речовин на йони під дією полярних молекул води називається **електролітичною дисоціацією**.

Якщо в такому розчині створити електричне поле, то позитивно заряджені йони рухатимуться до катода (негативно зарядженого електрода), а негативно заряджені йони — до анода (позитивно зарядженого електрода). Відповідно позитивно заряджені йони назвали *катіонами*, а негативно заряджені — *аніонами*.

Особливістю проходження електричного струму через електроліт є те, що йони переносять хімічні складники електроліту, і ті виділяються на електродах — відкладаються у вигляді твердого шару або виділяються в газоподібному стані.

Процес виділення речовини на електродах, пов'язаний з окисно-відновними реакціями, що відбуваються на електродах під час проходження струму, називають *електролізом*. У процесі електролізу катод є відновником, оскільки він віддає електрони катіонам, а анод — окисником, оскільки він приймає електрони від аніонів.

Закони електролізу. З курсу фізики 8 класу нам відомо, що, вивчаючи проходження електричного струму через електроліти, англійський фізик Майкл Фарадей експериментально встановив закони електролізу.

1-й закон Фарадея

Маса речовини m , що виділилася на електроді в результаті електролізу, прямо пропорційна силі струму I і часу t проходження струму через електроліт, $m = kIt$, де k — коефіцієнт пропорційності (електрохімічний еквівалент).

Електрохімічний еквівалент речовини дорівнює масі речовини, яка виділяється на електроді за 1 с під час проходження через електроліт струму силою 1 А.

2-й закон Фарадея

Електрохімічний еквівалент речовини k пропорційний хімічному еквіваленту, $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$, де M — молярна маса, F — стала Фарадея, n — валентність речовини.

Фізичний зміст законів Фарадея легко пояснити, використавши електронно-йонну теорію. Маса речовини, що виділяється на електродах під час електролізу, визначається масою N йонів, що осідають на електроді.

Кількість йонів дорівнює $N = \frac{m}{M} N_A$, де m — маса речовини, M — її молярна маса, N_A — число Авогадро.

З іншого боку, кількість йонів, що осіли, можна визначити через величину заряду $q = It$, що пройшов крізь електроліт, і заряд одного йона q_0 , $N = \frac{q}{q_0}$. Отже, $\frac{m}{M} N_A = \frac{q}{q_0}$. Звідки $m = \frac{Mq}{q_0 N_A}$.

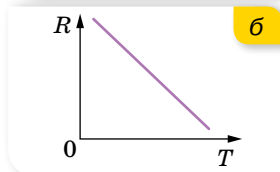
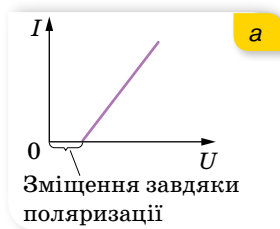
Модуль заряду будь-якого йона дорівнює модулю заряду електрона, помноженому на валентність йона, $|q_0| = |e| n$. Отже, $m = \frac{M|q|}{|e| n N_A}$.

Величини N_A і e є універсальними сталими, а M і n — сталі для даної речовини.

Тож вираз $\frac{M}{|e| n N_A} = k$ є електрохімічним еквівалентом речовини.

Добуток $N_A |e| = F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ — стала Фарадея — фізична

константа.



Мал. 56. Графіки залежності:

а — сили струму від напруги $I(U)$;

б — опору від температури $R(T)$ для електролітів

Як видно з формули, стала Фарадея — це модуль електричного заряду 1 моля електронів.

Закони Фарадея можна записати в об'єднаному вигляді так:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It.$$

Електричний заряд будь-якого йона $q = \pm \frac{nF}{N_A}$.

Вольт-амперна характеристика проходження електричного струму крізь електроліт має лінійний характер, як і в металах, але відрізняється тим, що для створення електричного струму в електроліті необхідна певна робота зовнішнього електричного поля — для поляризації електроліту (напруга цього поля для різних електролітів має різне значення) (мал. 56, а).

Залежність опору електроліту від температури (мал. 56, б) — лінійна. Це пояснюється тим, що за зростання температури тепловий рух молекул

стає інтенсивнішим, і тому кількість йонів у розчині та їх концентрація зростають, а отже, змінюється питомий опір електроліту ρ . Його зміну можна розрахувати за рівнянням, яке використовували в аналогічних розрахунках для металів, $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$, де ρ_0 — питомий опір електроліту за температури 273 К (0 °С); α — термічний коефіцієнт опору. Для електролітів термічний коефіцієнт опору завжди є від'ємним, а отже, за нагрівання провідність електроліту зростає, а його опір зменшується.

Явище електролізу широко застосовують. Детальніше — в електронному додатку.



? ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Дистильована вода не проводить електричний струм. Чому вона стає провідником унаслідок розчинення в ній солей, кислот, лугів? **2.** Чому вольт-амперна характеристика електроліту не починається з початку координат? **3.** Що називають електрохімічним еквівалентом речовини? Який фізичний зміст сталої Фарадея? **4.** Чому опір розчинів електролітів залежить від температури?



Експериментуємо

Визначте масу йона міді. Обладнання: джерело постійного струму, набір обладнання для електролізу, розчин Купрум(II) сульфату (мідного купоросу), терези з важками, амперметр, секундомір, з'єднувальні провідники, вимикач.



Приклади розв'язування задач

Задача. Який найменший заряд повинен мати акумулятор, щоб під час електролізу підкисленої води вивільнилось 5 л кисню за температури 27 °С і нормального атмосферного тиску?

Дано:

$$V = 5 \text{ л} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$T = 27 \text{ °С} = 300 \text{ К}$$

$$p = 101,3 \text{ кПа}$$

$$k = 8,29 \cdot 10^{-8} \frac{\text{КГ}}{\text{Кл}}$$

$$q = ?$$

Розв'язання:

Необхідний для електролізу заряд акумулятора визначимо із співвідношення $m = kq$.

Масу газу визначимо з рівняння стану ідеального газу: $pV = \frac{m}{M} RT$, $m = \frac{pV}{M} RT$.

$$\text{Таким чином, } q = \frac{pVM}{RTk}.$$

Підставимо числові значення, отримуємо:

$$q = \frac{101,3 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К} \cdot 8,29 \cdot 10^{-8} \frac{\text{КГ}}{\text{Кл}}} = 78,4 \text{ кКл}.$$

Відповідь: 78,4 кКл.



Вправа 6

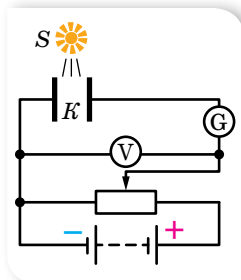
1. Скільки часу потрібно для того, щоб унаслідок нікелювання виробу на його поверхні утворився шар двовалентного нікелю завтовшки 0,03 мм? Скільки енергії (у Вт · год) буде затрачено? Площа поверхні виробу дорівнює 120 см². Напруга на клеммах ванни — 1,8 В, опір розчину — 3,75 Ом.
2. Скільки алюмінію виділиться за витрати електричної енергії 1 кВт · год, якщо електроліз проводиться під напругою 5 В, а ККД всієї установки — 80 %?
3. У електролітичній ванні за 20 хв виділилося 1,98 г міді. Визначте електричну потужність, що витрачається на нагрівання електроліту. Опір розчину ванни становить 0,8 Ом.
4. Під час електролізу розчину сірчаної кислоти за 2 год 23 хв виділяється 5 л водню за нормальних умов. Визначте опір розчину, якщо потужність струму дорівнює 32,5 Вт.
5. Під час електролізу води через ванну пройшов заряд 4 кКл, унаслідок чого виділилося 0,4 л водню за тиску 128 кПа. Визначте температуру водню.

§10

Електричний струм у газах

Механізм електропровідності газів. З курсу фізики 8 класу нам відомо, що в природі гази є діелектриками, бо за цих умов у газах майже немає вільних носіїв заряду, рух яких міг би створити електричний струм. Проте під зовнішнім впливом, наприклад, високої температури, у газі з'являються заряджені частинки. Вони виникають унаслідок відщеплення від атомів газу одного або кількох електронів, як результат — замість нейтрального атома виникають позитивний йон і електрони. Частина електронів, що утворилися, може бути захоплена іншими нейтральними атомами, і тоді з'являться ще й негативні йони. Розпад молекул газу на електрони та йони називають **йонізацією газів**.

Нагрівання газу до високої температури — не єдиний спосіб йонізації молекул або атомів газу. Йонізація газу може відбуватися під впливом інших зовнішніх чинників: рентгенівських променів; променів, що виникають під час радіоактивного розпаду; космічних променів (фотойонізація).



Мал. 57. Схема для дослідження розряду в газі

Разом із процесом йонізації відбувається і процес рекомбінації: йони й електрони, що беруть участь у тепловому русі, стикаються один з одним і можуть з'єднатися в нейтральний атом.

Йонізований газ є провідником. Явище проходження електричного струму через газ називають **газовим розрядом**.

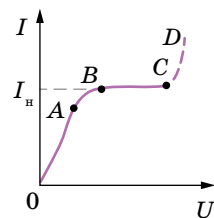
Несамостійний і самостійний газові розряди. Розглянемо схему, зображену на малюнку 57.

Між пластинами плоского конденсатора K міститься повітря за атмосферного тиску й кімнатної температури. Якщо до конденсатора прикладено напругу в кілька сотень вольт, а йонізатор S не працює, то гальванометр G струму не реєструє. Тільки-но простір між пластинами конденсатора починає йонізуватися (наприклад, потоком ультрафіолетового випромінювання від джерела S), гальванометр починає реєструвати струм. Цей струм і є *несамостійним розрядом*.

Отже, *несамостійний розряд* у газі є результатом перенесення заряду електронами, позитивними й негативними йонами, наявність і кількість яких зумовлені дією йонізатора (радіоактивного випромінювання, світла, космічних променів тощо), тиском газу й напруженістю електричного поля в газовому проміжку.

Одночасно з процесом йонізації в газі протікає і протилежний процес рекомбінації йонів. Якщо до конденсатора не прикладено зовнішньої напруги, то в певний момент часу в робочому об'ємі конденсатора встановлюється динамічна рівновага, за якої швидкість йонізації (кількість йонів, що утворюються за одиницю часу) починає дорівнювати швидкості рекомбінації йонів. Якщо між пластинами конденсатора існує електричне поле, то частина йонів досягне пластин, інша частина — рекомбінує. Зі збільшенням напруги між пластинами конденсатора процес йонізації молекул газу починає переважати процес рекомбінації.

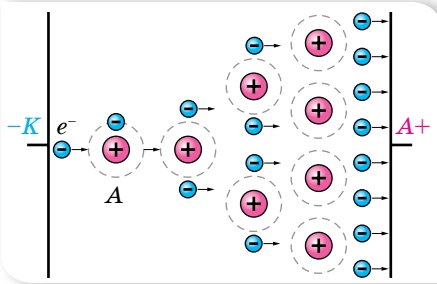
На малюнку 58 зображено *вольт-амперну характеристику газового розряду*. З малюнка видно, що за невеликих напруг сила струму лінійно залежить від напруги (ділянка OA), отже, тут справджується закон Ома. На ділянці AB струм зростає повільніше від напруги — тут залежність нелінійна й закон Ома не виконується. Ділянка BC характеризується струмом насичення I_n — максимальною силою струму, можливою за даних інтенсивності йонізації, тиску газу та напруженості електричного поля, коли всі утворені йони й електрони, не встигаючи рекомбінувати, досягають електродів. Якщо й надалі підвищувати напругу, відбудеться пробій газового проміжку (ділянка CD) й *несамостійний розряд* перетвориться на *самостійний*, тобто такий газовий розряд, який відбувається й після припинення дії зовнішнього йонізатора.



Мал. 58.
Вольт-амперна характеристика газового розряду

Електричний розряд у газі, що зберігається після припинення дії зовнішнього йонізатора, називається **самостійним газовим розрядом**.

Які саме причини різкого збільшення сили струму за великої напруги? Розглянемо пару заряджених частинок (позитивний йон і електрон), що утворилася завдяки дії зовнішнього йонізатора. Вільний електрон, який з'явився в такий спосіб, починає рухатися до позитивного електрода — анода, а позитивний йон — до катода. На своєму шляху електрон зустрічає йони



Мал. 59. Схема процесу іонізації електронним ударом

йонізації (найменше значення енергії, потрібної для того, щоб вирвати електрон), то, зіткнувшись з атомом (або молекулою), він їх іонізує. У результаті замість одного електрона матимемо два (другий — вибитий з атома). Уже два електрони прискорюються полем і йонізують зустрічні атоми й т. д. Унаслідок цього кількість заряджених частинок швидко наростає, виникає *електронна лавина* (мал. 59). Що стосується йонів, то вони, рухаючись в електричному полі, також збільшують свою енергію. Але повністю віддати її нейтральному атому (молекулі), тим самим йонізуючи його, йон не може, оскільки має масу, майже однакову з масою атома. Під час зіткнення відбувається лише передавання частини кінетичної енергії (як між більярдними кулями). Легенький же електрон налітає на атом, як на стіну, повністю віддаючи йому свою набуту енергію.

Описаний процес називають *йонізацією електронним ударом*. Але йонізація електронним ударом не може забезпечити підтримки самостійного розряду. Справді, адже всі електрони, що виникають у такий спосіб, рухаються в напрямку до анода і, після досягнення анода, «вибувають із гри». Для підтримки розряду необхідна емісія електронів з катода, якої можна досягти кількома способами.

Залежно від властивостей і стану газу, характеру й розташування електродів, а також від прикладеної до електродів напруги виникають різні види самостійного розряду: тліючий, коронний, іскровий та дуговий (табл. 4).

Таблиця 4

Види електричного розряду

Тліючий розряд спостерігається в газах або парах за низького тиску (в межах кількох десятків міліметрів ртутного стовпа та меншого).



За нормального тиску в газі, що перебуває в сильно неоднорідному електричному полі (наприклад, біля загострень або дотів ліній високої напруги), спостерігається розряд, світна область якого часто нагадує корону. Тому його й назвали **коронним розрядом**.

Іскровий розряд — це розряд, що виникає зазвичай за нормального атмосферного тиску й супроводжується характерним звуковим ефектом — «тріском» іскри.



Дуговий розряд виникає за високої температури між електродами, розведеними на невелику відстань, і супроводжується яскравим світінням у формі дуги. Для дугового розряду характерні: велика густина струму й напруга між електродами (порядку кількох десятків вольт). Він є результатом інтенсивного викидання термоелектронів розжареним катодом.

Плазма. За подальшого нагрівання газу (або опромінення) можна отримати такий його стан, у якому атоми й молекули будуть частково або повністю йонізованими, а концентрація позитивних і негативних зарядів — практично однаковою. Такий газ називають *плазмою*. Плазма має специфічні властивості, що дає змогу розглядати її як особливий — четвертий стан речовини. На відміну від нейтрального газу, між молекулами якого існують короткодійчі сили, між зарядженими частинками плазми діють кулонівські сили, що порівняно повільно зменшуються з відстанню. Кожна частинка взаємодіє відразу з великою кількістю навколишніх частинок. Завдяки цьому разом з хаотичним тепловим рухом частинки плазми можуть брати участь у різноманітних упорядкованих рухах. У плазмі легко збуджуються різного роду коливання та хвилі.

Плазма характеризується ступенем йонізації: відношенням об'ємної концентрації заряджених частинок до загальної об'ємної концентрації частинок. Залежно від ступеня йонізації плазму поділяють на слабо йонізовану (становить частки відсотків), частково йонізовану (порядку декількох відсотків) і повністю йонізовану (близько 100 %). Слабо йонізованою плазмою в природних умовах є верхні шари атмосфери — йоносфера. Сонце, гарячі зорі й міжзоряна речовина — це повністю йонізована плазма, яка утворюється за високих температур. Зважаючи на масштаби Всесвіту, можемо стверджувати, що основним станом речовини є стан плазми.

Розглядають високотемпературну ($T > 10^6$ °C) і низькотемпературну ($T < 10^5$ °C) плазми. Низькотемпературна плазма застосовується в газорозрядних джерелах світла. У сучасних плоских екранах моніторів і телевізорів використовують або рідкокристалічні матриці, або пікселі, наповнені плазмою. Кожний піксель містить капсули, покриті червоним, синім і зеленим люмінофором, що світяться завдяки вміщеній у них плазмі, свічення якої регулює подача електричних сигналів.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Як відбувається йонізація газів? Наведіть приклади йонізаторів газу. **2.** Поясніть вольт-амперну характеристику несамостійного розряду в газі. **3.** Поясніть явище ударної йонізації. **4.** Який розряд називають самостійним? Наведіть приклади самостійних розрядів і поясніть умови їх виникнення.

§ 11

Електричний струм
у вакуумі

Електричний струм у вакуумі. Як ми знаємо, щоб існував електричний струм, необхідні вільні носії електричного заряду. Що ж є носієм заряду у вакуумі? Як відомо, вакуум (від лат. *vacuum* — порожнеча), тому за одним із визначень, вакуум — це розріджений стан газу за тиску, меншого від атмосферного. Вакуум є ізолятором, оскільки не має вільних носіїв заряду.

Розглянемо посудину, в якій створено високий вакуум — стан газу, за якого довжина вільного пробігу молекул (відстань, яку пролітає молекула між зіткненнями) перебільшує розміри посудини. У посудині містяться дві металеві пластини — електроди — катод і анод. Один із цих електродів може стати джерелом вільних електронів, якщо їм надати додаткової енергії, достатньої для виконання роботи виходу з металу. Процес випускання електронів з поверхні металу називають *емісією*. Емісія за певних умов настає за освітлення металу (*зовнішній фотоефект*), нагрівання (*термоелектронна емісія*), під дією сильного електричного поля (*автоелектронна емісія*), за бомбардування поверхні металу потоком електронів у вакуумі (*вторинна електронна емісія*) тощо. Проте електрони, вирвавшись за межі електрода, далеко від його поверхні відлетіти не можуть, оскільки, втрачаючи електрони, електрод сам одночасно заряджається позитивно й притягує їх назад. Між «електронною хмаринкою» над металом та «електронним газом» у металі встановлюється динамічна рівновага. Якщо ж тепер катод з'єднати з негативним полюсом джерела струму, а анод — з позитивним, то електрони будуть рухатися від катода до анода, і в посудині виникне електричний струм.



Мал. 60. Прилади, де використовується електричний струм у вакуумі:

а — вакуумний діод Флемінга (1904);

б — кінескоп телевізора (50-ті роки XX ст.);

в — кінескоп монітора комп'ютера (90-ті роки XX ст.)

Прилади, в яких використовувався електричний струм у вакуумі (електронні лампи (вакуумні діоди та тріоди), електронно-променеві трубки та ін.), активно використовували в електротехніці в першій половині XX ст. (мал. 60).

На сьогодні на зміну електронним лампам прийшли напівпровідникові прилади, електронно-променевим трубкам — рідкокристалічні екрани, проте вивчення закономірностей електричного струму у вакуумі залишається важливим, оскільки

він і сьогодні використовується, наприклад, для вакуумного плавлення та зварювання, у вакуумних фотоелементах.

Розглянемо детальніше струм у вакуумі, створений завдяки *термоелектронній емісії* (на прикладі вакуумного діода).

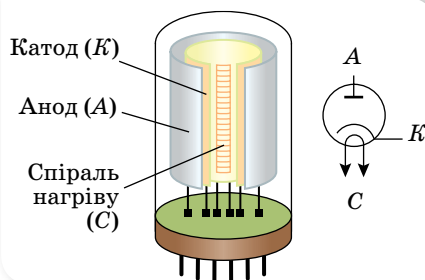
На малюнку 61 наведено схему будови вакуумного діода та його умовне позначення на радіосхемах. У середині балона зі скла або метало-кераміки, з якого відкачано повітря, розміщено два циліндричні електроди: металевий анод (А) і металевий катод (К). Розміщена в його середині спіраль нагріву (С) нагрівається електричним струмом і спричинює термоелектронну емісію електронів з катодів. Навколо катода утворюється електронна хмара — хмара просторового заряду.

Якщо підключити катод до позитивного полюса батареї, а анод — до негативного, то поле всередині діода зміщуватиме електрони до катода, і струму не буде. Якщо ж навпаки — анод підключити до плюса, а катод до мінуса, то електричне поле переміщуватиме електрони в напрямку від катода до анода (анодний струм). Цим пояснюється властивість односторонньої провідності діода, яку використовують у випрямлячах змінного струму (коли треба перейти від змінного струму до постійного). Тепер у випрямлячах використовують напівпровідникові діоди.

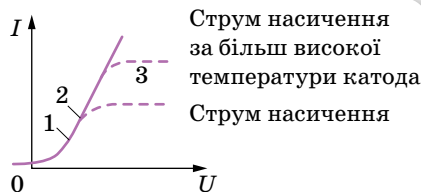
Властивості вакуумного діода, як і будь-якого приладу, відображає його вольт-амперна характеристика (мал. 62) — залежність величини анодного струму через діод I_a від прикладеної напруги U між катодом і анодом. Основна причина нелінійності вольт-амперної характеристики вакуумного діода в тому, що катод випускає вільні електрони в обмеженій кількості. До того ж на рух електронів, крім поля між анодом і катодом, істотно впливає поле просторового заряду електронної хмари. Що вищою буде напруга між анодом і катодом, то меншим буде просторовий заряд електронної хмари й більша кількість електронів досягне анода, а отже, більшою буде сила струму в колі. Якщо за деякої напруги всі електрони, що покинули катод, досягають анода, то з подальшим збільшенням напруги сила струму практично не змінюється. Струм досягає насичення.

Якщо підвищити температуру катода, то більша кількість електронів буде залишати катод. Електронна хмара навколо нього стане щільнішою. Струм насичення буде досягнуто за більшої напруги між анодом і катодом, а сила струму насичення зросте.

Електронні пучки та їх властивості. Рухаючись між катодом і анодом, електрони прискорюються електричним полем і набувають величезної



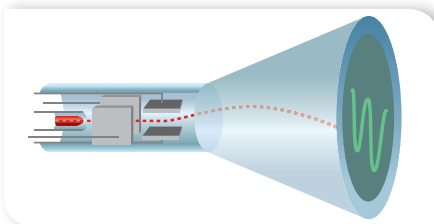
Мал. 61. Будова й умовне позначення вакуумного діода



Мал. 62. Вольт-амперна характеристика вакуумного діода

швидкості, досягаючи $10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ і більше. У спеціально побудованих прискорювачах швидкість руху електронів наближається до швидкості світла ($3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$). Якщо в аноді зробити отвір, то частина електронів, прискорених електричним полем, пролетить в отвір, утворюючи за анодом так званий *електронний пучок*. Кількістю електронів у пучку можна керувати, змінюючи потенціал додаткового електрода, встановленого між катодом і анодом. Взаємодіючи з речовиною, електронні пучки спричиняють різні ефекти. Усі ці властивості використовують на практиці, наприклад: для електронного плавлення надчистих металів у вакуумі, отримання рентгенівських променів.

Властивості електронних пучків поширюватися прямолінійно, відхилятися в електричному або магнітному полі та спричиняти світіння люмінофорів, якими покривають екран, застосовують в електронно-променевих трубках (мал. 63), які донедавна використовували в телевизорах і моніторах комп'ютерів.



Мал. 63. Схематичне зображення електронно-променевої трубки



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. У чому суть явища емісії? **2.** Поясніть будову вакуумного діода. Які функції може виконувати діод? **3.** Які закономірності вольт-амперної характеристики вакуумного діода? **4.** Які властивості електронних променів (пучків)?



Приклади розв'язування задач

Задача. Пучок електронів з енергією¹ $W = 3000$ еВ рухається у вакуумі паралельно пластинам незарядженого конденсатора. Визначте вертикальне зміщення цього пучка на виході з конденсатора, якщо на конденсатор подати напругу $U = 600$ В. Довжина пластин конденсатора $L = 6$ см, а відстань між ними $d = 3$ см.

Дано:

$$W = 3000 \text{ еВ}$$

$$U = 600 \text{ В}$$

$$L = 6 \text{ см}$$

$$d = 3 \text{ см}$$

$$h = ?$$

Розв'язання:

На малюнку 64 зображено траєкторію руху електронів у зарядженому конденсаторі.

Розв'яжемо задачу координатним методом. По осі x електрон рухається за інерцією з постійною швидкістю $v_0 = \text{const}$.

Швидкість руху електронів за інерцією визначається їхньою енергією

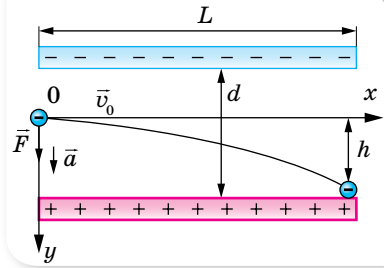
$$W = \frac{mv_0^2}{2}, \quad v_0 = \sqrt{\frac{2W}{m}}.$$

¹ Досить часто для малих значень енергії використовують одиницю електрон-вольт: $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Рівняння руху електрона відносно осі x має вигляд: $x = v_0 t = \sqrt{\frac{2W}{m}} t$, ($x_0 = 0$).

Що стосується руху вздовж координати y , то потрібно врахувати, що на електрон діє сила $\vec{F} = e\vec{E}$. Під дією цієї сили електрон набуває прискорення $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{e\vec{E}}{m}$.

Координата рухомого електрона $y = \frac{at^2}{2}$.



Мал. 64

За умовою задачі $x = L$, коли $y = h$, тоді маємо два рівняння: $\sqrt{\frac{2W}{m}} t = L$ і $h = \frac{at^2}{2}$. З першого рівняння визначаємо t^2 і підставляємо в друге рівняння. Урахуємо також, що модуль напруженості $E = \frac{U}{d}$.

У результаті зміщення електрона на виході з конденсатора буде дорівнювати $h = \frac{eUL^2}{4dW}$. Підставивши числові значення, матимемо:

$$h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 600 \text{ В} \cdot 36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{4 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 3000 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Відповідь: 6 мм.



Вправа 7

- З нитки катода діаметром 0,16 мм і довжиною 5 см випромінюється за одиницю часу $1,5 \cdot 10^{17}$ електронів із квадратного сантиметра поверхні. Вважаючи, що до анода долітає кожний п'ятий електрон, визначте спад напруги на опорі 5 кОм, який включений в анодне коло лампи.
- У діоді електрон підлітає до анода, маючи швидкість $8 \frac{\text{Мм}}{\text{с}}$. Визначте анодну напругу.
- В електронно-променевої трубки прискорювальна анодна напруга дорівнює 16 кВ, а відстань від анода до екрана — 30 см. За який час електрони проходять цю відстань?
- Відстань між катодом й анодом діода дорівнює 1 мм. Скільки часу рухається електрон від катода до анода, якщо анодна напруга становить 40 В? Вважайте, що рух рівноприскорений.



Перевірте себе (§ 1–11)



- Укажіть назву величини, що характеризує швидкість перенесення електричного заряду через поперечний переріз провідника.

А робота струму	В сила струму
Б електрорушійна сила	Г потужність струму

2. У якому середовищі здійснюється перенесення речовини під час проходження струму?

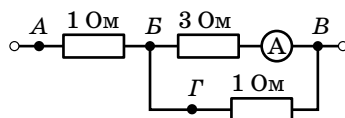
- А у металах
 Б в електролітах
 В у напівпровідниках
 Г у будь-якому середовищі

3. Укажіть рядок, у якому наведено лише діелектрики.

- А вода, ртуть, олія
 Б залізо, алюміній, магній
 В повітря, скло, водний розчин соляної кислоти
 Г слюда, парафін, спирт

4. У колі, зображеному на малюнку, амперметр показує 1 А. До яких точок кола потрібно під'єднати вольтметр, щоб його покази були 4 В?

- А до точок А і В
 Б до точок В і В
 В до точок В і Г
 Г до точок А і В



5. Укажіть джерело світла, в якому використовується розряд у газі.

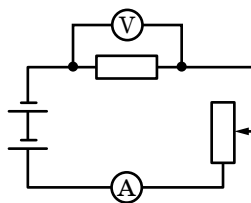
- А люмінесцентна лампа
 Б лампа розжарювання
 В світлодіод
 Г прожектор

6. Як зміниться маса речовини, що виділяється на електроді, якщо силу струму, яка проходить через електроліт, збільшити в 3 рази, а час електролізу — зменшити в 6 разів?

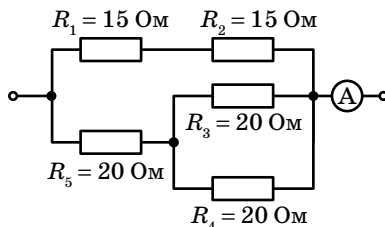
- А зменшиться у 18 разів
 Б зменшиться у 2 рази
 В зменшиться в 6 разів
 Г зменшиться у 3 рази

7. У колі, зображеному на малюнку, повзунок реостата пересунули вниз. Укажіть правильний характер змін.

- А сила струму зменшилась, напруга збільшилась
 Б сила струму й напруга збільшились
 В сила струму збільшилась, напруга зменшилась
 Г сила струму й напруга зменшились



8. За даними малюнка визначте кількість теплоти, яка виділяється в колі протягом 20 хв.



9. Через розчин сірчаної кислоти пропустили заряд $2 \cdot 10^5$ Кл. Визначте масу та об'єм утвореного водню за нормальних умов ($p_{\text{атм}} = 10^5$ Па, $T = 273$ К), густина водню — $0,09 \frac{\text{Кг}}{\text{М}^3}$.

10. Три гальванічні елементи, ЕРС яких 2,2 В; 1,1 В; 0,9 В, а внутрішні опори відповідно 0,2 Ом; 0,4 Ом; 0,5 Ом, увімкнені в коло послідовно та створюють струм 1 А. Визначте зовнішній опір кола.

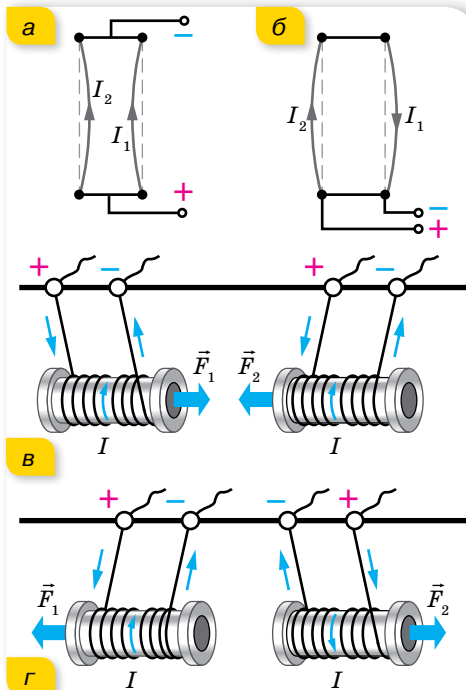
§12

Магнітна взаємодія. Закон Ампера

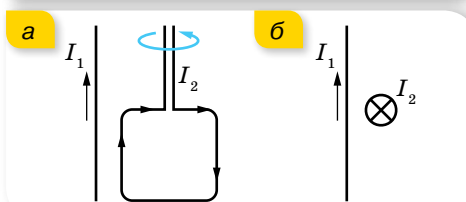
Електрична та магнітна взаємодії. Як ми знаємо, нерухомі електричні заряди взаємодіють між собою через електричне поле. Рухомі — через електричне й магнітне. Якщо по двох паралельних гнучких провідниках проходять струми в одному напрямку (мал. 65, а), то провідники притягуються один до одного. Якщо струми протилежних напрямків — провідники відштовхуються (мал. 65, б). Взаємодіють між собою, притягуючись або відштовхуючись, не лише прямолінійні провідники зі струмом, а й провідники довільної форми, по яких протікає струм, наприклад, провідники у вигляді прямокутних рамок, витків. Така сама взаємодія відбувається й між котушками зі струмом (мал. 65, в, г).

Взаємодія провідників зі струмом не завжди обмежується притяганням або відштовхуванням. Якщо, наприклад, маленьку прямокутну рамку, по якій тече електричний струм, розташувати поблизу прямолінійного провідника зі струмом, то рамка повернеться та розташується так, щоб її площина перебувала у площині провідника (мал. 66, а). Ще один приклад. Два прямолінійні провідники зі струмом, розташовані так, як показано на малюнку 66, б (у провіднику 2 струм напрямлений від нас), взагалі не взаємодіють.

Описані взаємодії між електричними струмами¹ (тобто рухомими електричними зарядами) не можна пояснити на підставі законів електростатики. Таку взаємодію називають *магнітною*. Сили, з якими провідники зі струмом діють один на одного, називають *магнітними силами*.



Мал. 65. Взаємодія провідників зі струмом: а, в — притягання; б, г — відштовхування

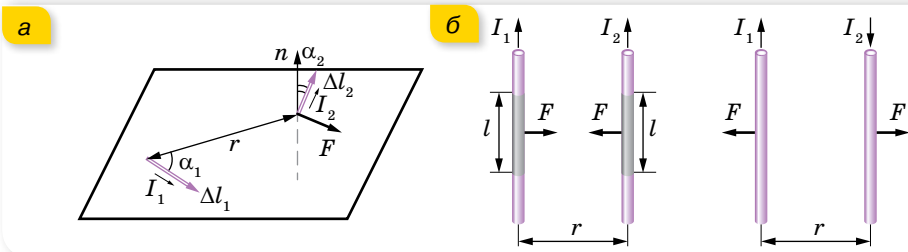


Мал. 66. Обертання рамки зі струмом (а); відсутність взаємодії двох взаємно перпендикулярних провідників, по яких проходять струми (б)

¹ Словом «струми» для спрощення замінюється фраза «провідники, якими проходить електричний струм».

Магнітні сили. Закон Ампера. Взаємодію електричних струмів уперше виявив і дослідив у 1820 р. французький фізик Андре Ампер (1775–1836). Тому закон, що описує взаємодію провідників зі струмом, називають *законом Ампера*. Щоб кількісно дослідити магнітну взаємодію провідників зі струмом, використовують метод моделювання. Розглядають не весь провідник, а лише коротку його ділянку довжиною Δl . Увесь провідник складається з подібних ділянок так, як і будь-яке заряджене тіло з точкових зарядів. Добуток сили струму I , що проходить по малій ділянці провідника, на її довжину Δl називають *елементом струму*.

Закон Ампера. Два нескінченно малі елементи провідників зі струмом взаємодіють між собою із силою ΔF , яка прямо пропорційна довжинам цих елементів Δl_1 та Δl_2 , силам струму в них I_1 та I_2 , обернено пропорційна квадрату відстані між ними r^2 і залежить від взаємної орієнтації цих елементів (мал. 67, а): $\Delta F = \mu\mu_0 \frac{I_1\Delta l_1 \cdot I_2\Delta l_2}{r^2} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2$, де α_1 — кут між елементом струму $I_1\Delta l_1$ та відстанню r ; α_2 — кут між елементом струму $I_2\Delta l_2$ і нормаллю n до площини, у якій лежать елемент $I_1\Delta l_1$ та r ; μ_0 — магнітна стала, μ — відносна магнітна проникність середовища — скалярна фізична величина, що характеризує його магнітні властивості.



Мал. 67. До закону Ампера: а — взаємодія елементів струму; б — взаємодія прямолінійних паралельних провідників зі струмом

Закон Ампера відіграє таку саму роль у магнітостатиці, як і закон Кулона в електростатиці. За допомогою закону Ампера можна обчислити силу взаємодії провідників зі струмом довільної довжини та форми. Так, сила взаємодії (сила Ампера) між двома прямими паралельними провідниками (мал. 67, б) визначається за формулою: $F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$, де l — довжина активної частини провідника, r — відстань між провідниками, I_1 і I_2 — сили струмів, що проходять провідниками. Якщо струми паралельні, то ці сили взаємодії намагаються наблизити провідники, якщо ж вони антипаралельні, то навпаки — віддалити їх один від одного (мал. 67, б).

У СІ дану формулу використовували для означення одиниці сили струму — *ампера*.

1 А — одиниця сили струму, яка дорівнює силі незмінного струму, що, проходячи по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини й дуже малої площі поперечного перерізу, які розміщені у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричинює на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н¹.

З визначення ампера можна обчислити значення магнітної сталої: $2 \cdot 10^{-7}$ Н = $\mu_0 \mu \frac{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}{2\pi \cdot 1 \text{ м}}$. Ураховуючи, що для вакууму $\mu = 1$, отримуємо: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$.

Цікавий результат отримаємо, коли обчислимо добуток двох сталих: електричної та магнітної. Для зручності значення електричної сталої запишемо у вигляді $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$.

$$\text{Отримуємо: } \epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} = \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{\text{Кл}^2}{\text{А}^2 \cdot \text{м}^2}.$$

Оскільки $1 \text{ А} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}}$, то $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{1}{\left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}$. А як відомо,

$3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ — це швидкість світла, яку прийнято позначати c . Отже, $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$.

Отримане співвідношення вказує на єдину природу електричних, магнітних і світлових явищ.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Як взаємодіють між собою паралельні струми? Що спричинює їх взаємодію? Що встановлює закон Ампера? **2.** Дайте визначення одиниці сили струму в системі одиниць СІ. **3.** Джеймс Максвелл стверджував, що електричний струм — це те, що створює магнітне поле. Як це твердження варто розуміти?

§13

Магнітне поле

Індукція магнітного поля. Під час з'ясування природи взаємодії провідників зі струмом постає таке саме питання, як у випадку вивчення взаємодії заряджених тіл. Яким чином передається взаємодія на відстані?

Як у просторі, що оточує нерухомі електричні заряди, виникає електричне поле, так у просторі, що оточує рухомі електрично заряджені

¹ 6 листопада 2018 року на XXVI Генеральній конференції мір і ваг було прийнято нове визначення ампера, не пов'язане з магнітною взаємодією струмів, яке вступає в дію 20 травня 2019 року.

частинки, виникає, крім електричного поля, ще й магнітне. І тому, розглядаючи взаємодію струмів, маємо не просто говорити, що один струм діє на інший, а що електричний струм в одному з провідників створює навколо себе магнітне поле, яке діє на елемент струму в іншому провіднику.

Магнітне поле (стаціонарне) — форма матерії, окремий вияв електромагнітного поля. Породжується рухомими електричними зарядами (струмами).

Дослідження, присвячені взаємодії струмів, доводять, що магнітні поля різних струмів відрізняються силою своєї дії. До того ж поле одного й того самого струму на різних відстанях від нього різне. Це спонукає до введення фізичної величини, яка б кількісно описувала магнітне поле. Пригадаймо, вивчаючи електростатичне поле, ми ввели силову характеристику — *напруженість* \vec{E} цього поля, що визначається відношенням сили, з якою поле діє на позитивний пробний заряд у певній точці поля,

до значення цього заряду: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Провівши аналогічні дослідження маг-

нітного поля, було введено силову характеристику, яка називається *індукцією магнітного поля*. Експериментами було встановлено, що максимальна сила F , з якою поле діє на провідник зі струмом (поміщений перпендикулярно лініям індукції магнітного поля), залежить від сили струму I в провіднику і від його довжини l (пропорційна їм). Однак сила, що діє на елемент струму, залежить тільки від самого поля. Тобто відно-

шення $\frac{F}{I\Delta l}$ для даного поля є величиною постійною (аналогічно відношенню сили до заряду для електричного поля). Цю величину і визначають як

магнітну індукцію: $B = \frac{F}{I\Delta l}$.

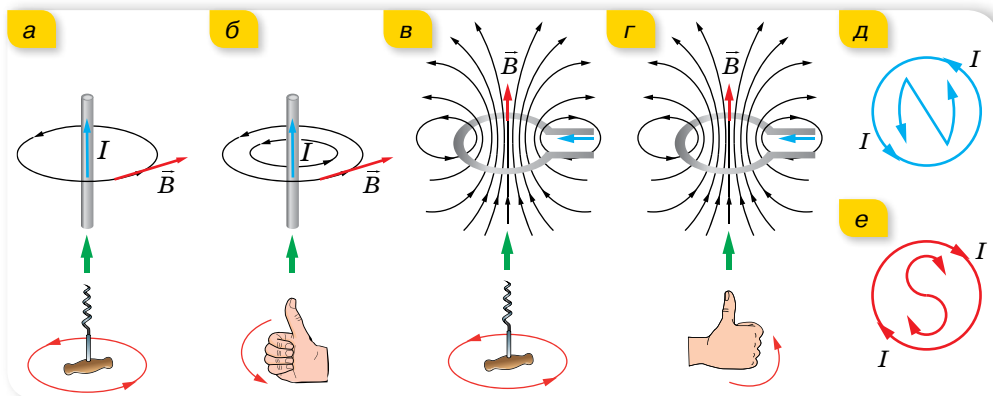
Магнітна індукція \vec{B} — векторна фізична величина, основна характеристика величини та напрямку магнітного поля.

Одиниця магнітної індукції — тесла, її названо на честь сербського вченого, електротехніка Ніколи Тесли, $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}$.

Наочну картину магнітного поля можна отримати, якщо побудувати *силові лінії поля*. Це лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються за напрямком з вектором магнітної індукції \vec{B} . Важливою особливістю ліній магнітної індукції є те, що вони не мають ні початку, ні кінця. Вони завжди замкнені. Поля із замкненими силовими лініями, як ви вже знаєте, називають *вихровими*.

Індукція магнітного поля, так само як і напруженість електричного поля, — векторна величина. На відміну від вектора напруженості електричного поля, який напрямлений так само, як і сила, що діє на позитивний заряд, розміщений у цьому полі, напрямок вектора індукції магніт-

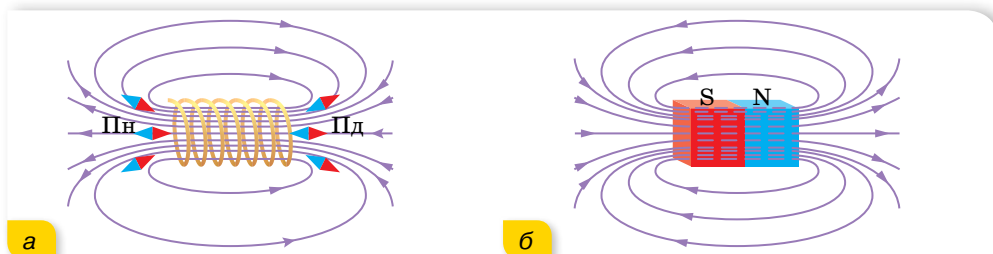
ного поля не збігається з напрямком вектора сили, що діє на елемент струму в магнітному полі. Для визначення напрямку вектора \vec{B} існують певні правила (сформулюйте їх, розглядаючи малюнок 68).



Мал. 68. Визначення напрямку вектора індукції магнітного поля за правилом: а, в — свердлика; б, г — правої руки; д, е — букв

Соленоїд. Соленоїдом називають пряму котушку з N однакових витків, що не лежать в одній площині. Як правило, витки соленоїда намотують в один шар рівномірно — так, щоб вони щільно прилягали один до одного. До того ж кількість витків n на одиницю довжини соленоїда визначається із співвідношення $n = \frac{1}{d}$, де d — діаметр дроту, яким намотано соленоїд. Узагалі, $n = \frac{N}{L}$, де L — довжина соленоїда.

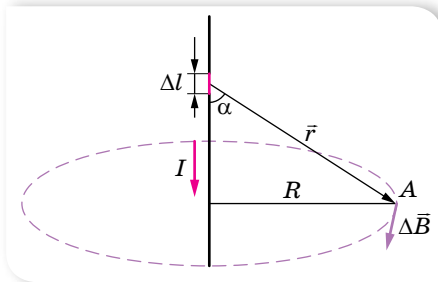
Якщо довжина L котушки більш як у 10 разів перевищує її діаметр D , соленоїд називають *нормальним*. Усередині (на осі) такого соленоїда магнітне поле *однорідне*, його силові лінії паралельні між собою й напрямлені вздовж осі (мал. 69, а). Напрямок вектора магнітної індукції визначається за тими само правилами, що й для колового струму. Якщо порівнювати магнітне поле соленоїда, зображеного на малюнку 69, а, з магнітним полем постійного магніту (мал. 69, б), то можна побачити, що ці поля за зовнішнім виглядом — однакові, але розміщення ліній індукції всередині магніту не можна спостерігати.



Мал. 69. Магнітне поле: а — котушки зі струмом; б — постійного магніту

Магнітні властивості соленоїда зі струмом і постійного магніту практично однакові. Наприклад, якщо соленоїд підвісити так, щоб він міг обертатися в горизонтальній площині, то він сам установлюється в напрямку з півночі на південь магнітного поля Землі. Це підтверджує той факт, що магнітне поле провідника зі струмом має таку саму природу, як і поле магніту. За теорією Ампера, всередині магнітів існують молекулярні струми (мікроструми), подібні до струму в замкненому колі. Як з'ясувалося пізніше, ці струми створюються рухом електронів в атомах.

З усього вищезазначеного можна зробити висновок, що магнітне поле й електричний струм завжди існують поряд. У природі ніколи не буває магнітного поля без електричного струму й електричного струму — без магнітного поля.



Мал. 70. До закону Біо — Савара — Лапласа

Закон Біо — Савара — Лапласа.

Ми з'ясували, як напрямлений вектор індукції магнітного поля. А від чого залежить його модуль? Значення індукції магнітного поля, створюваного елементом струму, у певній точці визначають за законом Біо — Савара — Лапласа. Французькі вчені Жан Біо (1774–1862) та Фелікс Савар (1791–1841) у 1820 р. провели ряд експериментальних досліджень, щоб з'ясувати, від чого залежить значення

індукції магнітного поля. Загальну математичну обробку експериментальних результатів виконав видатний французький математик П'єр Лаплас (1749–1827).

Закон Біо — Савара — Лапласа: Магнітна індукція $\Delta \vec{B}$ у точці A , що створюється струмом I , який протікає крізь елемент провідника

довжиною Δl (мал. 70), визначається за формулою $\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} I \Delta l \sin \alpha$,

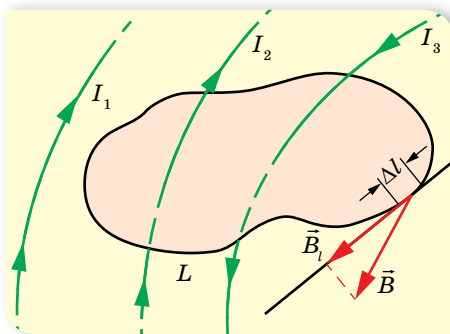
де r — радіус-вектор, що сполучає елемент Δl з точкою A , α — кут між напрямком струму в елементі та радіусом-вектором.

Теорема про циркуляцію індукції магнітного поля. Розрахунки магнітного поля струмів часто спрощуються, якщо врахувати симетрію в конфігурації струмів, що створюють поле. У цьому разі розрахунки можна виконувати за допомогою **теорему про циркуляцію вектора магнітної індукції**, яка в теорії магнітного поля струмів грає ту саму роль, що й теорема Гауса в електростатиці.

Циркуляція вектора індукції магнітного поля постійних струмів по будь-якому контуру L завжди дорівнює добутку магнітної сталої μ_0 на суму всіх струмів, що пронизують контур, $\sum_L B_i \Delta l = \mu_0 \sum I_i$.

З'ясуємо поняття циркуляції вектора індукції. Для цього у просторі, де створено магнітне поле, обираємо деякий умовний замкнутий контур

(не обов'язково плоский) і вказуємо позитивний напрямок обходу контура. На кожній окремій малій ділянці Δl цього контура визначаємо дотичну складову B_l вектора B у відповідній точці, тобто визначаємо проекцію вектора B на напрямок дотичної до даної ділянки контура (мал. 71).



Мал. 71. Замкнутий контур L із заданим напрямком обходу

Циркуляцією вектора індукції називають суму добутків $B\Delta l$, узяті по всьому контуру L .

Деякі струми, що створюють магнітне поле, можуть пронизувати вибраний контур L у той час, як інші струми можуть міститися поза межами контура. На малюнку 71 зображено кілька провідників зі струмами, що створюють магнітне поле. Струми I_2 та I_3 пронизують контур L у протилежних напрямках. Позитивними вважаються струми, які пов'язані з вибраним напрямком обходу контура за правилом правого гвинта (свердлика). З малюнка видно, що $I_3 > 0$, $I_2 < 0$, а струм I_1 не пронизує контур L . Теорема про циркуляцію в цьому прикладі записується так:

$$\sum_L B_l \Delta l = \mu_0 (I_3 - I_2).$$

Теорема про циркуляцію в загальному вигляді витікає із закону Біо — Савара — Лапласа та принципу суперпозиції.

Із закону Біо — Савара — Лапласа можна вивести формули для визначення індукції магнітного поля, створюваного нескінченним прямолінійним провідником, коловим струмом, котушкою зі струмом. Виведення формул потребує знання інтегрального числення, тому ми будемо користуватись уже готовими результатами (табл. 5).

Таблиця 5

Індукція прямолінійного провідника зі струмом, $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$	Індукція в центрі колового витка радіусом r , по якому тече струм I , $B = \mu_0 \frac{I}{2r}$	Індукція всередині катушки, $B = \mu_0 \frac{IN}{l},$ тут N — кількість витків, а l — її довжина
--	---	---

Для складного магнітного поля, як і для електростатичного, виконується *принцип суперпозиції*:

індукція магнітного поля, створеного кількома струмами, дорівнює векторній сумі індукцій магнітних полів, створених кожним із цих струмів окремо,
$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Для вивчення електричного поля користуються пробним електричним зарядом. Чим за аналогією користуються, вивчаючи магнітне поле? 2. Яка з величин, що характеризують магнітне поле, є аналогом напруженості електричного поля? У чому найхарактерніша відмінність цих величин?



Експериментуємо

Визначте напрямок струму в провіднику. Обладнання: джерело струму з прихованими позначеннями полюсів, магнітна стрілка, з'єднувальні провідники, вимикач.



Приклади розв'язування задач

Задача. Два довгі прямолінійні паралельні провідники розміщені на відстані 50 см один від одного. У першому провіднику сила струму дорівнює 20 А, у другому — 24 А. Визначте індукцію магнітного поля в точці А, що розміщена на відстані 40 см від першого провідника і 30 см від другого, якщо струми в них напрямлені в протилежні боки. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.

Дано:

$$I_1 = 20 \text{ А}$$

$$I_2 = 24 \text{ А}$$

$$a = 0,5 \text{ м}$$

$$r_1 = 0,4 \text{ м}$$

$$r_2 = 0,3 \text{ м}$$

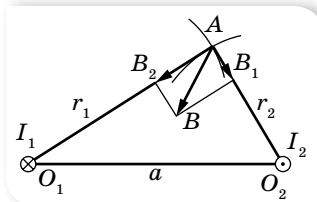
$$\mu = 1$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$$

$$B = ?$$

Розв'язання:

Зробимо малюнок до задачі (мал. 72). Проведемо з точки O_1 , де розміщено перший провідник, дугу кола радіусом r_1 . Аналогічно проведемо дугу кола радіусом r_2 з точки O_2 . Оскільки вектор індукції напрямлений по дотичній до магнітної силової лінії, то $\vec{B}_1 \perp O_1A$, $\vec{B}_2 \perp O_2A$.



Мал. 72

Згідно з принципом суперпозиції, індукція \vec{B} магнітного поля в точці А є векторною сумою \vec{B}_1 і \vec{B}_2 утворених у цій точці струмів I_1 і I_2 . Модуль індукції поля, утвореного кожним струмом окремо, визначається формулою $B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$. Модуль сумарного вектора \vec{B} визначимо за теоремою Піфагора: $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$, оскільки трикутник AO_1O_2 прямокутний. Підставимо в цю формулу вирази для B_1 і B_2 та обчислимо числове значення B :

$$B = \sqrt{\frac{\mu^2 \mu_0^2 I_1^2}{4\pi^2 r_1^2} + \frac{\mu^2 \mu_0^2 I_2^2}{4\pi^2 r_2^2}} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \sqrt{\frac{I_1^2}{r_1^2} + \frac{I_2^2}{r_2^2}};$$

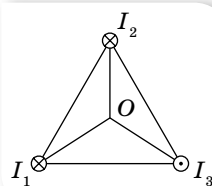
$$B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Н}}{2 \cdot \pi \text{ А}^2} \sqrt{\frac{20^2 \text{ А}^2}{0,16 \text{ м}^2} + \frac{24^2 \text{ А}^2}{0,09 \text{ м}^2}} = 188 \cdot 10^{-7} \text{ Тл.}$$

Відповідь: $B = 188 \cdot 10^{-7} \text{ Тл.}$



Вправа 8

1. По двох нескінченно довгих паралельних провідниках, відстань між якими l , в одному напрямку течуть струми I_1 і I_2 . Визначте індукцію магнітного поля в точці A , що лежить на продовженні прямої, яка сполучає провідники, на відстані s від другого провідника. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.
2. Два паралельні провідники, з однаковою силою струму в них, розташовані на відстані 8,7 см один від одного й притягуються із силою $2,5 \cdot 10^{-2}$ Н. Визначте силу струму в провідниках, якщо довжина кожного з них 320 см, струми однаково напрямлені. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.
3. По двох довгих прямих провідниках, що розміщені на відстані 5 см один від одного, протікають струми по 10 А в одному напрямку. Визначте індукцію магнітного поля в точці, що лежить на відстані 3 см від кожного провідника. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.
4. Три паралельні прямолінійні провідники великої довжини розміщені в повітрі на відстані 15 см один від одного. Сила струму в усіх провідниках дорівнює 12 А, а напрямок струми мають такий, як показано на малюнку 73. Визначте індукцію магнітного поля в точці O , яка лежить на однаковій відстані від усіх трьох провідників.
5. Три паралельні довгі провідники розміщені в одній площині на відстані 0,5 м один від одного. Сила струму в кожному провіднику дорівнює 100 А. Струми в першому і середньому провідниках мають однаковий напрямок. Визначте силу, яка діє на одиницю довжини першого, другого (середнього) і третього провідників. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.



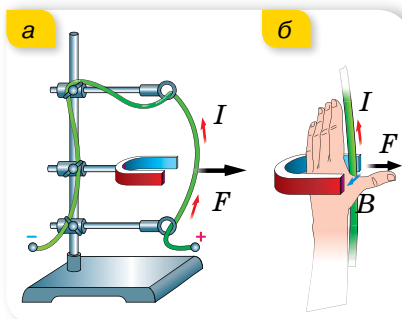
Мал. 73

§14

Дія магнітного поля на прямолінійний провідник і рамку зі струмом

Сила Ампера. Якщо прямий провідник розмістити між полюсами постійного магніту та пропустити по провіднику струм, то він почне відхилятися від початкового положення (мал. 74, а). Рух провідника пояснюється взаємодією двох полів: магнітного поля, що створюється струмом, і поля постійного магніту. У 9 класі ми вже дослідили, від чого залежить сила, яка діє на провідник зі струмом, що міститься в однорідному магнітному полі (її називають **силою Ампера**). Пригадаймо.

Сила Ампера, що діє на провідник у магнітному полі, буде більшою, якщо



Мал. 74. До визначення сили Ампера: а — схема установки для дослідження дії магнітного поля на провідник зі струмом; б — ілюстрація правила лівої руки

більший струм буде проходити провідником і сильнішим буде магнітне поле, в якому він розміщений. Також сила Ампера залежить від довжини провідника зі струмом і його розташування в магнітному полі. До речі, пригадаймо, що ділянку магнітного поля між полюсами магніту можна вважати однорідним магнітним полем, силові лінії якого паралельні.

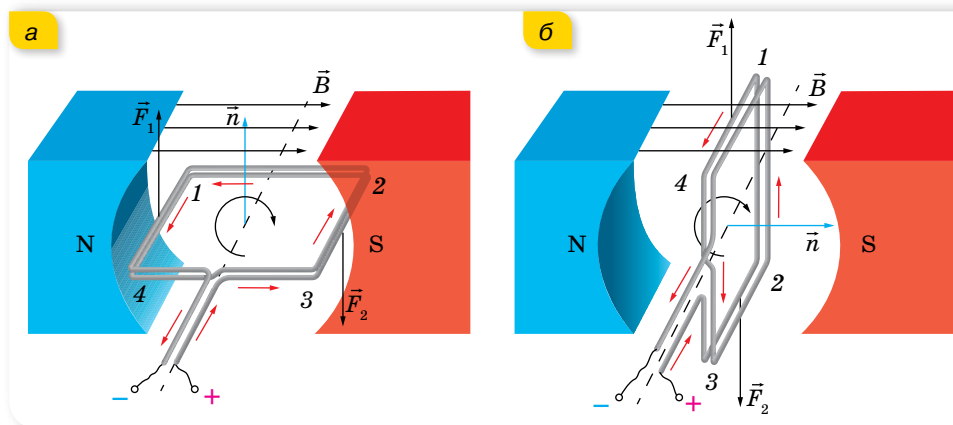
У випадку однорідного магнітного поля сила Ампера визначається за формулою $F_A = BI\Delta l \sin \alpha$, тут α — кут між напрямком струму I в провіднику та індукцією магнітного поля \vec{B} . Максимальне значення сила Ампера має, коли провідник розташований перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля, $F_{A_{\max}} = BI\Delta l$.

Напрямок сили Ампера визначають за правилом *лівої руки* (мал. 74, б): якщо розмістити ліву руку вздовж провідника так, щоб чотири пальці вказували напрямок струму в ньому, а лінії магнітної індукції входили в долоню, то відігнутий великий палець покаже напрямок сили, яка діє на провідник зі струмом.

Обертання прямокутної рамки зі струмом у магнітному полі. Розглянемо прямокутний контур (рамку), що може обертатися навколо горизонтальної осі (мал. 75, а). У початковий момент площина рамки паралельна лініям індукції однорідного магнітного поля постійного магніту. У більшості випадків розглядають орієнтацію рамки, вказуючи, як розташована нормаль \vec{n} до рамки щодо ліній індукції магнітного поля.

Пропустимо електричний струм рамкою (напрямок струму вказано червоними стрілочками). Цей струм створює магнітне поле, вектор індукції якого можна визначити за правилом свердлика. Оскільки цей напрямок збігається з вектором нормалі до площини рамки, то на малюнку показано тільки його позначення.

У провідниках 1–4 і 2–3 магнітні сили \vec{F}_1 і \vec{F}_2 утворюють пару сил, які обертають рамку. У нашому випадку — за годинниковою стрілкою. У положенні б ці сили вже не обертають рамку, а деформують її.

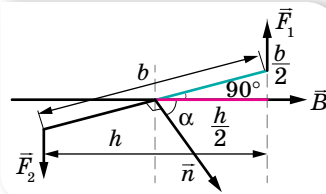


Мал. 75. Дія сил Ампера: а — повертають рамку за годинниковою стрілкою; б — розтягують рамку

Обчислимо момент пари сил щодо осі обертання рамки. Для цього розглянемо лише одну сторону рамки (мал. 76), наприклад, 1–2, довжина якої b .

Сила Ампера, що діє на сторону рамки 1–4 (мал. 75, а) довжиною a , дорівнює $F_1 = BIa$, оскільки $\vec{B} \perp a$. Така ж сила діє на сторону 2–3. Пригадаймо: обертальний момент M дорівнює добутку сили на плече — найкоротшу відстань від осі обертання до лінії дії сили.

З малюнка видно: $M_1 = F_1 \cdot \frac{h}{2} = F_1 \cdot \frac{b \cos(90^\circ - \alpha)}{2} = F_1 \cdot \frac{b}{2} \sin \alpha$. Загальний момент сили дорівнює сумі моментів M_1 і M_2 , тобто $M = F_1 \cdot b \sin \alpha$. Підставляючи вираз сили, отримуємо: $M = BIab \sin \alpha = BIS \sin \alpha$.



Мал. 76. До виведення формули обертального моменту

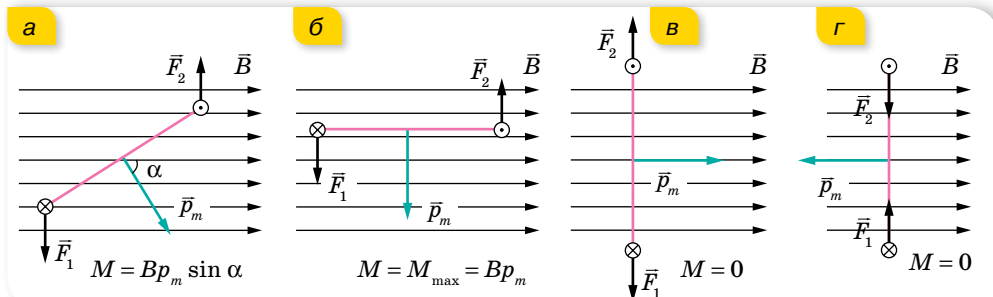
Обертальний момент M , який діє на контур зі струмом I в однорідному полі, прямо пропорційний площі S , яку обтікає струм, силі струму I та індукції магнітного поля B : $M = BIS \sin \alpha$.

Оскільки обертальний момент M залежить від положення контура відносно поля, то вводять поняття *магнітного моменту струму*, який вважають векторною величиною.

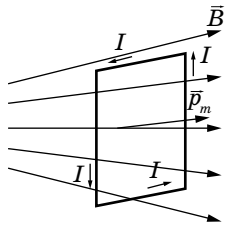
Магнітний момент струму p_m — це векторна фізична величина, що описує магнітні властивості контура зі струмом і визначає його поведінку в зовнішньому магнітному полі. Величина p_m дорівнює добутку сили струму I в контурі на площу S цього контура, $p_m = IS$. (Якщо контур має N витків, то магнітний момент струму: $p_m = ISN$.)

Напрямок вектора магнітного моменту струму визначається за правилом свердлика (правого гвинта): якщо гвинт обертати за напрямком струму в контурі, то поступальний рух гвинта покаже напрямку вектора p_m . Як ми зазначали раніше, нормаль до рамки й вектор p_m можуть збігатися.

Тепер вираз для обертального моменту можна записати так: $\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]$ або $M = Bp_m \sin \alpha$, де α — кут між векторами \vec{p}_m та \vec{B} (мал. 77, а).



Мал. 77. Значення обертального моменту



Мал. 78. Рамка в неоднорідному магнітному полі

Дія магнітного поля на провідник зі струмом лежить в основі принципу роботи електровимірвальних приладів. Детальніше про це прочитайте в електронному додатку.



В однорідному магнітному полі замкнений контур зі струмом магнітні сили можуть лише повернути. Якщо поле неоднорідне (мал. 78), то контур зі струмом може рухатися ще й поступально під дією незрівноважених сил поля в бік, де індукція поля більша за модулем.

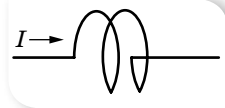
З малюнка 77 (с. 71) видно, що рівновага контура в магнітному полі можлива тоді, коли вектори \vec{p}_m та \vec{B} напрямлені по одній прямій. Зрозуміло, що стійкою вона буде в разі, коли напрямки векторів збігаються. Якщо змінити напрямок струму на протилежний, то повний обертальний момент, як і раніше, буде дорівнювати нулю, і рамка залишиться нерухомою: діючи на неї сили уже будуть лише стискати її з усіх сторін. Однак, такий стан рамки зі струмом у магнітному полі є нестійким, тому що за найменшого повороту рамки виникнуть сили, які прагнуть повернути її на 180° .

Таким чином, поведінка рамки в магнітному полі стає зрозумілою: якщо відхилити рамку від положення стійкої рівноваги й відпустити, то рамка буде здійснювати коливання. Але якщо спромогтися змінювати напрямок струму в потрібні моменти, то замість коливань отримаємо безперервне обертання. Обертання рамки зі струмом у магнітному полі використовують в електричних двигунах.

В однорідному магнітному полі замкнений контур зі струмом магнітні сили можуть лише

ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Від чого залежить модуль сили Ампера? Як визначити її напрямок? **2.** Виведіть формулу для визначення моменту сил, що діють на рамку зі струмом з боку магнітного поля. За якого положення рамки момент сил: дорівнює нулю; є максимальним? **3.** На малюнку 79 зображено два витки котушки, по якій тече електричний струм. Які сили діють на кожний виток? Які деформації вони спричиняють? Зобразіть вектори сил. З'ясуйте походження цих сил. **4.** За правилом лівої руки поясніть взаємодію (притягання, відштовхування) двох паралельних лінійних провідників зі струмом. **5.** Наведіть приклади практичного використання сили Ампера.



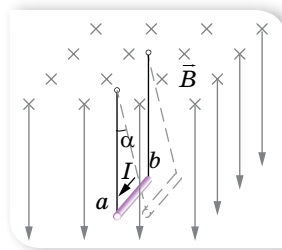
Мал. 79



Вправа 9

1. По горизонтально розташованому провіднику завдовжки 20 см і масою 4 г проходить струм силою 10 А. Визначте індукцію (модуль і напрямок) магнітного поля, у якому треба розмістити провідник, щоб сила тяжіння зрівноважилася силою Ампера.

- Провідник ab , що має довжину l і масу m , підвісили на тонких дротинках. По провіднику пропустили струм I , і він відхилився в однорідному магнітному полі (мал. 80) так, що дротинки утворили кут α з вертикаллю. Визначте індукцію магнітного поля. Якщо є можливість, визначте в такий спосіб середню індукцію магнітного поля підковоподібного магніту.
- Максимальний обертальний момент, який діє на рамку площею 1 см^2 , розміщену в магнітному полі, дорівнює $2 \text{ мкН} \cdot \text{м}$. Сила струму в рамці дорівнює $0,5 \text{ А}$. Визначте індукцію магнітного поля.
- Плоска прямокутна котушка зі сторонами 10 і 5 см , що має 200 витків, перебуває в однорідному магнітному полі з індукцією $0,05 \text{ Тл}$. Який максимальний обертальний момент може діяти на котушку в цьому полі, якщо сила струму в котушці — 2 А ?



Мал. 80

§15

Дія магнітного поля на рухому заряджену частинку

Рух зарядженої частинки в однорідному магнітному полі. Голландський учений Гендрік Лоренц пояснив існування сили Ампера тим, що магнітне поле діє на рухомі заряди в провіднику зі струмом. Оскільки ці заряди вирватися з провідника не можуть, загальна сила, яка діє на них, прикладена до всього провідника. Таким чином, сила Ампера є сумою сил, які діють на вільні заряди в провіднику зі струмом. Це припущення дає змогу визначити силу, що діє на один рухомий заряд у магнітному полі. Цю силу називають *силою Лоренца*.

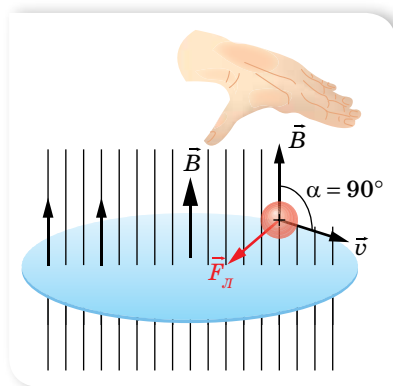
Сила Лоренца $F_{\text{Л}}$ — сила, що діє з боку магнітного поля на рухому заряджену частинку.

Одержимо вираз для визначення сили Лоренца з виразу для сили Ампера, підрахувавши кількість рухомих заряджених частинок у провіднику. Нехай N — загальна кількість вільних зарядів у провіднику зі струмом. У металі такими зарядами є електрони і, як відомо, $I = vneS$, де e — заряд електрона, v — модуль швидкості його руху, S — площа поперечного перерізу провідника, n — концентрація вільних електронів.

Тоді $F_{\text{Л}} = \frac{F_{\text{А}}}{N} = \frac{BIl}{N} \sin \alpha = \frac{BvneSl}{N} \sin \alpha = \frac{BvneV}{N} \sin \alpha$. Ураховуючи, що $nV = N$, отримуємо вираз для обчислення сили Лоренца $F_{\text{Л}} = eBv \sin \alpha$, тут α — кут між векторами швидкості \vec{v} та індукції \vec{B} .

У загальному випадку (для довільних заряджених частинок) вираз для обчислення сили Лоренца має вигляд $F_{\text{Л}} = qBv \sin \alpha$, де q — електричний заряд частинки.

Напрямок сили Лоренца визначають за правилом *лівої руки* (мал. 81, с. 74). Застосовуючи його, слід пам'ятати, що коли в магнітному полі



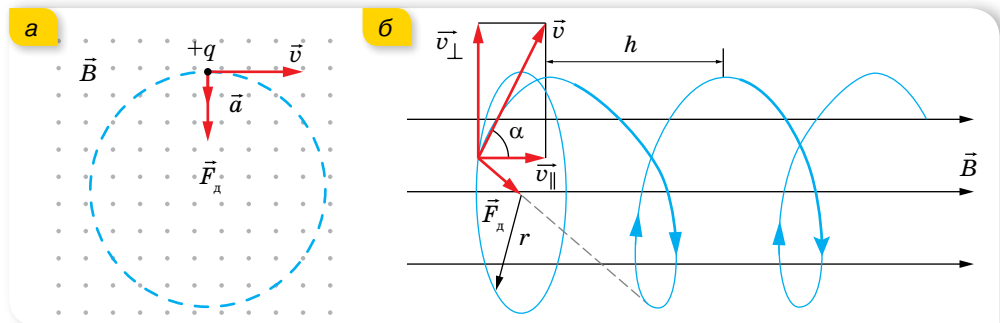
Мал. 81. Визначення напрямку сили Лоренца

рухається позитивно заряджена частинка, то чотири пальці треба спрямувати в бік її руху, якщо ж рухається негативно заряджена частинка, то витягнуті чотири пальці треба спрямувати проти вектора швидкості.

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна векторам \vec{v} та \vec{B} , а отже, напрямку переміщення частинки, вона не виконує роботи й не може змінювати кінетичну енергію частинки; вона лише викривляє траєкторію руху частинки, тобто є доцентровою силою. Припустимо, що заряджена частинка, заряд якої q та маса m , влітає зі

швидкістю \vec{v} в однорідне магнітне поле з індукцією \vec{B} ($\vec{v} \perp \vec{B}$) (мал. 82, а). (Крапки на малюнку вказують на те, що лінії магнітної індукції перпендикулярні до площини сторінки й напрямлені до читача.)

Тоді $qBv = \frac{mv^2}{r}$. У цьому разі заряд рухатиметься по колу радіусом $r = \frac{m}{qB}v$.



Мал. 82. Траєкторія руху зарядженої частинки в магнітному полі: а — за умови $\vec{v} \perp \vec{B}$; б — за умови, що напрямок швидкості утворює кут α відносно лінії індукції

Якщо швидкість частинки напрямлена під кутом α до ліній індукції, то заряд рухатиметься по гвинтовій траєкторії навколо ліній індукції поля (мал. 82, б). Вектор \vec{v} можна розкласти на складові v_{\parallel} (уздовж ліній індукції) та v_{\perp} (перпендикулярно до ліній індукції). v_{\perp} визначає радіус витка r , а v_{\parallel} з часом не змінюється (у цьому напрямку не діє сила). Якщо заряджена частинка зробить один виток протягом часу T , то вздовж ліній індукції за цей час вона зміститься на відстань $h = v_{\parallel}T$ ($v_{\parallel} = v \cos \alpha$, $v_{\perp} = v \sin \alpha$, а h є кроком гвинтової лінії).

Під час руху зарядженої частинки в неоднорідному магнітному полі змінюється не тільки напрямок, а й величина сили Лоренца, тому траєкторія руху частинки може бути дуже складною.

Використання сили Лоренца в техніці.

Рух заряджених частинок в однорідних магнітних полях використовують у багатьох пристроях, зокрема в *мас-спектрометрах* — пристроях для визначення мас заряджених частинок (йонів, ядер різних атомів та ін.).

Принципову схему мас-спектрометра наведено на малюнку 83. Проходячи крізь спеціальні отвори, йони, що вилітають із джерела S , формуються у вузький пучок. Далі вони потрапляють у селектор швидкостей, де рухаються у схрещених однорідних електричному та магнітному полях. Електричне поле створюється між пластинами плоского конденсатора, магнітне — між полюсами електромагніту. Початкова швидкість \vec{v} заряджених частинок напрямлена перпендикулярно до векторів \vec{E} та \vec{B} . На частинку, що рухається у схрещених електричних полях, діє електрична сила $\vec{F} = q\vec{E}$ та сила Лоренца $\vec{F}_L = q\vec{B}\vec{v}$.

За умови рівноваги сил, $qE = qvB$, частинка буде рухатися рівномірно й прямолінійно зі швидкістю $v = \frac{E}{B}$. Далі частинки з однаковими за значенням швидкостями влітають у камеру мас-спектрометра, у якому створене однорідне магнітне поле з індукцією \vec{B}' . У цьому полі частинки рухаються під дією сили Лоренца, траєкторією їх руху є дуга кола радіусом

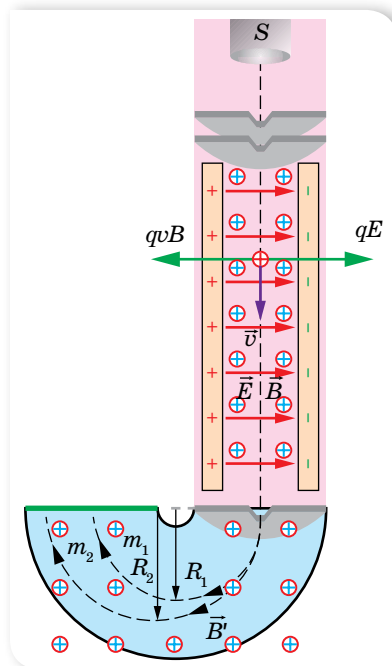
$R = \frac{mv}{qB'}$. Вимірюючи радіуси кривизни траєкторії руху і знаючи значення

v та B' , можна визначити відношення $\frac{q}{m}$.

Сучасні мас-спектрометри дають змогу визначити маси заряджених частинок з високою точністю. За їх допомогою можна розділити пучок ізотопів, оскільки вони мають однаковий заряд, але різне масове число.

Дуже важливе значення для розвитку ядерної фізики та фізики елементарних частинок мають *прискорювачі* частинок. Так називають установки, в яких заряджені частинки розганяються до великих швидкостей, що наближаються за своїм значенням до швидкості світла (а отже, і до великих енергій). Пучками заряджених частинок великих енергій бомбардують атомні ядра, щоб дослідити їхню структуру, розкрити природу ядерних сил, виявити нові частинки, що народжуються в реакціях під час взаємодії частинок високих енергій.

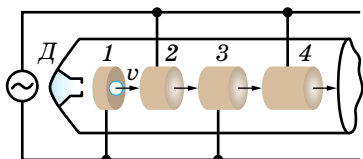
Є кілька типів прискорювачів, які умовно можна поділити на дві групи: I — прискорювачі, де заряджені частинки рухаються тільки



Мал. 83. Схема мас-спектрометра

в електричному полі; II — прискорювачі, де заряджені частинки рухаються в електричному й магнітному полях.

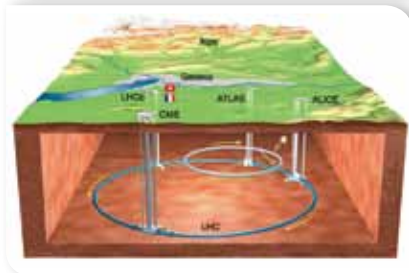
У прискорювачах I групи на заряджені частинки діє або стала різниця потенціалів (електростатичний прискорювач), або змінна, яка по черзі прикладається до двох сусідніх циліндричних електродів, осі яких розміщені вздовж однієї прямої лінії (лінійний прискорювач із синхронізованою змінною напругою). Схему лінійного прискорювача відображено на малюнку 84.



Мал. 84. Схема лінійного прискорювача



Мал. 85. Будівля синхротрону. Франція



Мал. 86. Великий адронний колайдер

Зростання енергії частинок, що вилітають з інжектора Д (пристрою, де утворюються прискорювані частинки), відбувається в момент проходження ними прискорюючих щілин — проміжків між циліндричними електродами. Такі прискорювачі розганяють частинки до енергії в десятки ГеВ. Довжина прискорювача — близько 3 км.

У прискорювачах II групи заряджені частинки рухаються не по прямій лінії, а по розбіжній спіралі. Тому їх називають циклотронами. Вперше циклотрон було сконструйовано в 1932 р. Ернестом Лоуренсом (1901–1958) у Каліфорнійському університеті для прискорення протонів та йонів. Оскільки сила Лоренца, що діє на частинку, як було зазначено, не може змінювати її кінетичну енергію, прискорити заряджену частинку за допомогою сталого магнітного поля неможливо. Тому в циклотронах, як і в лінійних прискорювачах, енергія заряджених частинок зростає тільки за рахунок роботи, яку виконує змінне електричне поле на певних ділянках траєкторії частинок, а магнітне поле лише викривляє траєкторію прискорюваних частинок, змушуючи їх рухатись не вздовж прямої лінії, а по дугах кіл різних радіусів, на які можна поділити розбіжну спіраль. Завдяки цьому розміри вакуумної камери, у якій відбувається прискорення частинок, у кілька десятків разів менші, ніж у лінійного прискорювача такої самої енергії.

На малюнку 85 показано загальний вигляд будівлі синхротрону.

Якщо в прискорювачі змінюється тільки частота, а індукція залишається

сталою, то його називають *синхротроном*. Прискорювач, у якому циклотронна частота залишається сталою, а змінюється індукція магнітного поля, називається *фазотроном*.

Сучасний прискорювач на зустрічних пучках — *колайдер* (від англ. *collide* — зіткнутися) — це система з двох прискорювачів заряджених частинок, у якій два пучки прискорюють назустріч один одному. Найбільший у світі прискорювач елементарних частинок — Великий адронний колайдер (мал. 86), створений у Європейському центрі ядерних досліджень (CERN). Прискорювач пролягає в тунелі (у формі тора радіусом 27 км) на глибині до 175 м під землею на кордоні Франції та Швейцарії. Призначений для прискорювання адронів, зокрема протонів і важких йонів.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Прискорена заряджена частинка влітає першого разу в поперечне електричне поле, другого разу — у поперечне магнітне поле. Поля протяжні й частинка не вилітає за їх межі. Якими будуть траєкторії частинки в кожному випадку? 2. Поясніть, чому світіння у верхніх шарах атмосфери (полярне сяйво), зумовлене корпускулярним випромінюванням Сонця, спостерігається переважно у приполярних широтах.



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Електрон влітає в однорідне магнітне поле зі швидкістю \vec{v} під кутом α до вектора індукції \vec{B} . Визначте радіус і крок гвинтової лінії, якою буде рухатись електрон.

Дано:

v
 α
 B
 R — ?
 h — ?

Розв'язання:

Рух електрона з такою швидкістю в однорідному магнітному полі відбувається по гвинтовій лінії (мал. 82, б; с. 74). Швидкість розкладається на складові: паралельну вектору індукції $v_{\parallel} = v \cos \alpha$ та перпендикулярну до індукції $v_{\perp} = v \sin \alpha$.

Сила Лоренца F_{\perp} діє на електрон у площині, перпендикулярній до вектора \vec{B} , надаючи йому доцентрового прискорення: $F_{\perp} = \frac{mv_{\perp}^2}{R}$,

$$evB \sin \alpha = \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{R}. \text{ Звідси } R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}.$$

Уздовж поля електрон рухається за інерцією з постійною швидкістю, оскільки в цьому напрямку не діють ніякі сили. У результаті додавання двох рухів — руху по колу та прямолінійного рівномірного руху за інерцією — траєкторія результуючого руху електрона є гвинтовою лінією. Кроком гвинтової лінії є відстань h , на яку зміщується частинка вздовж поля за один оберт, $h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha$. Ураховуючи, що $T v_{\perp} = 2\pi R$, отримуємо:

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}. \text{ Тоді } h = \frac{2\pi R v \cos \alpha}{v \sin \alpha} \text{ або } h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{eB}.$$

$$\text{Відповідь: } R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}; h = \frac{2\pi R v \cos \alpha}{v \sin \alpha} \text{ або } h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{eB}.$$

Задача 2. Йони двох ізотопів Калію масами 39 і 41 а.о.м., одержавши кінетичну енергію в електричному полі, влітають в однорідне магнітне поле з індукцією 0,16 Тл перпендикулярно до ліній індукції. Визначте, на скільки будуть відрізнятися радіуси траєкторій йонів ізотопів у магнітному полі, якщо їх рух відбувається у вакуумі, заряд кожного йона дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а в електричному полі всі йони проходять різницю потенціалів 500 В.

Дано:

$$m_{39} = 39 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$m_{41} = 41 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$U = 500 \text{ В}$$

$$B = 0,16 \text{ Тл}$$

$$Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\Delta r = ?$$

Розв'язання:

Оскільки сила Лоренца, що діє на йон ізотопу калію в магнітному полі, надає йому доцентрового прискорення, то радіус траєкторії цього йона можна визначити із співвідношення

$$Bvq = \frac{mv^2}{r}.$$

Швидкість руху йона можна визначити з формули для кінетичної енергії, врахувавши, що ця енергія одержана завдяки роботі сил електричного поля,

тобто $\frac{mv^2}{2} = qU$. Звідси визначимо швидкість руху йона: $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$.

Визначимо r з виразу для відцентрової сили:

$$r = \frac{mv}{Bq} = \frac{m}{Bq} \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2qUm^2}{q^2m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Um}{q}}.$$

Обчислюємо радіуси r_2 і r_1 траєкторій йонів різних ізотопів і визначаємо різницю $r_2 - r_1$:

$$r_1 = \frac{1}{0,16 \text{ Тл}} \sqrt{\frac{2 \cdot 500 \text{ В} \cdot 39 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}} = 0,1257 \text{ м},$$

$$r_2 = \frac{1}{0,16 \text{ Тл}} \sqrt{\frac{2 \cdot 500 \text{ В} \cdot 41 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}} = 0,129 \text{ м},$$

$$\Delta r = r_2 - r_1 = 0,129 \text{ м} - 0,1257 \text{ м} = 0,0033 \text{ м}.$$

Відповідь: 0,0033 м.



Вправа 10

1. Визначте магнітний момент електрона атома Гідрогену, що рухається по коловій орбіті радіусом $0,53 \cdot 10^{-10}$ м навколо ядра.
2. В однорідне магнітне поле з індукцією 0,085 Тл влітає електрон зі швидкістю $4,6 \cdot 10^7 \frac{\text{М}}{\text{с}}$, напрямленою перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначте силу, яка діє на електрон в магнітному полі, і радіус дуги кола, по якій він рухається. Рух відбувається у вакуумі.
3. Протон та електрон влітають в однорідне магнітне поле з однаковою швидкістю, перпендикулярно до ліній індукції. У скільки разів радіус кривизни траєкторії протона більший за радіус кривизни траєкторії електрона?

- Електрон, влітаючи в однорідне магнітне поле під кутом 60° до лінії магнітної індукції, рухається по спіралі діаметром 10 см з періодом обертання $6 \cdot 10^{-5}$ с. Визначте швидкість руху електрона, магнітну індукцію поля і крок спіралі.
- Електрон рухається в магнітному полі, індукція якого 2 мТл, по гвинтовій лінії радіусом 2 см, крок якої 5 см. Визначте швидкість руху електрона.
- Однорідні електричне та магнітне поля розташовані взаємно перпендикулярно. Напруженість електричного поля становить $1 \frac{\text{кВ}}{\text{М}}$, а індукція магнітного поля — 1 мТл. Якими мають бути напрямок і значення швидкості електрона, щоб траєкторія цього руху була прямолінійною?



Виконємо навчальні проекти

- ▶ Роль магнітосфери в еволюції Землі.
- ▶ Магнітні поля у Всесвіті.
- ▶ Вплив магнітного поля на організми.

§16

Магнітні властивості речовини

Діа-, пара- і феромагнетики. Ще Ампер для пояснення магнітних властивостей речовини висунув гіпотезу про молекулярні струми, але до створення планетарної моделі атома ця гіпотеза залишалась необґрунтованою.

За сучасними поглядами на будову речовини, кожний електрон в атомі має *спіновий* та *обертальний магнітні моменти*. Так, під час обертання одного електрона навколо ядра створюється струм, середнє значення якого можна записати формулою $I_{\text{cp}} = \frac{e}{T}$, де T — період обертання електрона навколо ядра. Із цим струмом пов'язаний орбітальний магнітний момент електрона $p_m = I_{\text{cp}} S$, де S — площа, охоплювана орбітальною електрона.

Електрони мають і власне магнітне поле, що характеризується спіновим магнітним моментом. Термін «спін» (англ. *spin* — веретено) виник у той час, коли вважалось, що власний магнітний момент електрона зумовлений його обертанням навколо власної осі. Нині закони руху електрона в атомі встановлені квантовою теорією, і *спін* електрона є квантовомеханічною його властивістю, що не має аналогії у класичній фізиці. У класичній фізиці момент імпульсу виникає внаслідок обертання масивного тіла скінченних розмірів. Спін властивий навіть частинкам, які на сьогодні вважаються точковими, і не пов'язаний із жодним обертанням мас всередині такої частинки.

Електрони розташовуються так, що їх спін напрямлений уздовж лінії магнітного поля й може збігатися з напрямком вектора \vec{B} або бути йому протилежним. Отже, атом (чи молекула) будь-якої речовини — це складна мікроскопічна (елементарна) магнітна система. Результируючий магнітний момент атома дорівнює векторній сумі спінових та орбітальних маг-

нітних моментів окремих електронів. Оскільки власні магнітні моменти протонів та ядра значно менші від магнітних моментів електронів, то вважають, що магнітні властивості атома визначаються магнітними властивостями його електронної оболонки.

Залежно від кількості електронів в атомі та їх взаємного розміщення на електронних оболонках навколо ядра може статися так, що сумарний магнітний момент атома дорівнюватиме нулю.

Речовини, атоми яких не мають власного магнітного моменту, тобто у яких спінові та орбітальні магнітні моменти електронів взаємно скомпенсовані, називаються **діамагнетиками**.

До них належать речовини, атоми яких мають повністю забудовані електронні оболонки: інертні гази, азот, водень, кремній, вісмут, цинк, мідь, срібло, а також багато органічних і неорганічних сполук (вода, ацетон, гліцерин, нафталін тощо). Усередині діамагнетика, внесеного в зовнішнє магнітне поле, відбувається так званий діамагнітний ефект, що полягає у виникненні в атомів речовини індукованого (наведеного) магнітного моменту, який завжди напрямлений проти вектора індукції магнітного поля, тому відносна магнітна проникність діамагнетиків менша від одиниці ($\mu < 1$).

Речовини, що складаються з атомів і молекул, які мають відмінний від нуля власний магнітний момент, називаються **парамагнетиками**.

Цей термін уперше ввів у 1845 р. Майкл Фарадей, який поділив речовини на діамагнітні й парамагнітні, а перше пояснення парамагнетизму розробив на основі класичної електронної теорії французький фізик Поль Ланжевен (1872–1946). До парамагнетиків належать речовини, атоми яких мають незаповнену внутрішню оболонку (алюміній, кальцій) або непарну кількість електронів (натрій), деякі метали (платина, вольфрам), кисень тощо. За відсутності зовнішнього магнітного поля відмінні від нуля магнітні моменти атомів парамагнітної речовини під дією теплового руху розміщуються рівномірно за всіма напрямками. У результаті сумарний макроскопічний магнітний момент тіла дорівнює нулю, і воно виявляється ненамагніченим.

Після внесення парамагнітної речовини в зовнішнє магнітне поле в ній поряд із слабким діамагнітним ефектом відбувається переважна орієнтація елементарних магнітних моментів атомів у напрямку цього поля. Тому парамагнетики намагнічуються вздовж зовнішнього поля і, отже, підсилюють його, їхня магнітна проникність трохи більша за одиницю ($\mu > 1$).

Зразки з пара- і діамагнетика по-різному себе поведуть у разі внесення їх у магнітне поле. В однорідному магнітному полі видовжений зразок з діамагнітної речовини розміщується перпендикулярно до силових ліній поля, парамагнітний зразок — уздовж них. У неоднорідному магнітному

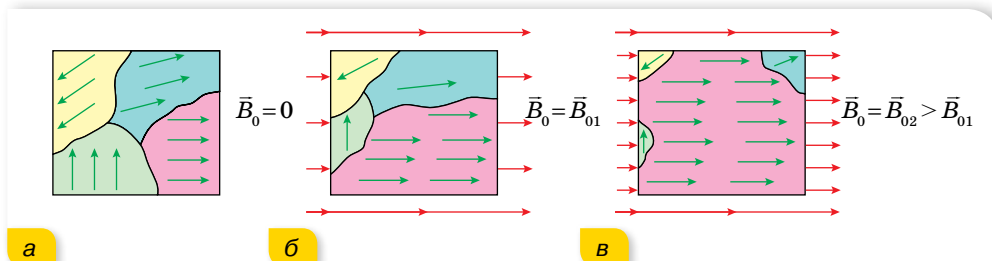
полі діамагнетик виштовхується в напрямку зменшення індукції магнітного поля, парамагнетик — утягується.

Механізм намагнічування парамагнетиків дуже схожий на механізм поляризації полярних діелектриків. Діамагнетизм не має аналога серед електричних властивостей речовини.

Окрім названих типів магнетиків, існують і такі, що здатні дуже сильно намагнічуватись у магнітному полі (наприклад, залізо, сталь, чавун, нікель, кобальт, гадоліній). Вони утворюють окрему групу сильно магнітних речовин, які називають *феромагнетиками* (від лат. Ferrum — залізо). Магнітна проникність феромагнітних речовин дуже велика — 10^2 – 10^5 . Отже, феромагнетиками підсилюють зовнішнє поле в сотні й тисячі разів. Ефект «втягування» ліній індукції зовнішнього поля у феромагнетиків дуже сильний.

Досліджуючи природу феромагнетизму, французький фізик П'єр Вейсс (1865–1940) у 1907 р. висунув гіпотезу про існування у феромагнетиків внутрішньої взаємодії, що приводить до самодовільного (спонтанного) намагнічування окремих ділянок феромагнетика за відсутності зовнішнього магнітного поля. Вивчення будови цих речовин за допомогою мікроскопа показало, що феромагнетик складається з множини самодовільно (спонтанно) намагнічених областей розмірами близько 0,001–0,1 мм, які називають *доменами* (або областями Вейсса). Фактично це області, що охоплюють сотні атомних шарів, у яких напрямок намагнічування змінюється монотонно.

Якщо відсутнє зовнішнє магнітне поле ($\vec{B}_0 = 0$), то домени феромагнетика розміщені хаотично (мал. 87, а). Тому він не виявляє макроскопічної намагніченості. Коли феромагнетик вміщують у зовнішнє магнітне поле, його домени перемагнічуються так, щоб їхні магнітні моменти мали напрямок ліній індукції зовнішнього поля (мал. 87, б) (орієнтуються в напрямку поля). До того ж змінюються межі доменів і домени, орієнтація яких відповідала зовнішньому магнітному полю, — вони збільшують свої розміри за рахунок доменів з іншою орієнтацією (мал. 87, в).



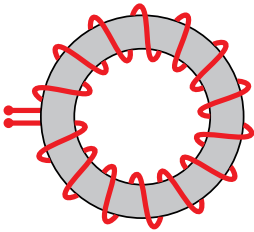
Мал. 87. Намагнічування феромагнетика

Після вимикання зовнішнього магнітного поля єдиним фактором, що впливає на орієнтацію доменів, залишається тепловий рух, який руйнує орієнтацію доменів. За низьких температур інтенсивність теплового

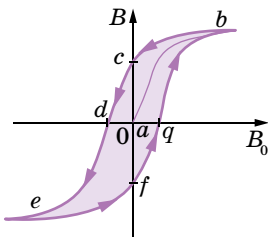
руху виявляється недостатньою для повного руйнування орієнтації доменів, і феромагнетик зберігає певне залишкове намагнічування. В експериментах із залізом П'єр Кюрі встановив, що у процесі нагрівання залізо за певної температури втрачає властивості феромагнетика і переходить у парамагнітний стан. Подальші дослідження показали, що для кожного феромагнетика є своя визначена температура (температура Кюрі), за якої феромагнітні властивості зникають. Для заліза, наприклад, ця температура становить $770\text{ }^{\circ}\text{C}$, для кобальту — $1130\text{ }^{\circ}\text{C}$, для нікелю — $360\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отже, уявлення про доменну структуру феромагнетиків дає можливість пояснити особливості процесу їх намагнічування. Однак залишаються нез'ясованими питання: чому існують домени; які сили змушують атоми в доменах шикуватися так, щоб їх власні магнітні поля були строго орієнтовані? Відповідь на ці питання була дана в 1928 р. радянським фізиком Яковом Іллічем Френкелем і німецьким фізиком Вернером Гейзенбергом. Вони показали, що сильну орієнтацію магнітних полів атомів зумовлюють так звані сили обмінної взаємодії. Природа цих сил пояснюється лише квантовою теорією атома.

Магнітний гістерезис. Характерною особливістю феромагнетиків є складна залежність індукції внутрішнього поля намагніченого феромагнетика B від індукції зовнішнього поля намагнічуючих струмів B_0 . До того ж намагнічування феромагнетика залежить не лише від індукції намагнічуючого поля, а й від того, намагнічувався даний феромагнетик раніше чи ні.



Мал. 88. Тороїдальна котушка



Мал. 89. Петля гістерезису

Кількісне дослідження залежності $B = f(B_0)$ проводять, як правило, за допомогою залізного кільця, на яке намотана обмотка, якою пропускають електричний струм (мал. 88). Обмотку такої форми називають *тороїдом*.

Нехай залізне осердя тороїдальної котушки раніше не намагнічувалось і струму в котушці немає. Почнемо поступово збільшувати силу струму. Індукція зовнішнього поля B_0 буде зростати пропорційно силі струму.

Індукція внутрішнього поля також починає зростати, але не лінійно, а так, як показано на малюнку 89. Спочатку (точка a) домени невпорядковані. Зі зростанням B_0 орієнтація доменів впорядковується, і в точці b майже всі домени зорієнтовані по полю. Намагнічення осердя, як кажуть, досягає насичення. Точка b на графіку відповідає приблизно 70 % повного насичення, оскільки останні домени впорядковуються досить важко.

Будемо зменшувати B_0 , зменшуючи силу струму в обмотці. Коли струм зменшується до

нуля (точка c), домени ще зберігають деяку впорядкованість, і осердя зберігає залишкове намагнічення. У такий спосіб виготовляють постійні магніти. Змінимо напрямок струму в обмотці, і знову будемо його монотонно збільшувати. Протилежно напрямлене до залишкового намагнічування осердя магнітне поле ($-B_0$) почне переорієнтовувати домени, і в точці d внутрішнє поле зникає, $B = 0$. Подальше зростання сили струму спричиняє нову повну орієнтацію доменів (точка e). Зверніть увагу на те, що крива розмагнічування (bd) спадає повільніше, ніж зростала в процесі намагнічування феромагнетика. Це явище називають *магнітним гістерезисом* (від грец. *гістерезис* — запізнення).

Якщо знову зменшувати струм до нуля, а потім збільшувати його у протилежному напрямку, то індукція B буде змінюватись згідно з кривою $efqb$, допоки знову не досягне насичення в точці b . Утворена на графіку внаслідок цього замкнена крива дістала назву *петлі гістерезису*.

У такому циклі велика кількість енергії перетворюється на тепло (через внутрішнє тертя під час переорієнтації доменів); можна довести, що втрати тепла пропорційні площі петлі гістерезису.

Феромагнетики з великою площею петлі гістерезису називають *жорсткими*, а з малою площею — *м'якими*.

Про застосування магнітних матеріалів читайте в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

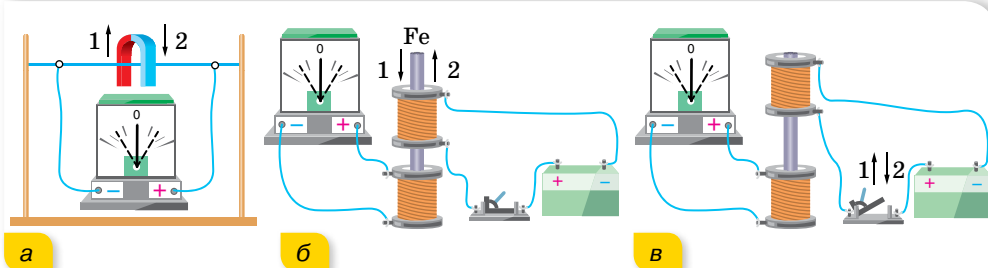
1. Які речовини називають діамагнетиками; парамагнетиками; феромагнетиками?
2. Що таке домен? Як поведуть себе домени під час намагнічування феромагнетика?
3. Які основні властивості мають феромагнетики? Наведіть приклади практичного використання феромагнетиків у техніці.

§17

Електромагнітна індукція

Потік магнітної індукції. Після відкриття Ерстеда, який довів, що навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле, природно було би поставити питання про можливість утворити електричний струм у провідниках за допомогою магнітного поля. Як ви знаєте з курсу фізики 9 класу, над розв'язанням цієї проблеми працював англійський фізик Майкл Фарадей. Відкрите ним явище називається електромагнітною індукцією, суть якого в тому, що в замкнутому провіднику (контурі) виникає електричний

струм (*індукційний струм*) за умови зміни магнітного поля, що проходить крізь контур (мал. 90). Для реалізації цього явища не важливо, рухається провідник або джерело магнітного поля чи ні.

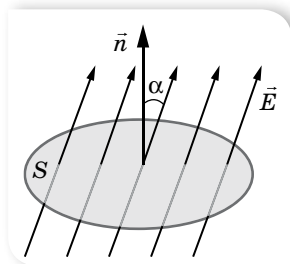


Мал. 90. Досліди з виявлення явища електромагнітної індукції

Щоб дати точне кількісне пояснення розглянутого явища, треба ввести величину — *потік магнітної індукції* (або, як кажуть, *магнітний потік*).

Потік магнітної індукції Φ — це фізична величина, яка характеризує магнітне поле, що пронизує певну поверхню площею S . Якщо індукція B в усіх точках поверхні однакова, то $\Phi = BS \cos \alpha$, де α — кут між вектором магнітної індукції та нормаллю до поверхні (мал. 91).

Одиниця магнітного потоку — вебер, $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{А}}$.



Мал. 91.
До визначення
магнітного потоку

Визначення явища електромагнітної індукції відповідно формулюють так: явище виникнення в замкненому провіднику електричного струму внаслідок зміни магнітного потоку, що пронизує контур провідника.

Якщо в котушку, сполучену з гальванометром, вставити магніт, а потім рухати їх разом так, щоб вони одне відносно одного залишалися у спокої, то індукційний струм не виникатиме (магнітний потік, що пронизує контур котушки, залишається сталим). Не виникає індукційний струм і в разі поступального руху замкненого провідника в однорідному полі вздовж силових ліній.

Напрямок індукційного струму. Правило Ленца. Майкл Фарадей, аналізуючи проведені досліди, встановив, що напрямок індукційного струму в провіднику залежить від того, збільшується ($\Delta\Phi > 0$) чи зменшується ($\Delta\Phi < 0$) магнітний потік через його контур. Загальне правило, за допомогою якого можна визначити напрямок індукційного струму в замкненому провіднику, сформулював у 1833 р. російський фізик Емілій Християнович Ленц (1804–1865).

Індукційний струм у замкненому провіднику завжди має такий напрямок, що створюваний цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм. (Правило Ленца випливає із закону збереження енергії.)

Поєднуючи правило Ленца з правилом свердлика (букв), за допомогою якого визначають напрямок вектора індукції магнітного поля в центрі колового струму, легко визначити напрямок індукційного струму в замкненому провіднику. Припустимо, що до замкненого витка (чи котушки) наближається зі швидкістю v постійний магніт північним полюсом N (мал. 92, а). При цьому магнітний потік через контур витка зростає ($\Delta\Phi > 0$). Отже, за правилом Ленца, у витку має виникнути індукційний струм такого напрямку, щоб власним магнітним полем протидіяти зростанню зовнішнього магнітного потоку. Для цього потрібно «не пустити» магніт у виток, тобто відштовхнути його. Це означає, що внутрішнє магнітне поле індукційного струму буде напрямлене проти зовнішнього поля постійного магніту. Отже, робимо висновок, що з того боку витка (чи котушки), який повернуто до магніту, з'являється однойменний полюс N (якби до витка наближався магніт південним полюсом S , то із цього боку виникав би південний полюс магнітного поля індукційного струму). Далі міркуємо так. Для того щоб назустріч постійному магніту утворився полюс N індукційного струму, потрібно, аби поступальне переміщення свердлика відбувалось зліва-направо, тобто його ручку треба обертати проти стрілки годинника (дивимось на виток з боку магніту). Напрямок цього обертання і вказує напрямок індукційного струму. (Замість правила свердлика можна також скористатися правилом букв, уписаних у виток, мал. 92.)

З віддаленням постійного магніту від витка (мал. 92, б) магнітний потік через його контур зменшується ($\Delta\Phi < 0$). Щоб протидіяти цьому, потрібно «не відпускати» магніт, тобто притягувати його. Це означає, що магнітне поле індукційного струму буде однакового напрямку із зовнішнім, тобто з боку магніту матиме південний полюс S . За правилом свердлика (чи букв) з'ясуємо, що індукційний струм у витку повинен проходити за стрілкою годинника.



Мал. 92. Визначення напрямку індукційного струму

У випадку виникнення індукційного струму в прямому провіднику (який є ділянкою замкненого кола і рухається в зовнішньому магнітному полі перпендикулярно до ліній індукції, тобто перетинає їх) напрямок індукційного струму можна визначити за правилом *правої руки*:

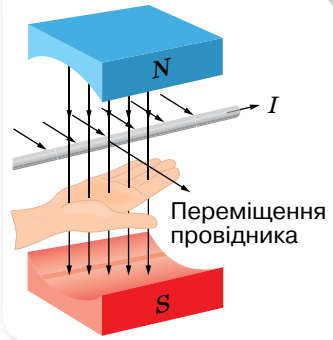
праву руку треба розмістити в магнітному полі так, щоб силові лінії входили в долоню, а відставлений під прямим кутом великий палець збігався з напрямом переміщення провідника. Тоді чотири витягнуті пальці вкажуть напрямок індукційного струму в цьому провіднику (мал. 93).

Пояснення діамагнетизму на основі правила

Ленца. У (§ 16) ми зазначили, що в діамагнетику, внесеному у зовнішнє магнітне поле, відбувається так званий діамагнітний ефект, що полягає у виникненні в атомів речовини індукованого (наведеного) магнітного моменту, який завжди напрямлений проти вектора індукції магнітного поля, тому відносна магнітна проникність діамагнетиків менша від одиниці ($\mu < 1$). Оскільки зовнішнє магнітне поле діє не тільки на вільні носії заряду в провіднику, а й на всі заряджені частинки речовини, що рухаються, зокрема й на зв'язані електрони, що рухаються на певних відстанях навколо атомних ядер, то при цьому виникають зміни в орбітальних рухах електронів, що є причиною виникнення *діамагнітного ефекту* в усіх без винятку речовинах.

Діамагнетизм речовини якісно можна пояснити на основі правила Ленца щодо напрямку індукційного струму в провідниках.

Уявімо собі рух електрона навколо атомного ядра, як деякий струм по замкненому контуру у формі орбіталі електрона. Відомо, що зі збільшенням магнітного потоку крізь замкнений контур (а в разі внесення речовини в зовнішнє магнітне поле магнітний потік, що пронизує електронні орбіти, зростає), у ньому виникає індукційний струм, напрямком якого, за правилом Ленца, має бути таким, щоб власним магнітним полем протидіяти зміні зовнішнього магнітного поля, яка породжує цей індукційний струм. Із цього випливає, що в кожного атома речовини в момент внесення в зовнішнє магнітне поле індукцією \vec{B} виникає власний магнітний момент, напрямлений проти цього поля.



Мал. 93. Визначення напрямку індукційного струму за правилом правої руки



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗЦМЮ

1. Щоб одержати індукційний струм у кільці за допомогою магніту, кільце й магніт переміщували разом (один відносно одного вони не переміщувалися). Чи виникав за таких умов індукційний струм у кільці? **2.** Чи завжди утворюється індукційний струм у металевому кільці зі зміною в його площині: а) магнітного потоку; б) індукції магнітного поля? **3.** Магніт у вакуумі вільно падає південним полюсом у центр дротяного кільця. Яким буде напрямок індукційного струму в разі наближення магніту до кільця? **4.** Крізь провідне кільце, розташоване горизонтально, падають з однакової висоти алюмінієвий брусок і магніт. Що впаде першим?

§18

Закон електромагнітної індукції

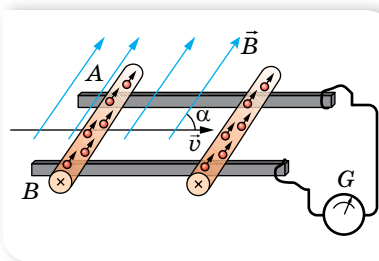
Закон електромагнітної індукції. Перейдемо до кількісного формулювання закону електромагнітної індукції. Індукційний струм I_i у замкненому провіднику опором R виникає під дією електрорушійної сили індукції ε_i , яку можна виразити за законом Ома: $\varepsilon_i = I_i R$. Оскільки та само ЕРС у провідниках з різними опорами створює однакові струми, то для кількісної характеристики явища електромагнітної індукції зручніше користуватися величиною ЕРС індукції ε_i , а не силою індукційного струму I_i .

Майкл Фарадей у ході досліджень установив, що ЕРС індукції, яка виникає під час зміни магнітного потоку через контур провідника, прямо пропорційна швидкості зміни цього потоку $\varepsilon_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Якщо ЕРС індукції спостерігається в котушці з N витків, то її величина буде відповідно в N разів більшою, ніж для одного витка, тобто $\varepsilon_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Цей вираз математично виражає **закон електромагнітної індукції**.

ЕРС індукції, як і електрорушійна сила будь-якого іншого походження, вимірюється у вольтах. Тоді одиницю магнітного потоку в СІ — вебер — можна записати так: $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Виникнення ЕРС під час руху провідника в магнітному полі. Звернемося до питання про природу ЕРС індукції. Спочатку розглянемо механізм виникнення ЕРС індукції під час руху провідника в стаціонарному магнітному полі.

Нехай в однорідному магнітному полі індукцією B розміщено прямолінійний металевий провідник довжиною l , який може ковзати по паралельних стержнях (мал. 94). При цьому швидкість руху провідника v напрямлена під кутом α до вектора \vec{B} . Під час руху провідника зі швидкістю v будуть рухатись і його власні електрони та йони. А оскільки вони рухаються в магнітному полі, то на кожний йон та електрон діє сила Лоренца. Якщо йони під впливом сили Лоренца не покидають положень стійкої рівноваги у вузлах кристалічної ґратки, то вільні електрони провідника зміщуються до одного його кінця A , залишаючи на другому кінці B надлишок позитивних зарядів. Це розділення зарядів триватиме доти, поки вони не створять усередині провідника таке електростатичне поле (напрявлене від B до A), у якому на електричні заряди провідника діятиме сила, рівна за значенням і протилежна за напрямком силі



Мал. 94. До пояснення механізму виникнення ЕРС у рухомому провіднику

Лоренца. Отже, зміщення електронів до кінця A припиниться за умови: $F_e = F_{\text{л}}$. Оскільки $F_e = eE = e \frac{U}{l}$, а $F_{\text{л}} = evB \sin \alpha$, маємо: $e \frac{U}{l} = evB \sin \alpha$, звідки $U = Blv \sin \alpha$.

Оскільки напруга на полюсах в разі розімкненого кола дорівнює ЕРС, то ЕРС індукції, яка виникає в провіднику під час його руху в магнітному полі, визначається формулою $\varepsilon_i = Blv \sin \alpha$.

Таким чином, причиною виникнення ЕРС індукції в рухомому провіднику є сила Лоренца.

ЕРС індукції такої природи виникає в будь-якому провіднику, коли він рухається в магнітному полі так, що його швидкість перпендикулярна до його власної довжини й утворює з вектором індукції магнітного поля кут α (іншими словами, коли він перетинає лінії індукції магнітного поля). Провідник стає джерелом ЕРС. Цю властивість використовують на електростанціях.

Індукційне електричне поле. Розглянемо випадок утворення індукційного струму в замкненому провіднику, коли змінюється магнітний потік через площину, обмежену цим провідником, але ніякого відносного руху немає. Магнітне поле, що пронизує контур, у цьому випадку привести заряди в рух не може, оскільки воно діє лише на рухомі заряди (зрозуміло, хаотичний тепловий рух не враховуємо). Проте на нерухомі заряди може діяти електричне поле. Якщо це так, то звідки це поле з'являється? Можливо, саме змінне магнітне поле може створювати (індукувати) електричне поле, яке вже й збуджує в замкненому провіднику індукційний струм?

Таке припущення вперше висловив Джеймс Максвелл. Розвиваючи цю ідею, він створив теорію *електромагнітного поля*, яка була підтверджена багатьма дослідженнями. За теорією Максвелла, у просторі, у якому існує змінне магнітне поле, обов'язково виникає так зване *індукційне електричне поле*. Водночас виникнення індукційного електричного поля ніяк не пов'язане з наявністю в даній частині простору провідника. Наявність провідника лише дає змогу виявити це поле за збудженим індукційним електричним струмом.

Тепер явище електромагнітної індукції постає перед нами в новому світлі. Головне в ньому — це процес утворення змінним магнітним полем індукційного електричного поля. Суть явища електромагнітної індукції в нерухомому провіднику полягає не стільки у виникненні індукційного струму, скільки у виникненні електричного поля, яке приводить у рух електричні заряди.

Видатний німецький дослідник Герман Гельмгольц (1821–1894) вивів формулу для обчислення ЕРС індукції теоретично із закону збереження енергії. Спробуймо й ми. Умістимо в однорідне магнітне поле індукцією B провідник довжиною Δl й опором R , який є ділянкою замкненого кола $ABCD$ (мал. 95). Опором з'єднувальних провідників BC , CD і AD знехтуємо.

Джерело постійного струму, що має ЕРС ε та внутрішній опір r , створює у замкненому колі струм $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$, який у провіднику проходить перпенди-

кулярно до ліній індукції магнітного поля. Водночас на провідник довжиною Δl діє сила Ампера $F_A = BI\Delta l$, у результаті чого провідник переміщується прискорено, і за час Δt пройде шлях s . Під час проходження струму I в замкнутому колі $ABCD$ протягом часу Δt виділяється ланц-джоулеве тепло $Q = I^2 (R + r)\Delta t$ та виконується механічна робота з переміщення провідника на шляху s : $A = F_A s = BI\Delta l s = BI\Delta S = I\Delta\Phi$.

За законом збереження енергії, ці витрати мають дорівнювати повній роботі джерела струму $A' = \varepsilon I\Delta t$, тобто $\varepsilon I\Delta t = I^2 (R + r)\Delta t + I\Delta\Phi$. Після спро-

щень отримуємо вираз $I = \frac{\varepsilon - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{R + r}$. Ця формула виражає закон Ома для замкнутого контура, вміщеного в магнітне поле. Роль діючої електро-

рушійної сили в такому колі відіграє вираз $\varepsilon - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ або $\varepsilon + \left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$. Це означає, що додатковий член $\left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$, який відрізняється від нуля тільки при зміні магнітного потоку через контур кола, повинен мати розмірність ЕРС. Отже, він і визначає ЕРС індукції $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. (Якщо контур складається з N витків, то $\varepsilon_i = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.)

Цей вираз називають *основним законом електромагнітної індукції*, або *законом Фарадея — Максвелла*.

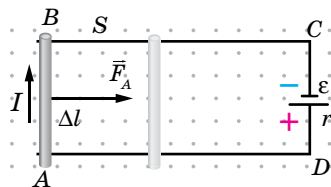
ЕРС індукції ε_i у замкнутому контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур із протилежним знаком, $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Знак « $-$ » є відображенням дії правила Ленца.

Приклади застосування закону електромагнітної індукції. Розглянемо кілька прикладів застосування основного закону електромагнітної індукції для обчислення ЕРС індукції в поодиноких випадках.

Для випадку нестационарного магнітного поля, коли вектор індукції магнітного поля змінюється із часом за незмінних площі контура та його орієнтації ($S = \text{const}$, $\alpha = \text{const}$), $\varepsilon_i = -\frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha$.

У разі зміни орієнтації поля (якщо $|\vec{B}| = \text{const}$) або зміни орієнтації контура в стаціонарному полі ($S = \text{const}$), $\varepsilon_i = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = -\frac{BS(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{\Delta t}$,



Мал. 95. Рух провідника в магнітному полі

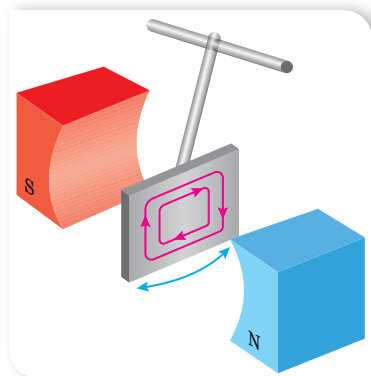
де α_1 і α_2 — кути між нормаллю до контура та вектором індукції в початковий і кінцевий моменти часу.

Коли магнітне поле стаціонарне ($\vec{B} = \text{const}$), а орієнтація контура незмінна ($\alpha = \text{const}$), то ЕРС індукції може виникати внаслідок зміни площі контура. Її розраховують за формулою $\varepsilon_1 = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = -\frac{B(S_2 - S_1)}{\Delta t} \cos \alpha$, де S_1 і S_2 — площі контура на початку й наприкінці, наприклад, руху ділянки контура.

Ці формули можна використовувати для розв'язування багатьох задач.

Вихрові струми. До цього часу ми розглядали лише лінійні провідники, у яких виникає індукційний струм у змінному магнітному полі. Якщо ж цей провідник буде виготовлено у вигляді суцільної пластини, то змінне магнітне поле теж зумовлює індукційні струми, вони самі собою замикаються всередині, і тому їх називають вихровими струмами.

Уперше вихрові струми виявив французький учений Франсуа Фуко (1786–1853) у 1824 р., тому їх ще називають струмами Фуко. Фуко відкрив явище нагрівання металевих тіл, які обертаються в магнітному полі, вихровими струмами. Струми Фуко спричинюються дією змінного електромагнітного поля і за своєю фізичною природою нічим не відрізняються від індукційних струмів, що виникають у лінійних провідниках.



Мал. 96. Дослід, що демонструє гальмування коливань пластини-маятника в магнітному полі внаслідок виникнення струмів Фуко

Оскільки електричний опір провідників малий, то сила струмів Фуко може досягати великих значень. Згідно з правилом Ленца, вони вибирають у провіднику такий напрямок, щоб протистояти причині, яка їх спричинює. Наприклад, суцільний провідник (пластина), рухаючись у сильному магнітному полі, зазнає сильного гальмування, яке пояснюється взаємодією струмів Фуко з магнітним полем (мал. 96). (Цей ефект застосовують для демпфування рухливих частин гальванометрів, сейсмографів тощо.)

Оскільки вихрові індукційні струми циркулюють всередині провідника, то вони зумовлюють його сильне нагрівання. Теплову дію струмів Фуко використовують в індукційних печах. Такі печі мають вигляд котушки, яка живиться від високочастотної потужної батареї. У середину печі поміщають тіло-провідник, у якому виникають вихрові струми, які й розігрівають його до температури плавлення.

У багатьох випадках струми Фуко небажані, шкідливі. Для боротьби з ними вдаються до спеціальних заходів. Наприклад, осердя трансформаторів набираються з тонких пластин, перериваючи шляхи утворення великих вихрових струмів.



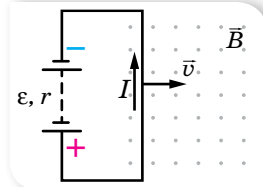
ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Що називають ЕРС індукції? Яка формула виражає основний закон електромагнітної індукції? **2.** Виведіть формулу, за якою визначають значення ЕРС індукції в прямолинійному провіднику, що рухається, перетинаючи лінії індукції однорідного магнітного поля. **2.** Яка природа сили, що збуджує індукційний струм у провіднику, що рухається в постійному магнітному полі? Яка природа сили, що збуджує індукційний струм у нерухомому контурі, що пронизується змінним магнітним полем? **3.** Чим відрізняється вихрове електричне поле від електростатичного, чи стаціонарного? **4.** Що таке вихрові струми? У чому проявляється їх негативний вплив?



Приклади розв'язування задач

Задача. Прямолинійний провідник завдовжки 1,2 м за допомогою гнучких дротів приєднали до джерела електричного струму з ЕРС 24 В і внутрішнім опором 0,5 Ом. Провідник розміщують в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 0,8 Тл, напрямленою на читача (мал. 97). Опір усього зовнішнього кола дорівнює 2,5 Ом. Визначте силу струму в провіднику, коли він рухається перпендикулярно до ліній індукції поля зі швидкістю $12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. У скільки разів зміниться сила струму, якщо провідник зупиниться?



Мал. 97

Дано:

$$l = 1,2 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 24 \text{ В}$$

$$r = 0,5 \text{ Ом}$$

$$B = 0,8 \text{ Тл}$$

$$v = 12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$R = 2,5 \text{ Ом}$$

$$I_1 = ?; \frac{I_2}{I_1} = ?$$

Розв'язання:

Силу струму визначимо із закону Ома для повного кола:

$$I = \frac{\varepsilon_0}{r + R},$$
 де ε_0 — ЕРС, що діє в колі. Під час руху провідника в магнітному полі, крім ЕРС батареї ε , у колі діє ЕРС індукції ε_i . Обчислимо її. Нехай у початковий момент часу площа контура, що перетинає магнітне поле, S_1 . Через час Δt :

$$S_2 = S_1 + vl\Delta t. \text{ Тоді } \Delta S = vl\Delta t, \text{ а } \varepsilon_i = -\frac{B\Delta S}{\Delta t} = -Bvl.$$

$$\text{Таким чином, } \varepsilon_0 = \varepsilon + \varepsilon_i, \text{ а } I_1 = \frac{\varepsilon + \varepsilon_i}{r + R}.$$

У разі зупинки провідника ε_i зникає, тому ε_0 буде дорівнювати ε .

$$\text{Обчислимо: } \varepsilon_i = -0,8 \text{ Тл} \cdot 12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,2 \text{ м} = -12 \text{ В}.$$

$$\text{Сила струму в рухомому провіднику } I_1 = \frac{24 \text{ В} - 12 \text{ В}}{0,5 \text{ Ом} + 2,5 \text{ Ом}} = 4 \text{ А}.$$

$$\text{Сила струму в нерухомому провіднику } I_2 = \frac{24 \text{ В}}{0,5 \text{ Ом} + 2,5 \text{ Ом}} = 8 \text{ А}.$$

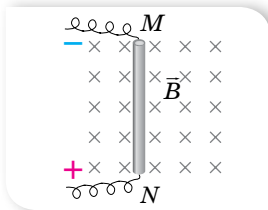
$$\text{Визначимо відношення струмів } \frac{I_2}{I_1} = \frac{8 \text{ А}}{4 \text{ А}} = 2.$$

Відповідь: 4 А, 2 рази.

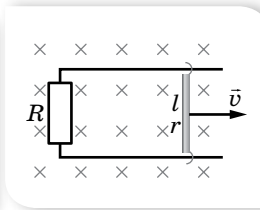


Вправа 11

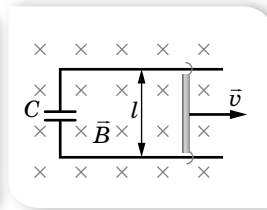
- Провідник MN (мал. 98), довжина активної частини якого 1 м, а опір 2 Ом, міститься в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл. Провідник приєднали до джерела, ЕРС якого дорівнює 1 В (внутрішнім опором джерела та опором підвідних провідів знехтуйте). Визначте силу струму в провіднику, якщо він: а) перебуває у стані спокою; б) рухається праворуч зі швидкістю $4 \frac{M}{C}$; в) рухається ліворуч з тією самою швидкістю. У якому напрямку і з якою швидкістю треба переміщувати провідник, щоб у ньому не проходив струм?
- В однорідному вертикальному магнітному полі з індукцією $B = 0,4$ Тл по двох горизонтальних паралельних стержнях, розміщених на відстані $l = 0,5$ м один від одного і замкнутах на резистор опором $R = 1,5$ Ом, рухається без тертя провідник опором $r = 0,5$ Ом зі швидкістю $v = 1 \frac{M}{C}$, перпендикулярною до ліній індукції поля (мал. 99). Визначте: а) силу струму в колі; б) силу, напрямлену в сторону руху, яку необхідно прикласти до провідника, щоб він рівномірно рухався з даною швидкістю; в) теплову потужність, яка виділяється в колі. Опором стержнів знехтуйте.
- По двох паралельних рейках, що розміщені на відстані $l = 0,2$ м одна від одної, перпендикулярно до однорідного магнітного поля з індукцією $B = 0,1$ Тл, рухається провідник зі швидкістю $v = 0,5 \frac{M}{C}$ (мал. 100). Визначте заряд та енергію електричного поля конденсатора ємністю $C = 20$ мкФ, який включено в коло.



Мал. 98



Мал. 99



Мал. 100

- Рамка із 25 витків міститься в магнітному полі. Визначте ЕРС індукції, яка виникає в рамці внаслідок зміни магнітного потоку в ній від 0,098 до 0,013 Вб за 0,16 с.
- У котушці із 75 витків магнітний потік дорівнює $4,8 \cdot 10^{-3}$ Вб. За який час має зникнути цей потік, щоб у котушці виникла середня ЕРС індукції, яка дорівнює 0,74 В?
- Скільки витків повинна мати котушка, щоб унаслідок зміни магнітного потоку всередині її від 0,024 до 0,056 Вб за 0,32 с в ній виникла середня ЕРС індукції, яка дорівнює 10 В?
- Прямолинійний провідник рухається зі швидкістю $25 \frac{M}{C}$ в однорідному магнітному полі з індукцією 0,0038 Тл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Чому дорівнює довжина провідника, якщо на його кінцях різниця потенціалів становить 28 мВ?

§ 19

Самоіндукція

ЕРС самоіндукції. За законом Фарадея — Максвелла $\epsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, електрорушійна сила індукції виникає за будь-яких змін магнітного потоку через контур провідника незалежно від природи цього потоку. *Будь-які*

зміни власного магнітного потоку, що його створює струм у провіднику, також спричиняють виникнення в ньому індукційного струму.

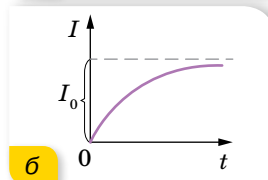
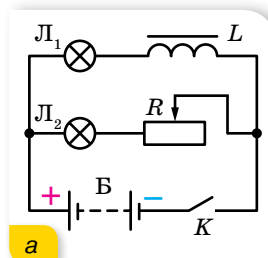
Розглянемо котушку, що має N витків, у якій тече струм силою I від зовнішнього джерела. Цей струм створює в котушці магнітне поле, і тому її витки пронизує власний магнітний потік Φ . Якщо якимось способом змінювати силу струму в котушці (наприклад, за допомогою реостата або замиканням і розмиканням кола), то змінюватиметься і власний магнітний потік котушки. Як показують досліди, одночасно в котушці виникає ЕРС індукції, величину якої можна обчислити за загальним законом Фарадея — Максвелла.

Явище виникнення в провіднику електрорушійної сили індукції за умови зміни власного магнітного потоку, що спричинена зміною сили струму в цьому провіднику, називається **самоіндукцією**.

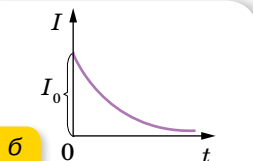
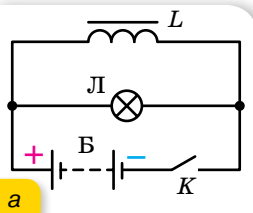
Самоіндукція — це окремий випадок явища електромагнітної індукції. Електрорушійну силу в цьому випадку називають ЕРС самоіндукції ε_{ci} . Оскільки власний магнітний потік котушки пропорційний струму I в ній, то ε_{ci} зручніше пов'язати зі швидкістю зміни струму в котушці. Очевидно, $\varepsilon_{ci} \sim \frac{\Delta I}{\Delta t}$ або $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, де L — коефіцієнт, що характеризує індивідуальні властивості котушки. Його називають *коефіцієнтом самоіндукції*, або *індуктивністю провідника*.

Визначимо одиницю індуктивності провідника в СІ: $L = -\frac{\varepsilon_{ci} \Delta t}{\Delta I}$; $[L] = \frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Гн}$. Одиницю індуктивності назвали на честь американського фізика Джозефа Генрі (1799–1878).

Явище самоіндукції найяскравіше виявляється у виникненні так званих струмів замикання і струмів розмикання в колах, що містять котушки великої індуктивності. Струми замикання можна спостерігати в колі, складеному за схемою, що зображена на малюнку 101, а. Дві однакові лампи L_1 і L_2 від кишенькового ліхтарика ввімкнено у дві паралельні вітки, одна з яких містить котушку з індуктивністю L , а друга — повзунковий реостат R , за допомогою якого активні опори обох віток роблять однаковими. Замкнувши коло вимикачем K , ми побачимо, що лампа L_1 починає світитися дещо пізніше. Справді, в початковий момент часу сила струму зростає від нуля до деякого значення I_0 (мал. 101, б). Але зі зростанням струму у вітці, що містить котушку індуктивності, зростає і власний магнітний потік котушки. До того ж унаслідок явища самоіндукції у вітці з котушкою виникатиме індукційний струм, який за правилом Ленца буде напрямлений проти струму,



Мал. 101.
а — схема для спостереження струмів замикання; б — графік залежності сили струму замикання від часу



Мал. 102.
а — схема для отримання струмів розмикання;
б — графік залежності сили струму розмикання від часу

створюваного зовнішнім джерелом ЕРС. Отже, результуючий струм у вітці, що містить котушку з індуктивністю L та опором R , у початковий момент часу буде меншим, ніж у вітці з таким самим за величиною опором R , але без індуктивності. Тому максимальне світіння лампи L_1 у першій вітці настане дещо пізніше, ніж у другій вітці.

Струми розмикання виникають у момент розриву електричного кола, і якщо коло містить котушку великої індуктивності, ці струми можуть бути значними. Струм розмикання наочніше можна спостерігати за допомогою схеми, зображеної на малюнку 102, а. Замкнувши ключ K , почекаємо рівномірне світіння лампи L і розімкнемо коло. Якщо котушка L має достатньо велику індуктивність, ми побачимо, що лампа згасла лише через деякий час після розмикання кола. І в цьому разі зміна (спадання) струму в момент вимикання спричинює виникнення змінного магнітного потоку в котушці, а отже, виникнення струму самоіндукції.

До того ж, за правилом Ленца, струм розмикання має такий самий напрямок, як і основний струм від зовнішнього джерела. Наявність великої індуктивності в електричному колі або дуже швидка зміна сили струму можуть призвести до того, що, нехай і короткочасно, але загальна сила струму значно перевищить робочу силу струму. Як наслідок, прилади, включені в таке коло, вийдуть із ладу. Потрібно чітко розрізняти силу струму через котушку, який стати більше не може і тільки зменшується з часом (мал. 102, б), та силу струму через інші ділянки кола. Так, на схемі, зображеній на малюнку 102, струм через лампу може збільшитися тільки за умови, якщо до розмикання він був меншим, ніж через котушку (струм через котушку при розмиканні ключа «вимушений» протікати через лампу).

Явище самоіндукції подібне до явища інерції в механіці. Унаслідок самоіндукції під час замикання кола сила струму не одразу набуває максимального значення. І, навпаки, під час вимикання джерела струм не зникає одразу, а самоіндукція підтримує його деякий час, незважаючи на опір кола. Мірою «інертності» контура відносно змін сили струму в ньому (аналогічно масі тіла в механіці) в електродинаміці є *індуктивність*, або коефіцієнт самоіндукції контура L .

Індуктивність. Щоб розкрити фізичний зміст індуктивності, вважатимемо, що струм у котушці змінюється зі швидкістю $1 \frac{\text{А}}{\text{с}}$. Тоді $|\varepsilon_{\text{сі}}| = L$ — індуктивність котушки дорівнює тій електрорушійній силі самоіндукції, яка виникає в ній унаслідок зміни струму зі швидкістю $1 \frac{\text{А}}{\text{с}}$.

Ураховуючи те, що для нормального соленоїда $\Phi = BS$, а магнітна індукція всередині соленоїда з кількістю витків N і довжиною l дорівнює

$B = \mu\mu_0 \frac{IN}{l}$, формулу закону електромагнітної індукції у випадку само-

індукції можна записати так: $\varepsilon_{ci} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l} \cdot \frac{I}{\Delta t}$. Порівнюючи

цей вираз із формулою $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, дістаємо формулу для обчислення ін-

дуктивності нормального соленоїда: $L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$. Цю формулу можна

виразити через об'єм соленоїда. Оскільки $S = \frac{V}{l}$, то $L = \frac{\mu\mu_0 N^2 V}{l^2} = \mu\mu_0 n^2 V$,

де n — кількість витків на одиницю довжини $n = \frac{N}{l}$.

З двох виразів для ЕРС самоіндукції, а саме $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ та $\varepsilon_{ci} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, отримуємо: $L\Delta I = N\Delta\Phi$.

Струм, що проходить у контурі, створює в навколишньому середовищі магнітне поле, причому зчеплений з контуром (або пронизує його) магнітний потік прямо пропорційний струмові.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Що називають явищем самоіндукції? Запишіть формулу, за якою визначають ЕРС самоіндукції. **2.** Який фізичний зміст індуктивності? Як зміниться індуктивність котушки, якщо збільшити її довжину, розтягуючи вздовж осі? **3.** Послідовно з котушкою індуктивності L_1 увімкнули другу — індуктивністю L_2 . У якому випадку індуктивність цієї ділянки буде сумою $L_1 + L_2$? **4.** Коло, яке містить джерело постійної ЕРС, замкнули. На що витрачається енергія джерела до і після встановлення постійної сили струму?



Експериментуємо

У вас є заряджене тіло на ізолюючій підставці, а також прилади для виявлення електромагнітного поля. Як можна виявити: лише електричне поле; лише магнітне поле; електричне і магнітне поля одночасно?

§ 20

Енергія магнітного поля. Взаємозв'язок електричного і магнітного полів

Енергія магнітного поля. Ми розглянули дослід з виникнення у провідниках струму розмикання. Підкреслимо, що лампа продовжувала світити (струм текти) після вимкнення зовнішнього джерела. Це свідчить про те, що магнітне поле в котушці має енергію. Очевидно, що під час замикавання електричного кола додаткова енергія джерела струму була затра-

чена на створення магнітного поля. При його зникненні енергія частково повертається в коло. Отже, магнітне поле, як і електричне, має енергію.

Енергію магнітного поля котушки індуктивності визначимо на підставі таких міркувань. Нехай після розмикання кола струм зменшується лінійно. У цьому разі ЕРС самоіндукції має постійне значення, що дорівнює $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, де Δt — час, за який сила струму в колі лінійно зменшується від початкового значення I до 0. За цей час в колі проходить електричний заряд $q = I_{\text{сеп}} t = \frac{I}{2} t$. Робота електричного струму:

$A = q\varepsilon_{ci} = \frac{It}{2} \cdot \frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2}$. Ця робота виконується завдяки енергії магнітного поля котушки індуктивності.

Енергія W_m магнітного поля котушки індуктивності дорівнює половині добутку її індуктивності на квадрат сили струму в ній, $W_m = \frac{LI^2}{2}$.

Пригадаймо, що електрична енергія виражається формулами: $W_{\text{ел}} = q \frac{U}{2}$, $W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$ та $W_{\text{ел}} = \frac{q^2}{2C}$, і зосереджена між обкладками зарядженого конденсатора, тобто локалізована в об'ємі електричного поля.

Як і у випадку з конденсатором, магнітна енергія міститься безпосередньо в об'ємі магнітного поля.

Густина енергії магнітного поля. Установимо зв'язок між енергією магнітного поля, яка міститься в одиниці об'єму, та індукцією магнітного поля. Цей зв'язок можна встановити, розглянувши будь-який провідник зі струмом, для якого можна обчислити індуктивність й індукцію поля. Найзручніше це зробити для соленоїда, у якого магнітне поле, а отже, й енергія поля, зосереджені в межах його об'єму Sl (S — площа перерізу, l — довжина соленоїда), а індукцію магнітного поля в межах цього об'єму із задовільною точністю можна вважати скрізь однаковою і такою, що дорівнює $B = \mu_0 \frac{IN}{l}$. Індуктивність такого соленоїда $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$. Підставивши у формулу $W_m = \frac{LI^2}{2}$ вираз для індуктивності $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$ та сили

струму $I = \frac{Bl}{\mu_0 N}$, отримаємо: $W_m = \frac{B^2 Sl}{2\mu_0}$. Оскільки $Sl = V$, то густина енергії $\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}$.

Цей вираз справджується не тільки для однорідного поля, а й для довільних неоднорідних магнітних полів.

Взаємозв'язок електричного і магнітного полів як вияв єдиного електромагнітного поля. Сформульовані раніше закони електромагнетизму встановлено для електричного струму провідності, що його створює

напрямлений рух мікроскопічних частинок — носіїв заряду (електронів і йонів) у провідниках і вакуумі.

Проте Амперу та його сучасникам було невідомо, які ефекти виникатимуть під час руху макроскопічних заряджених тіл. Електричний струм, зумовлений переміщенням макроскопічних заряджених тіл, називають *конвекційний електричний струм*. Ученим, які розробляли класичну теорію електромагнетизму, не здавалось очевидним, що ці струми (провідності та конвекційний) є принципово однаковими джерелами магнітного поля.

Перші досліди, щоб відповісти на питання, чи створює наелектризоване тіло, що перебуває в русі, магнітне поле (поряд з електричним), у Берлінському університеті в 1878 р. провів американський фізик Генрі Роуланд (1848–1901). Ці дослідження продовжив російський фізик Олександр Олександрович Ейхенвальд (1863–1944) у 1901–1904 рр. Особливо складно було в цих експериментах точно виміряти напруженість магнітного поля конвекційного струму, створюваного зарядженим диском, який обертається навколо своєї осі. Адже індукція цього поля була в тисячі разів меншою за індукцію магнітного поля Землі.

Досліди Роуланда й Ейхенвальда дали позитивні результати: справді, конвекційні струми, пов'язані з механічним рухом наелектризованих тіл, створюють таке саме магнітне поле, як і відповідні їм струми провідності. Отже, в цих дослідах довели існування магнітного поля під час механічного руху наелектризованих тіл, а точними вимірюваннями підтвердили еквівалентність конвекційних струмів і струмів провідності. Досліди Роуланда й Ейхенвальда належать до серії перших експериментів, у яких було підтверджено теоретичні висновки про єдину природу електричних і магнітних явищ, які випливали з теоретичних праць Максвелла.

До Максвелла існували окремо вчення про електрику, вчення про магнетизм, вчення про світло. «Місток» між електричними та магнітними явищами створило експериментальне відкриття Ерстеда, Ампера, Фарадея. Джеймс Максвелл поставив перед собою завдання узагальнити всі відомі на той час експериментальні факти з макроскопічної електродинаміки і викласти їх у вигляді стрункої послідовної математичної теорії, яка для електричних і магнітних явищ відігравала б таку саму роль, як закони динаміки Ньютона в класичній механіці. Результатом його теоретичних досліджень стала система рівнянь Максвелла, яку він виклав у своїй знаменитій праці «Трактат з електрики і магнетизму», що побачила світ у 1873 р. Пізніше в працях німецького фізика Генріха Герца (1867–1894) та англійського фізика Олівера Хевісайда (1850–1925) рівняння Максвелла набули сучасного вигляду.

Оскільки математична форма запису цих рівнянь передбачає знання інтегрального та диференціального числення, ми ознайомимося з ними лише якісно.

Перше рівняння Максвелла встановлює два джерела збудження магнітного поля. Оскільки в усіх експериментах магнітне поле було обов'язково пов'язане з електричним струмом, Джеймс Максвелл у своїх теоретичних працях змінив електричне поле, яке породжувало вихрове магнітне поле,

назвав струмом зміщення (на відмінну від струму провідності та конвекційного струму). Тепер цю назву не можна визнати вдалою. Тільки під час вивчення змінного електричного поля в діелектриках вона дещо відбиває дійсну фізичну картину, пов'язану зі зміщенням зв'язаних електричних зарядів у молекулах і атомах середовища. У вакуумі під струмом зміщення слід розуміти тільки змінне електричне поле. Інакше кажучи, перше рівняння Максвелла стверджує, що магнітне поле можуть збуджувати не лише рухомі заряди, а й зміни електричного поля.

Друге рівняння Максвелла є відображенням закону електромагнітної індукції.

Третє рівняння — відображення закону про поле електричних зарядів, тобто є узагальненням закону Кулона.

Із *четвертого рівняння* випливає, що в природі не існує вільних магнітних зарядів, на яких, подібно до електричних, могли б починатись лінії індукції. Інакше кажучи, в природі не існує інших джерел магнітного поля, крім електричних струмів.

Варто зазначити, що в рівняннях Максвелла середовище враховується феноменологічно, тобто без розкриття внутрішнього механізму взаємодії речовини з полем, і тому питання щодо пояснення, узагальнення й визначення меж застосування теорії на основі молекулярно-атомної структури речовини та електронної будови молекул і атомів у ній не розглядається. Систематичне вивчення цього кола питань — одне з головних завдань *електронної теорії*, виникнення якої було наступним етапом розвитку електродинаміки після теорії Максвелла.

Піді́ємо підсумки. *Електромагнітне поле* є формою матерії, завдяки якій здійснюється взаємодія між електрично зарядженими частинками. Це поняття відображує єдність електричного та магнітного полів, вияв яких залежить від вибору системи відліку. Наприклад, у системі відліку, відносно якої електричні заряди перебувають у стані спокою, взаємодія між ними здійснюється через електростатичне поле, магнітне поле тут відсутнє. У системі відліку, відносно якої електричні заряди рухаються, взаємодія між ними відбувається за допомогою обох полів — електричного й магнітного. У випадку нестационарного електромагнітного поля зміни магнітного поля в деякій точці ведуть до виникнення там вихрового електричного поля, і навпаки, змінне або вихрове електричне поле створює вихрове магнітне поле. Їхні взаємозв'язок та взаємоперетворення відображають рівняння Максвелла.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Як змінилась індуктивність котушки, якщо збільшення в ній струму в k разів не змінило енергію її магнітного поля?
2. Коло, яке містить джерело постійної ЕРС, замкнули. На що витрачається енергія джерела до і після встановлення постійної сили струму?
3. У вас є заряджене тіло на ізолюючій підставці та прилади для виявлення електромагнітного поля. Як можна виявити лише електричне поле; лише магнітне; електричне і магнітне одночасно?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Котушку з дуже малим опором та індуктивністю 3 Гн під'єднано до джерела струму з дуже малим внутрішнім опором, ЕРС якого дорівнює 15 В. Через який інтервал часу струм у котушці досягне значення 50 А?

Дано:

$$L = 3 \text{ Гн}$$

$$\varepsilon_1 = 15 \text{ В}$$

$$I = 50 \text{ А}$$

$$t = ?$$

Розв'язання:

За законом Ома для повного кола: $\varepsilon = I(R + r)$, де ε — повна ЕРС у колі, що дорівнює для цього випадку сумі ε_1 (ЕРС джерела) і ε_2 (ЕРС самоіндукції), яка виникає після під'єднання котушки до джерела, $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

ЕРС самоіндукції можна визначити за формулою $\varepsilon_2 = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

$$\text{Тоді } \varepsilon_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = I(R + r).$$

За умовою задачі, опори R і r дуже малі, тому $\varepsilon_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$, або $\varepsilon_1 = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Звідки можна визначити швидкість зміни сили струму $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_1}{L}$. Тепер можна визначити час, потрібний для наростання струму до значення $I = 50 \text{ А}$.

$$t = \frac{I}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} = \frac{I}{\frac{\varepsilon_1}{L}} = \frac{IL}{\varepsilon_1}; \quad t = \frac{50 \text{ А} \cdot 3 \text{ Гн}}{15 \text{ В}} = 10 \text{ с.}$$

Відповідь: $t = 10 \text{ с}$.

Задача 2. Зміна сили струму від 2,5 до 14,5 А в соленоїді з 800 витками без осердя збільшує його магнітний потік на 2,4 мВб. Чому дорівнює середня ЕРС самоіндукції, яка виникає в соленоїді, якщо зміна сили струму відбувається за 0,15 с? Визначте енергію магнітного поля в соленоїді, якщо сила струму — 5 А.

Дано:

$$I_1 = 2,5 \text{ А}$$

$$I_2 = 14,5 \text{ А}$$

$$I = 5 \text{ А}$$

$$N = 800$$

$$\Delta \Phi = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

$$\Delta t = 0,15 \text{ с}$$

$$\varepsilon_{\text{ci}} = ?; W_{\text{мар}} = ?$$

Розв'язання:

Середню ЕРС самоіндукції можна визначити з формули $\varepsilon_{\text{ci}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, де $\Delta I = I_2 - I_1$. Індуктивність соленоїда визначимо зі співвідношення $\Phi_1 N = LI_1$ і $\Phi_2 N = LI_2$, звідки $\Delta \Phi N = L \Delta I$.

$$\text{Тоді } L = \frac{N \Delta \Phi}{\Delta I}, \quad L = \frac{800 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}}{14,5 \text{ А} - 2,5 \text{ А}} = 0,16 \text{ Гн.}$$

Тепер обчислимо $\varepsilon_{\text{ci}} = -0,16 \text{ Гн} \frac{12 \text{ А}}{0,15 \text{ с}} = -13 \text{ В}$. Знак «-» показує, що

ЕРС самоіндукції перешкоджає зростанню поля.

Магнітну енергію визначимо зі співвідношення $W_{\text{маг}} = \frac{LI^2}{2}$. Підста-

вивши числові значення, отримаємо: $W_{\text{маг}} = \frac{0,16 \text{ Гн} \cdot 25 \text{ А}^2}{2} = 2 \text{ Дж}$.

Відповідь: –13 В; 2 Дж.



Вправа 12

- Крізь соленоїд, що має індуктивність 0,4 мГн і площу поперечного перерізу 10 см², проходить струм 0,5 А. Визначте індукцію поля всередині соленоїда, якщо він містить 100 витків. Вважайте, що поле однорідне.
- Котушка із залізним осердям перерізом 20 см² має індуктивність 0,02 Гн. Якою має бути сила струму, щоб індукція поля в осерді становила 1 мТл, якщо котушка містить 1000 витків?
- У котушці, індуктивність якої становить 0,6 Гн, сила струму 20 А. Яку енергію має магнітне поле цієї котушки? Як зміниться енергія поля, коли сила струму зменшиться удвічі?
- Визначте енергію соленоїда, в якому сила струму 10 А створює магнітний потік 0,5 Вб.
- Визначте енергію магнітного поля котушки індуктивністю 0,8 Гн, якщо по ній проходить струм 4 А.
- Індуктивність котушки із залізним осердям 25 Гн. Визначте ЕРС самоіндукції в момент розмикання кола, якщо швидкість зміни сили струму в ній — $100 \frac{\text{А}}{\text{с}}$.



Виконуємо навчальні проекти

- Використання явища електромагнітної індукції в сучасній техніці: детектори металу в аеропортах; поїзди на магнітній подушці; побутових СВЧ-печах; пристроях для запису й відтворення інформації.
- 11 лютого визнано Міжнародним днем жінок і дівчат у науці. За допомогою різних джерел, зберіть і поширте серед однокласників і однокласниць інформацію про жінок, які зробили вагомий внесок у розвиток фізики.



Перевірте себе (§ 16–21)



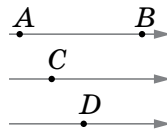
- У якій точці на малюнку магнітного поля модуль вектора магнітної індукції має найбільше значення?

А у точці А

Б у точці В

В у точках С або D

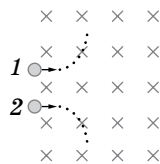
Г у всіх точках однаковий



- Укажіть малюнок, на якому правильно розміщена магнітна стрілка біля прямого провідника зі струмом.



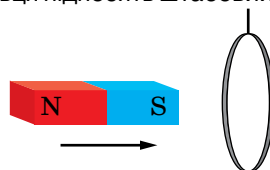
3. Укажіть явище, аналогічне явищу самоіндукції в електродинаміці.
- А** явище нагрівання речовини в молекулярній фізиці
Б явище інерції в механіці
В явище протікання електричного струму в електродинаміці
Г явище розпаду ядер атомів у квантовій фізиці
4. За фрагментами траєкторій заряджених частинок 1 і 2, що влетіли в магнітне поле з однаковою швидкістю, з'ясуйте знак заряду кожної частинки.



- А** частинка 1 заряджена негативно, частинка 2 заряджена позитивно
Б частинка 1 заряджена позитивно, частинка 2 заряджена негативно
В обидві частинки заряджені негативно
Г обидві частинки заряджені позитивно

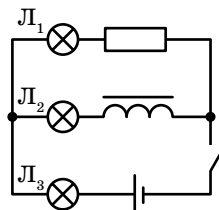
5. До середини підвішеного на нитці легкого алюмінієвого кільця підносять штабовий магніт. Укажіть, що відбудеться з кільцем.

- А** нічого не відбудеться
Б почне обертатися навколо вертикальної осі
В почне обертатися навколо горизонтальної осі
Г відштовхнеться від магніту



6. Усі лампи у схемі на малюнку однакові. Укажіть лампу, яка засвітиться пізніше за інших після замикання ключа, і правильне пояснення цього явища.

- А** L_1 ; вона розміщена далі від джерела струму, ніж інші лампи
Б L_1 ; послідовно з нею увімкнений резистор, опір якого може бути великим
В L_2 ; через явище самоіндукції в котушці
Г L_3 ; ця лампа увімкнена послідовно до джерела, а дві інші — паралельно



7. На рамку площею 200 см^2 зі струмом 2 А, розміщену в однорідному магнітному полі, діє максимальний обертальний момент $4 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Визначте модуль вектора магнітної індукції.

- А** 1 мТл
Б 2 мТл
В 3 мТл
Г 4 мТл

8. Магнітне поле створене накладанням двох однорідних полів з магнітною індукцією 0,4 Тл і 0,3 Тл, силові лінії яких взаємно перпендикулярні. Обчисліть магнітну індукцію результуючого поля.

9. На горизонтальних рейках, відстань між якими 0,2 м, перпендикулярно до них лежить провідник масою 0,5 кг. Провідник зрушує з місця після пропускання по ньому струму 50 А. Коефіцієнт тертя провідника об рейки 0,2. Вважайте $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

і визначте індукцію магнітного поля.

10. Електрон, прискорений різницею потенціалів 300 В. У деякий момент часу електрон пролітає на відстані 4 мм повз провідник зі струмом, при цьому вектор швидкості електрона спрямований паралельно до провідника. Яка сила буде діяти на електрон, якщо по провіднику тече струм силою 5 А?

Розділ 2

КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

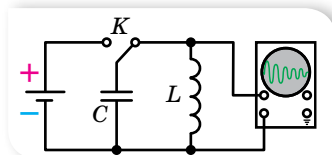
В 10 класі ми вивчили механічні коливання та хвилі. Вивчаючи електромагнітні коливання і хвилі, переконаємося, що вони мають багато загального з механічними, і тому описуються тими самими величинами та законами.

§ 21

Вільні електромагнітні коливання

Коливальний контур. Електромагнітні коливання були відкриті дещо випадково. Це сталося після того, як винайшли лейденську банку (перший конденсатор) і навчилися надавати їй великого заряду за допомогою електростатичної машини. Спостерігаючи електричний розряд банки, обкладки лейденської банки замикали на дротяну котушку. Виявилось, що сталені спиці всередині котушки намагнічуються. У цьому нічого дивного не було: електричний струм і має намагнічувати сталне осердя котушки. Здивувало інше: не можна було передбачити, який кінець осердя котушки буде північним полюсом, а який — південним. Повторюючи дослід приблизно в однакових умовах, отримували то один результат, то інший, і не відразу зрозуміли, що під час розрядження конденсатора через котушку виникають коливання.

Ми не можемо безпосередньо сприймати нашими органами чуття електромагнітні коливання так, як бачимо коливання маятника або чуємо коливання струни. Але ми можемо використати електронний осцилограф — пристрій, на екрані якого можна спостерігати за електромагнітними коливаннями.



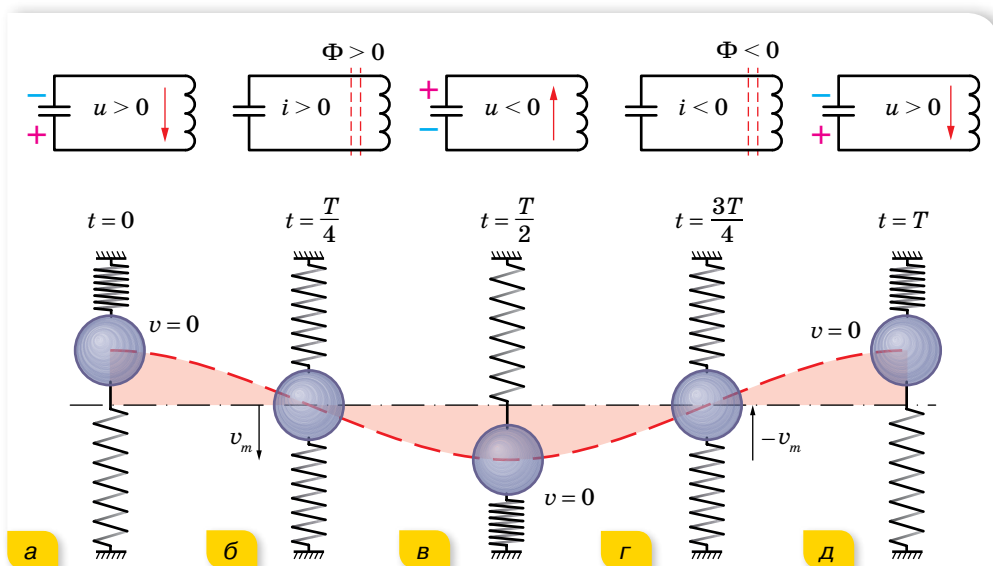
Мал. 103.
Спостереження
електромагнітних
коливань

Проведемо дослід (мал. 103). Зарядивши конденсатор від джерела постійного струму, замкнемо його котушкою, до якої паралельно підключено осцилограф. На екрані осцилографа ми будемо спостерігати осцилограму, яка свідчить про наявність електромагнітних коливань. Отже, найпростішою установкою, у якій можна спостерігати електромагнітні коливання, є електричне коло — *коливальний*

контур, до складу якого входить котушка індуктивністю L та конденсатор ємністю C . Такий коливальний контур називають закритим, оскільки він майже не випромінює енергії в простір.

Коливання, які виникають у коливальному контурі після початкового виведення системи з положення стійкої рівноваги, здійснюються завдяки внутрішнім силам системи, не зазнаючи впливу з боку змінних зовнішніх сил, тобто є *вільними*.

Перетворення енергії в коливальному контурі. Розглянемо детальніше, як відбуваються електромагнітні коливання (мал. 104). (Для порівняння і наочності на малюнку з кожним станом коливального контура зіставлене певне положення тягарця, підвішеного на пружині, що здійснює механічні коливання.)



Мал. 104. Аналогія електромагнітних і механічних коливань

Перед початком конденсатор заряджають. У початковий момент ($t = 0$) після замикання обкладок зарядженого конденсатора через котушку в колі виникає струм, який збільшується поступово, оскільки його збільшенню протидіє вихрове електричне поле, що виникає внаслідок збільшення магнітного потоку котушки. Упродовж часу $t = \frac{T}{4}$ струм зростає, поки вся енергія електричного поля конденсатора $W_e = \frac{CU^2}{2}$ не перейде в енергію магнітного поля котушки $W_m = \frac{LI^2}{2}$. (Цей процес аналогічний перетворенню енергії деформованої пружини на кінетичну енергію руху тягарця.)

З моменту $t = \frac{T}{4}$ струм у колі продовжує протікати внаслідок процесу самоіндукції, водночас конденсатор перезаряджається, між його пластинами зростає електричне поле, яке заважає протіканню струму. Струм зменшується поступово, оскільки його підтримує вихрове електричне поле, що виникає внаслідок зменшення магнітного поля котушки. Струм припиниться, коли вся енергія магнітного поля котушки перейде в енергію електричного поля конденсатора $\left(t = \frac{T}{2}\right)$. (Подібно до того, як тягарець у положенні рівноваги з максимальною швидкістю за інерцією продовжує рухатися вниз, стискаючи пружину. Кінетична енергія руху тягарця перетворюється на потенціальну енергію пружини.)

Потім процес повторюється у зворотному напрямку. З моменту $t = \frac{T}{2}$ конденсатор знову розряджається, і в контурі виникає струм зворотного напрямку. Енергія електричного поля зарядженого конденсатора зменшується, а магнітного поля — зростає. Момент часу $t = \frac{3}{4}T$, коли конденсатор повністю розрядиться, а сила струму досягне максимального значення і максимальною буде енергія магнітного поля, відповідає проходженню тягарцем положення рівноваги.

Після цього струм самоіндукції заряджатиме конденсатор, і коливальна система повернеться у вихідне положення ($t = T$).

В ідеальному випадку, якщо б у коливальному контурі не було втрат енергії, цей процес тривав би як завгодно довго. Коливання були б незатухаючими. Через інтервали часу, що дорівнюють періоду коливань, стан системи точно повторювався б. Повна енергія до того ж зберігалася б і в будь-який момент часу дорівнювала максимальній енергії електричного поля конденсатора або максимальній енергії магнітного поля котушки зі струмом, $W = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \text{const}$.

Коливання, які відбуваються в ідеальній системі без тертя, тобто без втрат механічної енергії, ще називають *власними*. Власні коливання — це теоретично можливі вільні незатухаючі коливання.

Насправді втрати енергії неминучі. Зокрема, котушка та з'єднувальні проводи мають опір R , і це спричинює поступове перетворення енергії електромагнітного поля на внутрішню енергію провідника.

Рівняння гармонічних електромагнітних коливань. Вираз для зміни заряду й сили струму в *ідеальному коливальному контурі* (при $R \rightarrow 0$) можна отримати із закону збереження енергії: $\frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}$, де u та i — миттєві значення напруги та сили струму. Оскільки $u = \frac{q}{C}$, $U_m = \frac{q_m}{C}$,

то $\frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{q_m^2}{2C}$. Помноживши останній вираз почленно на $2C$, отримаємо $q^2 + i^2LC = q_m^2$, або $q^2 + (i\sqrt{LC})^2 = q_m^2$.

Цей вираз геометрично можна зобразити у вигляді прямокутного трикутника, гіпотенуза якого q_m , а катети q та $i\sqrt{LC}$ (мал. 105).

З малюнка видно, що $q = q_m \cos \varphi$, $i = \frac{q_m}{\sqrt{LC}} \sin \varphi$.

Отримані вирази свідчать, що заряд конденсатора й сила струму в котушці змінюються за гармонічним законом. Водночас між коливаннями заряду на обкладках конденсатора й сили струму в колі існує різниця фаз $\frac{\pi}{2}$. З малюнка також видно, що $\cos \varphi = \frac{q}{q_m}$. Оскільки миттєве значення заряду q конденсатора — величина змінна, а амплітудне значення q_m — стала, то φ — також постійно змінюється. Швидкість зміни фази коливань $\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}\right)$ є циклічною частотою ω .

Тепер формулу для зміни заряду можна записати у вигляді $q = q_m \cos \omega t$. Ураховуючи, що $i = q'$, формулу зміни сили струму отримаємо, обчисливши похідну, $i = q' = -q_m \omega \sin \omega t$, де $q_m \omega = I_m$ — максимальне значення сили струму. Зрештою маємо: $i = -I_m \sin \omega t$.

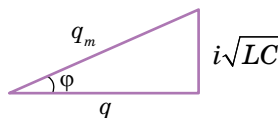
Оскільки напруга на конденсаторі в будь-який момент часу визначається співвідношенням $U = \frac{q}{C}$, то рівняння зміни напруги в коливальному контурі має вигляд $u = \frac{q_m}{C} \cos \omega t = U_m \cos \omega t$, де $U_m = \frac{q_m}{C}$ — амплітуда напруги.

Графіки коливань заряду та сили струму наведено на малюнку 106.

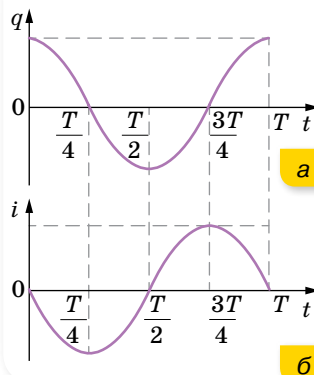
Формула періоду власних електромагнітних коливань. Знайдемо формулу для визначення періоду власних коливань, використавши те, що всі закономірності гармонічних коливань у механіці зберігають свою суть і для електромагнітних коливань. Як відомо, період коливань зв'язаний із циклічною частотою співвідношенням $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Зіставивши дві форми

рівняння: $i = \frac{q_m}{\sqrt{LC}} \sin \varphi$ та $i = -q_m \omega \sin \omega t$, бачимо, що $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Тоді

$T = 2\pi\sqrt{LC}$. Цю формулу для періоду вільних електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі теоретично вивів у 1853 р. англійський фізик Вільям Томсон, тому її називають *формулою Томсона*. З формули видно, що період власних коливань зростає зі збільшенням ємності та індуктивності контура. Пояснюють це тим, що зі збільшенням



Мал. 105. До виведення рівняння електромагнітних коливань



Мал. 106. Графіки коливань заряду (а) та сили струму (б)

індуктивності контура сила струму повільніше зростає з часом і повільніше спадає до нуля. А що більшою є ємність контура, то більше часу потрібно для перезарядження конденсатора.

Застосовуючи формулу зв'язку між періодом коливань T і частотою ν , визначимо власну частоту коливань у контурі: $\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Із цієї формули видно, що для одержання в контурі коливань високої частоти ємність й індуктивність контура мають бути якомога меншими.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. У початковий момент часу конденсатор заряджений. Якою буде локалізація енергії в моменти $\frac{T}{8}, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3T}{4}$ від початку коливань? 2. Заряд q на пластинах конденсатора коливального контура змінюється із часом t за законом $q = 10^{-6} \cos 10^4 \pi t$ (усі величини в СІ). Запишіть закон залежності сили струму від часу, $i(t)$. Визначте період і частоту коливань у контурі, амплітуду коливань заряду й амплітуду коливань сили струму.



Приклади розв'язування задач

Задача¹. На малюнку 107 наведено графік залежності сили струму від часу для вільних електромагнітних коливань у контурі. Визначте ємність конденсатора, якщо індуктивність котушки дорівнює $0,1$ Гн. Запишіть рівняння залежності сили струму в контурі й напруги від часу. Побудуйте графік залежності $u(t)$.

Дано:

Графік $i(t)$
 $L = 0,1$ Гн
 $C = ?$
 $u(t) = ?$
 $i(t) = ?$

Розв'язання:

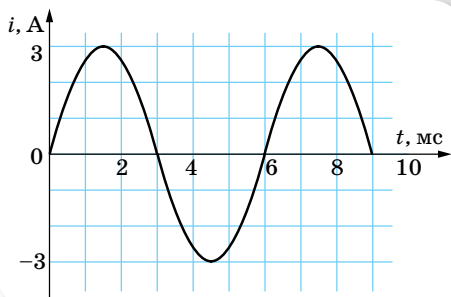
З графіка видно, що $T = 6$ мс $= 6 \cdot 10^{-3}$ с. За формулою Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$ знаходимо $C = \frac{T^2}{4\pi^2 L}$, $C = 9,1$ мкФ.

З графіка видно, що $I_m = 3$ А. Тоді з рівності максимальних енергій у коливальному контурі, $\frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}$, обчислюємо: $U_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}$, $U_m = 314$ В.

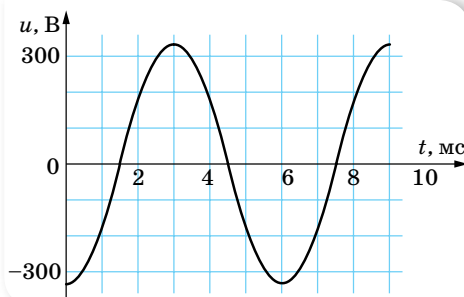
Оскільки $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega = \frac{\pi}{3} \cdot 10^3$ с⁻¹ і коливання сили струму, як видно з графіка, здійснюються за законом синуса з початковою фазою, яка дорівнює нулю, а саме: $i = 3 \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$, то рівняння зміни напруги матиме вигляд $u = -314 \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$.

Графік залежності $u(t)$ зображено на малюнку 108.

¹ Якщо в умові задачі немає ніяких застережень, то вважається, що коливальний процес відбувається в ідеальному коливальному контурі.



Мал. 107



Мал. 108. Графік коливань напруги

Відповідь: $C = 9,1 \text{ мкФ}$; $i = 3 \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$; $u = -314 \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$.



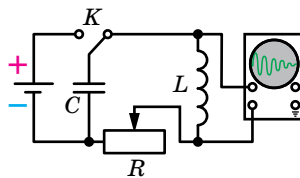
Вправа 13

1. Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 1 мкФ і котушки індуктивністю 4 Гн . Амплітуда коливань заряду на конденсаторі становить 100 мкКл . Напишіть залежності $q(t)$, $i(t)$, $u(t)$. Визначте амплітуди коливань сили струму та напруги.
2. Коливальний контур складається з котушки, індуктивність якої $0,2 \text{ мГн}$, та двох однакових конденсаторів ємністю 4 мкФ кожний, з'єднаних послідовно. Визначте період вільних коливань у контурі, максимальний заряд конденсатора та максимальну напругу на кожному конденсаторі. Максимальна сила струму в контурі — $0,1 \text{ А}$.
3. У коливальному контурі індуктивністю L і ємністю C конденсатор заряджений до максимальної напруги U_m . Якою буде сила струму в момент, коли напруга на конденсаторі зменшиться у 2 рази? Коливання вважайте незатухаючими.
4. У коливальному контурі індуктивність котушки становить $0,2 \text{ Гн}$, а амплітуда сили струму дорівнює 40 мА . Визначте енергію електричного поля конденсатора й магнітного поля котушки в той момент, коли миттєве значення сили струму буде у 2 рази меншим, ніж амплітудне значення.

§ 22

Затухаючі електромагнітні коливання

Рівняння затухаючих електромагнітних коливань. Уявімо собі коливальний контур, до складу якого входить конденсатор C , котушка L й активний опір R (мал. 109). Нехай у певний момент часу конденсатор зарядили до напруги U і від'єднали зовнішнє джерело живлення. Якби в електричному колі, крім конденсатора, був лише резистор R , то струм продовжувався б лише доти, поки потенціали обкладок конденсатора не зрівнялися. Якщо ж у колі є ще й котушка



Мал. 109. Реальний коливальний контур

індуктивністю L , то електрорушійна сила самоіндукції, що виникає в контурі внаслідок зміни сили струму, підтримує струм, який зменшується, і відбудеться перезарядка обкладок конденсатора, але не до початкового значення. Після цього струм у контурі йтиме у протилежному напрямі, конденсатор знову перезарядиться, втрапивши ще дещо в заряді. Виникають затухаючі електромагнітні коливання, які ми вже дослідили якісно.

Одержимо рівняння затухаючих електромагнітних коливань на основі узагальнення закону Ома для кола, що містить джерело ЕРС. Напруга на обкладках конденсатора U . За законом Ома сума напруг, які є в колі, має дорівнювати сумі діючих у цьому колі електрорушійних сил. Зрозуміло, що в цьому разі в колі діє лише одна електрорушійна сила — електрорушійна сила самоіндукції. Отже, $IR + U = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$. Виразимо всі змінні в цьому рівнянні через заряд q . Силу струму можна визначити за зміною заряду за одиницю часу: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ або $I = q'$. Напруга $U = \frac{q}{C}$, а швидкість зміни сили струму $\frac{\Delta I}{\Delta t} = I' = q''$. Підставимо у вираз закону Ома й отримаємо рівняння: $Lq'' = -\frac{1}{C}q - Rq'$, яке можна переписати у вигляді $q'' = -\frac{1}{LC}q - \frac{R}{L}q'$. Якщо тепер ввести позначення $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$ і $\frac{R}{L} = 2\beta$, то рівняння матиме вигляд $q'' = -2\beta q' - \omega_0^2 q$, а його розв'язок — $q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha)$, де β — коефіцієнт затухання.

Отримане рівняння описує *затухаючі гармонічні коливання заряду* в реальному коливальному контурі.

Формула періоду затухаючих коливань. Період затухаючих коливань визначається за формулою $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$, або $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}$, якщо в

попередню формулу підставити значення ω_0^2 і β^2 , виражені через параметри коливального контура L , C і R . Ця формула дає можливість зробити важливий висновок про те, за яких умов коливання в досліджуваному колі можливі. Період коливань повинен бути додатним числом і не може бути нескінченно великим. Отже, підкореневий вираз у знаменнику має бути більшим за нуль, $\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2}$, або $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ чи $L > \frac{CR^2}{4}$. Лише за цих умов коливання в колі можливі, і коло можна вважати коливальним контуром.

Формула $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}$ відразу перетворюється на формулу Томсона

$T = 2\pi\sqrt{LC}$, якщо припустити, що $R = 0$ (ідеальний коливальний контур).

Відповідно з рівняння $q'' = -\frac{1}{LC}q - \frac{R}{L}q'$ також можна отримати формули для опису незатухаючих гармонічних коливань. Оскільки $R = 0$, то $q'' = -\frac{1}{LC}q$. Розв'язком такого рівняння є функція $q = q_m \cos(\omega t + \varphi)$, де q_m — амплітуда коливань заряду конденсатора із циклічною частотою $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які енергетичні перетворення відбуваються у процесі електромагнітних коливань в ідеальному й реальному коливальних контурах? **2.** Якими рівняннями описують затухаючі електромагнітні коливання? Запишіть рівняння для коливань напруги й заряду. **3.** Який фізичний зміст коефіцієнта затухання коливань? Що треба зробити, щоб коливання в коливальному контурі стали незатухаючими? **4.** Як можна встановити умови, за яких коливання в контурі взагалі не можливі?



Вправа 14

- Заряджений конденсатор ємністю 10 мкФ підключили до котушки індуктивністю 0,1 Гн. Через 5 періодів амплітуда коливань напруги в контурі становила 95 % початкової напруги на конденсаторі. Визначте активний опір контура.
- Конденсатор, який має ємність 10 мкФ, зарядили до напруги $U_m = 400$ В і приєднали до котушки. Після цього в контурі виникли затухаючі коливання. Яка кількість теплоти виділиться в контурі за час, протягом якого амплітуда зменшиться у 2 рази?
- У коливальному контурі конденсатору надали заряд 1 мкКл, після чого в контурі виникли затухаючі електромагнітні коливання. Яка кількість теплоти виділиться до моменту, коли максимальна напруга на конденсаторі зменшиться в 4 рази? Ємність конденсатора — 10 мкФ.
- Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 48 мкФ, котушки з індуктивністю 24 мГн й активним опором 20 Ом. Визначте частоту вільних електромагнітних коливань в цьому контурі. На скільки зміниться частота електромагнітних коливань в контурі, якщо знехтувати активним опором котушки?

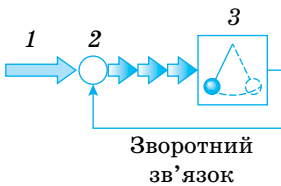
§ 23

Автоколивання

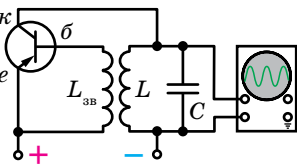
Отримання незатухаючих коливань. У реальному контурі заряджений конденсатор спричинює виникнення лише затухаючих коливань. У кінці кожного періоду коливань заряд на пластинах конденсатора зменшується порівняно з початком періоду. Зрозуміло, заряд зберігається, але зменшується на однакову за модулем величину позитивний заряд на одній пластині й негативний — на іншій. Унаслідок чого енергія коливань зменшується, оскільки вона пропорційна квадрату заряду, $W_e = \frac{q_m^2}{2C}$. Щоб коливання не затухали, потрібно компенсувати втрати енергії за кожний період.

Поповнювати енергію в контурі можна, підзаряджаючи конденсатор. Для цього потрібно періодично вмикати контур у коло джерела постійної напруги. До того ж конденсатор має вмикатися у коло джерела лише в ті проміжки часу, коли приєднана до позитивного полюса джерела пластина заряджена позитивно, а та, що приєднана до негативного полюса, — негативно. Тільки за такої умови джерело підзаряджатиме конденсатор, поповнюючи його енергію. Тобто джерело постійної напруги, яке весь час під'єднане до конденсатора контура, не може підтримувати в ньому незатухаючих коливань. Адже половину періоду енергія надходитиме в контур, а в наступну половину періоду повертатиметься до джерела. Незатухаючі коливання встановляться в контурі лише за умови, що джерело вмикатиметься в контур у ті інтервали часу, коли це потрібно. Система, яка сама регулює надходження енергії в коливальний контур для компенсації її втрат, називається *автоколивальною*.

Автоколивальні системи. Генератор незатухаючих електромагнітних коливань. Вивчаючи в 10 класі механічні коливання, ми з'ясували, що до складу будь-якої автоколивальної системи (мал. 110), має входити:



Мал. 110. Схема автоколивальної системи



Мал. 111. Схема генератора на транзисторі

1 — джерело енергії, 2 — передавальний пристрій (клапан), 3 — коливальна система.

Розглянемо принцип дії *генератора на транзисторі* (пригадайте, що таке транзистор, § 8). Його складові частини: коливальний контур — конденсатор ємністю C і котушка індуктивністю L , джерело енергії та транзистор (мал. 111).

Зі схеми видно, що коливальний контур з'єднаний послідовно з джерелом постійного струму і з транзистором так, що на емітер подається позитивний заряд, а на колектор — негативний. При цьому перехід між емітером і базою (емітерний перехід) прямий, а перехід між базою і колектором (колекторний перехід) виявляється оберненим, і струм по колу не проходить.

Щоб у колі контура виник струм і підзарядив конденсатор під час коливань, потрібно надати базі негативного відносно емітера потенціалу, і саме в ті інтервали часу, коли верхня пластина конденсатора заряджена позитивно, а нижня — негативно. В інтервал часу, коли верхня пластина конденсатора заряджена негативно, а нижня позитивно, струму в колі контура не повинно бути. У цей час база мусить мати позитивний потенціал відносно емітера. Отже, щоб компенсувати втрати енергії коливань у контурі, напруга на емітерному переході має періодично змінювати знак згідно з коливаннями напруги на контурі. Потрібний, як кажуть, зворотний зв'язок.

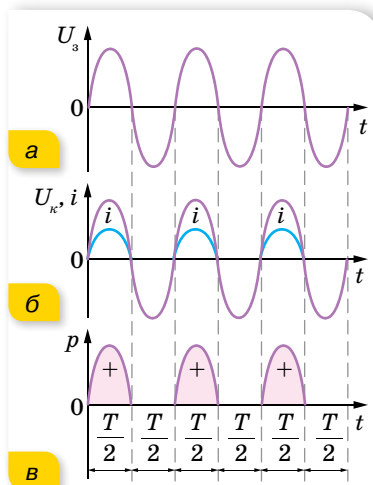
Зворотний зв'язок у розглядуваному генераторі — індуктивний. До емітерного переходу підведено котушку з індуктивністю $L_{зв}$, яка індуктивно зв'язана з котушкою контура, що має індуктивність L .

Коливання в контурі внаслідок електромагнітної індукції збуджують коливання напруги на кінцях першої котушки й тим само — на емітерному переході. Це спричинює те, що струм i , який проходить по контурній котушці, індукуює на кінцях котушки зворотного зв'язку змінну напругу U_e (мал. 112, а). Під дією цієї напруги електричне поле емітерного переходу періодично то підсилюється, то послаблюється, а транзистор то відкривається, то замиряється.

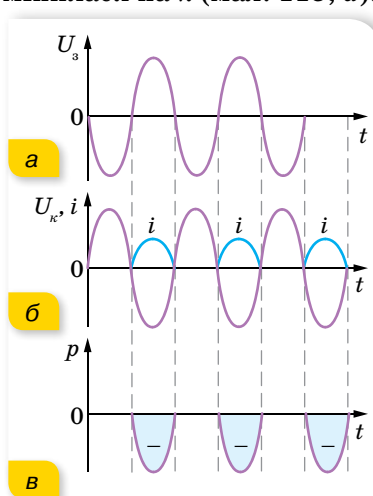
У ті проміжки часу, коли транзистор відкритий, через нього проходять імпульси струму, тривалість яких залежить від режиму роботи транзистора (мал. 112, б). Частота імпульсів струму, що проходить через транзистор, збігається з частотою коливань, які виникають в контурі, і надходять вони в контур у моменти, коли конденсатор контура заряджається. Тому імпульси струму, що проходять через транзистор, підзаряджають конденсатор і поповнюють енергію контура. На малюнку 112, в зафарбовано рожевим площі пропорційні енергії, яка надходить до контура за кожний період коливань. Енергія, яка надходить від джерела струму, компенсує втрати енергії в контурі, і коливання не затухають.

Якщо в автогенераторі котушку зворотного зв'язку повернути на 180° , то з осцилограми буде видно, що генератор не працює. Адже поворот котушки зворотного зв'язку на 180° спричинює те, що фаза коливань змінної напруги U_e на емітерному переході змінилася на π (мал. 113, а). Отже, імпульси струму, що проходять через транзистор, припадають на від'ємні півперіоди коливань напруги U_k на контурі (мал. 113, б). У разі проходження такого імпульсу через контур робота електричного струму буде від'ємною. Це означає, що вони не лише не поповнюють енергію контура, а навпаки, зменшують. Тому розрізняють прямий і обернений зворотний зв'язок.

Якщо в автогенераторі поступово збільшувати відстань між котушкою зворотного зв'язку й контурною котушкою, амплітуда автоколивань зменшується. І з досягненням деякої відстані між котушками коливання припиняються. Це означає, що за слабкого зворотного зв'язку енергія, що надходить у контур за кожний півперіод, менша від енергії, яка втрачається.



Мал. 112. Графіки незатухаючих коливань



Мал. 113. Графіки коливань у генераторі з оберненим зворотним зв'язком

Отже, зворотний зв'язок повинен бути таким, щоб:

- ▶ по-перше, напруга на емітерному переході змінювалась синфазно з напругою на контурі. Це фазова умова самозбудження генератора;
- ▶ по-друге, зворотний зв'язок має забезпечити надходження в контур такої кількості енергії, яка повністю компенсує необоротні втрати енергії. Це амплітудна умова самозбудження.

За допомогою автоколивальних систем можна одержувати незатухаючі електромагнітні коливання в широкому діапазоні частот. Низькочастотні коливання одержують унаслідок обертання рамок із провідників в однорідних магнітних полях (змінний струм низької частоти). Коливання високої частоти добувають за допомогою інших пристроїв, наприклад, за допомогою генератора на транзисторі.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Чим відрізняються автоколивання від вимушених і вільних коливань? **2.** Назвіть основні елементи автоколивальної системи. **3.** Яка роль транзистора в генерації автоколивань?

§ 24 Змінний струм

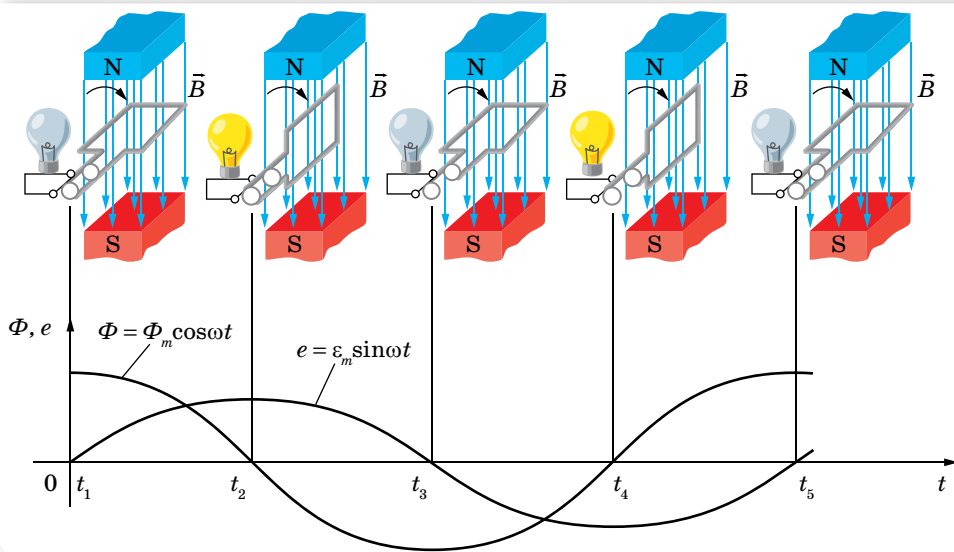
Обертання прямокутної рамки в однорідному магнітному полі. Досліджуючи явище електромагнітної індукції, з'ясували, що у випадку обертання рамки в магнітному полі в ній виникає індукційний струм. Дослідимо це явище детальніше.

Нехай у початковий момент часу рамка розташована так, що напрямок нормалі \vec{n} до неї збігається з напрямком індукції магнітного поля \vec{B} , у якому рамка обертається (мал. 114). Магнітний потік, який до того ж пронизує рамку, $\Phi_m = BS$, має максимальне значення. Рамка обертається рівномірно з кутовою швидкістю ω за годинниковою стрілкою, отже, в будь-який момент часу t кут повороту φ рамки $\varphi = \omega t$. Відповідно значення магнітного потоку, який пронизує рамку, змінюється за законом $\Phi = BS \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t$. Ця формула визначає зміну магнітного потоку через контур рамки площею S , яка рівномірно обертається в однорідному магнітному полі індукцією B з кутовою швидкістю ω .

Згідно із законом електромагнітної індукції, в разі зміни магнітного потоку, що пронизує контур, виникає електрорушійна сила індукції, $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Для швидкозмінних процесів слід брати $\Delta t \rightarrow 0$, тоді за означенням похідної: $\varepsilon_i = -\Phi'$. Формула для обчислення ЕРС індукції, що виникає в рамці, у будь-який момент часу t набуває вигляду $\varepsilon_i = -\Phi' = BS \omega \sin \omega t$.

Отже, за умови рівномірного обертання рамки в однорідному магнітному полі в ній виникає ЕРС індукції, яка з часом змінюється за синусоїдаль-

ним законом. Якщо рамка має N витків, то ЕРС індукції на її клеммах буде відповідно в N разів більшою: $\varepsilon_i = BS\omega \sin \omega t$. Зрозуміло, що максимальних значень ε_i досягає в ті моменти, коли $\sin \omega t = \pm 1$. Тоді максимальне значення ЕРС індукції $\varepsilon_m = BS\omega$. За один оберт рамки електрорушійна сила змінює своє значення і знак двічі, тобто здійснює одне повне *коливання*.



Мал. 114. Обертання рамки в магнітному полі

Вимушені електромагнітні коливання — незатухаючі коливання заряду, напруги, сили струму й інших фізичних величин, спричинені електрорушійною силою, що періодично змінюється.

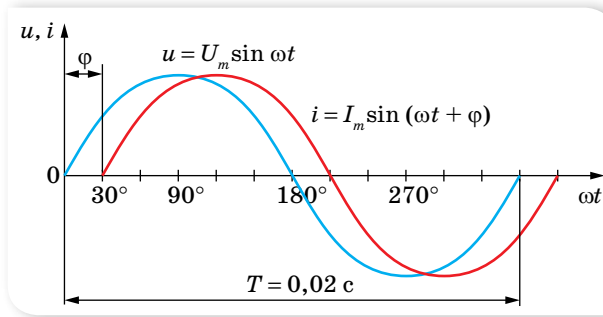
Закон зміни ЕРС можна записати так: $e = \varepsilon_m \sin \omega t$, де колова (циклічна) частота ω збігається з кутовою швидкістю обертання рамки в магнітному полі. Для кутової частоти справджується формула: $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$, де ν — частота коливань, T — період коливань.

Змінний струм. Прикладом вимушених електромагнітних коливань є змінний струм.

Змінними вважають струми, які змінюються як за значенням, так і за напрямком.

Найпростішим способом одержання низькочастотних змінних струмів є обертання рамки з провідників в однорідному магнітному полі (мал. 114) (або навпаки — обертання магнітного поля, яке перетинає нерухомі провідники). Цей принцип закладено в роботу генераторів змінного струму (індукційних генераторів).

Якщо до генератора змінного струму, напруга на полюсах якого змінюється за законом $u = U_m \sin \omega t$, під'єднати будь-яке навантаження (наприклад, електричний двигун, батарею конденсаторів, нагрівальний прилад і т. ін.), по колу проходить змінний струм $i = I_m \sin (\omega t + \varphi)$, де φ — зсув фаз між коливаннями сили струму та напруги (мал. 115). Причиною виникнення зсуву фаз між струмом і напругою в загальному випадку є різний опір кола змінного струму (про це детальніше — в наступних параграфах).



Мал. 115. Графіки зміни напруги та сили змінного струму

Діючі значення сили струму та напруги. У колі змінного струму напруга й сила струму повсякчас змінюються. Постає запитання: якими значеннями сили струму або напруги характеризувати цей струм? Середні значення сили струму й напруги за період дорівнюють нулю і не можуть бути їхніми характеристиками. Проте середнє значення квадрата сили струму за період відмінне від нуля. Пригадаймо, що кількість виділеного в провіднику тепла внаслідок проходження по ньому постійного струму змінюється пропорційно квадрату сили струму, $Q \sim I^2$. Якщо сконструювати вимірювальний прилад (тепловий амперметр), у якого відхилення стрілки буде пропорційним квадрату сили струму, і включити його в коло змінного струму, то він покаже певне значення. Який фізичний зміст цього показу?

Оскільки шкала приладу відградуєвана для постійного струму, то можна зробити висновок, що змінний струм за своїм тепловим ефектом еквівалентний постійному струму, силу якого показує на шкалі приладу стрілка. Це дає змогу ввести характеристику змінного струму — *ефективне (або діюче) значення сили змінного струму*.

Ефективним (або діючим) значенням сили змінного струму називають силу такого постійного струму, який за один період змінного струму виділяє стільки ж тепла, скільки останній виділяє за той самий час.

Усі амперметри, призначені для змінного струму, показують ефективне значення сили струму.

Дослідженнями встановлено, що середнє за період значення квадрата сили струму становить $\frac{I_m^2}{2}$, то корінь квадратний із цього виразу й буде

визначати діюче значення сили струму $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$. Так само визначається

і діюче значення напруги та ЕРС змінного струму: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, $\varepsilon = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}$.

У США й Канаді, наприклад, стандартна напруга мережі змінного струму дорівнює 120 В, що відповідає 170 В амплітудного значення. У Європі ефективна напруга 240 В, амплітудна відповідно — 340 В. У нашій країні ефективна напруга 220 В, амплітудна — 310 В. Усі вольтметри, призначені для змінного струму, показують ефективні значення ЕРС і напруги.

Потужність у колі змінного струму. Як підрахувати потужність струму, що проходить у цьому колі? У випадку постійного струму потужність визначають за формулою $P = UI$. Для кола змінного струму ця формула не застосовна, оскільки сила струму й напруга змінюються. Але сила струму й напруга мають постійні амплітудні значення і змінюються за однаковими законами, отже, і середнє значення потужності за будь-який період і за будь-яку кількість періодів буде однаковим. Унаслідок чого й середня потужність у колі змінного струму буде постійною. Отже, щоб знайти потужність змінного струму, достатньо визначити середню потужність за один період: $P = \frac{A}{T}$, де A — середня робота струму за період T .

Щоб визначити роботу змінного струму за період, скористаємось таким способом. Розіб'ємо період на велику кількість дуже маленьких інтервалів часу Δt . Тоді на кожному такому інтервалі силу струму та напругу можна вважати постійними і середнє значення потужності струму буде визначатись миттєвими значеннями сили струму та напруги, $P = iu$.

Робота струму ΔA за малий інтервал часу Δt дорівнює $\Delta A = iu\Delta t = I_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot U_m \sin \omega t \cdot \Delta t$.

Скориставшись формулою добутку синусів:

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) \cos(\alpha + \beta)],$$

можна записати $\Delta A = \frac{1}{2} I_m U_m \left[\cos \varphi - \cos 2 \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \Delta t$. Робота струму за весь період дорівнює сумі робіт ΔA .

$$\begin{aligned} A &= \sum \frac{1}{2} I_m U_m \left[\cos \varphi - \cos 2 \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \Delta t = \\ &= \sum \frac{1}{2} I_m U_m \Delta t \cos \varphi - \sum \frac{1}{2} I_m U_m \Delta t \cos 2 \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right). \end{aligned}$$

У цьому виразі $\frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$ стала, і її можна винести за знак суми; сума косинусів подвійного кута за період дорівнює нулю, і $\sum \Delta t = T$.

Отже, робота струму за період становить $A = \frac{1}{2} I_m U_m T \cos \varphi$. Тоді середня потужність струму за період: $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Як можна отримати ЕРС, яка б змінювалася за законом синуса? 2. Який струм називають змінним? Що таке діючі значення сили струму та напруги?



Приклади розв'язування задач

Задача. В однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл розміщено виток із провідника, площа контура якого 0,1 м², а опір 2 Ом, таким чином, що його площина перпендикулярна до ліній індукції. Виток замкнено на гальванометр. Повний заряд, що пройшов через гальванометр під час повороту витка, дорівнює $7,5 \cdot 10^{-3}$ Кл. На який кут повернули виток?

Дано:

$$B = 0,1 \text{ Тл}$$

$$S = 0,1 \text{ м}^2$$

$$R = 2 \text{ Ом}$$

$$\Delta q = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$$

α — ?

Розв'язання:

$$\text{Заряд } \Delta q = I \Delta t. \text{ За законом Ома сила струму } I = \frac{\varepsilon_i}{R}.$$

ЕРС індукції ε_i визначаємо за законом Фарадея:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t},$$

де $\Phi_1 = BS$ — потік магнітної індукції через площу контура, що охоплює виток на початку повороту; $\Phi_2 = BS \cos \alpha$ — кінцевий потік. Для індукційного заряду маємо вираз:

$$\Delta q = \frac{(BS - BS \cos \alpha) \Delta t}{R \Delta t} = \frac{BS(1 - \cos \alpha)}{R}; \quad \cos \alpha = 1 - \frac{R \Delta q}{BS};$$

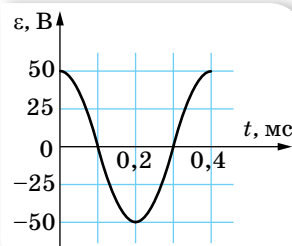
$$\cos \alpha = 1 - \frac{2 \text{ Ом} \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}}{0,1 \text{ Тл} \cdot 0,1 \text{ м}^2} = -0,5, \quad \alpha = 120^\circ.$$

Відповідь: $\alpha = 120^\circ$.



Вправа 15

- Під час обертання дрітної рамки в однорідному магнітному полі потік магнітної індукції, який пронизує її, змінюється залежно від часу за законом $A = 0,01 \cos 10\pi t$ (усі величини задано в одиницях СІ). Обчисліть похідну (Φ') і напишіть формулу залежності ЕРС від часу $e = e(t)$. У якому положенні була рамка на початку відліку часу? Яка частота обертання рамки? Чому дорівнюють максимальні значення магнітного потоку та ЕРС?
- Рамка, що має площу 200 см², обертається з кутовою швидкістю 50 $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ в однорідному магнітному полі, індукція якого 0,4 Тл. Напишіть формули залежності магнітного потоку та ЕРС від часу, якщо за $t = 0$ нормаль до площини рамки перпендикулярна до ліній індукції поля.
- За графіком (мал. 116) визначте амплітудне значення змінної ЕРС, її період і частоту. Запишіть формулу зміни ЕРС із часом.



Мал. 116

4. Зміну сили струму залежно від часу задано рівнянням $i = 5 \cos 200\pi t$. Визначте частоту та період коливань, амплітуду сили струму, а також значення сили струму, якщо фаза — $\frac{\pi}{3}$ рад.
5. Яке значення напруги буде через 10, 15 та 30 мс, якщо амплітуда напруги становить 200 В, а період — 60 мс? Вважайте, що коливання напруги здійснюються за синусоїдальним законом, з початковою фазою, яка дорівнює нулю.
6. Неонова лампа починає світити, коли напруга на її електродах досягне точно визначеного значення. Яку частину періоду світитиме лампа, якщо її ввімкнути в мережу, діюче значення напруги в якій дорівнює цій напрузі?

§ 25

Активний опір у колі змінного струму

Активні та реактивні навантаження. У колах змінного струму існують два принципово різних види навантажень — активні й реактивні.

Навантаження, в якому вся підведена електрична енергія перетворюється на інший вид енергії, називають *активним*, опір цього навантаження також дістав назву *активного опору*.

Величина струму в колі змінного струму залежить не тільки від його активного опору. У будь-якому колі змінного струму діє електрорушійна сила індукції, яка, за правилом Ленца, перешкоджає всякій зміні електричного струму в колі, затримує наростання струму і зменшує його діюче значення, тобто діє як опір. Цей опір називають *індуктивним опором* і позначають X_L .

Крім того, в колі змінного струму після вимикання рубильника по проводах (особливо в кабелях) ще протягом деякого часу протікає струм, наявність якого можна виявити чутливим амперметром. Це пояснюється тим, що проводи, які живлять струмоприймачі, подібні до конденсатора, що підтримує в колі зарядний і розрядний струми. Ці струми за ввімкненого рубильника збільшують діюче значення струму в струмоприймачі. Вплив ємності кола на величину діючого значення змінного струму враховується його *ємнісним опором* X_C .

Отже, коло змінного струму має такі опори: активний, індуктивний та ємнісний.

Індуктивний і ємнісний опори мають спільну назву *реактивних опорів*.

Природа реактивних опорів польова, тобто їхнє походження пов'язане зі змінами електричного поля (наприклад, конденсатора) або магнітного (наприклад, котушки зі струмом). Реактивні опори не спричиняють необоротних перетворень енергії. У колах лише з реактивними опорами відбуваються тільки оборотні процеси: протягом першої чверті періоду

енергія струму перетворюється на енергію електричного поля конденсатора (або магнітного поля котушки), а протягом другої чверті періоду енергія поля знову перетворюється на енергію струму. Тому в таких колах середня потужність за період дорівнює нулю, незважаючи на струм у колі. Це легко продемонструвати, увімкнувши в коло з конденсатором ваттметр. Стрілка цього приладу не відхиляється, хоча в колі діє напруга й тече струм, які реєструють відповідно вольтметр і амперметр.

Розглянемо спочатку найпростіші ідеальні кола змінного струму, які мають лише один із трьох опорів, а потім — складніші.

Активний опір у колі змінного струму. Електричні кола, що складаються з електричних ламп, нагрівальних приладів, реостатів і з'єднувальних проводів, практично можна вважати колами тільки з активним опором. У цих колах електрична енергія майже цілком перетворюється на теплову.

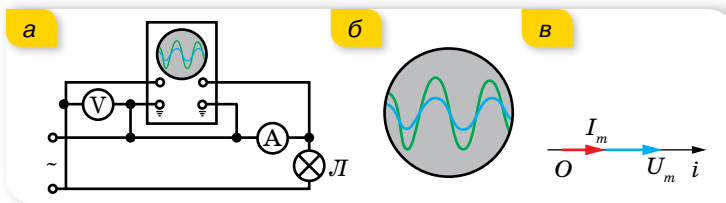
Один і той самий провідник чинить різний опір постійному і змінному струму. Опір провідника постійному струму називають *омічним опором*; він залежить від матеріалу, розмірів і температури провідника.

Активний опір провідника завжди більший за омічний. Зі збільшенням частоти змінного струму різниця між активним й омічним опорами провідника збільшується. Для частот до 100 Гц цією різницею можна знехтувати і вважати, що активний опір дорівнює омічному, але на більших частотах ця різниця буде значною. Наприклад, опір постійному струму мідного дроту довжиною 1 км, діаметром 4 мм дорівнює 1,47 Ом. Опір цього самого дроту змінному струму частотою 800 Гц становить 2,95 Ом, а на частоті струму 30 000 Гц — 8,14 Ом.

Фазові співвідношення між струмом і напругою. Проведемо такий дослід. Підключимо до генератора змінного струму дуже низької частоти активне навантаження, наприклад, лампу розжарювання. Генератор створює в колі змінне електричне поле, напруга якого змінюється синусоїдально.

Підключимо паралельно лампі вольтметр, а послідовно з лампою — амперметр. Замкнувши коло, побачимо, що стрілки приладів одночасно проходять через нульові й максимальні значення.

Якщо, крім вольтметра й амперметра, додати двоканальний осцилограф, підключений так, як показано на малюнку 117, а, то на його екрані спостерігатимемо збіг осцилограм сили струму й напруги за фазою (мал. 117, б).



Мал. 117. а — осцилограф у колі змінного струму з активним навантаженням; б — осцилограма; в — векторна діаграма

У колах змінного струму з активним навантаженням коливання сили струму збігаються за фазою з коливаннями напруги, отже, якщо $u = U_{\max} \sin \omega t$, то $i = I_{\max} \sin \omega t$.

Фазові співвідношення між струмом і напругою в колах змінного струму стають особливо наочними у векторному зображенні. Для цього візьмемо довільну вісь Oi , що називається віссю струму, і від точки O відкладемо вектор сили струму довжиною I_m . Оскільки в колі з активним опором коливання сили струму й напруги збігаються за фазою, вектор напруги буде напрямлений так само, як і вектор сили струму (мал. 117, в).

Значення активного опору R у колі змінного струму можна визначити як відношення миттєвих значень напруги та струму або як відношення амплітуд напруги та струму, а також їх амплітудних або діючих значень:

$$R = \frac{u}{i} = \frac{U_m \sin \omega t}{I_m \sin \omega t} = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I}.$$

Потужність у колі з активним навантаженням. Як ми з'ясували, середня потужність змінного струму за період визначається через максимальні значення напруги та сили струму і зсув фаз між ними,

$$P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi, \text{ або через діючі значення, } P = IU \cos \varphi.$$

В електричному колі, яке містить лише активні опори, струм і напруга збігаються за фазами ($\cos \varphi = 1$), тому середня потужність, що споживається активним опором за період, дорівнює добуткові діючих значень струму й напруги. Уся ця потужність витрачається на нагрівання: $P = UI = I^2 R$.

Обчислена в такий спосіб потужність вимірюється у ватах і називається *активною потужністю*.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Які види опору розрізняють у колі змінного струму? Який опір називають активним, а який реактивним? **2.** Як зміниться загальний опір змінному струмові, якщо прямолінійний дріт намотати на картонний циліндр? **3.** Запишіть рівняння зміни миттєвого значення напруги й струму на активному опорі та побудуйте їх графіки. **4.** Який зв'язок мають діючі значення струму й напруги на активному опорі в колі змінного струму? **5.** Через резистор проходить постійний струм силою 1 А, а через лампу — змінний, частота якого 50 Гц, діюче значення 1 А. Який заряд переноситься кожним зі струмів через поперечний переріз провідників за 1 хв?

§ 26

Конденсатор у колі змінного струму

Конденсатор у колах постійного та змінного струму. Підключимо до джерела постійного струму конденсатор великої ємності та амперметр. У момент замикання кола стрілка амперметра відхиляється на кілька

поділок, а потім повертається в нульове положення. Це відбувається тому, що в разі замикання кола проходить короткочасний струм зарядки конденсатора до напруги джерела. Після того як конденсатор зарядиться, струм у колі припиняється. Якщо ж подібне коло (але з амперметром змінного струму) під'єднати до джерела змінного струму, можна спостерігати, що струм у колі не припиниться.

На перший погляд, це здається дивним: у колі, розімкненому діелектриком конденсатора, проходить струм! Пояснюється це тим, що змінний струм — це вимушені коливання, зумовлені дією змінного поля генератора. Конденсатор протягом першої чверті періоду заряджається: на його пластинах з'являються електричні заряди. Протягом другої чверті періоду конденсатор розряджається. Відповідно протягом третьої чверті конденсатор знову заряджається, а протягом четвертої чверті — розряджається. У колі тече струм перезарядки конденсатора.

Ємнісний опір. Якщо до генератора змінного струму приєднати лампу розжарювання, вона світитиме яскраво. Якщо в це коло послідовно з лампою включити конденсатор, яскравість лампи зменшиться. Це свідчить про зменшення сили струму, зумовлене збільшенням опору.

Отже, конденсатор чинить змінному струму опір, який називають *ємнісним опором*, позначають його X_c . Причиною цього опору є електричне поле зарядів на пластинах конденсатора, це поле протидіє полю джерела струму.

З'ясуймо, від чого залежить ємнісний опір. Для цього складемо коло з джерела струму, частоту якого можна змінювати, батареї конденсаторів, ємність якої також можна змінювати, й амперметра змінного струму. Не змінюючи напруги в колі, будемо збільшувати ємність конденсатора. Сила струму також збільшується, отже, ємнісний опір зменшується. Не змінюючи напруги, будемо збільшувати частоту змінного струму. Ми помітимо, що струм у колі зростає. Отже, з досліду впливає, що *ємнісний опір обернено пропорційний частоті струму і ємності конденсатора*.

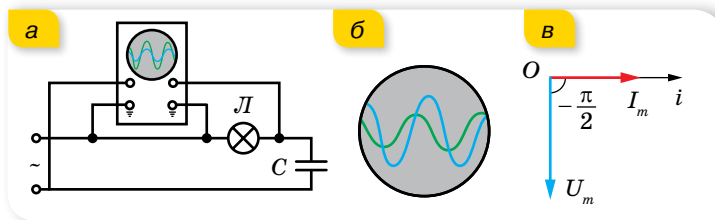
Формулу для визначення ємнісного опору можна вивести за допомогою математичних перетворень. Напруга на конденсаторі $u = \frac{q}{C}$ дорівнюватиме напрузі на кінцях кола $u = U_m \sin \omega t$. Звідки $q = U_m C \sin \omega t$. Ураховуючи, що $i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = q' = U_m C \omega \cos \omega t$, де $U_m C \omega = I_m$, останній вираз можна записати у вигляді $\frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C}$, де $\frac{1}{\omega C}$ є виразом для визначення ємнісного опору — опору, який чинить конденсатор змінному струмові. Остаточно $X_c = \frac{1}{\omega C}$.

Ємнісний опір можна визначати й через відповідні діючі значення сили струму та напруги: $X_c = \frac{U}{I}$.

Закон Ома для ділянки кола з ємнісним опором має вигляд $I = \frac{U}{X_c}$.

Фазові співвідношення між напругою та силою струму. Якщо на один вхід двоканального осцилографа (мал. 118, а) подати напругу з конденсатора, а на інший — напругу, миттєве значення якої пропорційне силі струму в колі (цю напругу знімають з електроламп), то на екрані можна побачити одночасно осцилограми обох коливань — напруги та сили струму. Уважний аналіз осцилограм показує, що коливання сили струму і коливання напруги в колі з конденсатором зсунуті за фазою на $\frac{\pi}{2}$. До того ж коливання сили струму випереджають за фазою коливання напруги (мал. 118, б). На перший погляд, це здається дивним. Проте результати досліду мають простий фізичний зміст: напруга на конденсаторі в довільний момент часу визначається наявним на пластинках електричним зарядом, який утворюється в результаті проходження струму, необхідного для зарядки конденсатора. Тому коливання напруги відстають від коливань сили струму.

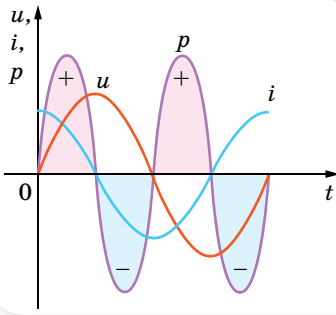
У колах змінного струму, що містять ємнісне навантаження, коливання напруги $u = U_m \sin \omega t$ відстають за фазою на чверть періоду від коливань сили струму, $i = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$.



Мал. 118. Спостереження за фазовими співвідношеннями в колі змінного струму з конденсатором (а, б); в — векторна діаграма

Фазові співвідношення між силою струму й напругою на ділянці кола з конденсатором зображено за допомогою векторних діаграм на малюнку 118, в. Оскільки коливання напруги відстають за фазою на чверть періоду від коливань сили струму, то вектор напруги повернуто стосовно вектора сили струму на $-\frac{\pi}{2}$.

Потужність у колі з ємнісним навантаженням. З'ясуємо, яка потужність виділяється в колі змінного струму, що містить конденсатор. Відомо, що потужність у колі змінного струму визначається формулою $P = IU \cos \varphi$. Оскільки зсув фаз між коливаннями струму й напруги в колі з ємнісним навантаженням становить $\frac{\pi}{2}$, то $\cos \frac{\pi}{2} = 0$ і $P = 0$. Такий результат покаже й ватметр, включений в електричне коло змінного струму з ємнісним опором. Зрозуміти ситуацію легко, якщо розглянути в такому колі графіки зміни напруги, сили струму та потужності від часу (мал. 119, с. 122).



Мал. 119. Часові залежності напруги, сили струму та потужності в колі змінного струму з ємнісним опором

Протягом першої чверті періоду конденсатор заряджається, і відбувається накопичення енергії в електричному полі конденсатора. Потужність протягом даного часу додатна. Протягом наступної чверті періоду конденсатор розряджається. Енергія електричного поля конденсатора повертається в коло, і потужність від'ємна. У подальшому процес повторюється. Таким чином, у колі змінного струму з конденсатором відбувається періодичний обмін енергією між генератором і конденсатором без необоротної втрати енергії.

У цьому основна відмінність між активним і ємнісним опорами. Активний опір обмежує силу струму в колі й повністю та необоротно перетворює енергію електромагнітного поля на інші види. Ємнісний опір лише обмежує силу струму в колі, але не перетворює енергію електромагнітного поля в інші види енергії. Цю властивість ємнісного опору використовують для обмеження сили струму, що проходить через прилади незначної потужності (наприклад, в електробритвах).



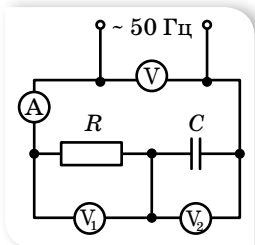
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Запишіть рівняння зміни миттєвого значення напруги й струму на конденсаторі та побудуйте їх графіки.
2. За якою формулою визначають ємнісний опір?
3. Який зв'язок між діючими значеннями струму й напруги на конденсаторі в колі змінного струму?
4. Послідовно з конденсатором в коло змінного струму увімкніть лампу. Як змінюється яскравість лампи, якщо даний конденсатор замінити конденсатором більшої ємності? Як зміниться світіння лампи, якщо обидва конденсатори підключити послідовно; паралельно?



Вправа 16

1. У колі, наведеному на малюнку 120, прилади показують $I = 1$ А, $U_1 = 50$ В, $U_2 = 120$ В. Визначте ємність C конденсатора та напругу U в мережі.
2. Два конденсатори, ємності яких $0,2$ мкФ і $0,1$ мкФ, увімкнені послідовно в коло змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Визначте струм у колі та спади напруг на першому й другому конденсаторах.
3. Конденсатор ємністю 20 мкФ та резистор, опір якого 150 Ом, увімкнені послідовно в коло змінного струму частотою 50 Гц. Яку частину напруги, прикладеної до кола, становить напруга на конденсаторі, а яку — на резисторі?
4. Конденсатор та електролампа з'єднані послідовно й увімкнені в коло змінного струму частотою 50 Гц. Яку ємність повинен мати конденсатор для того, щоб через лампу проходив струм $0,5$ А, а спад напруги дорівнював 110 В?



Мал. 120

5. Сила струму в колі змінюється за законом $i = 0,2 \sin 314\pi t$. На яку напругу має бути розрахований конденсатор ємністю 2 мкФ, увімкнений у дане коло, щоб не відбулося його пробую?
6. Напруга на конденсаторі змінюється за законом $u = 220 \sin\left(314t - \frac{\pi}{2}\right)$. Запишіть рівняння для миттєвого значення струму через конденсатор, якщо ємність конденсатора 20 мкФ. Визначте зсув фаз між струмом і напругою на конденсаторі. За яким законом змінюється заряд конденсатора?

§ 27

Котушка індуктивності в колі змінного струму

Котушка в колах постійного і змінного струму. Якщо підключити до джерела постійного струму котушку, яка має велику кількість витків з мідного дроту великого перерізу, і виміряти значення сили струму й напруги в колі, то можна побачити, що сила струму в колі доволі значна за невеликої напруги. Тобто опір котушки постійному струмові незначний.

Якщо ж цю котушку під'єднати до джерела змінного струму з такою самою напругою й замінити амперметр і вольтметр на прилади для вимірювання змінного струму, то помітимо, що сила струму значно зменшиться. Тобто змінному струмові котушка¹ чинить більший опір, ніж постійному.

Активний та індуктивний опори котушки. Опір, який чинить котушка індуктивності змінному струмові, називають *індуктивним опором* і позначають X_L .

З'ясуємо природу індуктивного опору. Для цього розглянемо процеси, що відбуваються в колі змінного струму з котушкою індуктивності. Змінний струм створює навколо котушки змінне магнітне поле. Лінії індукції цього магнітного поля пронизують витки котушки. Тому у витках котушки виникає індукційне електричне поле, яке, відповідно до правила Ленца, протидіє зміні сили струму в колі. Першої чверті періоду індукційне електричне поле, яке виникає в котушці індуктивності, протидіє наростанню сили струму в колі; протягом другої чверті — спаданню сили струму; протягом третьої та четвертої — наростанню й спаданню сили струму відповідно (але вже в протилежному напрямку).

Таким чином, за проходження змінного струму через котушку індуктивності внаслідок явища самоіндукції виникає індукційне електричне поле, яке протидіє полю, що створюється генератором. Індукційне електричне поле і є причиною індуктивного опору.

З'ясуємо, від чого залежить індуктивний опір. Для цього складемо коло, до якого входять генератор змінного струму, частоту якого можна змінювати, котушка індуктивності й амперметр. У будь-який момент часу напруга на котушці дорівнює за модулем ЕРС самоіндукції, $u = -e_c$. Змінюючи частоту змінного струму, спостерігаємо за змінами сили струму.

¹ Котушку в колі змінного струму інколи називають котушкою індуктивності, або індуктивною котушкою.

Зі збільшенням частоти сила струму зменшується, тобто сила струму обернено пропорційна частоті струму. Відповідно індуктивний опір прямо пропорційний силі струму. Збільшимо індуктивність котушки, для цього внесемо в котушку залізне осердя. Сила струму в колі різко зменшиться. Повільно висуваючи осердя з котушки, спостерігаємо поступове зростання сили струму в колі. Отже, індуктивний опір прямо пропорційний індуктивності. Таким чином, *індуктивний опір прямо пропорційний силі струму та індуктивності*.

Формулу для визначення індуктивного опору отримаємо математичним шляхом. Якщо сила струму в колі змінюється за гармонічним законом $i = I_m \sin \omega t$, то ЕРС самоіндукції: $e_c = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t$. Ураховуючи, що $u = -e_c$, напруга на кінцях котушки становитиме:

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Тоді $\frac{U_m}{I_m} = \omega L$ або $\frac{U_m}{I_m} = X_L$. Ємнісний опір можна визначати й через від-

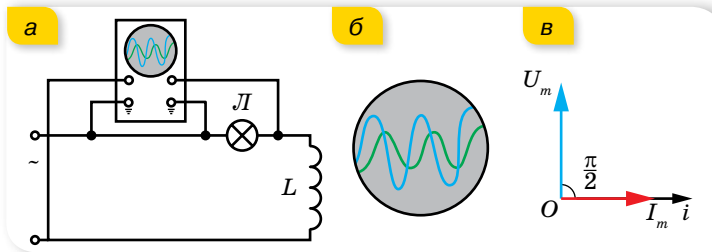
повідні діючі значення сили струму й напруги: $X_L = \frac{U}{I}$.

Формула для визначення ємнісного опору: $X_L = \omega L$.

Закон Ома для кола з індуктивним опором має вигляд: $I = \frac{U}{X_L}$.

Котушка індуктивності має також і *власний активний опір R*.

Фазові співвідношення між напругою та струмом. Зберемо коло, що містить електролампу та котушку індуктивності, так, як показано на малюнку 121. Підключимо двоканалний осцилограф до клем генератора паралельно активному навантаженню (електролампі). Бачимо, що осцилограми сили струму й напруги в колі з котушкою індуктивності не збігаються за фазою.



Мал. 121. Спостереження за фазовими співвідношеннями в колі змінного струму з котушкою індуктивності (а, б); в — векторна діаграма

Вивчення осцилограм (мал. 121, б) показує, що в колі з котушкою сила струму й напруга зсунуті за фазою на $\frac{\pi}{2}$. До того ж коливання напруги випереджають коливання сили струму. Якщо $u = U_m \sin \omega t$, то $i = I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$.

У колах змінного струму, що містять індуктивне навантаження, коливання напруги, $u = U_m \sin \omega t$, випереджають за фазою на чверть періоду коливання сили струму $i = I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$.

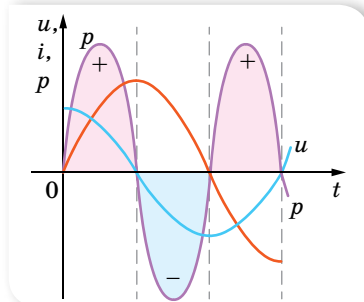
Фазові співвідношення між струмом і напругою в колі з котушкою зображено за допомогою векторних діаграм на малюнку 121, в. Оскільки на котушці індуктивності коливання напруги випереджають коливання сили струму на $\frac{\pi}{2}$, то вектор напруги повернуто на $\frac{\pi}{2}$ відносно вектора сили струму.

Як ми зазначили, котушка крім індуктивного має і власний активний опір. Зазвичай у багатьох задачах активним опором котушки нехтують. Якщо ж активний опір ураховують, то повний опір котушки Z буде визначатися формулою $Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$. Згодом ми пояснимо цю формулу, скориставшись векторною діаграмою опорів.

Потужність у колі з індуктивним навантаженням. Визначимо потужність у колі змінного струму, що містить котушку індуктивності. Ми знаємо, що потужність у колі змінного струму визначається за формулою $P = IU \cos \varphi$. Оскільки зсув фаз між коливаннями струму й напруги в колі з ємнісним навантаженням становить $\frac{\pi}{2}$, то $\cos \frac{\pi}{2} = 0$ і $P = 0$. Як і у випадку з конденсатором, коло, що містить тільки котушку індуктивності, не перетворює енергію, яка надходить від джерела, в інші види. У цьому можна переконатись і на досліді, включивши в коло змінного струму з котушкою ватметр. Прилад покаже нуль.

Щоб це зрозуміти, розглянемо малюнок 122, на якому наведено графік зміни миттєвої потужності. Протягом першої і третьої чверті періоду миттєва потужність додатна, і в колі з котушкою індуктивності за рахунок енергії генератора створюється магнітне поле, енергія якого збільшується від нуля до деякого найбільшого значення. Протягом другої і четвертої чверті періоду миттєва потужність від'ємна. Це означає, що накопичена в магнітному полі енергія повертається назад генератору. Таким чином, енергія в колі змінного струму з котушкою індуктивності за кожний період дорівнює нулю, а отже, дорівнює нулю й середня потужність змінного струму в даному колі.

Іншими словами: у колі змінного струму, що містить котушку індуктивності, не відбувається незворотних перетворень енергії, а лише обмін енергією між генератором і котушкою. У цьому основна відмінність між активним й індуктивним опорами. Активний опір обмежує силу струму в колі



Мал. 122. Часові залежності напруги, сили струму і потужності в колі змінного струму з індуктивним опором

й повністю та необоротно перетворює енергію електромагнітного поля на інші види. Індуктивний опір лише обмежує силу струму в колі, але не перетворює енергію електромагнітного поля на інші види енергії.

Цю властивість індуктивного опору широко використовують у техніці, наприклад, для плавного регулювання сили струму в колі.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. Запишіть рівняння зміни миттєвого значення напруги й струму на котушці індуктивності та побудуйте їх графіки. **2.** Що називають індуктивним опором? Яка формула виражає зміст цього поняття? **3.** Який зсув фаз між струмом і напругою існує в колі змінного струму, яке містить котушку індуктивності? **4.** Маємо електричне коло з послідовно з'єднаними лампою і котушкою індуктивності. Як зміниться яскравість лампи, якщо в котушку ввести осердя; приєднати ще одну котушку послідовно; паралельно?



Вправа 17

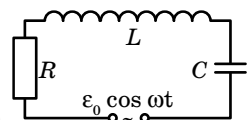
1. Якщо подати на котушку постійну напругу 30 В, сила струму в котушці дорівнюватиме 1 А. Якщо на цю саму котушку подати змінну напругу 30 В із частотою 50 Гц, сила струму становитиме лише 0,6 А. Яка індуктивність котушки? Яка потужність виділяється в котушці під час проходження постійного струму; змінного?
2. Котушка довжиною 50 см і площею поперечного перерізу 10 см^2 увімкнена в коло змінного струму із частотою 50 Гц. Кількість витків котушки — 3000. Визначте активний опір котушки, якщо зсув фаз між напругою та струмом — 60° .
3. Обмотка котушки має 500 витків мідного дроту, площа поперечного перерізу якого 1 мм^2 , довжина котушки 50 см, її діаметр 5 см. На якій частоті змінного струму повний опір котушки вдвічі більший за її активний опір?
4. Котушка довжиною 25 см і радіусом 2 см має обмотку з 1000 витків мідного дроту, площа поперечного перерізу якого — 1 мм^2 . Котушку включено в коло змінного струму із частотою 50 Гц. Яку частину повного опору становить її активний опір, а яку — індуктивний?

§ 28

Електричне коло змінного струму з активним і реактивним навантаженнями

Послідовне коло змінного струму з активним, ємнісним та індуктивним опорами. Будь-яке реальне електричне коло змінного струму містить активний опір (опір провідників, нагрівальних приладів і т. ін.), ємнісний опір (ємність провідників, конденсаторів) та індуктивний опір (обмотки електродвигунів, котушки електромагнітних приладів).

Розглянемо електричне коло з активним, ємнісним та індуктивним навантаженнями, які з'єднані послідовно (мал. 123) (таке коло ще називають послідовним колом змінного струму).



Мал. 123. Схема електричного кола змінного струму з послідовним з'єднанням активного та реактивного навантажень

Якщо до такого кола під'єднати двохпроменевий осцилограф, то ми будемо спостерігати осцилограми коливань сили струму й напруги, які не збігаються за фазою. Змінюючи індуктивність котушки (вносячи залізне осердя) або ємність батареї конденсаторів, будемо спостерігати, що змінюється й різниця фаз. Отже, різниця фаз φ між коливаннями сили струму й напруги залежить від співвідношення між ємнісним та індуктивним опорами. Якщо $u = U_m \sin \omega t$, то $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$.

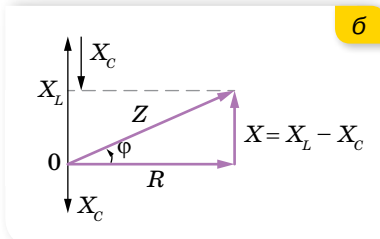
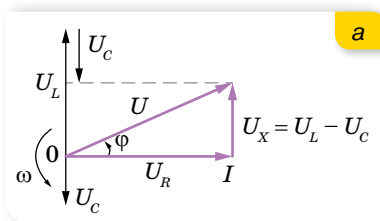
Урахувавши зсув фаз між струмом і напругою в колі з мішаним опором, можна аналітично вивести формулу повного опору. Нехай до кола підведено змінну напругу $u = U_m \cos \omega t$. В електричному колі проходить струм $i = I_m \cos(\omega t + \varphi)$, де $I_m = \frac{U_m}{Z}$ або $U_m = I_m Z$, де Z — повний опір кола.

Миттєві значення напруг на кожному з навантажень: $u_R = I_m R \cos \omega t$; $u_L = I_m X_L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$; $u_C = I_m X_C \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$. Оскільки у випадку послідовного з'єднання елементів миттєве значення прикладеної напруги дорівнює сумі миттєвих значень її на окремих ділянках, то $u = u_R + u_L + u_C$ або $I_m Z \cos(\omega t + \varphi) = I_m R \cos \omega t + I_m X_L \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + I_m X_C \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Після простих перетворень дістанемо: $Z \cos \omega t \cos \varphi - Z \sin \omega t \sin \varphi = R \cos \omega t - (X_C - X_L) \sin \omega t$. Прирівнявши коефіцієнти при $\sin \omega t$ і $\cos \omega t$, матимемо, $Z \cos \varphi = R$, $Z \sin \varphi = X_C - X_L$.

Піднісши до квадрата й додавши ці вирази, дістанемо вираз для обчислення повного опору в колі змінного струму з активним і реактивним навантаженнями, $Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$.

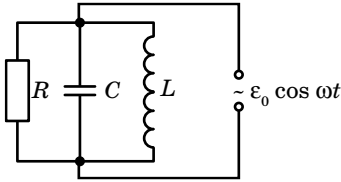
Формулу для опору повного кола можна вивести й за допомогою векторних діаграм (мал. 124). Оскільки коливання напруги на активному навантаженні збігається з коливаннями сили струму, то спад напруги на активному опорі U_R відкладаємо вздовж осі струму. Коливання напруги на котушці U_L випереджають коливання сили струму на $\frac{\pi}{2}$, тому вектор U_L повернутий на кут $+90^\circ$, коливання напруги U_C на конденсаторі відстають від коливань сили струму на $\frac{\pi}{2}$, тому вектор U_C повернутий на -90° . Векторна сума векторів U_R , U_L та U_C дорівнює напрузі генератора. З малюнка 124, а видно, що $U_Z^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$, де спади напруг на відповідних опорах можна виразити як



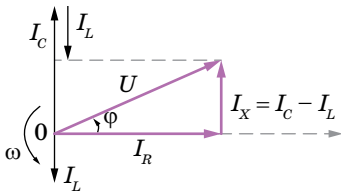
Мал. 124. Векторні діаграми: а — напруг; б — опорів (для послідовного кола)

$(IZ)^2 = (IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2$. Тоді повний опір кола обчислюється за формулою: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

За діаграмою опорів (мал. 124, б; с. 127) легко визначити зсув фаз між напругою джерела струму і струмом у колі: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$ або $\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U}$.



Мал. 125. Схема електричного кола змінного струму з паралельним з'єднанням активного та реактивного навантажень



Мал. 126. Векторна діаграма сил струмів для випадку паралельного з'єднання активного та реактивного навантажень

Паралельне коло змінного струму з активним, ємнісним та індуктивним опорами. За паралельного з'єднання резистора, котушки та конденсатора (мал. 125) повний опір визначається формулою $\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{X^2}$, тобто

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Сила струму в колі $I = \sqrt{I_R^2 + I_X^2} = \frac{U}{Z}$, де I_R та I_X — струми, що проходять через активний і реактивні елементи відповідно.

На малюнку 126 показано векторну діаграму струмів у колі з паралельним з'єднанням активного та реактивних навантажень.

$$\text{Зсув фаз } \operatorname{tg} \varphi = R \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \text{ або } \cos \varphi = \frac{I_R}{I_X}$$

Закон Ома для ділянки кола змінного струму як для послідовного, так і для паралельного з'єднання має вигляд $I = \frac{U}{Z}$.

ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. Чи може повний опір кола з послідовно з'єднаними резистором, котушкою індуктивності та конденсатором бути меншим від активного опору? Відповідь обґрунтуйте.
2. Замкнене коло складено з батарейки, резистора й котушки індуктивності. Чи може напруга на котушці індуктивності перевищити ЕРС джерела?

§ 29

Робота і потужність змінного струму

Активна та реактивна потужності. Якщо в коло змінного струму послідовно з лампами включити котушку індуктивності, то спричинений індуктивністю котушки зсув фаз між коливаннями струму й напруги

зумовить менші покази ватметра, ніж добуток показів вольтметра й амперметра. Активна потужність витрачається на виконання корисної роботи, а потужність, яка поглинається котушкою індуктивності, у корисній роботі участі не бере, оскільки під час наростання струму в магнітному полі котушки індуктивності накопичується енергія, яка повертається назад до генератора зі зменшенням струму, тобто в колі відбувається перекачування енергії від генератора в коло і навпаки. Потужність у колі з реактивним опором називають *реактивною потужністю* Q .

Реактивна потужність Q визначається добутком ефективної напруги, реактивного струму (складової сили струму, перпендикулярної до напруги) та синусом кута зсуву фаз між діючими в колі силою струму та напругою, $Q = IU \sin \varphi$, або $Q = I^2(X_L - X_C)$.

Одиниця реактивної потужності — вар, $[Q] = 1 \text{ вар}$.

Помноживши сторони трикутника напруг на величину струму I , дістанемо трикутник потужностей (мал. 127). Повна потужність S визначається формулою $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Одиниця повної потужності — вольт на ампер, $[S] = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$.

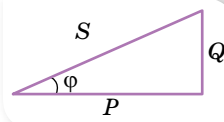
Коефіцієнт потужності. З трикутника потужностей видно, що активна потужність змінного струму в колі з активним і реактивним опорами визначається як $P = S \cos \varphi$; оскільки $S = UI$, то $P = UI \cos \varphi$.

$\cos \varphi$ називають *коефіцієнтом потужності*. Величину коефіцієнта потужності можна обчислити з трикутника напруг, опорів або потужностей:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U} = \frac{P}{S}.$$

Коефіцієнт потужності показує ефективність використання електричної енергії в даному колі. Наприклад, якщо $\cos \varphi = 0,8$, то це означає, що 80 % енергії споживається колом, а 20 % повертається до генератора. Водночас частина цієї енергії перетворюється на теплову (внутрішню енергію обмоток генератора, ліній електропередачі та споживача). Потужність теплових втрат $P = I^2 R$. Енергія, яка витрачається на нагрівання проводів, обернено пропорційна квадрату коефіцієнта потужності. Наприклад, якщо $\cos \varphi = 0,8$, втрати майже в 1,5 раза більші, ніж при $\cos \varphi = 1$.

Підвищення коефіцієнта потужності — одне з головних завдань будь-якого виробництва. Однією з важливих умов збільшення $\cos \varphi$ є правильна експлуатація електродвигунів, увімкнених в електричну мережу. До них треба підключати таке навантаження, щоб потужність, яку вони розвиватимуть під час роботи, була якомога ближчою до їх номінальної потужності, вказаної в паспорті. Варто підкреслити, що на холостому ході коефіцієнт потужності становить 0,2–0,3, а під час роботи на повну потужність він досягає 0,85. Тому треба уникати холостого ходу електродвигунів.



Мал. 127.
Трикутник
потужностей

Особливо ефективним способом підвищення коефіцієнта потужності є підключення паралельно двигуну, що працює, спеціальних компенсуючих конденсаторів. Цим способом коефіцієнт потужності установки можна довести до одиниці. У випадку паралельного з'єднання індуктивності та ємності в колі змінного струму енергія нагромаджується в магнітному полі котушки індуктивності й електричному полі конденсатора та повертається до джерела від цих елементів кола в різні моменти часу. Тому в разі паралельного з'єднання котушки індуктивності й конденсатора частина реактивної енергії циркулює між ємністю й індуктивністю, минаючи джерело (генератор) і проводи лінії. Саме тому одним зі способів збільшення коефіцієнта потужності є підключення конденсатора паралельно індуктивно-активному навантаженню.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. За яких умов ділянка кола змінного струму зі з'єднаними послідовно резистором, котушкою та конденсатором споживатиме найбільшу потужність? Чому вона дорівнює? **2.** У чому відмінність одиниць активної і реактивної потужності? **3.** Використовуючи формулу $P = UI \cos \varphi$, доведіть, що втрата енергії відбувається лише на активному опорі даної ділянки кола змінного струму. **4.** Яка потужність ділянки кола — активна, реактивна чи повна — визначається як добуток значень миттєвого струму на миттєву напругу? На яку з трьох потужностей орієнтуються, розраховуючи необхідні поперечні перерізи дротів у колах змінного струму?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Котушка, активний опір якої $R_k = 6 \text{ Ом}$, а індуктивний $X_L = 10 \text{ Ом}$, з'єднана послідовно з активним навантаженням опором $R = 2 \text{ Ом}$ та конденсатором, ємнісний опір якого $X_C = 4 \text{ Ом}$. У коло подається напруга 50 В . Визначте: а) повний опір кола; б) струм у колі; в) коефіцієнт потужності; г) активну, реактивну та повну потужності кола; д) напругу на кожному навантаженні.

Дано:

$$R_k = 6 \text{ Ом}$$

$$X_L = 10 \text{ Ом}$$

$$R = 2 \text{ Ом}$$

$$X_C = 4 \text{ Ом}$$

$$U = 50 \text{ В}$$

а) Z — ?; б) I — ?

в) $\cos \varphi$ — ?

г) P, Q, S — ?

д) U_R, U_L, U_C — ?

Розв'язання:

$$\text{Повний опір кола } Z = \sqrt{(R_k + R)^2 + (X_L - X_C)^2},$$

$$Z = \sqrt{(6 \text{ Ом} + 2 \text{ Ом})^2 + (10 \text{ Ом} - 4 \text{ Ом})^2} = 10 \text{ Ом}.$$

$$\text{Струм у колі } I = \frac{U}{Z}, \quad I = \frac{50 \text{ В}}{10 \text{ Ом}} = 5 \text{ А}.$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{R_k + R}{Z}, \quad \cos \varphi = \frac{6 \text{ Ом} + 2 \text{ Ом}}{10 \text{ Ом}} = 0,8.$$

$$\text{Активна потужність } P = I^2(R_k + R), \quad P = 5^2 \text{ А}^2 \cdot (6 \text{ Ом} + 2 \text{ Ом}) = 200 \text{ Вт}.$$

$$\text{Реактивна потужність } Q = I^2(X_L - X_C), \quad Q = 5^2 \text{ А}^2 \cdot (10 \text{ Ом} - 4 \text{ Ом}) = 150 \text{ вар}.$$

$$\text{Повна потужність } S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad S = \sqrt{200^2 \text{ Вт}^2 + 150^2 \text{ вар}^2} = 250 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Спади напруги на опорах кола:

$$UR_k = IR_k, UR_k = 5 \text{ А} \cdot 6 \text{ Ом} = 30 \text{ В};$$

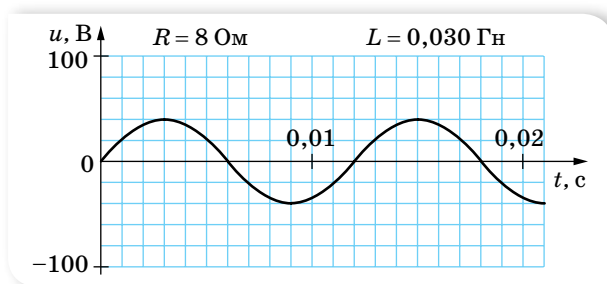
$$U_L = IX_L, U_L = 5 \text{ А} \cdot 10 \text{ Ом} = 50 \text{ В};$$

$$U_C = IX_C; U_C = 5 \text{ А} \cdot 4 \text{ Ом} = 20 \text{ В};$$

$$UR = IR, U_R = 5 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом} = 10 \text{ В}.$$

Відповідь: $Z = 10 \text{ Ом}; I = 5 \text{ А}; \cos \varphi = 0,8; P = 200 \text{ Вт}; Q = 150 \text{ вар}; S = 250 \text{ В} \cdot \text{А}; U_R = 30 \text{ В}; U_L = 50 \text{ В}; U_C = 20 \text{ В}.$

Задача 2. На малюнку 128 зображено графік зміни напруги для синусоїдального змінного струму.



Мал. 128

Визначте:

- Циклічну частоту струму; амплітудне значення напруги; діюче значення напруги.
- У разі вмикання в коло тільки резистора, активний опір якого вказано на малюнку, обчисліть амплітудне та діюче значення струму, середню потужність струму в цьому випадку. Запишіть закон зміни сили струму в колі. Побудуйте графіки зміни сили струму та середньої потужності.
- Якщо в коло будуть увімкнені послідовно активний опір R і котушка з індуктивністю L (відповідні значення вказано на малюнку), обчисліть реактивний і повний опори, амплітудне значення струму в цьому колі, коефіцієнт потужності та кут зсуву фаз струму відносно напруги; середню потужність. Побудуйте графіки зміни сили струму та середньої потужності.

Розв'язання:

- За даними графіка визначаємо: $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega = \frac{2 \cdot 3,14}{0,012 \text{ с}} = 523 \text{ с}^{-1}$;

$$U_m = 40 \text{ В}; U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 28 \text{ В}.$$

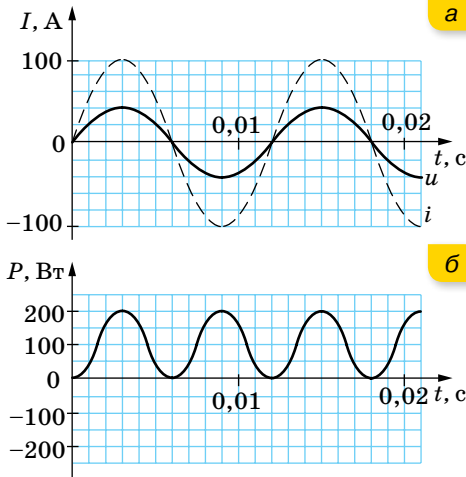
- Якщо в колі є лише активне навантаження опором $R = 8 \text{ Ом}$, то амплітудне значення сили струму $I_m = \frac{U_m}{R} = \frac{40 \text{ В}}{8 \text{ Ом}} = 5 \text{ А}$, діюче значення

$$\text{сили струму } I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{5 \text{ А}}{\sqrt{2}} \approx 3,5 \text{ А}.$$

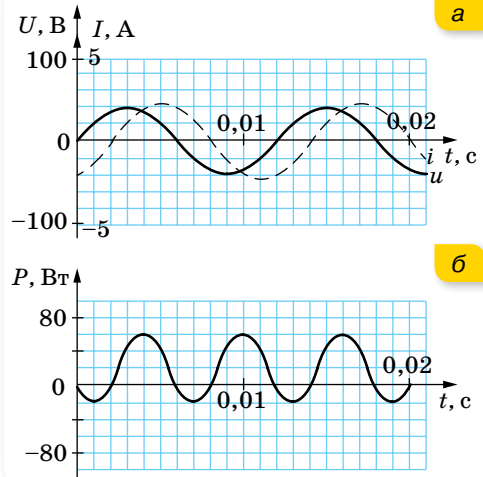
Оскільки на активному навантаженні струм збігається за фазою з напругою, то середня потужність $P = I_{\text{д}} U_{\text{д}} = \frac{I_m U_m}{2} = 100 \text{ Вт}$.

Закон зміни сили струму в колі: $i = 5 \sin 166,7\pi t$.

Графіки зміни сили струму та потужності наведено на малюнку 129.



Мал. 129. Графіки зміни сили струму (а) та потужності (б) у випадку лише активного навантаження в колі



Мал. 130. Графіки зміни сили струму (а) та потужності (б) у випадку послідовного з'єднання активного навантаження та котушки

в) Якщо коло складається з послідовно з'єднаних активного навантаження та котушки індуктивності, то реактивний і повний опори становлять:

$$X_L = \omega L = 523 \text{ с}^{-1} \cdot 0,03 \text{ Гн} \approx 16 \text{ Ом.}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad Z = \sqrt{8^2 \text{ Ом}^2 + 16^2 \text{ Ом}^2} = 18 \text{ Ом.}$$

Амплітудне значення сили струму $I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{40 \text{ А}}{18 \text{ Ом}} \approx 2,2 \text{ А}$.

Коефіцієнт потужності та кут зсуву фаз:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}, \quad \cos \varphi = \frac{8 \text{ Ом}}{18 \text{ Ом}} \approx 0,44, \quad \varphi = 64^\circ.$$

Середня активна потужність:

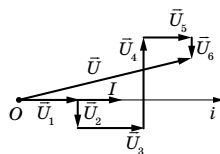
$$P = I_{\text{д}} U_{\text{д}} \cos \varphi = \frac{I_m U_m \cos \varphi}{2}, \quad P = \frac{2,2 \text{ А} \cdot 40 \text{ В} \cdot 0,44}{2} \approx 20 \text{ Вт.}$$

Графіки зміни сили струму та потужності у випадку послідовного з'єднання активного опору та котушки індуктивності подано на малюнку 130. Слід зазначити, що в цьому разі середня потужність набуває від'ємних значень, на відміну від попереднього випадку, коли коло містить лише активний опір.

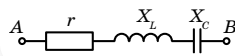


Вправа 18

1. У коло змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц під'єднано послідовно конденсатор ємністю 35,4 мкФ, котушку, індуктивність якої 0,7 Гн, і резистор, активний опір якого 100 Ом. Визначте струм у колі та спад напруг на кожному елементі.
2. У коло змінного струму напругою 220 В включено послідовно конденсатор, котушку та активний опір. Визначте спад напруг на активному навантаженні, якщо спад напруг на конденсаторі у 2 рази більший, а на котушці — у 3 рази більший, ніж на активному навантаженні.
3. На малюнку 131 наведено векторну діаграму напруг у колі змінного струму. Напруги на ділянках кола відповідно дорівнюють: $U_1 = 70$ В, $U_2 = 15$ В, $U_3 = 30$ В, $U_4 = 75$ В, $U_5 = 20$ В, $U_6 = 10$ В. Активний опір на п'ятій ділянці $R_5 = 4$ Ом. Накресліть схему електричного кола, визначте повну напругу в колі, повний опір кола.
4. У котушці в колі постійного струму під напругою 12 В амперметр показує струм 4 А. У тій само котушці в колі змінного струму промислової частоти під напругою 12 В тече струм 2,4 А (за показами амперметра). Визначте індуктивність котушки.
5. У нерозгалуженій ділянці кола змінного струму (мал. 132) $r = 3$ Ом, $X_L = 6$ Ом, $X_C = 2$ Ом. Побудуйте векторну діаграму. Визначте повний опір.
6. У нерозгалуженій ділянці кола змінного струму (мал. 132) напруги на ділянках кола відповідно дорівнюють: $U_r = 40$ В, $U_L = 80$ В, $U_C = 50$ В. Визначте повну напругу в колі. Побудуйте векторну діаграму.



Мал. 131



Мал. 132

§ 30

Резонанс у колі змінного струму

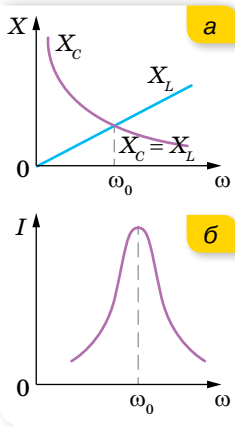
Резонанс напруг. З аналізу формули закону Ома для кола змінного струму з послідовним з'єднанням активних і реактивних елементів,

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$
, видно, що максимального значення сила струму в колі набуває за умови однакових індуктивного та ємнісного опорів.

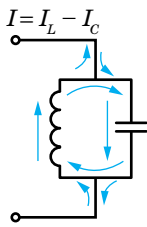
Якщо $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, то в цьому разі немає зсуву фаз між коливаннями напруги та сили струму, а коефіцієнт потужності максимальний, $\cos \varphi = 1$. У такому випадку в колі настає електричний резонанс.

В умовах резонансу сила струму в колі визначається тільки активним опором кола. Отже, за резонансу енергія витрачається лише на теплову дію в активному навантаженні, а між конденсатором і котушкою постійно відбувається лише її обмін — коли енергія електричного поля конденсатора зменшується, енергія магнітного поля котушки зростає, і навпаки.

З умови $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ можна визначити резонансну циклічну частоту $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, кількість коливань за секунду, $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, і період цих коливань, $T = 2\pi\sqrt{LC}$.



Мал. 133.
Резонансні криві



Мал. 134.
Резонанс струмів

Якщо ділянку кола з послідовним з'єднанням активного, індуктивного та ємнісного навантажень під'єднати до генератора змінного струму, який виробляє струм змінної частоти, можна досягти **резонанс напруг**. З формули $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ видно, що зі зміною частоти змінюються значення індуктивного та ємнісного опорів. Зі збільшенням частоти ємнісний опір зменшується, а індуктивний — збільшується, відповідно зменшується повний опір (мал. 133, а). Для деякого значення частоти ємнісний опір дорівнює індуктивному, до того ж повний опір визначається лише активним опором і сила струму набуває максимального значення. З подальшим збільшенням частоти індуктивний опір стає більшим за ємнісний — сила струму в колі зменшується (мал. 133, б). Отже, в умовах резонансу повне падіння напруги в колі дорівнює напрузі на активному опорі, а $U_L = -U_C$.

Резонанс струмів. У колі змінного струму з паралельним з'єднанням котушки та конденсатора настає **резонанс струмів**. Відомо, що в колі з конденсатором коливання сили струму випереджають коливання напруги на чверть періоду, а в колі з котушкою індуктивності коливання сили струму відстають від коливань напруги на чверть періоду, внаслідок чого в нерозгалуженій частині кола ці струми напрямлені в протилежних напрямках (мал. 134).

Якщо частота така, що індуктивний опір дорівнює ємнісному, то $I_L = I_C$, але оскільки котушка, крім індуктивного опору, має ще й активний, то повної рівності струмів не настає і в нерозгалуженій ділянці проходить слабкий струм. Таким чином, слабкий змінний струм, що підходить до контура, підтримує в ньому значні вимушені коливання.

Практичне використання резонансу. Явище резонансу має величезне значення в техніці. По суті, явище резонансу є основою техніки радіозв'язку. Проте в деяких випадках електричний, як і механічний резонанс виявляється шкідливим. Якщо електричне коло не розраховане на роботу в умовах резонансу, то виникнення резонансу спричинить аварію, надмірно великі струми розплавляють електропроводи, ізоляція може бути пробита внаслідок виникнення високих резонансних напруг тощо.

? ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. У чому суть електричного резонансу? 2. Побудуйте графік, який ілюструє явище резонансу в двох контурах з різним активним опором. У якому випадку резонансна крива буде крутішою? 3. Чому дорівнює різниця фаз між коливаннями струму й напруги під час резонансу? 4. Який з трьох елементів ділянки (R , L чи C) першим пошкоджується в разі резонансу напруг?

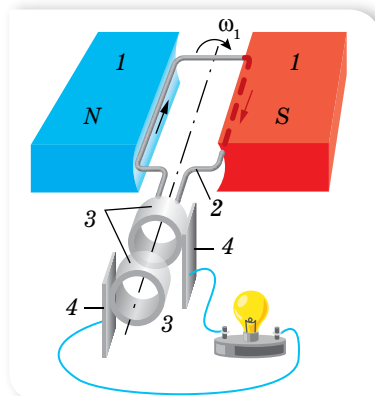
§ 31

Генератори. Трифазний струм

Принцип дії індукційного генератора. Електричні машини, у яких механічна енергія перетворюється на електричну завдяки явищу електромагнітної індукції, називають *індукційними генераторами*. Зараз є багато різних типів індукційних генераторів, але всі вони складаються з однакових основних частин. Найпростіший індукційний генератор — рамка, яка рівномірно обертається у магнітному полі (мал. 135). Основні частини цієї установки такі: 1 — індуктор, який створює магнітне поле; 2 — ярмір (провідник, у якому наводиться ЕРС); 3 — металеві кільця; 4 — щітки.

У зображеній на малюнку моделі генератора обертається дротяна рамка, яка є ротором (правда, без залізного осердя). Магнітне поле створює нерухомий постійний магніт. Зрозуміло, можна було б вчинити і навпаки: обертати магніт, а рамку залишити нерухомою.

Для отримання великого магнітного потоку в генераторах застосовують спеціальну магнітну систему (мал. 136), що складається з двох осердь, зроблених з електротехнічної сталі. Обмотки, що створюють магнітне поле, розміщені в пазах одного з осердь, а обмотки, у яких індукуються ЕРС, — у пазах другого. Одне з осердь (зазвичай внутрішнє) разом зі своєю обмоткою обертається довкола горизонтальної або вертикальної осі. Тому воно називається *ротором*. Нерухоме осердя з його обмоткою називають *статором*. Зазор між осердями статора й ротора роблять якомога меншим, щоб збільшити потік магнітної індукції.



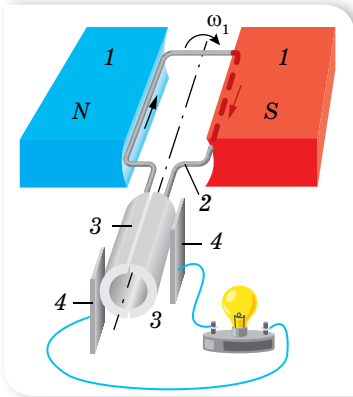
Мал. 135. Найпростіша модель індукційного генератора



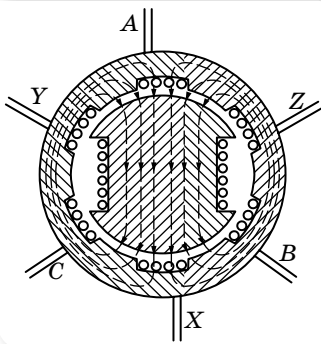
Мал. 136. Магнітна система генератора

У великих промислових генераторах обертається саме електромагніт, який є ротором, водночас обмотки, в яких наводиться ЕРС, укладені в пазах статора й залишаються нерухожими. Річ у тім, що підводити струм до ротора або відводити його з обмотки ротора в зовнішнє коло доводиться за допомогою ковзаючих контактів. Для цього ротор забезпечується контактними кільцями, приєднаними до кінців його обмотки. Нерухомі пластини (щітки) притиснуті до кілець і здійснюють зв'язок обмотки ротора із зовнішнім колом. Сила струму в обмотках електромагніту, що створює магнітне поле, значно менша за силу струму, що віддається генератором у зовнішнє коло. Струм, що генерується, зручніше знімати з нерухомих обмоток, а через ковзні контакти підводити порівняно слабкий струм до електромагніту, що обертається. Цей струм виробляється окремим генератором постійного струму (збудником).

У малопотужних генераторах магнітне поле створюється постійним магнітом, що обертається. У такому разі кільця та щітки взагалі не потрібні. Поява ЕРС в нерухомих обмотках статора пояснюється виникненням в них вихрового електричного поля, породженого зміною магнітного потоку внаслідок обертання ротора.



Мал. 137. Схема генератора постійного струму



Мал. 138. Схема генератора трифазного струму

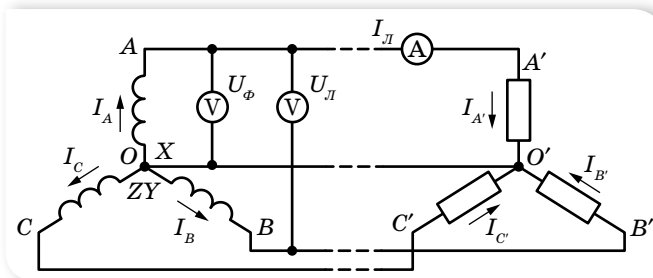
Сучасний генератор електричного струму — це значна споруда з мідних дровів, ізоляційних матеріалів і сталевих конструкцій. Маючи розміри в декілька метрів, найважливіші деталі генераторів потребують виготовлення з точністю до міліметра. Ніде в природі немає такого поєднання рухомих частин, які могли би породжувати електричну енергію настільки ж безперервно й економічно.

Генератор постійного струму виробляє струм постійний за напрямком і значенням (мал. 137). Це забезпечується тим, що ліва щітка колектора 3 завжди з'єднана зі стороною рамки 2, яка піднімається в полі постійного магніту 1, а права — зі стороною, яка опускається. На практиці обмотку якоря виготовляють із секцій, які з'єднують з окремими секторами колектора. Така конструкція зменшує пульсації струму, тобто робить його значення сталим.

Трифазний струм. Генератор трифазного змінного струму відрізняється від індукційного генератора тим, що на його статорі замість однієї обмотки якоря розміщено три однакові обмотки, зміщені одна від одної на 120° . Початки обмоток позначено буквами A, B, C, а кінці — відповідно X, Y, Z (мал. 138).

Струм, який виникає в обмотках генератора, називають **трифазним струмом**. Трифазний струм має важливі переваги порівняно зі звичайним змінним струмом, тому майже на всіх електростанціях встановлено генератори трифазного струму. Кожну з трьох фаз генератора можна було б приєднати окремими провідниками до споживачів і використовувати у вигляді окремих джерел змінного струму. Проте це недоцільно, і фази завжди з'єднують між собою.

На малюнку 139 показано спосіб з'єднання зіркою: кінці фаз генератора X, Y, Z з'єднують в один вузол O , який називають нейтральною точкою, або нейтраллю.



Мал. 139. Магнітна система генератора

Аналогічно приєднані споживачі, що розбиті на три групи, які називають фазами навантаження. Генератор і споживачів з'єднують чотири провідники AA', BB', CC' , які називають лінійними, а OO' — нейтральним провідником.

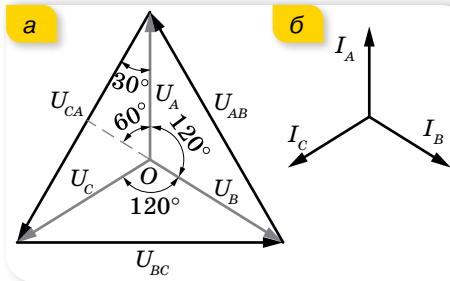
Напругу між початком кожної фази A, B, C і нульовою точкою називають *фазовими напругами* й позначають U_A, U_B, U_C або в загальному випадку U_ϕ . Напруги між початками обмоток, тобто між лінійними провідниками, називають *лінійними*, їх позначають U_{AB}, U_{BC}, U_{AC} або U_L . Лінійні напруги дорівнюють різниці відповідних фазових напруг.

Наприклад, $U_L = U_{AB} = U_A - U_B$ на малюнку 140, а (с. 138) зображено вектором U_{AB} , який сполучає кінці векторів U_A і U_B (напрямленим з кінця вектора, який віднімають, до кінця вектора, від якого віднімають). Аналогічно визначають напруги U_{BC} і U_{AC} .

У випадку з'єднання зіркою лінійна напруга в $\sqrt{3}$ раз більша за фазову: $U_L = U_\phi \sqrt{3}$. Так, якщо фазова напруга дорівнює 127 В, то лінійна становить $127 \cdot \sqrt{3} = 220$ В.

Струми, які течуть у фазах, називають *фазовими струмами* (позначають I_ϕ), а струми в лінійних провідниках — *лінійними струмами* (I_L). Струми у фазах генератора дорівнюють відповідним лінійним струмам і струмам у фазах навантаження, тобто $I_\phi = I_L$.

Величина цих струмів визначається фазовими напругами й опорами навантаження. Зазначимо, що тільки в разі активного навантаження струми збігаються за фазою з відповідними фазовими напругами; якщо ж навантаження має індуктивний або ємнісний характер, то струми відстають

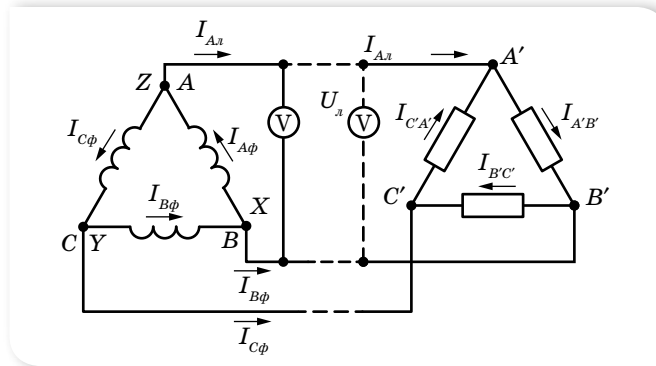


Мал. 140. Векторні діаграми:
а — напруг; б — сили струмів

або випереджають напругу на кут φ . Струм у нейтральному провіднику I_0 дорівнює сумі фазових струмів. За однакового навантаження фаз струми I_A, I_B, I_C є однаковими за величиною й утворюють симетричну зірку векторів (мал. 140, б). У цьому випадку струм у нейтральному проводі дорівнює нулю.

Інший спосіб з'єднання — трикутником: початок кожної фази з'єднують з кінцем попередньої

фази, так, що фази утворюють замкнений трикутник (мал. 141). У разі такого з'єднання $U_L = U_\phi$, $I_L = I_\phi \sqrt{3}$.



Мал. 141. Схема з'єднання трикутником фаз генератора і фаз споживачів

Обмотки генератора можуть бути з'єднані зіркою, а споживачі — трикутником, і навпаки. Загальна активна потужність трифазної системи (незалежно від способу з'єднання) $P = P_A + P_B + P_C = 3P_\phi = 3I_\phi U_\phi \cos \varphi$ або $P = \sqrt{3} I_L U_L \cos \varphi$. Отже, це співвідношення доводить, що лінія передавання трифазного струму економічніша у порівнянні з лінією передач однофазного струму.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. На якому принципі ґрунтується робота генератора змінного струму? **2.** Генератор струму почав обертатися нерівномірно. Як це вплинуло на характеристики створюваного ним змінного струму? **3.** Для компенсації небажаного зсуву фаз між струмом і напругою на ділянці кола з електродвигуном використовують конденсатори необхідної ємності. Як їх вмикають — паралельно чи послідовно? **4.** Яка система змінного струму називається трьохфазною? **5.** Які способи з'єднання фазних обмоток трьохфазного генератора ви знаєте? **6.** Яка напруга називається фазною; лінійною? Яке співвідношення між лінійними і фазними напругами в разі з'єднання обмоток генератора зіркою; трикутником? **7.** Чому обмотки трьохфазного генератора найчастіше з'єднують зіркою?



Вправа 19

1. Частота змінного струму — 400 Гц. З якою частотою $\left(\text{в } \frac{\text{об}}{\text{хв}} \right)$ має обертатись ротор генератора такого струму, якщо в нього: а) одна пара полюсів; б) n пар полюсів?
2. У скільки разів зміниться напруга генератора змінного струму, якщо частота обертання його ротора збільшиться в n разів?
3. Частота обертання ротора чотирьохполюсного генератора дорівнює 1500 хв^{-1} . Визначте частоту змінної ЕРС генератора.
4. Скільки пар магнітних полюсів має ротор гідрогенератора, якщо він виробляє змінний струм стандартної частоти? Частота обертання ротора — 125 хв^{-1} .
5. Визначте коефіцієнт потужності та зсув фаз між напругою і силою струму, якщо вольтметр, підключений до електродвигуна, показав 220 В, амперметр — 10 А, а ватметр — 2 кВт.
6. Електродвигун живиться від джерела струму з ЕРС 24 В. У випадку, коли сила струму в колі 8 А, механічна потужність двигуна становить 96 Вт. Якою буде сила струму в колі, якщо загальмувати якір?
7. Електродвигун живиться від мережі з напругою 24 В. Яка потужність на валу двигуна (механічна потужність) за сили струму в його обмотці $I = 8 \text{ А}$, коли відомо, що за повного гальмування якоря сила струму в колі $I_0 = 16 \text{ А}$?
8. Генератор змінного струму має на роторі 6 пар полюсів. З якою частотою має обертатися ротор, щоб генератор виробляв струм стандартної частоти?
9. Ротор генератора має 50 пар полюсів й обертається із частотою $2400 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$. ЕРС якої частоти збуджується в цьому генераторі?

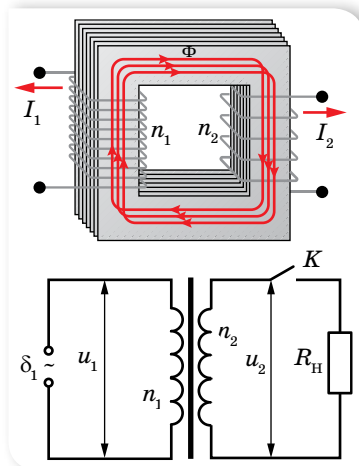
§ 32 Трансформатор

Будова та принцип дії трансформатора.

Змінний струм має ту перевагу перед постійним, що напругу й силу струму можна в дуже широких межах перетворювати (трансформувати) майже без втрат енергії. Для цього енергію треба передавати під високою напругою.

Пристрої, які дають змогу підвищувати напругу (в разі подачі енергії від генераторів до лінії електропередачі) і знижувати її (в разі подачі від лінії електропередачі до споживачів), називаються **трансформаторами**.

На малюнку 142 зображено схему трансформатора та його умовне позначення. Він складається з двох індуктивно зв'язаних котушок (обмоток) з різною кількістю витків з мідного дроту. Одну з обмоток, яку називають *первинною*, під'єднують до джерела



Мал. 142. Схема та умовне позначення трансформатора

змінної напруги. Прилади, які споживають електроенергію, під'єднують до *вторинної* обмотки. Для того щоб магнітне поле не розсіювалось у просторі, котушки розміщують на замкнутому осерді, виготовленому з листів спеціальної трансформаторної сталі, ізольованих один від одного тонким шаром лаку. Це роблять, щоб зменшити втрати на нагрівання. Окрім того, у суцільних провідниках виникають значні вихрові струми (струми Фуко), які зумовлюють нагрівання провідника.

З'ясуємо принцип дії трансформатора. Трансформатор перетворює змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги за незмінної частоти. Якщо первинну обмотку під'єднати до джерела змінної напруги, а вторинна буде розімкнута (цей режим роботи називають *холостим ходом трансформатора*), то в первинній обмотці з'явиться слабкий струм, який створює в осерді змінний магнітний потік. Цей потік наводить у кожному витку обмоток однакову ЕРС, тому ЕРС індукції в кожній обмотці буде прямо пропорційною кількості витків у цій обмотці, тобто $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2}$.

Якщо вторинну обмотку буде розімкнута, то напруга на її затискачах U_2 дорівнюватиме ЕРС ε_2 , яка в ній наводиться. У первинній обмотці ЕРС ε_1 за числовим значенням мало відрізняється від напруги U_1 , що підводиться до цієї обмотки. Практично їх можна вважати однаковими, тому $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{n_1}{n_2} = k$, де k — *коефіцієнт трансформації*. Якщо вторинних обмоток кілька, то коефіцієнт трансформації для кожної з них визначають аналогічно.

Якщо у вторинне коло трансформатора увімкнуті навантаження, то у вторинній обмотці з'явиться струм. Цей струм створює магнітний потік, який, за правилом Ленца, має зменшити зміну магнітного потоку в осерді, що, своєю чергою, спричинить зменшення ЕРС індукції в первинній обмотці. Але ця ЕРС дорівнює напрузі, прикладеній до первинної обмотки, тому струм у первинній обмотці повинен зрости, відновлюючи початкову зміну магнітного потоку. Водночас збільшується потужність, яку споживає трансформатор від мережі.

Оскільки в роботі трансформатора відбуваються втрати енергії, то потужність, яку споживає первинна обмотка, більша за потужність у вторинній обмотці. ККД трансформатора η буде визначатися відношенням потужності P_2 вторинної обмотки до потужності P_1 первинної обмотки: $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ або $\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}$.

ККД сучасних трансформаторів часто перевищує 90 % і доходить до 99 %. Невеликі втрати електричної енергії під час її передавання з первинної обмотки у вторинну зумовлені виділенням джоулевої теплоти в дротах обмоток і перемагнічуванням осердя. Для навантаженого трансформатора на первинній обмотці $\varepsilon_1 \approx U_1$, напруга на затискачах вторинної обмотки становить $U_2 = \varepsilon_2 - I_2 R_2$, де $I_2 R_2$ — спад напруги на вторинній

обмотці, тоді коефіцієнт трансформації $k = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{U_2 + U_H}$, де U_H — спад напруги на навантаженні.

Передавання електроенергії. Споживачі електроенергії є всюди. А виробляється вона лише на електростанціях, які розташовані в певних місцях. Консервувати електроенергію у великих масштабах немає змоги. Її треба використовувати відразу після вироблення. Тому виникає потреба передавати електроенергію на великі відстані. Але таке передавання пов'язане зі значними втратами. Адже електричний струм нагріває провідники лінії електропередачі. Згідно із законом Джоуля — Ленца енергія, яка витрачається на нагрівання проводів лінії, визначається формулою $Q = I^2 R t$, де R — опір лінії. За великої довжини лінії передавання енергії взагалі може бути економічно не вигідним. Істотно зменшити опір лінії практично дуже важко. Тому доводиться зменшувати силу струму.

Оскільки потужність струму пропорційна добутку сили струму на напругу, то, щоб зберегти передавану потужність, треба підвищувати напругу в лінії передачі. Причому, що довшою є лінія передачі, то вигідніше використовувати вищу напругу. Так, у деяких високовольтних лініях передач використовують напругу 500 кВ. Але генератори змінного струму будують на напруги, що не перевищують 16–20 кВ, бо використання вищої напруги вимагало б складніших спеціальних заходів для ізоляції обмоток та інших частин генераторів. Тому на великих електростанціях ставлять підвищувальні трансформатори. Трансформатор підвищує напругу в лінії у стільки разів, у скільки зменшує силу струму.

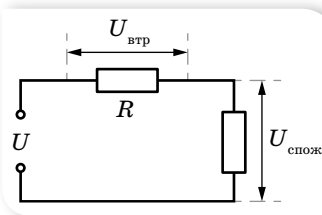
Перед безпосереднім використанням електроенергії споживачами її напругу знижують за допомогою знижувальних трансформаторів.

Повністю уникнути втрат під час передавання електроенергії не вдається. За дуже високої напруги між провідниками починається коронний розряд, що призводить до втрат енергії.

На малюнку 143 показано електричну схему лінії електропередачі, на якій U — напруга на генераторі, $U_{\text{втр}}$ — напруга на провідниках лінії електропередачі, $U_{\text{спож}}$ — напруга на споживачі. Якщо частина втрат потужності у відносних одиницях становить k , тоді потужність втрат на лінії пов'язана з потужністю, переданою споживачу, формулою $P_{\text{втр}} = k P_{\text{спож}}$.

Потужність генератора дорівнює сумі потужностей споживача й потужності втрат:

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{спож}} + P_{\text{втр}} = (k + 1)P_{\text{спож}}, \text{ де } P_{\text{втр}} = I^2 R.$$



Мал. 143. Електрична схема лінії електропередач



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Чому гуде трансформатор, увімкнений у коло змінного струму? Яка частота цього звуку? 2. Вторинна обмотка трансформатора замкнена на: а) малий опір r ; б) великий

опір R . Порівняйте в обох випадках напругу на вторинній обмотці та потужність, яку споживає трансформатор. **3.** За яким законом треба збільшувати робочу напругу лінії, щоб за збільшення її довжини коефіцієнт корисної дії лінії залишався сталим?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Знижувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації 5 включений у коло з напругою 220 В. Який опір вторинної обмотки, якщо напруга на виході трансформатора 40 В, а опір корисного навантаження — 4 Ом? Яка потужність витрачається на нагрівання вторинної обмотки? Яку потужність споживає трансформатор з мережі? Який ККД трансформатора?

Дано:

$$k = 5$$

$$U_1 = 220 \text{ В}$$

$$U_2 = 40 \text{ В}$$

$$R_{\text{н}} = 4 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{об}} - ?; P_{\text{втр}} - ?$$

$$P - ?; \eta - ?$$

Розв'язання:

$$\text{Коефіцієнт трансформації } k = \frac{U_1}{U_2}, \text{ звідки } U_2 = \frac{U_1}{k},$$

де $U_2 = U_{\text{об}} + U_{\text{н}} = IR_{\text{об}} + U_{\text{н}}$. Сила струму у вторинній

$$\text{обмотці } I = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{н}}}, \text{ отже, } R_{\text{об}} = \frac{\left(\frac{U_1}{k} - U_{\text{н}}\right) R_{\text{н}}}{U_{\text{н}}},$$

$$R_{\text{об}} = \frac{\left(\frac{220 \text{ В}}{5} - 40 \text{ В}\right) \cdot 4 \text{ Ом}}{40 \text{ Ом}} = 0,4 \text{ Ом}.$$

$$\text{Потужність вторинної обмотки } P_{\text{втр}} = I^2 R_{\text{об}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{R_{\text{н}}^2} R_{\text{об}}, P_{\text{втр}} = 40 \text{ Вт}.$$

$$\text{Потужність трансформатора } P = \frac{U_2^2}{R_{\text{об}} + R_{\text{н}}}, P = \frac{44^2 \text{ В}^2}{4,4 \text{ Ом}} = 440 \text{ Вт}.$$

$$\text{ККД трансформатора } \eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P} = \frac{P - P_{\text{втр}}}{P},$$

$$\eta = \frac{440 \text{ Вт} - 44 \text{ Вт}}{440 \text{ Вт}} = 0,9 = 90 \text{ \%}.$$

Відповідь: 0,4 Ом, 40 Вт, 440 Вт, 90 %.

Задача 2. Лінія електропередач має опір 100 Ом. Яку напругу повинен мати генератор електростанції, щоб, передаючи по цій лінії до споживача повну потужність 250 кВт, втрати на лінії не перевищували 4 % переданої до споживача повної потужності?

Дано:

$$R = 100 \text{ Ом}$$

$$P = 250 \text{ кВт}$$

$$k = 0,04$$

$$U - ?$$

Розв'язання:

$$\text{Напруга генератора } U = \frac{P_{\text{ген}}}{I}.$$

Потужність генератора дорівнює сумі потужностей споживача P і потужності втрат $P_{\text{втр}}$.

Потужність втрат можна виразити як $P_{\text{втр}} = kP$, тоді $P_{\text{ген}} = P + kP = (k + 1)P$. З іншого боку, $P_{\text{втр}} = I^2 R$, тоді $I = \sqrt{\frac{P_{\text{втр}}}{R}} = \sqrt{\frac{kP}{R}}$.

Отже, $U = (k + 1)\sqrt{\frac{RP}{k}}$; $U = (0,04 + 1)\sqrt{\frac{100 \text{ Ом} \cdot 250 \text{ кВт}}{0,04}} = 26 \text{ кВт}$.

Відповідь: $U = 26 \text{ кВ}$.



Вправа 20

1. Сила струму в первинній обмотці трансформатора 0,5 А, напруга на її кінцях — 220 В. Сила струму у вторинній обмотці — 11 А, напруга на її кінцях — 9,5 В. Визначте ККД трансформатора.
2. Для визначення кількості витків у первинній і вторинній обмотках трансформатора поверху вторинної обмотки намотали $n_3 = 80$ витків дроту, й після підключення первинної обмотки до мережі з напругою 220 В за допомогою вольтметра визначили напругу на кінцях додаткової обмотки $U_3 = 20$ В і на кінцях вторинної обмотки $U_2 = 36$ В. Визначте кількість витків у первинній і вторинній обмотках і коефіцієнт трансформації.
3. Електричний двигун працює від джерела електричного струму, напруга на клеммах якого дорівнює 120 В, а сила струму — 7,5 А. Визначте втрати потужності в обмотці двигуна і його ККД, якщо опір обмотки дорівнює 2,2 Ом.
4. Генератор струму з напругою на клеммах 220 В передає в зовнішнє коло потужність 11 кВт. Якого мінімального перерізу мають бути мідні дроти лінії передачі, щоб втрати напруги в них не перевищували 2 % від вказаної напруги? Довжина лінії передачі дорівнює 50 м.
5. У мережу з напругою 220 В одночасно включені електродвигун потужністю 0,3 кВт і ККД 90 %, електрична піч потужністю 1 кВт і десять ламп потужністю 150 Вт кожна. Визначте силу струму у двигуні, печі та лампах, загальну силу струму та спожиту потужність.
6. Під якою напругою треба передавати електроенергію на відстань $l = 10$ км, щоб за густини струму $j = 0,5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$ у сталевому проводі двопровідної лінії електропередачі втрати енергії становили 1 %? Питомий опір сталі $\rho = 0,12 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.
7. Вторинну обмотку трансформатора, що має 100 витків, пронизує магнітний потік, який змінюється з часом за законом $\Phi = 0,01 \cos 314t$. Напишіть формулу, що виражає залежність ЕРС вторинної обмотки від часу, і визначте діюче значення ЕРС.



Виконуємо навчальні проекти

- Як вирішуються питання енергозабезпечення у вашому регіоні, країні, в інших країнах?
- Енергозабезпечення сьогодні та в майбутньому.
- Як вирішуються проблеми передавання електричної енергії на великі відстані?

§ 33

Електромагнітні хвилі

Утворення та поширення електромагнітних хвиль. Як ви знаєте, можливість існування електромагнітних хвиль теоретично довів Джеймс Максвелл, практично отримав їх Генріх Герц у 1888 р. Щоб здобути електромагнітні

Про електромагнітні хвилі ми вже дещо знаємо з курсу фізики 9 класу.

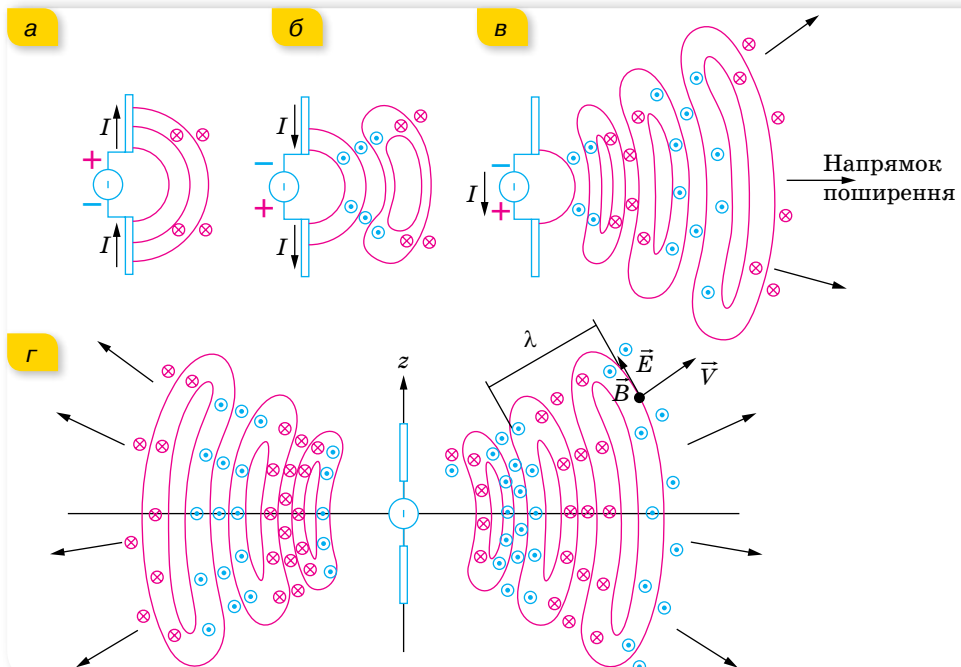
Пригадати основні відомості можна в електронному додатку.



хвилі, Герц запропонував використовувати так званий *диполь*, який ще називають *відкритим коливальним контуром*. Розглянутий коливальний контур, у якому відбуваються електромагнітні коливання, не випромінює електромагнітних хвиль. У ньому відбуваються перетворення енергії електричного поля конденсатора на магнітне поле котушки, і витрат енергії на утворення хвиль практично немає.

Розглянемо диполь, що складається з двох провідних стержнів (мал. 144) і підключений до джерела змінного струму. Малюнок 144, *а*

відповідає моменту, коли диполь щойно підключили до джерела. Електричний струм створює магнітне поле, силові лінії індукції магнітного поля замкнені й охоплюють стержні: праворуч від стержнів вектор індукції напрямлений від нас \otimes , а ліворуч від стержнів — на нас \odot (на малюнку не показано). ЕРС генератора проходить через максимум і починає зменшуватись; струм змінює напрям і його магнітне поле також змінює напрямок. Оскільки напрямок нових полів протилежний попередньому, то силові лінії полів замикаються, утворюючи замкнені контури (мал. 144, *б*). Утворене раніше поле не зникає — воно поширюється в просторі. І згодом картина силових ліній матиме вигляд, зображений на малюнку 144, *в*. Оскільки диполь не є точковим джерелом, то поля по-

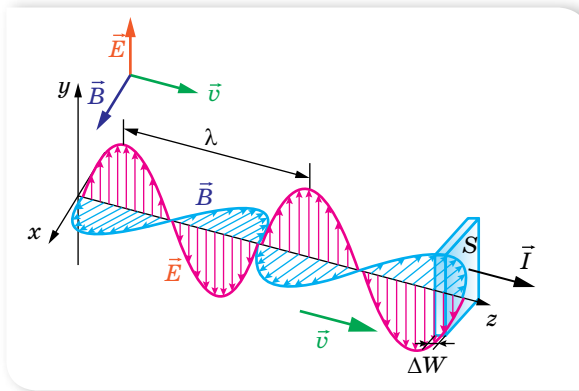


Мал. 144. Процес утворення електромагнітної хвилі

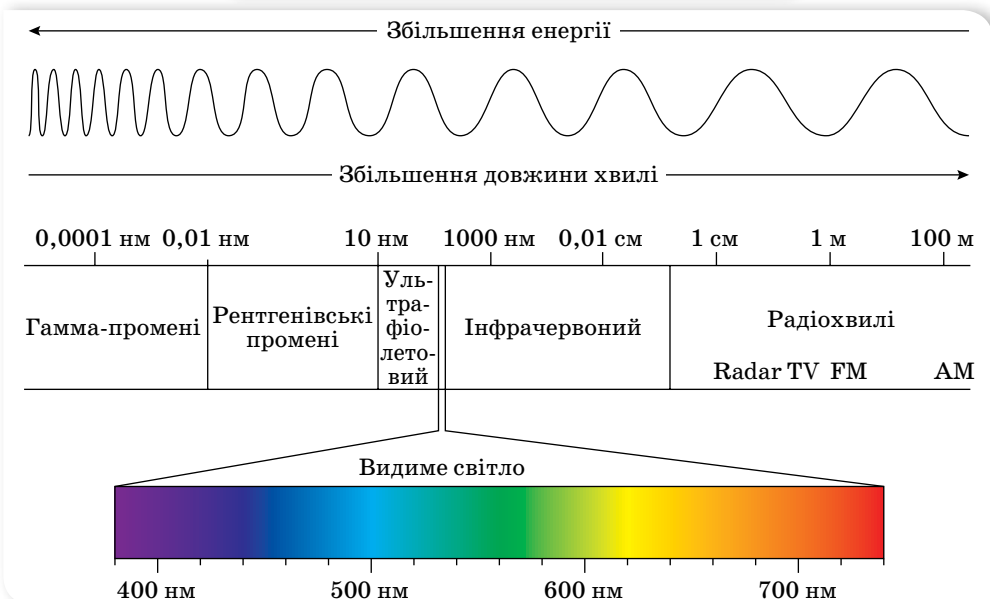
ширюються у просторі, віддаляючись у напрямку, перпендикулярному до його осі в обидва боки, а вздовж осі випромінювання немає (мал. 144, з).

Вивчаючи механічні хвилі, ми ознайомились із деякими характеристиками хвильового руху: фронт хвилі, промінь, довжина хвилі. Усі ці поняття застосовні і для електромагнітних хвиль.

Електромагнітні хвилі — це явище поширення в просторі електромагнітних коливань, тобто взаємопов'язаних коливань електричного та магнітного полів, які являють собою єдине електромагнітне поле. У довільній точці вектори \vec{E} і \vec{B} взаємно перпендикулярні та перпендикулярні до напрямку поширення. Два взаємоперпендикулярні вектори \vec{E} і \vec{B} , своєю чергою, перпендикулярні до вектора швидкості v (мал. 145).



Мал. 145. Схематичне зображення плоскополяризованої електромагнітної хвилі



Мал. 146. Шкала електромагнітних хвиль

Оскільки електромагнітні хвилі генерує електричний струм, тобто заряджені частинки, що рухаються з прискоренням, то правильним буде і загальне твердження: *електричний заряд під час прискореного руху є джерелом електромагнітних хвиль*.

Електромагнітні хвилі є *поперечними хвилями*, але, на відміну від механічних хвиль, у них відбуваються коливання полів, а не речовини.

За довжиною хвилі λ або частотою коливань (ν) межі діапазону електромагнітних хвиль — від 10^{11} м ($3 \cdot 10^{-3}$ Гц) до 10^{-11} м ($3 \cdot 10^{19}$ Гц). Цей діапазон уміщує радіохвилі, інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське та γ (гамма)-випромінювання (мал. 146, с. 145).

Швидкість електромагнітних хвиль. За часів Максвелла ще не знали, як виявити і створити електромагнітні хвилі. Проте у своїх теоретичних розрахунках Максвелл показав, що якби електромагнітна хвиля існувала, то вона мала б поширюватись у середовищі зі швидкістю, яка визна-

чається формулою
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu \epsilon}}$$
, де ϵ і μ — діелектрична та магнітна проникності речовини, ϵ_0 та μ_0 — електрична й магнітна сталі.

Для вакууму $\epsilon = \mu = 1$, тому швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$
. На той час знали, що з такою швидкістю поширюється світло. Це підтверджує, що світло є одним з діапазонів електромагнітних хвиль.

Чи можете ви назвати найбільше число, що характеризує довжину, або проміжок, часу? Максимальне значення енергії, або потужності? Для опису конкретних об'єктів ви можете вказати орієнтовні максимальні значення цих величин, але стверджувати, що вони є граничними — не можете. Єдина фізична величина, яка має фіксоване граничне значення, — це швидкість світла у вакуумі. Окрім того, що це фізична величина, це ще й фізична константа. Швидкість, із якою світлові хвилі поширюються у вакуумі, не залежить ні від руху джерела хвиль, ні від системи відліку спостерігача. Постулат про інваріантність швидкості світла вперше в 1905 р. запропонував Альберт Ейнштейн у своїй спеціальній теорії відносності. Відтоді інваріантність швидкості світла незмінно підтверджується безліччю експериментів.

З порівняння формул $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu \epsilon}}$ та $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ отримаємо: $\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}$.

Величину, яка показує, у скільки разів швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі більша, ніж у певному середовищі, називають

абсолютним показником заломлення цього середовища, $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}$.

Зазначимо, що діелектрична проникність середовища ϵ в цій формулі не збігається з діелектричною проникністю того самого середовища для випадку електростатичної взаємодії, оскільки ϵ залежить від частоти коливань. Однак ϵ завжди більша за одиницю, а μ для діелектриків, у яких

можуть поширюватись електромагнітні хвилі, практично можна вважати таким, що дорівнює одиниці. Тому в будь-якому середовищі швидкість поширення електромагнітних хвиль менша, ніж у вакуумі, тобто n завжди більший за одиницю.

Звертаємо увагу, що *під час переходу з одного середовища в інше частота коливань не змінюється. Змінюється швидкість поширення та довжина хвилі.*

Рівняння хвилі. Вивчаючи механічні хвилі, ми отримали рівняння плоскої гармонічної хвилі. Виведемо *рівняння для електромагнітної хвилі*. Нехай у деякій точці O напруженість електричного поля змінюється за гармонічним законом: $E = E_m \sin \omega t$. Оскільки електромагнітна хвиля поширюється зі скінченною швидкістю, то в другій точці, віддаленій від першої на відстань x , також виникнуть гармонічні коливання, проте із запізненням $\Delta t = \frac{x}{v}$. Закон зміни напруженості електромагнітного поля

у другій точці матиме вигляд $E = E_m \sin \omega(t - \Delta t) = E_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right)$.

Це і є рівняння плоскої синусоїдальної електромагнітної хвилі.

Рівняння хвилі записують і так: $E = E_m \sin\left(\omega t - \omega \frac{x}{v}\right)$. Або враховуючи, що $\omega = 2\pi\nu$ і $\lambda = \frac{v}{\nu}$, так: $E = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$.

Оскільки максимуми напруженості електричного поля під час поширення електромагнітної хвилі збігаються з максимумами індукції магнітного поля, тому рівняння коливань індукції магнітного поля мають аналогічний вигляд: $B = B_m \sin \omega t$, а на відстані x від цієї точки

$$B = B_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right).$$

У випадку, коли хвиля поширюється у вакуумі: $E = E_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{c}\right)$ та $B = B_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{c}\right)$.

Енергія електромагнітної хвилі. Випромінені електромагнітні хвилі несуть із собою енергію. Ця енергія складається з енергії електричного W_e і магнітного W_m полів. Оскільки в електромагнітній хвилі відбуваються взаємні перетворення електричного та магнітного полів, то згідно із законом збереження і перетворення енергії: $W_e = W_m$.

Виразимо енергію електричного поля $W_e = \frac{CU^2}{2}$ через параметри плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$. Оскільки різниця потенціалів між обкладками $U = Ed$, маємо: $W_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon S E^2 d^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} Sd = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V$, де V — об'єм конденсатора.

Поділивши останню формулу на об'єм V , зайнятий електричним полем, дістанемо енергію, яка припадає на одиницю об'єму, тобто густину енергії електричного поля $\omega_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2$. Ця формула справджується і для випадку змінних електричних полів.

Аналогічно перетворимо формулу для енергії магнітного поля. Підставивши у формулу $W_m = \frac{LI^2}{2}$ вираз для індуктивності соленоїда

$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$ і виразивши силу струму через індукцію магнітного поля

$I = \frac{Bl}{\mu\mu_0 N}$, отримаємо: $W_m = \frac{B^2 Sl}{2\mu\mu_0}$. Оскільки $Sl = V$ — об'єм соленоїда,

то густина енергії: $\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$. Цей вираз справедливий не тільки для однорідного поля, а й для довільних змінних магнітних полів.

Густина енергії електромагнітної хвилі складається з густини енергії електричного та магнітного полів і в певній точці простору дорівнює

$$\omega = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}.$$

У вакуумі об'ємні густини електричної та магнітної енергій рівні між собою: $\omega = \omega_e + \omega_m = 2\omega_e = 2\omega_m$, або $\frac{\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0}$. Із цієї формули випливає, що в електромагнітній хвилі напруженість і магнітна індукція пов'язані простим співвідношенням $\frac{E}{B} = c$, де c — швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі.

Порівняємо сили, з якими діють на електричний заряд q , що рухається зі швидкістю v , електрична $F_e = qE$ та магнітна $F_m = qvB$ складові хвилі: $\frac{F_e}{F_m} = \frac{qE}{qvB} = \frac{E}{Bv}$. Ураховуючи, що $\frac{E}{B} = c$, отримуємо: $\frac{F_e}{F_m} = \frac{c}{v}$. Оскільки швидкість c набагато більша за швидкість руху заряду ($c \gg v$), то і $F_e \gg F_m$. Тобто дія на електричні заряди електричної складової поля хвилі значно сильніша за дію її магнітної складової.

Оскільки, як ми з'ясували, електромагнітні хвилі переносять енергію, то під час поширення хвилі виникає *потік електромагнітної енергії*. Розрахуємо *густину потоку електромагнітного випромінювання*. Для цього виділимо поверхню площею S , перпендикулярну до напрямку поширення хвилі. За час Δt через неї пройде енергія ΔW .

Відношення електромагнітної енергії ΔW , що проходить за час Δt через перпендикулярну до променів поверхню площею S , до добутку площі S і часу Δt називають *густиною потоку електромагнітного випромінювання* I , $I = \frac{\Delta W}{S\Delta t}$.

Фактично це — *потужність* електромагнітного випромінювання (енергія за одиницю часу), що проходить через одиницю площі поверхні.

Одиниця густини потоку випромінювання в СІ — ват на метр у квадраті, $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Іноді цю величину називають *інтенсивністю* хвилі. Спробуйте самостійно довести, що густина потоку випромінювання дорівнює добутку густини електромагнітної енергії та швидкості її поширення, $I = \omega c$.

Ще одна важлива властивість електромагнітних хвиль. Оскільки електромагнітні хвилі випромінюються внаслідок прискореного руху частинок, то напруженість електричного поля і магнітна індукція пропорційні прискоренню випромінюючих частинок. Як відомо, для гармонічних коливань прискорення пропорційне квадрату частоти. Тому напруженість електричного поля і магнітна індукція також пропорційні квадрату частоти, $E \sim v^2$ та $B \sim v^2$. Своєю чергою, густина енергії електромагнітного поля пропорційна квадрату напруженості $\omega \sim E^2$ (або квадрату індукції магнітного поля $\omega \sim B^2$). Відповідно інтенсивність електромагнітної хвилі (густина потоку випромінювання) пропорційна частоті в четвертому степені, $I \sim v^4$. Отже, якщо ми хочемо отримати поширення електромагнітних хвиль на велику відстань, ця хвиля повинна мати велику енергію (адже енергія хвилі поширюється в усі боки розсіючись). Серед усіх параметрів, від яких залежить енергія хвилі, найефективніше збільшувати її частоту. (Збільшивши частоту у 2 рази, збільшимо густину потоку випромінювання в 16 разів.) Тому в антенах радіостанцій збуджуються коливання високих частот — від десятків тисяч до десятків мільйонів герц. Зрозуміло, що змінні струми промислової частоти 50 Гц практично не випромінюють.



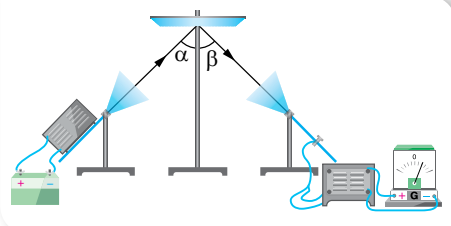
ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Дайте визначення електромагнітної хвилі. **2.** Якими фізичними величинами описують електромагнітні хвилі? **3.** Від яких величин залежить густина енергії електромагнітної хвилі; густина потоку випромінювання?

§ 34

Властивості електромагнітних хвиль

Досліди з електромагнітними хвилями. Ще Генріх Герц провів низку дослідів з вивчення властивостей електромагнітних хвиль. Для проведення подібних досліджень використовують генератор і приймач електромагнітних хвиль, що мають спеціальні рупорні антени для забезпечення напрямленого випромінювання та прийому хвиль. Індикатором прийому хвиль слугує вольтметр.



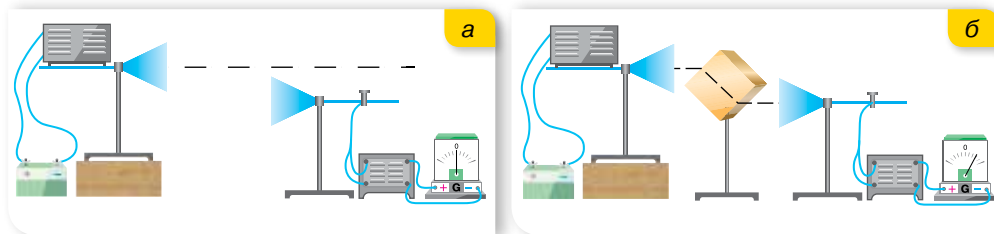
Мал. 147. Установка для дослідження відбиття електромагнітних хвиль

Унаслідок проведених дослідів було з'ясовано, що електромагнітні хвилі **відбиваються** провідником (мал. 147). Кут відбиття електромагнітних хвиль, як і хвиль будь-якої іншої природи, дорівнює куту падіння.

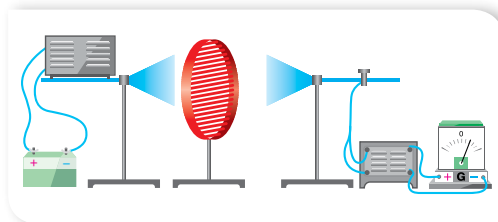
Під час падіння електромагнітної хвилі на деяку поверхню, що розмежовує середовища, частина енергії хвилі відбивається від поверхні іншого середовища, частина проникає всередину його, причому певна кількість енергії може пройти крізь середовище, якщо воно прозоре для електромагнітної хвилі, решта енергії поглинається в середовищі, викликаючи його нагрівання або інші процеси.

Отже, на межі двох середовищ електромагнітна хвиля поділяється на відбиту хвилю та хвилю, яка проходить у середовище, при цьому напрямок хвилі в середовищі відрізняється від початкового — хвиля зазнає *заломлення*.

Спостерігати заломлення електромагнітних хвиль можна на такому досліді. Розташуємо рупори антен так, щоб сигнал не потрапляв у приймальну антену (мал. 148, а). Якщо ж розташувати між рупорами антен прямокутну призму з діелектрика (наприклад, парафіну), то прийом сигналу відбувається (мал. 148, б). Дослід доводить, що електромагнітні хвилі заломлюються на межі двох середовищ. Зрозуміло, що закон заломлення електромагнітних хвиль такий самий, як у випадку світлових хвиль.



Мал. 148. Заломлення електромагнітних хвиль



Мал. 149. Дослід з поляризації електромагнітних хвиль

На досліді можна також спостерігати *поляризацію* хвиль і переконатись у тому, що електромагнітні хвилі — *поперечні*. Для цього між генератором і приймачем розміщують решітку з паралельних металевих стержнів (мал. 149). Повертаючи решітку, спостерігають підсилення приймання й послаблення аж до повної відсут-

ності. Приймання відсутнє тоді, коли вектор напруженості електричного поля E падаючої електромагнітної хвилі паралельний стержням. За цих умов у стержнях збуджуються струми й решітка відбиває падаючі хвилі подібно до суцільної металевої пластини. Якщо вектор E перпендикулярний до стержнів, значні струми не збуджуються, й електромагнітна хвиля проходить крізь решітку. Отже, електромагнітна хвиля поляризована — вектор напруженості має фіксовану площину коливань. (Поясніть самостійно, чому в даному досліді розглядається положення саме вектора E , а не B .)

Тут описано не всі основні властивості електромагнітних хвиль. Повніші відомості отримаємо під час вивчення світлових хвиль.

Ефект Доплера. Для електромагнітних хвиль, як і для механічних, спостерігається *ефект Доплера* — зміна частоти коливань, що приймаються спостерігачем під час відносного руху джерела хвиль до нього або від нього, при цьому $\Delta\nu = \frac{v}{\lambda_0}$, де $\Delta\nu$ — величина зміни частоти коливань, v — відносна швидкість джерела або спостерігача, λ_0 — дійсна довжина хвиль.

Цей ефект більш виразно спостерігається в акустиці та оптиці. В акустиці він виявляється, наприклад, під час руху поїзда чи автомобіля, що подає сигнал: з наближенням автомобіля спостерігач сприйматиме звук вищого тону, а з віддаленням висота звуку для спостерігача понижується. В оптиці ефект Доплера виявляється в зміщенні спектра світла в бік довгих хвиль (червоне зміщення) при взаємному віддаленні спостерігача і джерела світла або в бік коротких хвиль (фіолетове зміщення) у випадку їх взаємного зближення. Цей ефект використовують для вимірювання швидкостей джерел світла, наприклад, в астрономії — швидкостей зір і галактик.

Тут описано не всі основні властивості електромагнітних хвиль. Повніші відомості отримаємо під час вивчення оптики.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Назвіть відомі вам властивості електромагнітних хвиль. 2. У чому суть ефекту Доплера? Наведіть приклади його практичного використання.



§ 35

Використання електромагнітних хвиль

Електромагнітні хвилі в природі й техніці. Людство сьогодні живе у «хвильовому просторі» (мал. 150, с. 152). Із часів існування життя на Землі всі організми перебувають під впливом природного електромагнітного випромінювання, джерелами якого є космічні об'єкти: зорі, пульсари,

туманності. З розвитком техніки й технологій, крім природних джерел, у великому обсязі з'являються штучні, які випромінюють електромагнітні хвилі різних діапазонів.



Мал. 150. Природні та штучні джерела електромагнітного випромінювання

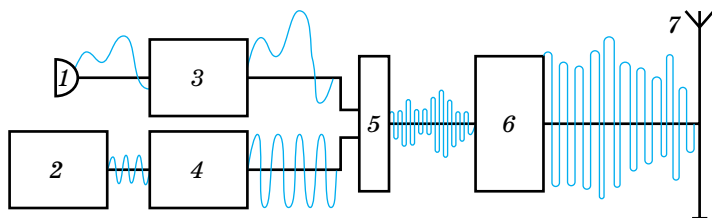
Життя сучасного суспільства неможливе без постійного обміну інформацією. Радіо, телебачення та стільниковий зв'язок відіграють у цьому неабияку роль. Створення й модернізація сучасних інформаційних засобів стали можливими завдяки тому, що можна задавати відповідні параметри електричного сигналу, кодувати його, посилювати, передавати.

Низькочастотні електромагнітні хвилі, що утворюються під час роботи різних електротехнічних пристроїв, які живляться змінним струмом низької частоти, мають низьку енергію і не придатні для передачі інформації в атмосфері на великі відстані. Саме тому невдача спіткала багатьох відомих дослідників і винахідників, які намагалися передавати інформацію за допомогою електромагнітних хвиль низької частоти. Придатними для цього є радіохвилі з довжиною в діапазоні від 0,1 мм до 10 км і частотою $3 \cdot 10^4$ – $3 \cdot 10^{12}$ Гц. Увесь радіодіапазон електромагнітних хвиль поділяють на: довгі, середні, короткі, ультракороткі.

Проте сама електромагнітна хвиля зі сталими параметрами, поширюючись у просторі, може нести інформацію лише про свою наявність. Для передавання різноманітної інформації за допомогою електромагнітних хвиль застосовують різні способи кодування сигналу. Варто зазначити, що зі збільшенням частоти кількість інформації, що може нести хвиля, збільшується, тому збільшення несучої частоти в сучасному світі є закономірним. Але поширення довгих і коротких хвиль залежить від погодних умов. Що є дійсно їхньою перевагою — вони можуть поширюватися поза прямою видимістю. Ультракороткі хвилі набули широкого використання для роботи радіостанцій, мобільних телефонів, Wi-Fi, Wi-Max, 3G і т. п. Але такі хвилі обмежені прямою видимістю, і максимальна відстань передачі залежить від відстані до горизонту та висоти антени.

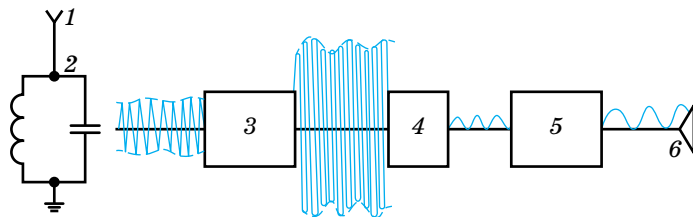
Дослідження Нікола Тесли, Гульєльмо Марконі, Олександра Степановича Попова підвели до винайдення радіозв'язку. Основний принцип радіозв'язку побудовано на використанні передавача і приймачів кодованого сигналу. Залежно від способу кодування розрізняють аналоговий і цифровий зв'язок. Аналоговий полягає в тому, що сигнал у передавачі модулюється — накладаються низькочастотні (звукові сигнали) на несучу радіохвилю, а в приймачі демодулюється — «виокремлюються» звукові хвилі з радіохвилі. Нині повсюди використовують цифровий зв'язок, зокрема й для передачі аналогових сигналів, які спочатку оцифровуються. Сучасні системи цифрового зв'язку використовують кабельні (з-поміж них волоконно-оптичні), супутникові, радіорелейні й інші засоби та способи передачі сигналу.

Принцип радіозв'язку. Під час радіотелефонного зв'язку коливання тиску повітря у звуковій хвилі за допомогою мікрофона перетворюються на електричні коливання тієї самої форми. Отримані коливання є низькочастотними і практично не випромінюються, тому їх використовують для модулювання хвиль високої частоти. Будь-який з параметрів електромагнітної хвилі — частоту, амплітуду, фазу — можна використовувати для кодування інформації (*модуляції*). Найчастіше використовують амплітудну модуляцію — за якої амплітуда високочастотних електромагнітних коливань змінюється за законом електричних коливань низької частоти. Утворений змінний струм високої частоти підсилюється і збуджує в передавальній антені електромагнітні хвилі, які поширюються до приймальної антени (мал. 151).



Мал. 151. Схема радіопередавача: 1 — мікрофон, 2 — генератор високої частоти, 3 — підсилювач звукової частоти, 4 — підсилювач високої частоти, 5 — модулятор, 6 — підсилювач модульованих коливань, 7 — передавальна антена

Отримані приймальною антеною хвилі збуджують у ній змінний струм тієї само частоти, на якій працює передавач. Отриманий сигнал підсилюють, потім демодулюють — виділяють низькочастотні коливання з високочастотних (мал. 152). Цей процес здійснюють за допомогою детектора, тому його ще називають *детектуванням*.



Мал. 152. Схема радіоприймача: 1 — антена, 2 — коливальний контур, 3 — підсилювач високої частоти, 4 — демодулятор, 5 — підсилювач звукової частоти, 6 — гучномовець

Головною частиною кожного радіоприймача є антена, з'єднана з коливальним контуром. За умов, коли одночасно працює багато радіостанцій, на антену діють хвилі різних довжин і частот. В антені та зв'язаному з нею коливальному контурі збуджуються складні електромагнітні коливання. Якщо частота одного з них дорівнює частоті власних коливань контура, то їх амплітуда різко зростає завдяки резонансу. У найпростішому радіоприймачеві для настроювання на частоту потрібної станції його контур обладнують конденсатором змінної ємності або котушкою, індуктивність якої можна змінювати. У сучасних приймачах для настроювання коливального контура застосовують спеціальні електронні пристрої.

Радіозв'язок має тривалу історію розвитку, що охоплює понад 100 років. Перші придатні для практичного застосування радіопередавачі та приймачі майже одночасно побудували російський інженер Олександр Степанович Попов та італійський винахідник і промисловець Гульєльмо Марконі (1895).

Одним з найуспішніших та дуже динамічних за розвитком типів радіозв'язку є мобільний телефонний зв'язок. Уперше мобільний телефонний радіозв'язок використала в 1921 р. поліція Дейтройта (США). Це був односторонній диспетчерський зв'язок у діапазоні 2 МГц для передавання інформації від центрального передавача до приймачів, встановлених на автомобілях. У 1957 р. московський інженер Леонід Іванович Куприянович розробив переносний радіотелефон і базову станцію для нього. Такий телефон мав масу близько трьох кілограмів, радіус його дії був 20–30 км. У 1978 р. в Чикаго розпочалось випробовування першої системи стільникового зв'язку на 2 тис. абонентів.

Мобільний телефонний зв'язок сьогодні — це звичайний і необхідний засіб комунікації. Основою для його здійснення слугує мобільний телефон і система базових станцій. Базові станції розташовують так, що зона їхньої дії (покриття) поділяється на зони, які частково перекриваються

ї утворюють єдину мережу. Поверхня зон покриття станцій (на рівній поверхні) нагадує за формою бджолині комірки, тому телефонний зв'язок називають ще стільниковим.

Здійснюючи виклик, абонент за допомогою мобільного телефону через радіоканал з'єднується з базовою станцією. Якщо цьому абонентові дозволено користуватися послугами мобільного зв'язку, то через мережу базових станцій встановлюється зв'язок з визначеним кінцевим абонентом. Роботу мобільного зв'язку забезпечує розвинута мережа базових станцій (фіксованих антен), які передають інформацію на комутаційні центри за допомогою радіочастотних сигналів (РЧ-сигнали). У світі на сьогодні експлуатується близько 1,4 мільйона базових станцій, понад 20 000 з них розташовані в Україні. Задля підвищення якості мобільного зв'язку оператори збільшують кількість базових станцій і постійно здійснюють їх переоснащення відповідно до найновітніших технологічних розробок галузі.

Стільникові мережі різних операторів з'єднані між собою та зі стаціонарною кабельною телефонною мережею.

Радіохвилі використовують для передавання не тільки звукового сигналу, а й зображень (телебачення). Принцип передавання зображення подібний до принципу радіозв'язку.

Особливо бурхливим став розвиток засобів телекомунікації з використанням супутникового зв'язку та цифрового формату запису інформації.

Супутниковий зв'язок. Уперше для передачі телевізійного зображення супутник використали під час Олімпійських ігор в Токіо 1964 р. Спершу супутники використовували для передавання телевізійного зображення та телефонії між материками. Нині супутники передають сигнал безпосередньо в наш дім через операторів кабельних мереж або наземні станції. У наш час супутниковий зв'язок добре розвинений, ефективний та надійний вид зв'язку.

Телекомунікаційний супутник складається з несучої платформи та корисного навантаження. Корисне навантаження складається з певної кількості транспондерів (радіоприймачі та передавачі), що приймають та ретранслюють сигнал. Супутники, що використовуються для ретрансляції телевізійних і широкосмугових сигналів, перебувають на висоті 36 000 км над екватором. (Для порівняння: відстань від Землі до Місяця становить 370 000 км.) На цій висоті супутник облітає Землю по орбіті за 24 год. Це означає, що відносно поверхні Землі його положення є незмінним. Тому такі супутники називають геостаціонарними.

Інформація (наприклад, телепрограми) посилається на супутник з наземної передавальної станції. На супутнику сигнал підсилюється і передається передплатникам. Для прийому супутникового сигналу необхідна параболічна антена («тарілка»). Супутники використовуються для здійснення різноманітних способів доставки сигналу, хоча користувачі іноді про це навіть не здогадуються. Наприклад, мережі кабельного телебачення часто приймають сигнал від супутника і вже після цього передають його своїм глядачам через мережу. Для передачі в прямому ефірі спортив-

них заходів, новин тощо зображення передається через супутник до телестудії, після чого програма передається через наземні мережі або знову ж таки через супутник. Як наслідок, глядач приймає сигнал на стандартну антену (у випадку наземної мережі), на тарілку (у випадку супутника) або через кабель (тут сигнал може бути як супутниковим, так і наземним).

На сьогодні бурхливий розвиток засобів телекомунікації (мобільний Інтернет, мобільне телебачення) надає можливість для бездротового передавання й отримання будь-якого виду інформації.

Одним з видів послуг, що здійснюється через супутники, є навігація. GPS — глобальна система позиціонування — американська система військового призначення, відкрита для користування приватними особами. GPS використовується для морської навігації та визначення місцеположення об'єктів, наприклад, транспортних засобів. Таксомоторні компанії використовують GPS для керування рухом парку своїх машин. На сьогодні багато таксомоторних компаній використовують послуги GPS, що дає змогу таксистам завантажувати карту місцевості безпосередньо в бортовий комп'ютер, задаючи адреси місця призначення.

На деяких автобусних маршрутах надається цифрова інформація у вигляді сигналу про кількість хвилин до прибуття автобуса на певну зупинку. Ця система також використовує GPS. Європейський аналог — система Galileo, розроблена ESA (Європейським космічним агентством).

Це далеко не весь перелік засобів і можливостей безпроводного зв'язку. Зі збільшенням кількості мобільних користувачів виникає гостра потреба в оперативному забезпеченні комунікацій між ними, в обміні даними, у швидкому одержанні інформації. Тому природним чином відбувається інтенсивний розвиток технологій безпроводних комунікацій.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗЦМЮ

1. Назвіть відомі вам властивості електромагнітних хвиль. 2. Чому для передавання радіосигналів потрібно використовувати високочастотні електромагнітні хвилі?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Радіолокатор працює на довжині хвилі 20 см і дає 5000 імпульсів за секунду, причому тривалість кожного імпульсу — 0,02 мкс. Скільки коливань міститься в одному імпульсі та яка найбільша глибина розвідки локатора?

Дано:

$$\lambda = 0,2 \text{ м}$$

$$n = 5000$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$\tau = 0,02 \text{ мкс}$$

$$N = ?; l = ?$$

Розв'язання:

$$\text{Кількість коливань в одному імпульсі } N = \nu t, \text{ де } \nu = \frac{c}{\lambda}.$$

$$N = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ с}}{0,2 \text{ м}} = 30.$$

Глибина розвідки $l = c \frac{t_0}{2}$, де $t_0 = \frac{t}{n}$ — проміжок часу між двома

послідовними імпульсами, тоді $l = \frac{ct}{2n}$, $l = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot 1 \text{ с}}{2 \cdot 5 \cdot 10^3} = 3 \cdot 10^4 \text{ м}$.

Відповідь: $N = 30$; $l = 3 \cdot 10^4 \text{ м}$.

Задача 2. Визначте довжину електромагнітної хвилі у вакуумі, на яку налаштований коливальний контур, якщо максимальний заряд конденсатора дорівнює $2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$, а максимальна сила струму в контурі — 1 А . Чому дорівнює ємність конденсатора, якщо індуктивність контура $2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$? Чому дорівнює енергія електричного поля конденсатора в момент, коли енергія магнітного поля становить $\frac{3}{4}$ від її максимального значення? Визначте напругу на конденсаторі в цей момент. Активним опором контура знехтуйте.

Дано:

$$q_{\text{макс}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$I_{\text{макс}} = 1 \text{ А}$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$$

$$R = 0$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

$$\lambda - ?; C - ?$$

$$W_e - ?; U - ?$$

Розв'язання:

Довжину хвилі визначимо з формули $\lambda = cT$, де $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Для визначення періоду коливань використаємо закон збереження і перетворення енергії. Для незатухаючих коливань максимальна енергія магнітного поля дорівнює максимальній енергії електричного поля й дорівнює повній енергії електромагнітних коливань у контурі, тобто

$$W_{\text{ел. макс}} = W_{\text{маг. макс}} = W, \text{ звідси } \frac{q_{\text{макс}}^2}{2C} = \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}, LC = \frac{q_{\text{макс}}^2}{I_{\text{макс}}^2}.$$

Тоді $T = 2\pi \frac{q_{\text{макс}}}{I_{\text{макс}}}$. Визначаємо довжину електромагнітної хвилі

$$\lambda = c \cdot 2\pi \frac{q_{\text{макс}}}{I_{\text{макс}}}; \quad \lambda = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot 2\pi \frac{2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{1 \text{ А}} \approx 38 \text{ м}.$$

Знаючи індуктивність контура, знайдемо ємність конденсатора:

$$C = \frac{q_{\text{макс}}^2}{LI_{\text{макс}}^2}; \quad C = \frac{(2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл})^2}{2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot 1 \text{ А}^2} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Повна енергія електромагнітних коливань у контурі дорівнює сумі миттєвих значень енергії електричного й магнітного полів і, за відсутності затухань коливань, є сталою величиною:

$$W = W_{\text{маг. макс}} = W_{\text{ел}} = W_{\text{маг}}, \text{ де } W_{\text{маг}} = \left(\frac{3}{4}\right) W_{\text{маг. макс}}.$$

$$\text{Отже, } W_{\text{маг. макс}} = \left(\frac{3}{4}\right) W_{\text{маг. макс}} + W_{\text{ел}}; \text{ звідси } W_{\text{ел}} = \frac{1}{4} W_{\text{маг. макс}} = \frac{1}{4} \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}.$$

Підставивши числові значення, матимемо:

$$W_{\text{ел}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot 1 \text{ А}^2}{2} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж.}$$

Енергію електричного поля знайдемо з формули $W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$. Маємо $\frac{CU^2}{2} = \frac{1}{4} \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}$, звідси знайдемо миттєве значення напруги U на конденсаторі:

$$U = \frac{I_{\text{макс}}}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1 \text{ А}}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}}{2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}}} = 5 \text{ В.}$$

Відповідь: $\lambda = 38 \text{ м}$, $C = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$, $W_{\text{ел}} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$, $U = 5 \text{ В}$.



Вправа 21

1. Радіоприймач можна настроювати на прийом радіохвиль від 25 до 2000 м. Що треба зробити для прийому довших хвиль — зближувати чи розсувати пластини конденсатора коливального контура?
2. Передавач випромінює електромагнітну хвилю ($\lambda = 300 \text{ м}$). Скільки електромагнітних коливань відбувається протягом одного періоду звукових коливань із частотою 500 Гц?
3. Коливальний контур радіоприймача настроєно на частоту 6 МГц. У скільки разів треба змінити ємність конденсатора контура, щоб налаштуватися на довжину хвилі 150 м?
4. Антена корабельного радіолокатора розташована на висоті 25 м над рівнем моря. На якій максимальній відстані радіолокатор може виявити рятувальний пліт? З якою частотою можуть до того ж випускатися імпульси?
5. Радіолокатор працює на хвилі 5 см і випускає імпульси тривалістю 1,5 мкс. Скільки коливань міститься в кожному імпульсі? Яка мінімальна дальність виявлення цілі?



Виконуємо навчальні проекти

- ▶ Як пов'язані електромагнітні хвилі й технологічна революція? Що таке індустрія 4.0? Суспільство 5.0?
- ▶ Можливості бездротового зв'язку.
- ▶ Як далеко можна «бачити» за допомогою електромагнітних хвиль?



Перевірте себе (§ 21–35)



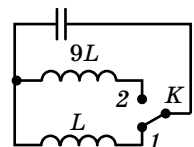
1. Як зміниться період власних електромагнітних коливань у контурі, зображеному на малюнку, якщо ключ K перевести з положення 1 у положення 2?

А збільшиться в 3 рази

Б зменшиться в 3 рази

В збільшиться в 9 разів

Г зменшиться в 9 разів



2. Зміна заряду конденсатора в коливальному контурі здійснюється за законом $q = 10^{-5} \cos(50,24 \cdot 10^6)t$. Визначте максимальний заряд конденсатора та частоту електромагнітних коливань у контурі.
- А 10 мкКл, 8 МГц
 Б 8 мкКл, 10 МГц
 В 10 нКл, 8 мГц
 Г 10 мкКл, 50 МГц
3. Яке з названих нижче явищ, характерних для електромагнітних хвиль, не є загальною властивістю хвиль будь-якої природи?
- А поляризація
 Б заломлення
 В дифракція
 Г інтерференція
4. Укажіть параметри електромагнітної хвилі, які змінюються під час переходу хвилі з повітря у скло.
- А швидкість і довжина хвилі
 Б частота і швидкість
 В довжина хвилі та частота
 Г амплітуда й частота
5. Визначте швидкість зміни сили струму в обмотці електромагніту індуктивністю 4 Гн, якщо в ній збуджується ЕРС самоіндукції 100 В.
- А $25 \frac{\text{А}}{\text{с}}$
 Б $400 \frac{\text{А}}{\text{с}}$
 В $2,5 \frac{\text{А}}{\text{с}}$
 Г $40 \frac{\text{А}}{\text{с}}$
6. У коло змінного струму ввімкнено котушку індуктивністю 20 мГн і конденсатор ємністю 50 мкФ. За якої частоти змінного струму виникне явище резонансу?
- А 159 кГц
 Б 159 Гц
 В 0,159 Гц
 Г 1,59 кГц
7. У коливальному контурі, що складається з котушки індуктивністю 2 Гн та конденсатора ємністю 1,5 мкФ, максимальне значення заряду на пластинах 2 мкКл. Визначте значення сили струму в контурі в той момент, коли заряд на пластинах конденсатора досягне значення 1 мкКл.
8. Рамка рівномірно обертається в однорідному магнітному полі. Водночас магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за законом $\Phi = 3 \cdot 10^{-2} \cos 157t$. Запишіть рівняння зміни ЕРС індукції, що виникає в рамці. Визначте максимальне та діюче значення ЕРС, період і частоту струму.
9. У раз підключення конденсатора до мережі змінного струму з напругою 220 В і частотою 50 Гц у ділянці кола протікає струм 0,14 А. Визначте ємність конденсатора. Вважайте активний опір утвореної ділянці мізерно малим.
10. Трансформатор, ККД якого 75 %, споживає потужність 90 Вт. Визначте силу струму у вторинній обмотці, якщо напруга на її затискачах — 12 В.

Розділ 3

ОПТИКА

Частину фізики, яка вивчає світлові явища, називають оптикою. Оскільки світло є унікальним за різноманіттям своїх властивостей, то виокремлюють фотометрію, хвильову, геометричну та квантову оптики.

§ 36

Світлові хвилі. Основні фотометричні величини

Розвиток уявлень про природу світла. Століттями між ученими тривали суперечки про природу світла. У 1675 р. Ісаак Ньютон запропонував корпускулярну теорію природи світла, згідно з якою світло складається з малих частинок різних форми і розмірів, які випромінюються будь-якими тілами й називаються корпускулами. У 1690 р. голландський фізик Християн Гюйгенс запропонував хвильову теорію природи світла, згідно з якою світло — це механічні поперечні хвилі, які поширюються в пружному середовищі, названому світловим ефіром. Але кожна з цих теорій не могла пояснити всі оптичні явища. Після створення електромагнітної теорії (60–70-ті роки XIX ст.) її автор Джеймс Максвелл зробив припущення, що світло — це електромагнітні хвилі, оскільки швидкість світла і швидкість електромагнітних хвиль — однакові. Електромагнітна теорія також не могла пояснити деякі оптичні явища (наприклад, фотоэффект). У 1900 р. німецький фізик Макс Планк пропонує квантову теорію природи світла, яка доповнює й розширює електромагнітну теорію. Отже, світло в певних явищах виявляє як корпускулярні, так і хвильові властивості. У фізиці такий прояв дістав назву *корпускулярно-хвильовий дуалізм*. Далі ми з'ясуємо, що такі властивості притаманні й іншим об'єктам, наприклад електронам.

У цьому й наступних параграфах детальніше дослідимо хвильові властивості світла. Оперуючи поняттям «світло», ми розглядатимемо електромагнітні хвилі в діапазоні частот від $4 \cdot 10^{14}$ до $7,6 \cdot 10^{14}$ Гц. У цьому інтервалі кожній частоті відповідає довжина хвилі та свій колір випромінювання: від 400 нм (фіолетовий колір) до 760 нм (червоний). Зазначимо, що до оптичного діапазону (світла) належить також інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання.

Фотометричні величини. Оскільки видиме світло сприймається оком людини, то, окрім суто енергетичних величин, що характеризують будь-

яке випромінювання, існують фотометричні величини, що враховують зорові відчуття людини. Вимірюють фотометричні характеристики за допомогою напівпровідникових приймачів, чутливість яких до світла є близькою до чутливості ока.

У таблиці 6 зіставлено енергетичні величини та відповідні фотометричні величини.

Таблиця 6

Енергетична величина	Одиниця величини	Фотометрична величина	Позначення	Одиниця величини
Енергія випромінювання	Дж	Світлова енергія	W	лм · с (люмен за секунду)
Потік випромінювання (потужність випромінювання)	Вт	Світловий потік	Φ	лм (люмен)
Поверхнева густина потоку випромінювання	$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	Освітленість	E	лк (люкс)
Сила випромінювання	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$	Сила світла	I	кд (кандела)
Енергетична яскравість	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$	Яскравість	L	$\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$

Для характеристики джерел світла щодо освітлення, яке вони створюють, користуються поняттям *світлового потоку*.

Світловий потік Φ — світлова фотоелектрична величина, що характеризує потужність випромінювання джерела світла, тобто енергію світлового випромінювання за одиницю часу, $\Phi = \frac{W}{t}$.

Одиниця світлового потоку — *люмен*, 1 лм.

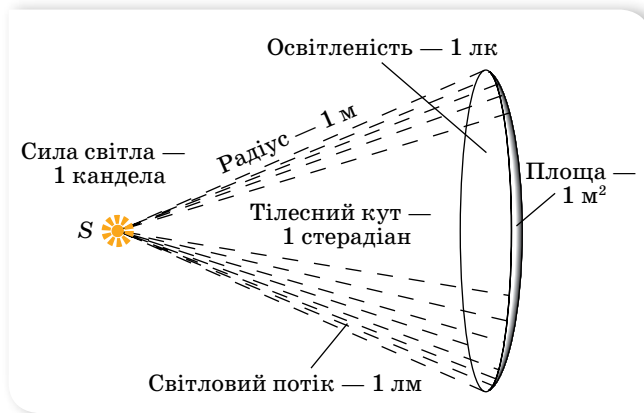
Якщо розміри джерела світла настільки малі, що його форму не можна розрізнити з відстані, на якій досліджується випромінюваний світловий потік, і цей потік розподілений рівномірно в усіх напрямках, то таке джерело світла називають *точковим*.

Характерним для точкового джерела світла є те, що випромінювані світлові хвилі — сферичні.

Головною характеристикою джерела світла є *сила світла*.

Сила світла I — світлова фотометрична величина, що характеризує просторовий розподіл потужності випромінювання в заданому напрямку. Сила світла дорівнює відношенню світлового потоку $\Delta\Phi$, який випромінює дане джерело світла в заданому напрямку всередині малого тілесного кута $\Delta\omega$, до величини цього кута, $I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega}$.

Одиницею сили світла в СІ є *кандела*, 1 кд, — одна із семи основних одиниць СІ (мал. 153).



Мал. 153. До пояснення одиниці сили світла

У разі рівномірного випромінювання світла в усі боки повний світловий потік точкового джерела світла дорівнює $\Phi = 4\pi I$. Із цієї формули випливає зв'язок між фотометричними одиницями: $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$.

Світловий потік Φ для кожного джерела є фіксованою величиною і не може бути збільшений за допомогою оптичних приладів. Проте оптичні прилади (дзеркала, лінзи) дають змогу перерозподілити світловий потік у тілесному куті та отримати в деяких напрямках більший потік на одиницю тілесного кута, тобто більшу силу світла. Так, наприклад, застосовуючи параболічне дзеркало в прожекторах, вдається збільшити силу світла в одному напрямку в тисячі разів через значне її зменшення в усіх інших напрямках.

Світловий потік, як і потік енергії, можна вимірювати у ватах, оскільки він фактично визначає потужність випромінювання, яке падає на певну поверхню. Проте, оскільки наше око найчутливіше до випромінювання, довжина хвилі якого 555 нм (зелений колір), то встановлено, що потік оранжевих променів ($\lambda = 610 \text{ нм}$) потужністю 1 Вт створює зорове відчуття такої само інтенсивності, як потік зелених променів потужністю 0,5 Вт.

Визначити універсальну залежність між ватом і люменом не вдається. Експериментально встановлено, що світловому потоку хвиль зеленого кольору в 1 лм відповідає потужність 0,0016 Вт. Для світла інших довжин хвиль співвідношення між люменом і ватом буде іншим.

У темряві ми не бачимо тіл, які нас оточують. За наявності джерела світла світловий потік, який поширюється від нього, падає на тіла, відбивається і, потрапляючи в око людини, дає змогу їх бачити. Що більший світовий потік впаде на тіло, то більшим буде і відбитий потік, тому людина чіткіше зможе бачити це тіло. Величину, яка характеризує різну видимість окремих тіл, називають освітленістю.

Освітленість E — фотометрична величина, що визначається відношенням світлового потоку $\Delta\Phi$, який падає на малу ділянку поверхні, до площі ΔS цієї поверхні, $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$.

Одиниця освітленості — люкс, 1 лк.

Якщо освітленість різних ділянок поверхні не однакова, треба взяти таку малу площу ΔS , щоб розподіл потоку Φ у її межах можна було вважати рівномірним. У разі нерівномірного розподілу потоку Φ на площі ΔS визначають середню освітленість цієї поверхні.

У випадку точкового джерела світла $E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}$, де I — сила світла, r — відстань від джерела світла до освітленої поверхні, α — кут між нормаллю до поверхні й напрямком поширення світлового променя.

Закони освітленості

1. З віддаленням джерела освітленість зменшується обернено пропорційно квадрату відстані.
2. Освітлюваність, яку створюють кілька джерел світла в деякій точці поверхні, дорівнює сумі освітленостей, створюваних кожним джерелом окремо.

Для кожного приміщення (простору) існують вироблені на практиці норми необхідної освітленості залежно від його призначення. Наприклад, для читання потрібна освітленість 50 лк. Для порівняння: Сонце в середині дня (у середніх широтах) створює освітленість порядку 10^5 лк, повний Місяць (у зеніті) — 0,2 лк, лампа розжарювання потужністю 100 Вт, яка висить на висоті 1 м над столом, створює на поверхні стола (під лампою) освітленість 100 лк.

Читаючи книжку, ми чітко бачимо букви на білому фоні аркуша, хоча його освітленість можна вважати скрізь однаковою. Пояснюється це тим, що білий аркуш і букви по-різному відбивають світловий потік, який падає на них.

Отже, різні ділянки поверхонь джерел світла — первинних і вторинних (аркуш паперу, що відбиває світло, можна вважати вторинним джерелом світла), які ми розглядаємо в певному напрямку, можуть значно відрізнитися своєю *яскравістю*.

Яскравість L — фотометрична величина, що характеризує поверхневу густину світлового потоку $\Delta\Phi$, який випромінюється світною поверхнею ΔS у заданому напрямку в тілесному куті $\Delta\omega$, $L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S \Delta\omega \cos \varphi}$, де φ — кут між нормаллю до світної поверхні й напрямком поширення світлової хвилі.

Одиниця яскравості — кандела на квадратний метр, $1 \frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$.

Яскравість пов'язана з іншими фотометричними величинами: силою світла I , $L = \frac{I}{\Delta S \cos \varphi}$, та освітленістю E , $L = \frac{E}{\Delta \omega \cos \varphi}$ (тільки для вторинних джерел, що відбивають 100 % енергії падаючої хвилі).

Наведемо для прикладу яскравість деяких джерел світла в $\frac{\text{кД}}{\text{см}^2}$: нічне небо — $10^{-7} \frac{\text{кД}}{\text{см}^2}$, Місяць — до $1 \frac{\text{кД}}{\text{см}^2}$, Сонце поблизу горизонту — $600 \frac{\text{кД}}{\text{см}^2}$, Сонце опівдні — до $150\,000 \frac{\text{кД}}{\text{см}^2}$, полум'я свічки — до $1 \frac{\text{кД}}{\text{см}^2}$.

ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Як змінювались уявлення про природу світла? Чому? 2. Як ви можете пояснити корпускулярно-хвильовий дуалізм світла? 3. Назвіть основні фотометричні величини та їхні одиниці. 4. Накресліть графік залежності освітленості поверхні книжки від кута між напрямком на джерело світла й нормаллю до сторінки. 5. На яку висоту треба підняти над центром стола радіусом R точкове джерело, сила світла якого I , щоб освітленість краю поверхні стола була найбільшою з можливих?



Виконуємо навчальні проекти

- ▶ Дослідження чинників, які впливають на освітленість робочих місць у приміщенні.
- ▶ Дослідження порівняльних характеристик електричних джерел світла.
- ▶ Економічне обґрунтування міського освітлення.



Приклади розв'язування задач

Задача. На висоті 3 м від землі висить лампа, сила світла якої 250 кд, а на висоті 4 м — лампа із силою світла 150 кд. Відстань між лампами 2,5 м (мал. 154). У скільки разів освітленість під першою лампою більша, ніж під другою?

Дано:

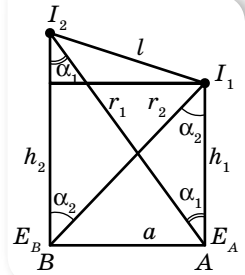
$$\begin{aligned} I_1 &= 250 \text{ кд} \\ I_2 &= 150 \text{ кд} \\ h_1 &= 3 \text{ м} \\ h_2 &= 4 \text{ м} \\ l &= 2,5 \text{ м} \end{aligned}$$

$$\frac{E_A}{E_B} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Освітленість під кожною лампою дорівнює сумі освітленості, яку створюють обидві лампи. Отже, на основі законів освітленості, маємо (мал. 150):

$$\begin{aligned} E_A &= \frac{I_1}{h_1^2} + \frac{I_2}{r_1^2} \cos \alpha_1 = \frac{I_1}{h_1^2} + \frac{I_2 h_2}{r_1^3}; \\ E_B &= \frac{I_2}{h_2^2} + \frac{I_1}{r_2^2} \cos \alpha_2 = \frac{I_2}{h_2^2} + \frac{I_1 h_1}{r_2^3}. \end{aligned}$$



Мал. 154

Необхідні величини r_1 і r_2 обчислимо за теоремою Піфагора, попередньо визначивши відстань a між точками A і B із співвідношення $a = \sqrt{l^2 - (h_2 - h_1)^2}$.

Дістанемо:

$$r_1 = \sqrt{h_2^2 + l^2 - (h_2 - h_1)^2}; \quad r_1 = \sqrt{16 \text{ м}^2 + 6,25 \text{ м}^2 - 1 \text{ м}^2} = \sqrt{21,25 \text{ м}^2} \approx 4,6 \text{ м};$$

$$r_2 = \sqrt{h_1^2 + l^2 - (h_2 - h_1)^2}; \quad r_2 = \sqrt{9 \text{ м}^2 + 6,25 \text{ м}^2 - 1 \text{ м}^2} = \sqrt{14,25 \text{ м}^2} \approx 3,8 \text{ м}.$$

Визначимо E_A і E_B :

$$E_A \approx \frac{250 \text{ кД}}{9 \text{ м}^2} + \frac{150 \text{ кД} \cdot 4 \text{ м}}{(4,6)^3 \text{ м}^3} \approx 27,8 \text{ лк} + 6,2 \text{ лк} \approx 34 \text{ лк};$$

$$E_B \approx \frac{150 \text{ кД}}{16 \text{ м}^2} + \frac{250 \text{ кД} \cdot 3 \text{ м}}{(3,8)^3 \text{ м}^3} \approx 9,4 \text{ лк} + 13,7 \text{ лк} \approx 23 \text{ лк}.$$

Визначимо відношення освітленостей: $\frac{E_A}{E_B} \approx \frac{34 \text{ лк}}{23 \text{ лк}} \approx 1,48$.

Відповідь: 1,48.



Вправа 22

- Дві електролампи, що розміщені поряд, освітлюють екран. Відстань від ламп до екрана — 1 м. Одну лампу вимкнули. На яку відстань слід наблизити екран, щоб його освітленість не змінилась?
- Визначте освітленість поверхні Землі, що створюється перпендикулярними сонячними променями. Яскравість Сонця $1,2 \cdot 10^9 \frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$, відстань від Землі до Сонця $1,5 \cdot 10^8 \text{ км}$, радіус Сонця $7 \cdot 10^5 \text{ км}$.
- Перегорілу лампу на 75 кД замінили лампою на 25 кД і наблизили її до освітлюваної поверхні, зменшивши відстань утричі. Чи було досягнуто попередньої освітленості поверхні?
- На який кут треба відхилити площину, щоб її освітленість зменшилась удвічі порівняно з освітленістю площини під час перпендикулярного падіння променів?
- Ліхтар для освітлення вулиці, сила світла якого 500 кд, висить на стовпі на висоті 3 м від поверхні землі. Визначте освітленість поверхні землі на відстані 4 м від основи стовпа.
- Визначте силу світла точкового джерела, якщо воно міститься в центрі сфери радіусом 85 см і на поверхню цієї сфери площею $1,5 \text{ м}^2$ випромінює світловий потік 360 лм. Визначте повний світловий потік, який випромінює це джерело.
- Який світловий потік потрапляє на поверхню стола, якщо її середня освітленість дорівнює 9500 лк, а площа — $1,6 \text{ м}^2$?
- Стіл діаметром 1,2 м освітлюється лампою, яка висить на висоті 1,2 м від його середини. Чому дорівнює освітленість краю стола, якщо повний світловий потік лампи — 750 лм?
- Дві лампи розташовані на відстані 2,4 м одна від одної. Де потрібно розмістити між ними непрозорий екран, щоб він був однаково освітлений з обох сторін? Сила світла ламп дорівнює 100 і 50 кд.
- Лампа, сила світла якої 400 кд, розташована на відстані 1 м від екрана. На якій відстані потрібно поставити позаду лампи плоске дзеркало, паралельне екрану, щоб освітленість у центрі екрана збільшилась на 100 лк?

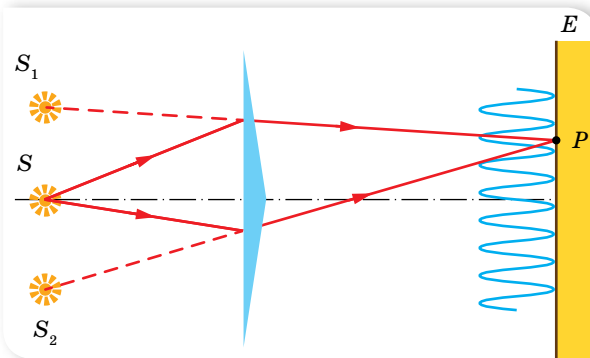
§ 37

Інтерференція світла

Когерентність світлових хвиль. Як ми знаємо, хвилям будь-якої природи притаманні однакові властивості. Так, явище інтерференції, яке ми розглядали на прикладі механічних хвиль, спостерігається і для електромагнітних, зокрема світлових. Пригадаймо: *інтерференцією* називається додавання в просторі двох і більше хвиль, за якого відбувається постійний у часі розподіл амплітуд результуючих коливань. Для її отримання необхідне виконання деяких умов. З'ясуємо їх.

Щоб інтерференційна картина була стійкою, потрібні узгоджені хвилі, тобто такі, що мають однакові довжини й сталу різницю фаз у будь-якій точці простору. Хвилі, які відповідають цим умовам, називають *когерентними*, відповідно когерентними називають і джерела, які їх випромінюють.

Для одержання когерентних джерел світла вдаються до штучного прийому: пучок світла від одного джерела розділяють на два або кілька пучків, які йдуть різними шляхами, і в подальшому зводяться й накладаються один на один. Якщо ці пучки пройдуть різну відстань, то між ними виникне різниця фаз. У разі накладання таких пучків і виникає стійка інтерференційна картина. Уперше такий метод використав французький фізик Огюстен Френель (1788–1827). На малюнку 155 наведено схему досліду Френеля для одержання когерентних джерел світла за допомогою так званої біпрізми Френеля.



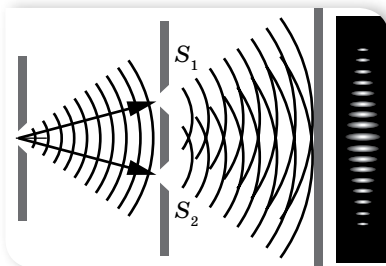
Мал. 155. Схема досліду Френеля

Існують інші способи отримання когерентних джерел світла.

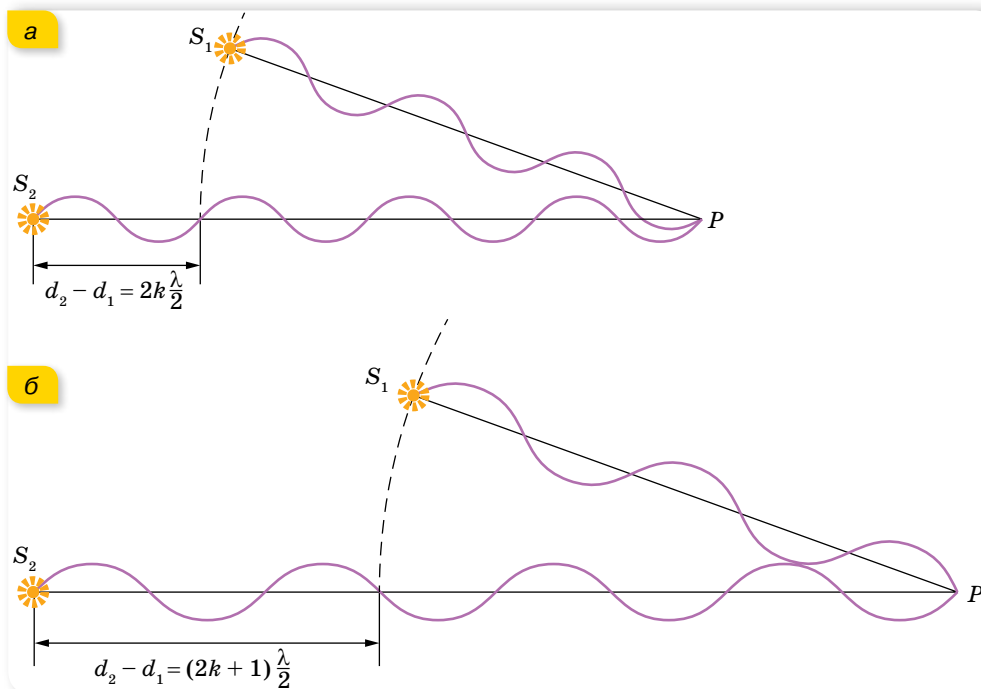
Умови мінімумів і максимумів інтерференційної картини. Уперше явище інтерференції дослідив Томас Юнг (1773–1820) (йому належить і термін «інтерференція»). Юнг також першим виміряв довжину світлової хвилі. У своїх дослідях Юнг використав сонячне світло, що проходило одну, а потім крізь дві щілини S_1 та S_2 . До речі, метою проведення досліду була перевірка припущення про корпускулярну природу світла. Якщо світло є потоком частинок, то на екрані повинні спостерігатися дві

яскраві лінії. Проте Юнг побачив цілу серію яскравих і темних ліній (мал. 156).

З'ясуємо умови, за яких спостерігаються світлі й темні смуги. Розглянемо дві когерентні світлові хвилі, які надходять у довільну точку P (мал. 157, а). Кожна з хвиль проходить певну відстань. Розрізняють звичайну довжину пройденого шляху l та оптичну d . Для вакууму ці довжини однакові. Для довільного середовища оптична довжина шляху d — це величина, що визначається добутком фактичної довжини шляху світлової хвилі в даному середовищі (геометричної довжини) та абсолютного показника заломлення цього середовища, $d = nl$. Від того, якою буде оптична різниця ходу між двома хвилями, залежить амплітуда результуючої хвилі.



Мал. 156. Схема досліду Юнга



Мал. 157. Ілюстрація умов: а — максимуму; б — мінімуму інтерференційної картини

Якщо хвилі виходять із джерел S_1 і S_2 з однаковими фазами, а різниця ходу $\Delta d = d_1 - d_2 = 0$, то в точку P хвилі приходять теж з однаковими фазами. У цьому разі в точці P відбуваються електромагнітні коливання зі збільшеною амплітудою, тобто спостерігається максимум освітленості. Те само відбувається за умови, що на відрізку Δd укладається будь-яке ціле число довжин хвиль (парне число півхвиль).

Якщо ж одна із хвиль проходить додаткову відстань, яка дорівнює половині хвилі, півтори хвилі й т. д., тобто різниця ходу $d_1 - d_2$ становить непарне число півхвиль, то обидві хвилі потраплять на екран у протифазі й «погасять» одна одну, оскільки результуюча амплітуда дорівнюватиме нулю (мал. 157, б; с. 167).

Узагальнення розглянутих випадків носить назву умов максимуму та мінімуму інтерференції.

Умова максимуму: у певній точці простору відбувається посилення результуючих світлових коливань, якщо оптична різниця ходу двох світлових хвиль Δd , що надходять у цю точку, дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль):

$$\Delta d = d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2}, \text{ де } k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Умова мінімуму: у певній точці простору відбувається ослаблення результуючих світлових коливань, якщо оптична різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять у цю точку, дорівнює непарному числу півхвиль:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ де } k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Можливий і ще один випадок (на мал. 157, с. 167 — не показано), коли різниця ходу дорівнює не цілому числу півхвиль. У цьому разі хвилі придуть з різними фазами й будуть або підсилювати, або послаблювати одна одну. Амплітуда результуючої хвилі буде мати проміжне значення між нулем і подвійною амплітудою.

По суті, інтерференційна картина — це незмінний у часі розподіл амплітуд інтерферуючих хвиль. Розглядаючи інтерференційну картину, ми вказали, що на щілини падають монохроматичні хвилі довжиною λ . Вигляд інтерференційної картини залежить від довжини хвиль. Так, якщо на установку спрямувати світло іншого кольору (іншої довжини хвилі), то спостерігатиметься аналогічна картина, але відстані між світлими й темними смугами будуть іншими. Наприклад, для червоного світла відстані між смугами виявляться більшими, ніж за освітлення зеленим або синім.

А що ж ми спостерігатимемо на екрані, освітлюючи його білим світлом? У цьому разі в центрі буде видно білу світлу смугу, а по обидва боки від неї — кольорові смуги, забарвлені всіма кольорами райдуги: від фіолетового (який розташований ближче до центра екрана) до червоного. (Спробуйте самостійно пояснити, чому у випадку білого світла спостерігаються різнокольорові смуги й чому на деякій відстані від центра екрана смуги зникають, а екран стає рівномірно освітленим.)

З'ясуємо ще одне питання. Як відомо, електромагнітні хвилі (зокрема й світлові) несуть енергію. Що ж відбувається із цією енергією, коли хвилі гасять одна одну? Можливо, ця енергія перетворюється на інші види й

у мінімумах інтерференційної картини виділяється теплота? Ні. Мінімум у даній точці інтерференційної картини означає, що енергія сюди зовсім не надходить. Унаслідок інтерференції енергія перерозподіляється в просторі. Вона концентрується в максимумах, не потрапляючи в мінімуми.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які хвилі називаються когерентними? 2. Назвіть способи спостереження інтерференції.
3. Сформулюйте умови максимумів і мінімумів інтерференційної картини.
4. На якому шляху у вакуумі владеться стільки ж довжин хвиль монохроматичного світла, скільки їх вкладається на шляху 3 мм у воді?



Приклади розв'язування задач

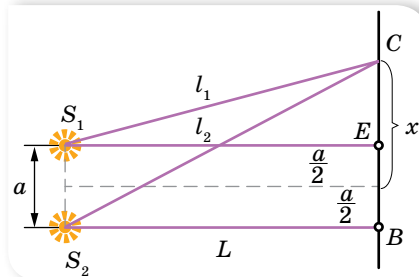
Задача. У досліді Юнга (мал. 158) відстань між щілинами $a = 0,07$ мм, а відстань від подвійної щілини до екрана $L = 2$ м. Коли прилад освітили зеленим світлом, то відстань до першого максимуму становила $x = 16$ мм. Визначте за цими даними довжину хвилі.

Дано:

$$\begin{aligned} a &= 7 \cdot 10^{-5} \text{ м} \\ L &= 2 \text{ м} \\ x &= 16 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ \lambda &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

У певній точці C екрана буде максимум освітленості за умови $\Delta d = l_2 - l_1 = k\lambda$.



Мал. 158

Визначимо оптичну різницю ходу Δd , для цього застосуємо до трикутників S_1CE і S_2CB теорему Піфагора:

$$l_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2, \quad l_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2.$$

Віднімаючи від першого рівняння друге, дістаємо $l_2^2 - l_1^2 = 2xa$,
 $(l_2 - l_1)(l_2 + l_1) = 2xa$.

Оскільки $a \ll L$, то $l_1 + l_2 \approx 2L$. Отже, $l_2 - l_1 = \frac{xa}{L}$.

Ураховуючи, що $l_2 - l_1 = k\lambda$, можемо записати: $k\lambda = \frac{xa}{L}$.

Звідси $\lambda = \frac{a \cdot x}{L}$, оскільки за умовою $k = 1$.

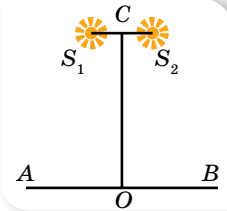
Після підстановки даних $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-7}$ м.

Відповідь: $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-7}$ м.



Вправа 23

1. Два когерентні джерела світла S_1 і S_2 освітлюють екран AB , площина якого паралельна напрямку S_1S_2 (мал. 159). Доведіть, що на екрані в точці O , яка лежить на перпендикулярі, опущеному із середини відрізка S_1S_2 , буде максимум освітленості.
2. Два когерентні джерела світла S_1 і S_2 (мал. 159) випускають монохроматичне світло з довжиною хвилі 600 нм. Визначте, на якій відстані від точки O буде перший максимум освітленості, якщо $|OC| = 4$ м і $|S_1S_2| = 1$ мм.
3. Відстань на екрані (мал. 159) між двома сусідніми максимумами освітленості дорівнює 1,2 мм. Визначте довжину хвилі світла, що його випускають когерентні джерела S_1 і S_2 , якщо $|OC| = 2$ м і $|S_1S_2| = 1$ мм.
4. Як зміниться інтерференційна картина на екрані AB (мал. 159), якщо:
 - а) не змінюючи відстані між джерелами світла, віддалити їх від екрана;
 - б) не змінюючи відстані до екрана, зблизити джерела світла;
 - в) джерела випускатимуть світло з меншою довжиною хвилі?



Мал. 159

§ 38

Інтерференційні картини в тонких пластинках і плівках

Інтерференція в тонких плоскопаралельних пластинках. У природних умовах інтерференцію світла можна спостерігати на тонких мильних бульбашках, на плівках бензину, розлитого на мокрому асфальті.

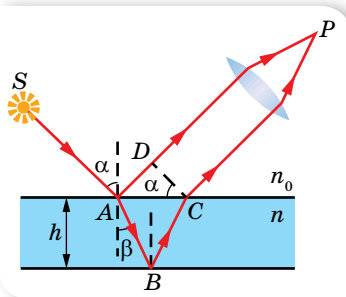
При відбитті від двох меж плівки утворюються два відбиті когерентні промені (мал. 160). Якщо на їх шляху поставити збірну лінзу, то вони зберуться в одній з точок P фокальної площини лінзи й дадуть інтерференційну картину, яка визначається оптичною різницею ходу Δd

між променями $\Delta d = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}$, де h — товщина плівки, n — показник заломлення речовини плівки, α — кут падіння світлового променя.

Доданок $\pm \frac{\lambda_0}{2}$ зумовлений втратою півхвилі при відбиванні світла на межі поділу середовищ. Якщо світло переходить у більш оптично густе середовище, $n > n_0$, то в точці A фаза коливань змінюється на протилежну, відбувається втрата півхвилі й доданок матиме знак «-».

У випадку $n < n_0$ втрата півхвилі відбудеться в точці C і $\frac{\lambda_0}{2}$ матиме знак «+».

У випадку $n < n_0$ втрата півхвилі відбудеться в точці C і $\frac{\lambda_0}{2}$ матиме знак «+».



Мал. 160. Хід променів у тонкій плівці

У точці P буде **максимум**, якщо $k\lambda = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}$, і **мінімум**, якщо $(2k + 1)\frac{\lambda}{2} = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}$.

Зі збільшенням кута падіння оптична різниця ходу зменшується. Це означає, що під час повертання пластинки відносно променів вона по черзі здаватиметься то темною, то світлою.

Інтерференція спостерігається не лише у відбитому світлі, а й у світлі, що проходить через плівку. Оскільки світло не відбивається в цьому разі від оптично густішого середовища, то умові максимумів інтерференції у відбитому світлі відповідають мінімуми інтерференції в прохідному світлі, і навпаки.

Якщо світло падає нормально на пластинку, то кут $\alpha = 0$, й оптична різниця ходу становить $\Delta d = 2hn$.

Якщо пластинку освітлювати білим світлом, то внаслідок інтерференції для одних променів з однаковими довжинами хвиль отримується підсилення, а для інших хвиль з іншими довжинами — послаблення. Тому пластинка здаватиметься спостерігачеві забарвленою в той колір, який близький до кольору променів, що максимально підсилюють один одного.

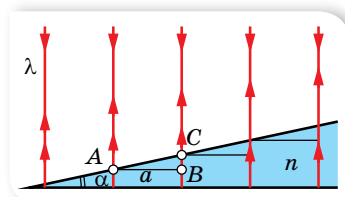
Зрозуміло, що, повертаючи пластинку відносно променів, спостерігатимемо зміну її забарвлення. Підкреслимо ще раз, що все викладене стосується випадку, коли на пластинку падають паралельні промені.

Інтерференція в клиноподібних плівках. Кільця Ньютонa. З'ясуємо особливості інтерференції світла в клиноподібній плівці з дуже малим кутом α і показником заломлення речовини n . Будемо освітлювати плівку паралельними монохроматичними хвилями, які перпендикулярні до однієї з граней клина. На поверхні грані чергуються темні та світлі смуги, паралельні гострому ребру клина. Пояснимо їх утворення.

На малюнку 161 зображено хід інтерферуючих променів у клині (оскільки кут α малий, то промені, відбиті від двох граней клина, практично паралельні). З віддаленням від ребра клина їх різниці ходу збільшуються. Нехай у точці A буде максимальне підсилення світла. Тоді на деякій відстані a від точки A буде наступна точка B , у якій, унаслідок збільшення товщини клина, знову буде максимальне підсилення світла, відповідно при цьому різниця ходу повинна зростати на λ . Тобто оптична різниця ходу $2BC \cdot n$ має дорівнювати λ . З малюнка 161 видно, що $BC = a \operatorname{tg} \alpha$, тому $2na \operatorname{tg} \alpha = \lambda$.

Для малих кутів тангенс кута можна вважати таким, що дорівнює самому куту, вираженому в радіанах, тому дістанемо $2\alpha an = \lambda$, звідки $a = \frac{\lambda}{2n\alpha}$.

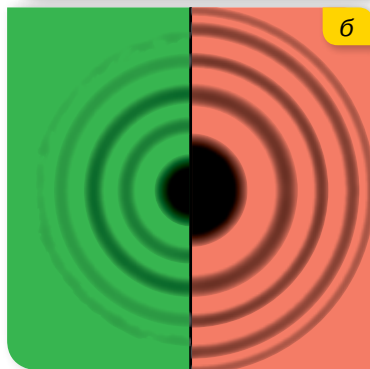
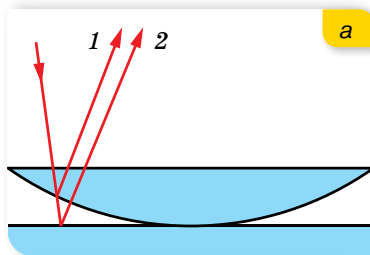
Неважко зрозуміти, що наступна світла смуга буде на відстані a від точки C і т. д. Це означає, що інтерференційні смуги в описаному випадку



Мал. 161. Інтерференція на клиноподібній плівці

розміщуються на однакових відстанях одна від одної. Зі збільшенням кута α відстань між світлими (або темними) смугами зменшується. Якщо кут α у плівки поступово зменшувати, то інтерференційні смуги розсуватимуться, і коли грані плівки стануть паралельними, смуги зовсім зникнуть. Зі збільшенням кута α смуги зближуються і для кута близько 1° накладаються одна на одну.

Клиноподібний повітряний простір можна отримати, якщо на плоскопаралельну пластинку покласти плоскоопуклу лінзу (мал. 162, а). Якщо освітити таку систему паралельними монохроматичними променями так, щоб вони падали перпендикулярно до плоскої поверхні лінзи, то у відбитому світлі буде добре видно чергування світлих і темних кілець, які називають «кільцями Ньютона».



Мал. 162. Кільця Ньютона:
а — установка для отримання
«кілець Ньютона»;
б — вигляд кілець Ньютона
для зелених і червоних
хвиль у відбитому світлі

У цьому разі інтерферують промені, що відбиваються від кривої поверхні лінзи й від поверхні пластини. Для нормального падіння променів на плоску поверхню лінзи оптична різниця ходу приблизно дорівнює подвійній товщині повітряного шару між лінзою та пластиною, $2hn$.

Зверніть увагу на те, що перша хвиля відбивається від межі скло—повітря, а друга — від межі повітря—скло. Тому в другому випадку відбувається зміна фази коливань відбитої хвилі на 180° , що відповідає збільшенню різниці ходу на $\frac{\lambda}{2}$.

На малюнку 162, б зображено вигляд кілець Ньютона у відбитому світлі (у прохідному світлі в центрі розташовується світла пляма) для хвиль зеленого та червоного кольорів. Як видно, з віддаленням від центра кільця зближуються. Це пояснюється тим, що в цьому напрямку зростає кут повітряного клина (мал. 162, а). До того ж радіус кілець залежить від довжини падаючої хвилі. Як саме — висновок зробіть самостійно

(мал. 162, б).

Практичне використання інтерференції. Сучасна наука і техніка використовує інтерференцію світла для точних вимірювань, щоб визначити якість обробки поверхонь, поліпшити якість зображення з оптичних приладів тощо. Інтерференційний метод вимірювання довжини хвилі світлового випромінювання дає змогу визначати її з точністю до 7–8 значущих цифр. Таким способом у 1960 р. було виміряно довжину еталона метра, унаслідок чого дали нове його означення: метром називають довжину, на якій довжина хвилі оранжевих променів у вакуумі, що їх випромінюють

атоми Криптону, укладається 1 650 763,73 раза. (У 1983 р. було прийнято новий еталон метра, виражений через швидкість світла).

У 1935 р. український учений Олександр Теодорович Смакула зробив відкриття — спосіб поліпшення оптичних приладів, що дістав назву «*просвітлення оптики*». Суть відкриття полягає в тому, що поліровану поверхню скляної лінзи покривають тонким шаром певного матеріалу. Завдяки явищу інтерференції в цій тонкій плівці відбите від полірованої поверхні світло гаситься і більше світла проходить уперед. Таких поверхонь на шляху світла, що проходить через складний прилад, досить багато, тому втрата навіть кількох відсотків світла на відбиття на кожній з них привело б до того, що на виході ми вже нічого не побачили. Лінзи є основним елементом різних оптичних приладів: фотоапаратів, мікроскопів, телескопів, перископів, стереотруб, біноклів, оптичних пристроїв до стрілецької зброї тощо (мал. 163).

Таким чином, це відкриття стало великим надбанням, яким користується все людство і сьогодні, як на Землі, так і в космосі для фотографування Землі та інших планет. За допомогою інтерференції можна оцінити якість шліфування поверхні виробу з точністю до $1/10$ довжини хвилі, тобто з точністю до 10^{-6} см. Для цього на поверхню, яку перевіряють, накладають еталонну пластинку, освітлюють її монохроматичним світлом і спостерігають інтерференційну картину. Якщо якість полірування висока, то на поверхні видно паралельні інтерференційні смуги. Якщо на поверхні є нерівності, інтерференційні смуги викривлюються.

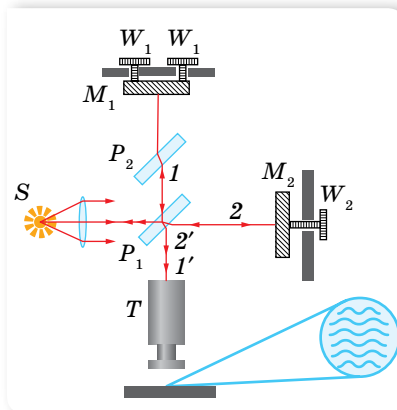
Існують спеціальні прилади — інтерферометри, які застосовують для вимірювань на основі явища інтерференції. За допомогою інтерферометрів здійснюють точне вимірювання довжини і кутів (особливо в астрономічних дослідженнях), визначають показник заломлення прозорих речовин.

Найвідомішим є інтерферометр конструкції Альберта Майкельсона, схему якого відображено на малюнку 164.

Світло від джерела S падає на скляну пластинку P_1 , покриту напівпрозорим шаром срібла. Частина світла (промінь 1) відбивається від пластинки і падає на дзеркало M_1 , інша частина (промінь 2) після заломлення у пластинці P_1 потрапляє



Мал. 163. Об'єктиви з просвітленою оптикою



Мал. 164. Схема інтерферометра Майкельсона

на дзеркало M_2 . Пластинку P_2 такої самої товщини, як і P_1 , ставлять на шляху променя I для компенсації різниці ходу, зумовленої заломленням.

Відбившись від дзеркал, промені повертаються до пластинки P_1 , причому промені, які йдуть від дзеркала M_1 , потрапляють у трубу T спостерігача, пройшовши крізь пластинку P_1 , а промені від дзеркала M_2 — відбившись від неї. У результаті інтерференції цих двох пучків залежно від різниці ходу променів у полі зору труби спостерігатиметься світла або темна смуга.

Гвинтами W_1, W_2 можна керувати положення дзеркал. Достатньо змістити одне із дзеркал у напрямку променя, наприклад на $\frac{1}{4} \lambda$, як різниця ходу обох променів збільшиться на $\frac{1}{2} \lambda$. Інтерференційна картина на екрані зміститься на цілу смугу, і замість світлої смуги спостерігатиметься темна або навпаки.

На сьогодні існують інтерферометри різних конструкцій, які застосовують для визначення лінійних розмірів досліджуваних об'єктів з точністю близько 100 нм, у космічних дослідженнях (де замість світлових хвиль можуть використовуватись хвилі радіодіапазону). Чутливість астрономічних інтерферометрів значно вища, ніж чутливість звичайних радіотелескопів.

Дослід Майкельсона — Морлі. Інтерферометр Майкельсона відіграв важливу роль у становленні сучасної фізики. У 10 класі, вивчаючи основи релятивістської механіки, ми розглядали дослід з виявлення «ефірного вітру», який проводили в 1881 р. американські вчені Альберт Майкельсон й Едвард Морлі. Пригадаймо суть досліді.

Відповідно до законів електродинаміки Максвелла, швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі однакова в усіх напрямках і дорівнює c . Але за законами класичної механіки швидкість може дорівнювати c лише в одній вибраній системі відліку. У будь-якій іншій системі відліку, що рухається відносно цієї вибраної системи зі швидкістю \bar{v} , швидкість світла вже дорівнюватиме $\bar{c} - \bar{v}$ (згідно із принципом відносності Галілея). Отже, виникли певні суперечності між електродинамікою Максвелла та механікою Ньютона, які намагались вирішити різними способами.

Один зі способів полягав у тому, щоб принцип відносності Галілея вважати незастосовним до електромагнітних явищ. Саме такої думки дотримувався голландський фізик Гендрік Лоренц. На той час вважали, що переміщення електромагнітної хвилі у просторі відбувається у спеціальному середовищі — ефірі. Інерціальна система відліку, яка відносно ефіру перебуває в стані спокою, за Лоренцом, і є тією особливою вибраною системою, у якій закони електродинаміки Максвелла дійсні. Тільки в цій системі відліку швидкість світла у вакуумі однакова в усіх напрямках.

Інший спосіб полягав у тому, щоб вважати неправильними рівняння Максвелла і спробувати замінити їх такими, щоб з переходом від однієї системи відліку до іншої (згідно зі звичайними, класичними уявленнями

про простір і час) вони не змінювались. Таку спробу зробив Генріх Герц. Він вважав, що ефір повністю захоплюється рухомими тілами, і тому електромагнітні явища відбуваються в ефірі однаково, незалежно від того, чи тіло перебуває в стані спокою, чи рухається.

Метою досліду Майкельсона — Морлі було підтвердити (або відкинути) існування ефіру. Якби швидкість світла дорівнювала c тільки в системі, зв'язаній з ефіром, то, вимірюючи швидкість світла в довільній інерціальній системі, можна було б виявити рух цієї системи відносно ефіру та визначити швидкість цього руху. Подібно до того, як у системі відліку, що рухається відносно повітря, виникає вітер, під час руху відносно ефіру (якщо, звичайно, ефір існує) повинен бути «ефірний вітер». Земля, рухаючись по орбіті навколо Сонця, рухається і відносно гіпотетичного ефіру. Відповідно пів року «ефірний вітер» має обдувати її в одному напрямку, пів року — в іншому, і відповідно картинка на виході інтерферометра має зміщуватись то в один, то в інший бік. Проведені досліди не виявили ніякого вітру, а отже, і ніякого ефіру! Це означало, що не існує і ніякої абсолютної системи відліку.

І, як ви вже знаєте, Альберт Ейнштейн усунув цю неузгодженість між класичною механікою й електродинамікою революційним шляхом, відмовившись від класичних уявлень про абсолютний простір і час, цим самим зберігши принцип відносності та рівняння Максвелла. Так і виникла спеціальна теорія відносності, у якій закони класичної механіки розглядаються як граничний випадок руху макроскопічних тіл зі швидкостями, набагато меншими від швидкості поширення світла.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. В останній момент перед тим, як розірватись і утворити отвір, мильна бульбашка втрачає прозорість. Як це пояснити, адже в цей момент товщина плівки є найменшою? **2.** Як зміниться вигляд багатоколірної мильної бульбашки, якщо освітити її монохроматичним світлом? **3.** Кольорові яскраві смуги утворюються від краплі бензину лише тоді, коли вона падає на вологу, а не на суху поверхню асфальту. Поясніть чому. **4.** Як зміниться кількість кілець Ньютона та відстань між ними, якщо проміжок між лінзою і склом заповнити водою?



Експериментуємо

Визначте радіус кривизни плоско-опуклої лінзи в установці для спостереження кілець Ньютона. Обладнання: прилад для спостереження кілець Ньютона, штангенциркуль. Вважайте довжину хвиль зеленого світла відомою: $\lambda = 0,55$ мкм.



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Мильна бульбашка в точці, найближчій до спостерігача, здається зеленою ($\lambda = 540$ нм). Визначте мінімальну товщину плівки. Показник заломлення мильного розчину $n = 1,35$.

Дано:

$\lambda = 540 \text{ нм}$

$n = 1,35$

$d_{\min} - ?$

Розв'язання:

Від найближчої до спостерігача точки сферичної поверхні світло відбивається перпендикулярно. Відбиваючись від верхньої поверхні бульбашки, світло втрачає півхвилі, а від внутрішньої поверхні — відбивається без втрати.

Таким чином, мінімальна оптична різниця ходу задовольняє умову

$$2d_{\min} n = \frac{\lambda}{2}. \text{ Звідки } d_{\min} = \frac{\lambda}{4n}.$$

Від найближчої до спостерігача точки сферичної поверхні світло відбивається перпендикулярно. Відбиваючись від верхньої поверхні бульбашки, світло втрачає півхвилі, а від внутрішньої поверхні — відбивається без втрати. Таким чином, мінімальна оптична різниця ходу

$$\text{задовольняє умову } 2d_{\min} n = \frac{\lambda}{2}. \text{ Звідки } d_{\min} = \frac{\lambda}{4n}.$$

$$d_{\min} = \frac{540 \text{ нм}}{4 \cdot 1,35} = 100 \text{ нм}.$$

Відповідь: $d_{\min} = 100 \text{ нм}$.

Задача 2. Визначте радіус кривизни лінзи, що застосовується в установці для спостереження кілець Ньютона, якщо відстань між другим і третім світлими кільцями — 0,5 мм. Установка освітлюється світлом, довжина хвилі якого 550 нм. Спостереження ведеться у відбитому світлі.

Дано:

$\Delta r = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

$R - ?$

Розв'язання:

З $\triangle ABC$ (мал. 165) маємо:

$$|BA|^2 = |BC|^2 + |AC|^2 \text{ або}$$

$$R^2 = r_m^2 + (R - h)^2.$$

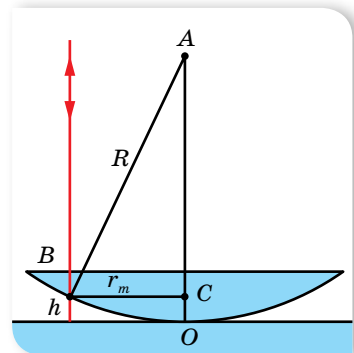
Звідки $r_m^2 - 2Rh + h^2 = 0$. Нехтуючи малою величиною h^2 порівняно з іншими доданками, отримуємо $r_m^2 = 2hn$, звідки $h = \frac{r_m^2}{2R}$.

Для m -го світлого кільця у відбитому світлі різниця ходу дорівнює $2hn + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2}$. Підставляючи в цю формулу вираз для h , визначимо

$$\text{радіус кільця } r_m^2 = (2m - 1) \frac{\lambda R}{2n}.$$

$$\text{Для } m = 2: r_2 = \sqrt{(2 \cdot 2 - 1) \frac{\lambda R}{2n}} = \sqrt{\frac{3\lambda R}{2n}}.$$

$$\text{Для } m = 3: r_3 = \sqrt{(2 \cdot 3 - 1) \frac{\lambda R}{2n}} = \sqrt{\frac{5\lambda R}{2n}}.$$



Мал. 165

$$\text{Тоді } \Delta r = r_3 - r_2 = \sqrt{\frac{5\lambda R}{2n}} - \sqrt{\frac{3\lambda R}{2n}} = \sqrt{\frac{\lambda R}{2n}}(\sqrt{5} - \sqrt{3}) \approx 0,5\sqrt{\frac{\lambda R}{2n}}.$$

Оскільки між лінзою і пластинкою — повітряний простір, то $n = 1$.

$$\text{Отже, } R = \frac{\Delta r^2}{0,125\lambda}; R = \frac{(0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2}{0,125 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 3,6 \text{ м}.$$

Відповідь: 3,6 м.

Зверніть увагу! Проаналізувавши розв'язання задачі, можна зробити узагальнювальний висновок: у відбитому світлі радіус світлого кільця визначають за формулою $r = \sqrt{\frac{2m-1}{2}} \lambda R$, радіус темного кільця $r = \sqrt{m\lambda R}$, де $m = 1, 2, 3$ — порядковий номер кільця. При $m = 0$ в центрі спостерігається темна пляма. Якщо розглядати інтерференційну картину в прохідному світлі, то темні та світлі кільця міняються місцями (у центрі спостерігається світла пляма).



Вправа 24

- Спочатку мильну плівку спостерігають у відбитому світлі через червоний світлофільтр ($\lambda = 6,7 \cdot 10^{-7}$ м). При цьому відстань між сусідніми червоними смугами становить 3 мм. Потім цю плівку спостерігають через синій світлофільтр ($\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ м). Визначте відстань між сусідніми синіми смугами. Вважайте, що форма плівки за час спостереження не змінюється.
- Біле світло, що нормально падає на мильну плівку й відбите від неї, дає у видимому спектрі інтерференційний максимум для хвилі довжиною 630 нм та ближчий до нього мінімум для хвилі 450 нм. Визначте товщину плівки.
- Тонка плівка товщиною 0,5 мкм освітлюється світлом довжиною хвилі 590 нм. Визначте колір плівки у прохідному світлі, якщо показник заломлення речовини плівки 1,48, а промені напрямлені перпендикулярно до її поверхні. Що буде відбуватися з кольором плівки, якщо її нахилити відносно променів?
- На мильний клин ($n = 1,33$) нормально до його грані падає монохроматичне світло довжиною хвилі 546 нм. Відстань між п'ятьма смугами — 2 см. Визначте заломний кут клина.
- Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає нормально до поверхні пластинки. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Радіуси двох сусідніх темних кілець — $r_n = 4$ мм і $r_{n+1} = 4,38$ мм. Радіус кривизни лінзи — 6,4 м. Визначте порядкові номери кілець та довжину хвилі падаючого світла.
- Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом ($\lambda = 600$ нм), що падає нормально до поверхні установки. Визначте товщину повітряного простору між лінзою і пластинкою в тому місці, де спостерігається п'яте темне кільце у відбитому світлі.
- Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає нормально до поверхні установки. Радіус кривизни лінзи — 15 м. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Відстань між п'ятим і двадцять п'ятим світлим кільцями — 9 мм. Визначте довжину хвилі монохроматичного світла.

8. Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає нормально до поверхні установки. Після того як простір між лінзою і скляною пластинкою заповнили рідиною, радіуси темних кілець у відбитому світлі зменшились в 1,25 разу. Визначте показник заломлення рідини.

§ 39 Дифракція світла

Явище дифракції. Ознайомимося ще з одним хвильовим явищем — дифракцією. **Дифракція** — явище огинання хвилями перешкод.

Спостерігати дифракцію світла не так легко. Річ у тім, що хвилі відхиляються від прямолінійного поширення на помітні кути лише на перешкодах, розміри яких порівняні з довжиною світлової хвилі. Тому для перешкод великих, порівняно з довжиною хвилі, дифракцію можна спостерігати на значній відстані від перешкоди.

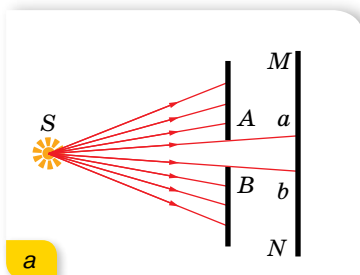
Якщо від джерела S пропустити пучок світла крізь отвір AB (мал. 166), то на екрані дістанемо світлу пляму.

Діаметр цієї плями відповідає ширині світлового пучка, що падає на екран (мал. 166, б). Зменшуючи отвір AB , ми спостерігатимемо, що зменшується і пляма, тобто звужується пучок світла. Проте, починаючи з деякого розміру отвору, подальше його зменшення спричинює збільшення плями! Водночас пляма втрачає чіткість, вона розширена й нерівномірно освітлена (мал. 166, в). На екрані з'являються світлі й темні кільця, що чергуються та займають ділянку, значно більшу, ніж це виходить з геометричних побудов, які ґрунтуються на законі прямолінійного поширення світла.

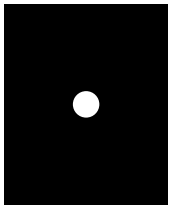
Змінюючи діаметр отвору, можна отримати в центрі дифракційної картини або темну, або світлу пляму.

На малюнку 167 показано дифракційні картини від тонкої дротини та круглого диска.

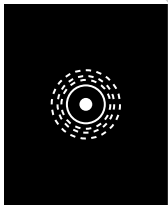
Повернімося знову до досліді Юнга (мал. 156, с. 167). Саме внаслідок дифракції з двох щілин виходили світлові конуси, які частково перекривались і утворювали інтерференційну картину.



а

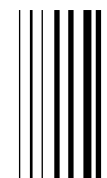


б

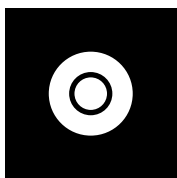


в

Мал. 166. Дослід з виявлення залежності вигляду світної плями від розмірів отвору



а



б

Мал. 167. Дифракційні картини від тонкої дротини (а) та круглого диска (б)

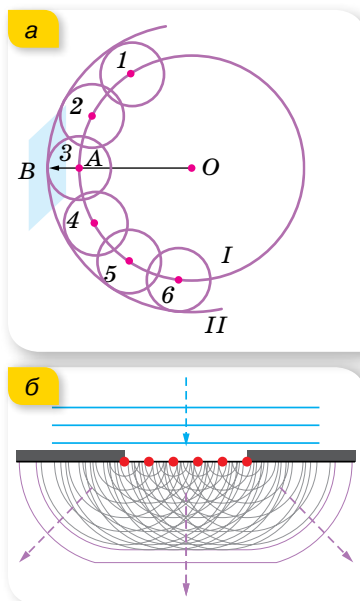
Досліджував явище дифракції Огюстен Френель. Він побудував кількісну теорію дифракції, яка дає можливість у принципі розрахувати дифракційну картину, що виникає внаслідок огинання світлом будь-яких перешкод. Цих успіхів Френель досяг, об'єднавши принцип Гюйгенса (с. 160) із припущенням про інтерференцію вторинних хвиль.

З'ясуємо, у чому суть питання. Переміщення фронту хвилі в просторі можна пояснити за принципом, сформульованим Християном Гюйгенсом 1678 р. Припустимо, що в деякий момент часу фронт сферичної хвилі, яка поширюється з точки O , займає положення I (мал. 168, а). Через деякий інтервал часу фронт займе положення II . Кожна точка фронту хвилі I є центром випромінювання вторинних елементарних хвиль 1, 2, 3, 4, ..., а поверхня II , яка охоплює їх через час Δt , дає нове положення фронту хвилі. Напрямок переміщення фронту хвилі (промінь) на малюнку 168, а показано стрілкою AB . Що далі від точки O переміщується фронт хвилі, то меншою стає кривизна його поверхні в околі точки B . Тому на великій відстані від джерела світла маленьку ділянку сферичного фронту хвилі на практиці можна вважати плоскою, а промені — паралельними.

Згідно з ідеями Френеля хвильова поверхня в будь-який момент часу є не просто обвідною вторинних хвиль (як за принципом Гюйгенса), а результатом їх інтерференції (мал. 168, б). Розгляньмо детальніше механізм проходження хвилі крізь щілину (мал. 168, б). Як тільки фронт хвилі дійде до щілини, то кожна точка простору між краями щілини стає самостійним джерелом вторинних хвиль. Новий фронт хвилі утворюється в результаті інтерференції цих вторинних хвиль. Оскільки вторинні хвилі від крайніх точок щілини мають вигнуту поверхню, то новоутворений фронт хвилі розширюється та деформується. Промені, проведені перпендикулярно до фронту хвилі, показують напрямок поширення хвилі.

Метод зон Френеля. Ознайомимось у дещо спрощеному вигляді з методом зон Френеля та застосуємо його до пояснення дифракції світла на круглому отворі (мал. 169, с. 180).

Нехай на отвір від джерела падає сферична хвиля. Згідно з методом зон, відкритий хвильовий фронт розбивається на кільцеві зони так, що віддалі від країв кожної зони до точки спостереження P відрізняються на $\frac{\lambda}{2}$ (мал. 169, с. 180). У цьому разі коливання, які приходять в точку P від аналогічних точок двох сусідніх зон, будуть накладатися з протилежними



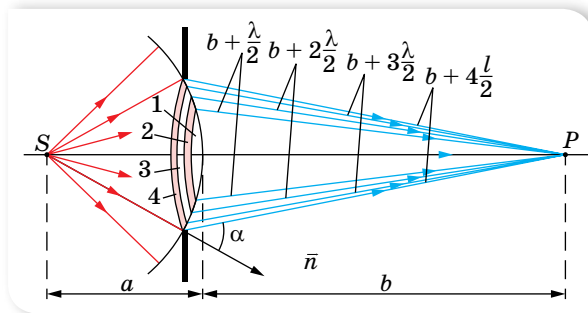
Мал. 168. Ілюстрації принципів: а — Гюйгенса; б — Гюйгенса-Френеля

фазами. Якщо в отворі діаграми вкладається парне число зон Френеля, то в центрі екрана спостерігатиметься послаблення інтенсивності світла (темна пляма), якщо непарне їх число — підсилення світла (світла пляма).

Радіус k -ї зони Френеля визначається як $r_k = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} k\lambda$, де a — радіус

k -го сферичного монохроматичного хвильового фронту (поверхні), що поширюється від джерела S до точки P на екрані; b — відстань від вершини хвильової поверхні до точки P ; $k = 1, 2, 3 \dots$ — порядковий номер зони Френеля; λ — довжина хвилі. Кількість зон Френеля, що вміщується в

круглому отворі радіусом R , дорівнює $k = \frac{R^2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$.



Мал. 169. Метод зон Френеля

Метод зон Френеля можна застосувати й у випадку дифракції від щілини. У цьому разі хвильовий фронт необхідно розбити на зони Френеля у вигляді вузеньких смужок, паралельних краю щілини.

У принципі можна виготовити таку пластинку, яка перекривала б усі парні або непарні зони. Тоді всі хвилі приходять у точку P у фазі й підсилюватимуть одна одну (хвилі, які приходять у протифазі, перекрито). Дістаємо прилад аналогічний лінзі.

Дифракція на щілинах. Щоб дифракційна картина була більш вираженою, світло пропускають не крізь одну чи дві щілини, а крізь кілька паралельних щілин. У цьому разі, крім явища дифракції, відбувається ще і явище інтерференції, оскільки промені, які йдуть від усіх щілин, будуть когерентними. Відповідний пристрій називають **дифракційною ґраткою** (мал. 170). Це тонка пластинка, на яку нанесено паралельні штрихи з проміжками (щілинами) між ними.



Мал. 170. Дифракційна ґратка

Ширину щілини зі штрихом позначають d і називають **сталю ґратки**, або **періодом ґратки** (мал. 171).

Паралельний монохроматичний пучок хвиль, перпендикулярних до площини ґратки,

пройшовши крізь щілини, завдяки дифракції буде розбіжним пучком променів, що поширюватимуться в усіх напрямках. При цьому підсилення цих хвиль унаслідок інтерференції можливе тільки в певних напрямках. З'ясуємо, в яких саме.

Нехай на ґратку падає плоска монохроматична хвиля довжиною λ . Оптична різниця ходу між хвилями від країв сусідніх щілин дорівнює довжині відрізка AC (мал. 171), який можна визначити з трикутника ABC : $AC = dn \sin \varphi$. Як відомо, якщо на цьому відрізку вміщується парне число півхвиль (або ціле число довжин хвиль), то хвилі від усіх щілин, додаючись, підсилюють одна одну, і в точці M спостерігатиметься максимум інтерференції. Отже, умовою максимуму є рівність $dn \sin \varphi = k\lambda$.

Оскільки для повітря $n = 1$, то отримане співвідношення записують так: $d \sin \varphi = k\lambda$.

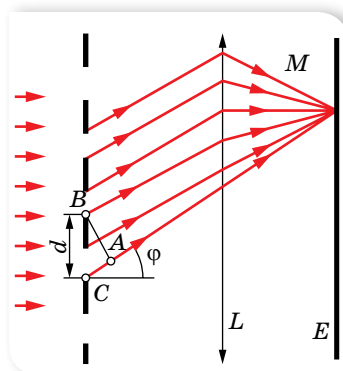
Зазначимо, що на малюнку 171 показано інтерферуючі промені, які йдуть від краю кожної щілини. Зрозуміло, що промені, які йдуть від будь-якої іншої точки щілини (наприклад, із центра) інтерферують з аналогічними променями від інших щілин. Що більше щілин має ґратка і ближче вони розміщені одна до одної, то яскравіші максимуми й ширші мінімумами вони розділені.

Дифракційний спектр. Утворену на екрані картину називають *дифракційним спектром* (мал. 172, с. 182). Кожному значенню коефіцієнта k відповідає своя лінія (максимум освітленості), тому його ще називають *порядком*. Між максимумами розміщуються мінімуми освітленості.

Якщо $k = 0$, то по центру ґратки в напрямку $\varphi = 0$ спостерігається світла смуга — максимум нульового порядку — для будь-якої довжини хвилі. З обох боків від нього на однакових відстанях видно менш яскраві максимуми першого порядку, потім ще менш яскраві максимуми другого порядку і т. д. Усі ці максимуми розміщені на однакових відстанях один від одного. Якщо на цю саму ґратку направити монохроматичне світло більшої довжини хвилі, то максимуми розмістяться рідше, тобто для того самого значення k максимум буде лежати далі від центрального.

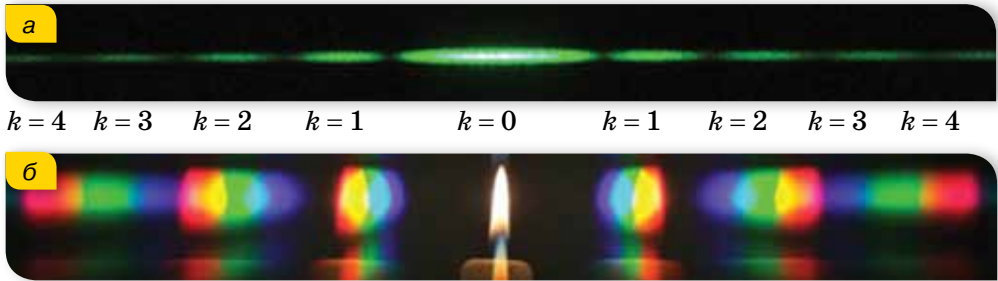
Оскільки місце максимумів (крім центрального, що відповідає $k = 0$) залежить від довжини хвилі, то ґратка розкладає біле світло в кольоровий спектр (мал. 172, б, с. 182). З обох боків від центральної білої лінії максимуми розміщуються в порядку зростання довжин хвиль (від фіолетового до червоного).

З формули $d \sin \varphi = k\lambda$ видно, що для вимірювання довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки треба виміряти тільки кут φ для даного значення k , оскільки d завжди відоме. Кут можна виміряти



Мал. 171. Проходження хвиль крізь дифракційну ґратку

з великою точністю, отже, велику точність буде забезпечено і для визначення довжини хвилі. Зазначимо: що меншим є період ґратки, то точнішим буде результат вимірювання λ .



Мал. 172. Дифракційні спектри: а — монохроматичний; б — білого світла

Дифракційну ґратку використовують для визначення складу світлового випромінювання будь-якої природи. Зі збільшенням загальної кількості щілин у ґратці зменшується ширина максимумів на екрані, що дає змогу бачити на ньому як окремі смуги максимуми променів з меншою різницею їхніх довжин хвиль. Говорять, що збільшення загальної кількості щілин у ґратці підвищує її *роздільну здатність*. Нині виготовляють ґратки, в яких на одному міліметрі нанесено понад тисячу штрихів, а загальна їх кількість у ґратці досягає ста тисяч.

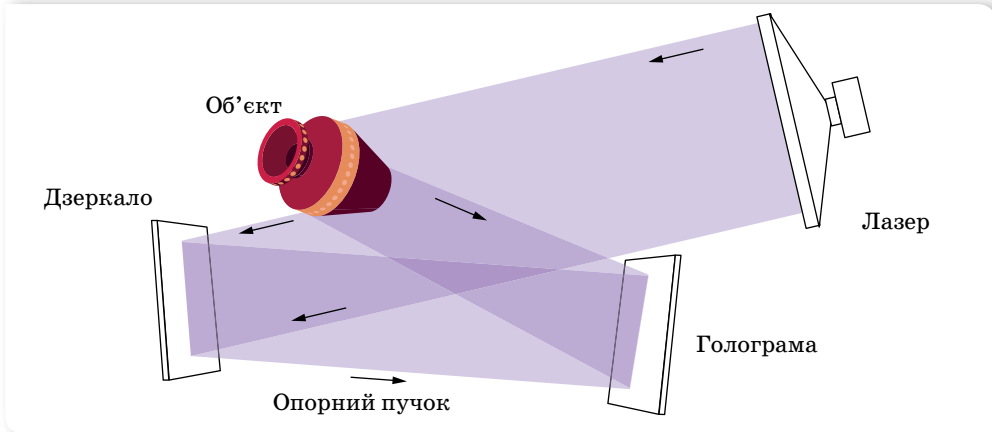
Цікаву картину можна побачити на екрані, якщо на шляху світлових променів помістити дві однакові схрещені ґратки, тобто повернуті так, що їхні щілини взаємно перпендикулярні. Ми побачимо окремі світні плями. Коли періоди решіток різні й розміщені вони не впритул, то утворюється складніша система плям. Виявляється, що, аналізуючи розміщення плям на екрані в таких випадках, можна визначити відстань між ґратками та їх період. Це дало змогу дізнатися про розміщення атомів у кристалічній ґратці багатьох твердих тіл.

Голографія та умови її спостереження. Голографічний метод Денісюка. У середині ХХ ст. (1947) Денніс Габор, англійський фізик, шукаючи способи підвищення чіткості зображення електронного мікроскопа, відкрив новий спосіб запису зображення — голографію. Якщо фотографія буквально означає «світлозапис», то голографія означає «повний запис» — спеціальний спосіб записування й відтворення просторового (об'ємного) зображення.

Основні принципи голографії, сформульовані Деннісом Габором, не знаходили свого практичного застосування до початку 1960-х років, коли було винайдено лазер. Застосувавши лазер і вдосконаливши початковий голографічний метод, американці Еммет Лейт і Юріс Упатнієкс отримали голограми, які відображали реальні тривимірні зображення. Після цього метод голографії почав швидко розвиватись.

Розгляньмо в загальних рисах принцип голографії. Для *запису голографії* (мал. 173) пучок світла від лазера ділять на дві частини, причому

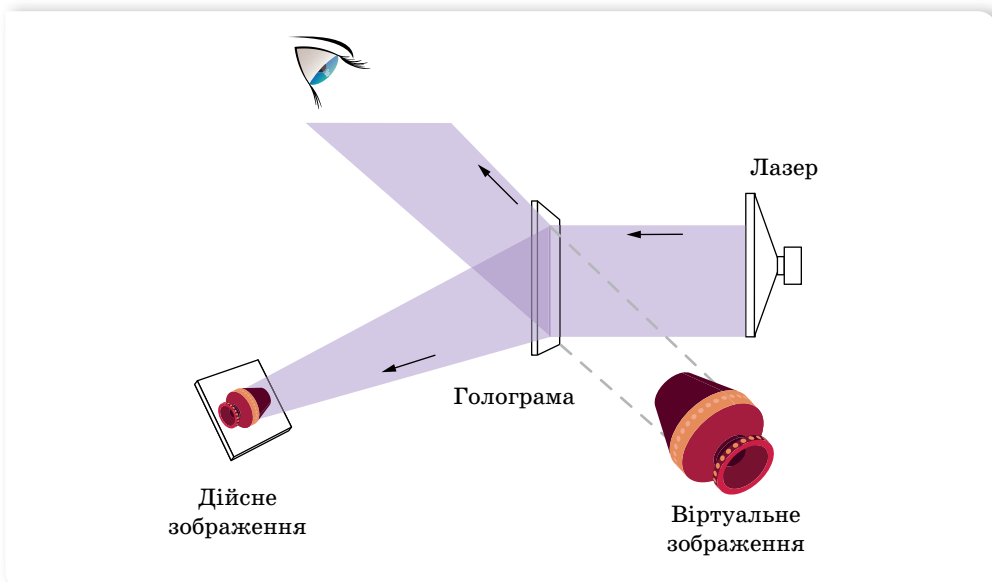
одна його частина відбивається дзеркалом на фотопластинку (опорна хвиля), а друга частина потрапляє на фотопластинку після відбивання від предмета (предметна хвиля).



Мал. 173. Схема запису голографічного зображення

Опорна і предметна хвилі когерентні й, накладаючись, утворюють на фотопластинці інтерференційну картину. Після проявлення пластинки отримуємо голограму.

Для відтворення зображення по голограмі її встановлюють у те саме положення, у якому її отримали (мал. 174). Голограму освітлюють опорним пучком світла від того самого лазера (другу частину лазерного пучка перебивають діафрагмою). Унаслідок дифракції світла на



Мал. 174. Схема відтворення голографічного зображення

інтерференційній структурі голограми відтворюється копія предметної хвилі, яка утворює об'ємне уявне зображення предмета, розташоване в тому самому місці, де перебував предмет під час голографування. Це зображення здається настільки реальним, що виникає бажання доторкнутись до нього рукою.

Таким чином, суть голографії полягає в тому, що фотографується розподіл інтенсивності світла в інтерференційній картині, яка виникає внаслідок накладання відбитих від об'єкта хвиль і когерентних їм так званих опорних хвиль відомої фази. Подальша дифракція світла на зареєстрованому розподілі почорнінь на фотографії відновлює відбиті від об'єкта хвилі та дає змогу їх спостерігати за відсутності об'єкта спостереження.

Розглянутий спосіб одержання голографічного зображення називають голографічним методом Денисюка. Він був запропонований радянським дослідником Юрієм Денисюком. У цьому методі запису фотопластинку встановлюють між об'єктом і джерелом світла (лазером), тому його ще називають методом запису голограми на зустрічних пучках.

Голографія, на відміну від фотографії, дає більшу інформацію про досліджуваний предмет. Отримавши голографічне зображення, наприклад, мікрооб'єкта через мікроскоп, можна його детально вивчати «з усіх боків». На фотопластинці розміром 32×32 мм голографічним методом можна записати текст книжки обсягом понад тисячу сторінок.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. У чому полягає явище дифракції світлових хвиль і як його можна спостерігати?
2. Чи можливе явище інтерференції та дифракції з ультрафіолетовими, інфрачервоними й рентгенівськими променями?
3. Якими уявленнями Френель доповнив принципи Гюйгенса?
4. Як зміниться: а) положення максимумів; б) інтенсивність центрального максимуму; в) ширина максимумів, — якщо половину дифракційної ґратки закрити непрозорою площиною так, щоб кількість штрихів зменшилась удвоє? Як зміниться вигляд спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?



Експериментуємо

1. За допомогою лазерної указки визначте густину доріжок (кількість доріжок, що припадає на 1 мм уздовж радіуса диска) на компакт-дисківі. Обладнання: лазерна указка з відомою довжиною хвиль випромінювання, компакт-диск, лінійка, мірна стрічка.
2. Порівняйте два способи визначення періоду дифракційної решітки. (Зазначений на решітці період попередньо заклейте непрозорим скотчем або лейкопластиром). Вважайте, що довжина хвиль зеленого світла дорівнює $0,55$ мкм. Обладнання для першого способу: прилад для спостереження дифракції світла, дифракційна решітка з невідомим періодом. Обладнання для другого способу: дифракційна решітка з невідомим періодом, дифракційна решітка з відомим періодом, екран зі щільною завширшки $0,5$ – 1 мм, лінійка.

Приклади розв'язування задач

Задача. На дифракційну ґратку з періодом $0,01$ мм падає біле світло. Яка ширина спектра першого порядку, якщо екран розміщено на відстані 3 м від ґратки? Довжина хвилі фіолетового кольору $\lambda_1 = 380$ нм, а червоного — $\lambda_2 = 760$ нм.

Дано:

$$\lambda_1 = 380 \text{ нм} = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\lambda_2 = 760 \text{ нм} = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$d = 0,01 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$AO = L = 3 \text{ м}$$

$$k = 1$$

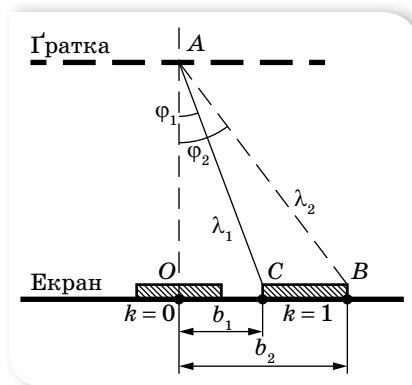
$$\Delta b = ?$$

Розв'язання:

Умова дифракційних максимумів для червоних хвиль $d \sin \varphi_1 = k\lambda_1$, а для фіолетових — $d \sin \varphi_2 = k\lambda_2$.

Для малих кутів φ_1 і φ_2 можна вважати, що

$$\sin \varphi_1 \approx \text{tg } \varphi_1 = \frac{k\lambda_1}{d} \text{ і } \sin \varphi_2 \approx \text{tg } \varphi_2 = \frac{k\lambda_2}{d}.$$



Мал. 175

З малюнка 175 видно, що $\Delta b = L(\text{tg } \varphi_2 - \text{tg } \varphi_1)$ або $\Delta b = \frac{Lk}{d}(\lambda_2 - \lambda_1)$.

Після підстановки даних отримуємо $\Delta b = 0,114$ м.

Відповідь: ширина спектра першого порядку — $0,114$ м.

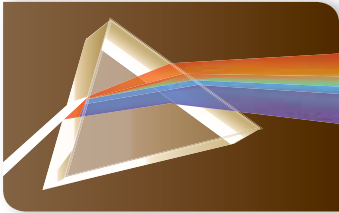


Вправа 25

1. Визначте кут відхилення променів зеленого світла ($\lambda = 550$ нм) у спектрі першого порядку, отриманого за допомогою дифракційної ґратки, період якої $0,02$ мм.
2. На дифракційну ґратку, що має період 4 мкм, нормально падає монохроматична хвиля. Оцініть довжину хвилі, якщо кут між спектрами другого і третього порядків — $2^\circ 30'$. Кути відхилення вважайте малими.
3. Світло нормально падає на дифракційну ґратку. Найменший кут відхилення, за якого суміщаються лінії довжинами хвиль 656 нм і 410 нм, дорівнює 41° . Визначте період дифракційної ґратки.
4. На плоску дифракційну ґратку нормально падає пучок світла. Під кутом 20° видно червону (669 нм) лінію спектра. Визначте період ґратки, якщо під цим само кутом видно і синю (446 нм) лінію в спектрі вищого порядку. Найбільший порядок спектра, за якого видно червону лінію, дорівнює 5 .

§ 40 Дисперсія світла

Явище дисперсії світла. Якщо в темній кімнаті скляну призму освітити пучком світла від лампи розжарювання, то, придивившись, можна побачити, що у склі на межі з повітрям пучок білого світла розщепився на декілька кольорових пучків (мал. 176).



Мал. 176. Розкладання білого світла призмою

Це явище вперше досліджував Ісаак Ньютон у 1666 р. й назвав його *дисперсією* (від лат. *dispergo* — розкидаю), а кольорову гаму — *спектром* (від лат. *spectrum* — марево).

Замість скла можна використовувати лід, органічне скло та інші прозорі для світла матеріали. Що більший показник заломлення матеріалу, то яскравіше виражене явище дисперсії. Середовища, у яких спостерігається явище дисперсії, називають *диспергуючими*.

З'ясуємо, у чому суть явища дисперсії. У вакуумі всі світлові хвилі, так само як і електромагнітні хвилі інших діапазонів довжин хвиль (частот), поширюються з однаковою швидкістю $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Під час перетину

межі поділу середовищ швидкість електромагнітної хвилі змінюється, унаслідок чого відбувається її заломлення. Причому *кожна монохроматична хвиля має свою певну швидкість поширення в середовищі*. Пояснення цього дає теорія дисперсії Гендріка Антона Лоренца на основі електромагнітної теорії світла й електронної будови речовини. Під час проходження електромагнітної хвилі крізь діелектрик на кожний електрон діє електрична сила, під дією якої вони здійснюють коливання. Коливання електронів є джерелом вторинних хвиль, які накладаються на первинні хвилі. Вторинні хвилі внаслідок інерції електронів дещо запізнюються в часі та, накладаючись на первинні хвилі, дають результуючі хвилі з відставанням за фазою порівняно з первинними. Зсув фаз між первинною та результуючою хвилями залежить від частоти коливань напруженості електромагнітного поля E , тобто світло різних довжин хвиль (частот) матиме різні швидкості поширення в речовині, а отже, й різні значення показника заломлення, оскільки показник заломлення визначається як $n = \frac{c}{v}$.

Із закону заломлення світла $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v}$ випливає, що $\sin \gamma = \frac{v \sin \alpha}{c}$.

Оскільки швидкість поширення світла v в середовищі для кожної монохроматичної хвилі має своє певне значення, то для кожної монохроматичної хвилі $\sin \gamma$ і відповідно кут заломлення γ також набуватимуть певного значення.

Нині термін «дисперсія», який спочатку було введено для пояснення розкладання білого світла в спектр, має ширший зміст. У теорії хвиль

термін «дисперсія хвиль» означає залежність фазової швидкості гармонічної хвилі від частоти (довжини) хвилі та, як наслідок, зміну форми довільних (негармонічних) збурень у процесі їх поширення.

Під *дисперсією світла* розуміють сукупність оптичних явищ, зумовлених залежністю діелектричної проникності речовини (а відповідно, і показника заломлення) від частоти (довжини) світлової хвилі.

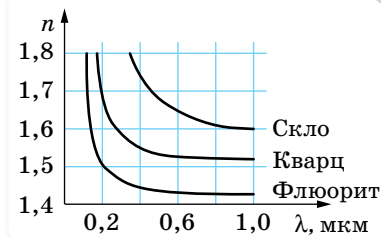
Оскільки колір світла визначається частотою світлової хвилі, то вживають і таке визначення: *дисперсія світла* — це залежність показника заломлення світла (а отже, і швидкості) від його кольору.

Як правило, показник заломлення світла зростає зі збільшенням частоти світла (*нормальна дисперсія*). Проте поблизу смуг поглинання світла речовиною спостерігається обернене явище, так звана *аномальна дисперсія*, коли зі збільшенням частоти світла (зменшенням довжини хвилі) показник заломлення світла зменшується.

Нормальна дисперсія видимих променів спостерігається в усіх прозорих безбарвних діелектриках: кварці, склі, воді тощо. Мірою дисперсії, тобто величиною, що показує, на скільки розходяться за заломлення промені в спектрі, служить так звана середня дисперсія, яка є різницею показників заломлення для двох довжин хвиль: голубої та червоної ($n_{\text{гол}} - n_{\text{чер}}$).

Графічну залежність показника заломлення від довжини хвилі для деяких речовин наведено на малюнку 177.

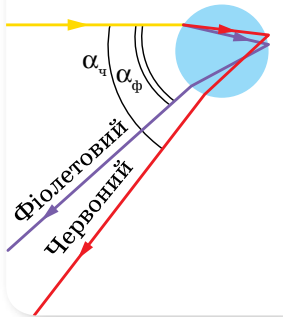
З графіків видно, що залежність $n = f(\lambda)$ має нелінійний характер і зі збільшенням довжини хвилі показник заломлення зменшується. Короткі хвилі заломлюються сильніше, ніж довгі. Іншими словами, червоний колір у речовині поширюється з найбільшою швидкістю, тому менше заломлюється, а промінь фіолетового кольору поширюється з найменшою швидкістю і найбільше заломлюється.



Мал. 177. Графічна залежність показника заломлення від довжини хвилі для деяких речовин

Неперервний спектр світла. Світло Сонця, лампи розжарювання, свічки розкладається призмою в суцільний (неперервний) спектр. Це свідчить про те, що ці тіла випромінюють хвилі всіх можливих частот (довжин) хвиль.

З кривої дисперсії для скла (мал. 177) видно, що в області коротких хвиль показник заломлення скла зі зміною довжини хвилі змінюється швидко, а в області довгих хвиль — повільно. Тому дисперсійний спектр білого світла стиснутий у червоній частині й розтягнутий у фіолетовій. Як відомо, дифракційна ґратка також розкладає біле світло у спектр, але утворений нею спектр, окрім кольорових смужок, має ще й чорні. До того ж дифракційний спектр (мал. 172, с. 182) відрізняється від дисперсійного ще й тим, що в ньому кольори розміщуються в порядку зростання довжин хвиль, і він рівномірно розтягнутий на всіх своїх ділянках.



Мал. 178.
Заломлення світла
в краплині води

Розкладанням білого світла на кольори внаслідок заломлення пояснюється виникнення веселки. Веселку видно тоді, коли спостерігач дивиться в напрямку від Сонця і в повітрі є водяні краплі (мал. 178).

Для певного кута падіння променів на краплю на межі вода—повітря всередині краплі відбувається повне відбивання. Оскільки фіолетові промені заломлюються більше, ніж червоні, після виходу з краплі вони розбігаються: червоні промені утворюють з падаючим променем кут близько 43° , а фіолетові — близько 41° .

Колір. Знаючи, що біле світло має складну структуру, можна пояснити велику різноманітність кольорів у природі. Якщо предмет, наприклад, аркуш паперу, відбиває всі промені різних кольорів, то він здаватиметься білим. Трава й листя дерев здаються нам зеленими тому, що з усіх падаючих на них сонячних променів вони відбивають лише зелені, поглинаючи решту. Якщо подивитись на траву крізь червоне скло, яке «пропускає» тільки червоні промені, то трава здаватиметься майже чорною.

Відчуття того чи того кольору, яке виникає в очах спостерігача, залежить від частоти світлової хвилі, а не від її довжини. Унаслідок того, що під час переходу електромагнітної хвилі з одного середовища в інше її частота лишається незмінною, колір, який сприймається людиною в повітрі та, наприклад, у воді, буде однаковим.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. Чому біле світло, проходячи крізь призму, розкладається в кольоровий спектр?
2. Яке світло буде поширюватися в речовині призми (склі) з більшою швидкістю — червоне чи фіолетове?
3. Подивіться крізь призму на білий аркуш паперу, коли її заломне ребро паралельне одному з боків аркуша. Як розташовані кольорові смуги відносно аркуша? Чому?

§ 41

Поляризація світла

Природне і поляризоване світло. Дослідимо ще одну властивість світлових хвиль — їх поляризацію. З дослідів Герца (с. 149–150) встановлено, що електромагнітні хвилі поперечні. Коливання зарядів у передавальній антені відбуваються вздовж її осі. Унаслідок цього в електромагнітній хвилі вектор напруженості електричного поля розташований у тій самій площині, що й вісь антени, а вектор індукції магнітного поля — у перпендикулярній площині.

Напрямок векторів \vec{E} і \vec{B} залишається незмінним протягом усього часу поширення хвилі.

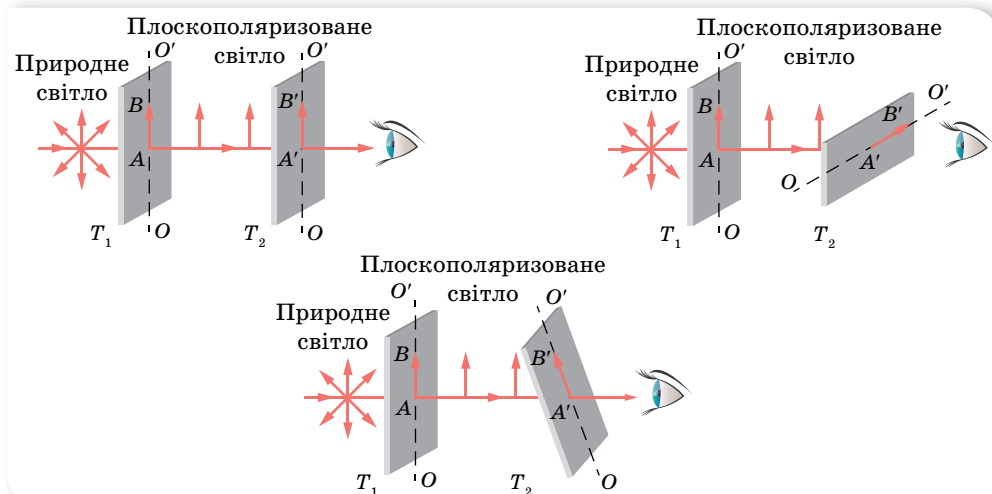
Хвилю, вектори \vec{E} і \vec{B} якої у процесі її поширення здійснюють коливання в певній площині, називають **плоскополяризованою**.

Світло — також електромагнітна хвиля, тому можна очікувати на поляризацію і світлової хвилі. Ураховуючи те, що у взаємодії світлової хвилі з речовиною вирішальну роль відіграє вектор напруженості електричного поля, а також для спрощення зображення світлової хвилі на малюнках надалі ми будемо говорити про коливання лише вектора напруженості.

Оскільки світло випромінюють атоми, кількість яких у речовині величезна, то зрозуміло, що таке світло не буде поляризованим (коливання вектора \vec{E} здійснюються в усіх можливих напрямках у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі). Проте бувають випадки, коли світлова хвиля буде поляризованою (чи частково поляризованою).

Поляризація світла — стан світлової хвилі, за якого певні напрямки коливань електричного вектора \vec{E} переважають над іншими.

Методи отримання поляризованого світла. Візьмемо дві однакові прямокутні пластинки з турмаліну, вирізані так, що одна зі сторін прямокутника збігається з певним напрямком усередині кристала, який називають оптичною віссю. Розмістимо другу пластинку так, щоб їхні осі збігалися за напрямком, і пропустимо крізь складену пару пластинок вузький пучок світла від якогось джерела або від Сонця. Під час обертання першої пластинки навколо пучка (друга пластинка нерухома), виявимо, що світловий пучок слабшатиме, а після повороту пластинки на 90° він зовсім зникне (мал. 179).



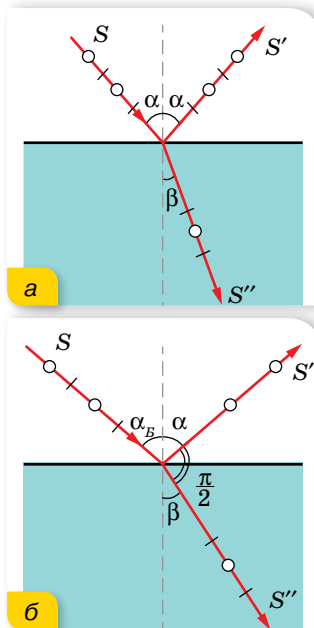
Мал. 179. Схема поляризації хвилі

Цей результат можна пояснити так. У природному світлі вектор напруженості електричного поля має довільні напрямки. Проходження природного світла крізь першу пластинку турмаліну приводить до того, що з усіх напрямків поперечних коливань відбираються лише ті, які пропускає турмалін. Тому світло, що пройшло крізь турмалін, є сукупністю поперечних коливань одного напрямку, який визначено орієнтацією осі пластинки турмаліну. Таке світло називають *плоскополяризованим*, а кристал турмаліну — *поляризатором світла*. Другий кристал турмаліну є аналізатором: він майже повністю пропускає поляризоване світло, що збігається з площиною поляризації. Якщо ж аналізатор повернути на 90° , то вже поляризоване світло він практично не пропускати.

Поляризація властива тільки поперечним хвилям. Якщо хвилі поляризуються, то вони є поперечними. Повздовжні хвилі не поляризуються. Окрім турмаліну, такі властивості має кварцова пластинка, вирізана в певний спосіб із кристала. Прозорі плівки, що можуть бути поляризаторами й аналізаторами світла, називають поляроїдами відтоді, як засновник компанії «Polaroid» Едвін Ленд (1909–1991, США) у 1929 р. винайшов і випустив перші зразки поляризаційних лінз.

Поляризація внаслідок відбиття й заломлення світла. Кут Брюстера.

Отримати поляризоване світло з неполяризованого можна ще одним способом — відбиванням і заломленням.



Мал. 180. Поляризація відбитої хвилі з довільним кутом падіння (а) і при падінні під кутом Брюстера (б)

Коли світло падає на поверхню прозорої речовини (наприклад, води) під довільним кутом, крім прямого, відбитий промінь виявляється плоскополяризованим переважно паралельно відбивній поверхні. Це добре знають рибалки, які використовують поляроїдні окуляри, щоб уникнути відблисків води.

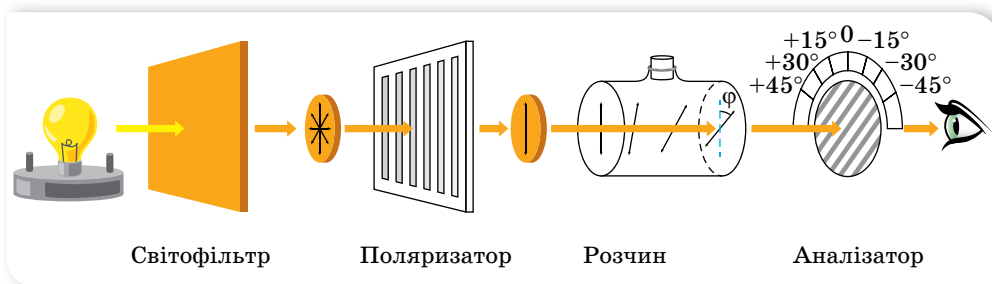
Вивчення цього явища показало, що в прозорих речовинах заломлений промінь завжди поляризується тільки частково, а для відбитого променя є один напрямок, у якому він поляризується повністю. На малюнку 180 схематично зображено промінь, який падає на межу поділу повітря й рідини під кутом α . У відбитому промені більше коливань, паралельних поверхні поділу (зображено кружечками), а в заломленому промені — перпендикулярних до них коливань (зображено рисочками). Ступінь поляризації цих променів залежить від кута падіння й показника заломлення. Установлено, що відбитий промінь повністю поляризується тоді, коли кут між відбитим і заломленим променями дорівнює 90° . Позначивши в цьому разі кут падіння α_B , запишемо закон заломлення світла:

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B \right)} = \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \operatorname{tg} \alpha_B = n.$$

Співвідношення $\operatorname{tg} \alpha_B = n$ називають **законом Брюстера**, або умовою повної поляризації.

Використання поляризованого світла. Під час фотографування великих гладеньких поверхонь (наприклад, води) з'являються так звані відблиски — дзеркально відбиті світлові пучки, які істотно погіршують якість зображення. Щоб позбутися цих відблисків, на об'єктив фотоапарата надівають спеціальні фільтри. Якщо відбите світло є повністю поляризованим, то, повертаючи поляризаційний фільтр, можна встановити таке положення, за якого світло відблисків не потраплятиме в об'єктив фотоапарата.

Установлено також, що під час проходження плоскополяризованого світла крізь деякі розчини площина його поляризації повертається. Наприклад, на малюнку 181 світло проходить крізь поляризатор, а потім — крізь розчин цукру в кюветі. Полярійд-аналізатор за кюветою, розташований під кутом 90° до поляризатора, мав повністю загасити світло, але цього не відбулося. Проте, якщо аналізатор повернути ще на деякий кут φ , то світло гаситься. Це означає, що розчин у кюветі повертає на кут φ площину поляризації. Такі речовини називають оптично активними.



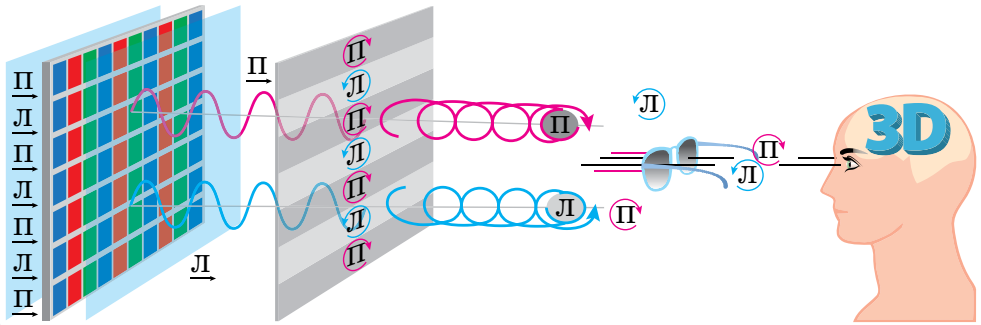
Мал. 181. Принцип дії цукрометра

Оптична активність речовин зумовлена асиметрією молекул, які мають форму спіралі, як, наприклад, молекули деяких білків. Деякі речовини (цукор, декстроза, *D*-глюкоза) повертають площину поляризації праворуч, а деякі речовини (амінокислоти, білки) — ліворуч. Кут повороту φ пропорційний концентрації розчину. Тому цю властивість використовують для виготовлення спеціальних пристроїв — цукрометрів, за допомогою яких визначають вміст цукру.

Спеціальні поляризаційні окуляри використовують під час перегляду стереофільмів у кінотеатрах. Отримати зображення у 3D-форматі можна й на домашньому комп'ютері за допомогою відповідних екранів. Вивчаючи властивості рідкокристалічних екранів, ми зазначали, що їм притаманна певна властивість, зумовлена самою технологією отримання зображення, — вони дають поляризоване світло.

Завдяки цьому, використовуючи тонкі смужки плівочок-поляризаторів, можна створювати парні та непарні ряди пікселів, що мають різний напрямок поляризації. Лінзи окулярів є поляризаторами, у яких площини

ни поляризації повернуті так, що крізь одну лінзу видно парні ряди, а крізь іншу — непарні. Таким чином створюють зображення, які видно окремо лівим оком і правим оком. Мозок людини зіставляє два зображення й «бачить» його об'ємним (мал. 182).



Мал. 182. Механізм утворення зображення у 3D-форматі за допомогою поляризованого світла



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Чим відрізняється поляризоване світло від природного? Як отримують поляризоване світло? 2. У чому суть закону Брюстера? 3. Де на практиці застосовують явище поляризації світла?



Перевірте себе (§ 36–41)



- Для роботи за письмовим столом освітленість його поверхні має бути не меншою від 50 лк. Сила світла лампи дорівнює 100 кд. Визначте висоту, на якій треба розмістити лампу над поверхнею стола.

А 0,7 м	В 1,0 м
Б 1,4 м	Г 0,5 м
- Визначте довжину хвиль фіолетового світла, частота якого $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц, у склі, де їхня швидкість — $2,22 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

А $3 \cdot 10^{-7}$ м	В $4,4 \cdot 10^{-7}$ м
Б $4 \cdot 10^{-7}$ м	Г $3,6 \cdot 10^{-7}$ м
- Вода освітлюється жовтим світлом довжиною хвилі 600 нм. Визначте довжину хвилі у воді та колір світла, який бачитиме плавець, що пірнув.

А 610 нм; жовтий	В 460 нм; жовтий
Б 810 нм; червоний	Г 460 нм; синій
- Різниця ходу двох когерентних хвиль до точки на екрані дорівнює 900 нм. Довжина хвиль — 0,6 мкм. Укажіть явище, що спостерігатиметься в цій точці.

- А інтерференційний максимум
 Б інтерференційний мінімум
 В може бути і максимум, і мінімум
 Г дифракційна картина
5. У деяку точку простору приходять дві когерентні світлові хвилі з різницею ходу 2,5 мкм. Визначте довжину хвилі, якщо в даній точці спостерігається інтерференційний максимум п'ятого порядку.
- А 550 нм
 Б 500 нм
 В 450 нм
 Г 600 нм
6. Дифракційна ґратка, період якої 0,01 мм, освітлюється світлом довжиною хвилі 500 нм. Визначте відстань між максимумами нульового й першого порядку на екрані, що віддалений від ґратки на 3 м.
- А 10 см
 Б 12 см
 В 15 см
 Г 8 см
7. Лампу, що перегоріла, замінили іншою, сила світла якої 35 кд. Як змінилася освітленість поверхні, якщо сила світла першої лампи була 100 кд, а нову лампу вдвічі наблизили до поверхні?
8. Сонце перебуває на кутовій висоті 10° над горизонтом. Порівняйте освітленості вертикального та горизонтального майданчиків однакових розмірів, розміщених поряд.
9. На мильну плівку ($n = 1,33$) падає біле світло під кутом 45° . За якої найменшої товщини плівки відбиті промені будуть забарвлені в жовтий колір ($\lambda = 0,6$ мкм)?
10. Радіуси двох сусідніх світлих кілець Ньютона, які спостерігаються в прохідному світлі, дорівнюють 4 мм і 4,9 мм. Визначте порядкові номери кілець, якщо радіус кривизни лінзи 10 м.

§ 42

Відбиття світла. Дзеркала

Закони геометричної оптики. Пригадуєте, у 9 класі, окрім терміну «світло», ми ще використовували терміни «світловий промінь» і «світловий пучок»? Світловий промінь — уявна лінія, уздовж якої відбувається перенесення світлової енергії. Світловий промінь — суто геометричне поняття, його застосовують для схематичного зображення світлових пучків. У реальному житті маємо справу з пучками світла, а от для схематичного зображення світлових пучків використовують світлові промені.

Світловий промінь є головним поняттям геометричної оптики, в основу якої покладено низку простих законів, установлених експериментально. Це:

- ▶ **закон прямолінійного поширення світла** — в однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно;
- ▶ **закон незалежного поширення світла** — окремі пучки світла не впливають один на один і поширюються незалежно;
- ▶ **закони відбиття і заломлення світла.**

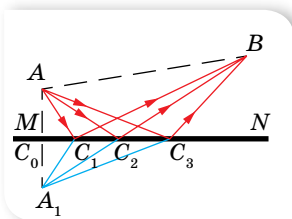
Узагальненням усіх законів геометричної оптики є принцип Ферма, або принцип найменшого часу: поширення світла з однієї точки до іншої відбувається шляхом, що потребує найменшого часу порівняно з іншими шляхами між цими точками.

Геометрична оптика є граничним випадком хвильової оптики. Тобто це розділ оптики, в якому вивчаються закони поширення світла в прозорих середовищах і принципи побудови зображень в оптичних системах без урахування хвильових властивостей світла. Але те, що хвильові властивості світла не враховуються, не означає, що закони геометричної оптики не можна пояснити згідно із хвильовою теорією.

Уявлення та закони геометричної оптики є правильними лише до тієї міри, до якої можна нехтувати явищами дифракції та інтерференції хвиль.

Закон відбиття світла. Закон відбиття справджується для хвиль будь-якої природи. Нагадаймо його:

падаючий промінь, відбитий промінь та перпендикуляр до межі поділу середовищ, проведені у точці падіння, лежать в одній площині; кут відбиття дорівнює куту падіння.

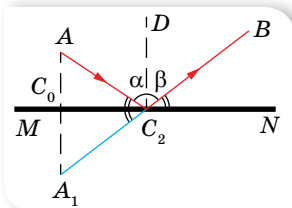


Мал. 183.

До пояснення закону відбиття

Доведемо правильність закону відбиття світла за допомогою принципу Ферма. Нехай MN — межа поділу двох середовищ (мал. 183). Промінь світла виходить з точки A й після відбиття від поверхні потрапляє в точку B . По якому шляху здійснюється цей перехід?

Намалюємо декілька можливих шляхів: AC_1B , AC_2B та AC_3B . Завдяки тому, що світло як до, так і після відбиття поширюється в однорідному середовищі, мінімальному часу відповідає шлях мінімальної довжини. Знайдемо його. Для цього побудуємо точку A_1 , симетричну до точки A відносно поверхні MN . Зрозуміло, що із цього випливає таке: $A_1C_0 = AC_0$ та $AA_1 \perp MN$. З'єднавши точки C_1 , C_2 і C_3 з точкою A_1 , легко впевнитися в тому, що $AC_1 = A_1C_1$, $AC_2 = A_1C_2$ і $AC_3 = A_1C_3$. Тому, обчислюючи шлях променя з точки A в точку B , ми можемо замінити відрізок AC_1 відрізком A_1C_1 , відрізок AC_2 — відрізком A_1C_2 і відрізок AC_3 відрізком A_1C_3 . Очевидно, що найкоротшим буде шлях, що відповідає падінню променя на поверхню відбиття в точці C_2 , яка лежить на прямій A_1B , оскільки відрізок прямої A_1B є найкоротшим від будь-якої ламаної, що проходить через точки A_1 і B .



Мал. 184.

До виведення закону відбиття світла

Тепер залишається показати, що під час відбиття променя від поверхні поділу двох середовищ в точці C_2 виконується закон відбиття, а саме, що кут відбиття β дорівнює куту падіння α (мал. 184). Оскільки трикутники AC_2C_0 та $A_1C_2C_0$ рівні, то $\angle AC_2C_0 = \angle A_1C_2C_0$. З іншого боку, $\angle C_0C_2A_1 = \angle BC_2N$. Звідси $\angle AC_2C_0 = \angle BC_2N$, тобто $\angle \alpha = \angle \beta$.

Зрозуміло, що якби промені AC_2 , C_2B і перпендикуляр DC_2 не лежали в одній площині, то шлях від точки A до межі MN , а потім від поверхні до точки B був би довшим. Таким чином, закон відбиття, як і прямолінійного поширення світла, повністю впливає з принципу Ферма.

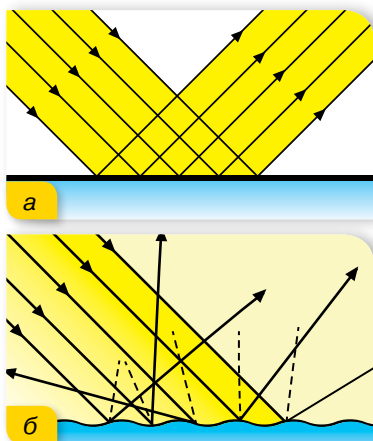
Дзеркальне та дифузне відбиття. Залежно від властивостей і якості поверхні відбиття розрізняють дзеркальне та розсіяне відбиття. Дзеркальною вважають поверхню, що має нерівності, розміри яких менші від довжини світлової хвилі. Наприклад, поверхні краплини ртуті, полірованого скла чи металу тощо. Паралельні промені після відбиття від дзеркальної поверхні будуть також паралельними. Якщо ж нерівності поверхні сумірні з довжиною світлової хвилі, то світло, відбите від поверхні, буде розсіяним (дифузним) (мал. 185). Саме завдяки такому відбиванню світла ми бачимо предмети, які не випромінюють світло.

Одержання зображень за допомогою дзеркал. На практиці використовують переважно *плоскі* та *сферичні* дзеркала.

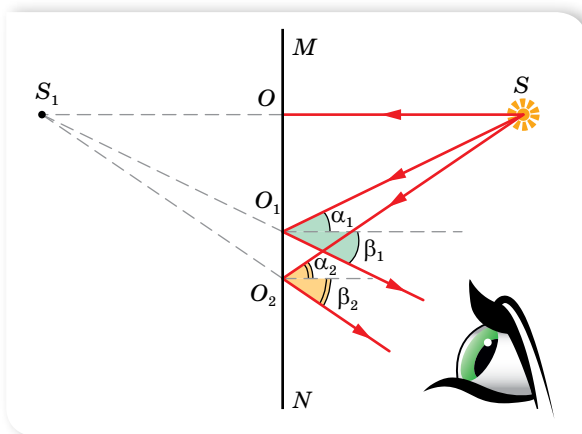
Зображення предмета в плоскому дзеркалі можна побудувати, скориставшись законами відбиття світла. Для цього з точки, зображення якої хочемо побудувати, проводимо довільні промені (на малюнку 186 з точки S проведено три промені, хоча зрозуміло, що для побудови точки на площині достатньо перетину двох променів). Після цього за законом відбиття світла будемо промені, відбиті від поверхні дзеркала, та їх продовження. Саме перетин продовжень відбитих променів є зображенням точки в плоскому дзеркалі.

Одержане зображення є прямим, уявним (оскільки одержане в результаті перетину не самих променів, а їх продовжень), таким, що дорівнює за розмірами предмету, і симетричним йому відносно площини дзеркала.

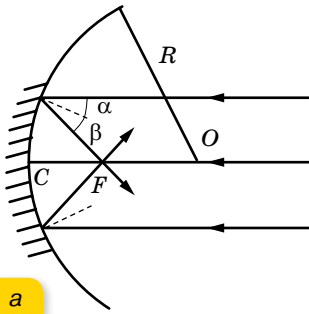
Нагадаймо, щоб визначити частину простору, з якої можна побачити зображення певної точки в плоскому дзеркалі, необхідно з'єднати зображення точки та крайні точки дзеркала.



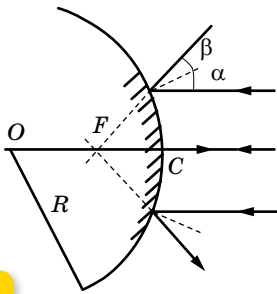
Мал. 185. Дзеркальне та дифузне відбиття



Мал. 186. Утворення зображення в плоскому дзеркалі



а



б

Мал. 187. Утворення зображень в увігнутому (а) та опуклому (б) дзеркалах

Поряд із плоскими дзеркалами широкого застосування набули сферичні дзеркала. Дзеркала, поверхню яких утворює частина поверхні кулі, називають *сферичними*. Вони бувають увігнуті й опуклі.

На малюнку 187 зображено приклади увігнутого та опуклого дзеркал. Точка O — *оптичний центр сферичної поверхні* дзеркала. Буквою C позначено вершину сферичної поверхні, яку називають *полюсом дзеркала*, або центром сферичної дзеркальної поверхні. Пряму OC , що проходить через центр дзеркальної поверхні O та вершину дзеркала C , називають *головною оптичною віссю дзеркала*. Усі інші осі, проведені через точку O , називають *побічними*.

Якщо спрямувати промені паралельно головній оптичній осі увігнутого дзеркала (мал. 187, а), то після відбиття від поверхні дзеркала промені зберуться в одній точці F , яка лежить на його головній оптичній осі. Цю точку називають *головним фокусом дзеркала*.

Якщо точкове джерело світла помістити у фокусі увігнутого дзеркала, то промені, відбившись від його поверхні, поширюватимуться паралельно головній оптичній осі дзеркала (згідно з оборотністю світлових променів).

Відстань OF від вершини дзеркала до головного фокуса називають *фокусною відстанню дзеркала*, вона дорівнює половині радіуса OC сферичної поверхні дзеркала, тобто $OF = 0,5 OC$. Таким чином, фокусна відстань сферичного дзеркала дорівнює половині радіуса сфери, частиною якого є дзеркало, $F = \frac{R}{2}$.

Якщо ж спрямувати світлові промені паралельно головній оптичній осі на опукле дзеркало, то відбиті промені будуть розходитися (мал. 187, б). Їхні продовження перетинатимуться в певній точці F , яка лежить за дзеркалом. Цю точку називають *головним фокусом опуклої лінзи*. Оскільки в цій точці перетинаються не самі промені, а їхні продовження, це означає, що *фокус опуклого дзеркала є уявним*.

Отже, увігнуті дзеркала — збиральні, головний фокус у них дійсний. Опуклі дзеркала — розсіювальні, головний фокус у них уявний.

Площину, яка перпендикулярна головній оптичній осі дзеркала і проходить через фокус, називають *фокальною площиною*. Зрозуміло, що для увігнутого дзеркала вона буде *дійсною*, для опуклого — *уявною*.

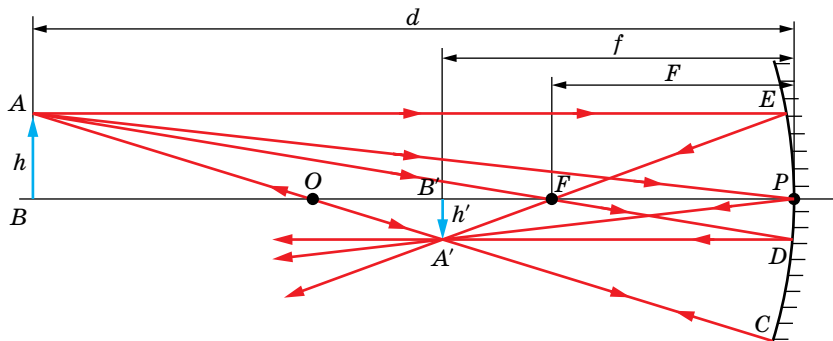
Величину, обернену до фокусної відстані, називають *оптичною силою* D сферичного дзеркала, $D = \frac{1}{F} = \frac{2}{R}$.

Одиницею оптичної сили в СІ є діоптрія (дптр), $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$.

Оптична сила увігнутого дзеркала є додатною, опуклого — від'ємною.

Для побудови зображення будь-якої точки предмета найзручніше використовувати такі правила (мал. 188):

- ▶ якщо падаючий промінь проходить через оптичний центр дзеркала, то відбитий промінь також проходить через оптичний центр (промені AOC і COA лежать на одній прямій);

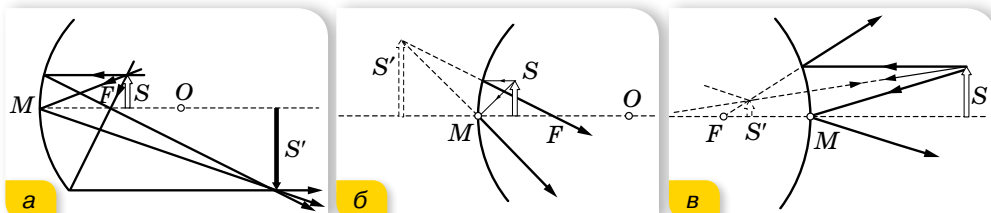


Мал. 188. Побудова зображення у сферичному дзеркалі

- ▶ якщо падаючий промінь AFD проходить через фокус дзеркала, то відбитий промінь DA' буде паралельним головній оптичній осі;
- ▶ якщо промінь AP падає на дзеркало в його полюсі, то відбитий промінь PA' є симетричним йому відносно головної оптичної осі;
- ▶ якщо падаючий промінь AE паралельний головній оптичній осі, то відбитий від дзеркала промінь EF проходить через фокус дзеркала.

Для побудови зображення предмета у вигляді відрізка прямої достатньо побудувати зображення двох його крайніх точок.

На малюнку 189 наведено приклади побудови зображення предмета у сферичних дзеркалах. Розташування й розміри зображення, одержаного за допомогою увігнутого дзеркала, залежать від положення предмета щодо дзеркала. Опукле дзеркало дає тільки уявне, зменшене зображення предмета, яке розташоване між уявним фокусом і полюсом. Уявні зображення є завжди прямими (не перевернутими), а дійсні зображення, навпаки, завжди перевернуті щодо предмета.



Мал. 189. Побудова зображень у сферичних дзеркалах

Позначимо відстань між світною точкою та дзеркалом літерою d , відстань між зображенням цієї точки та дзеркалом — літерою f . Ці величини пов'язані з радіусом сферичної поверхні дзеркала R співвідношенням

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}.$$

З урахуванням співвідношення $D = \frac{1}{F} = \frac{2}{R}$ цю залежність можна переписати у вигляді $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$.

Одержана формула справджується у випадку, коли зображення і фокус дзеркала дійсні. Якщо ж зображення або фокус уявні, то перед літерою f або F ставлять знак «-».

Лінійне збільшення Γ розмірів зображення H порівняно з розмірами предмета h знаходять за формулою $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$.

Галузі застосування плоских і сферичних дзеркал вам добре відомі. Сферичні дзеркала використовують для виготовлення прожекторів, дзеркал огляду на транспорті, автомобільних фар, проєкційних і кишенькових ліхтарів тощо. Якщо взяти увігнуте дзеркало порівняно великих розмірів, то в його фокусі можна одержати дуже високу температуру, використовуючи енергію Сонця. Тут можна розмістити резервуар з водою для одержання гарячої води, скажімо, для побутових потреб. У медицині ними користуються ЛОР-лікарі, стоматологи. Крім того, увігнуті дзеркала застосовуються в телескопах-рефлекторах, за допомогою яких спостерігають небесні тіла.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Доведіть закон відбиття світла, спираючись на принцип Ферма.
2. Схематично намалюйте сферичне увігнуте дзеркало та вкажіть його головну оптичну вісь, радіус і центр кривизни, головний фокус.
3. Де відносно ввігнутого дзеркала з радіусом кривизни 1,2 м необхідно розташувати джерело світла, щоб отримати прожектор?
4. На який кут повернеться промінь, відбитий від плоского дзеркала, коли дзеркало повернути на кут α ?



Приклади розв'язування задач

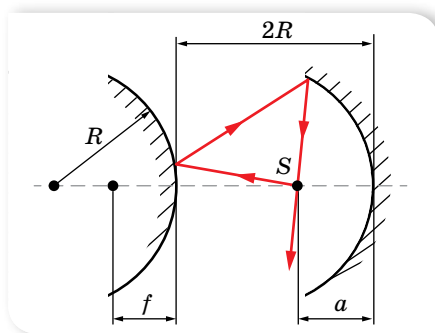
Задача. Опукле й увігнуте дзеркала мають однакові радіуси кривизни R . Відстань між їхніми вершинами дорівнює $2R$. У якій точці на оптичній осі дзеркал необхідно розташувати точкове джерело світла S , щоб промені після відбиття спочатку від опуклого, а потім від увігнутого дзеркал знову зібрались у точці S ?

Дано:

R
 $2R$
 a — ?

Розв'язання:

Нехай a — відстань від джерела до увігнутого дзеркала, f — відстань від зображення, утвореного опуклим дзеркалом, до цього дзеркала (мал. 190).



Мал. 190

Запишемо формулу опуклого сферичного дзеркала: $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{2}{R}$ або

$$\frac{1}{2R - a} - \frac{1}{f} = -\frac{2}{R}. \text{ Звідки } f = \frac{R(2R - a)}{5R - 2a}.$$

Зображення в опуклому дзеркалі є джерелом для увігнутого. Якщо точка перетину променів після двох відбивань збігається із джерелом, формула сферичного дзеркала набуває вигляду $\frac{1}{2R + f} + \frac{1}{a} = \frac{2}{R}$.

Підставивши в цю формулу вираз для f , після перетворень отримуємо: $2a^2 - 6Ra + 3R^2 = 0$.

Звідси, враховуючи, що $a < 2R$, отримуємо $a \approx 0,63R$.

Відповідь: $a \approx 0,63R$.



Вправа 26

1. На якій висоті висить вуличний ліхтар, якщо тінь від вертикально поставленої палиці заввишки 0,9 м має довжину 1,2 м, а коли палицю перемістити на 1 м від ліхтаря вздовж напрямку тіні, її довжина становитиме 1,5 м? Визначте таким способом, на якій висоті висить ліхтар, вважаючи, що безпосередньо виміряти відстань до джерела світла (по горизонталі) неможливо.
2. На горизонтальному дні водойми, глибина якої 1,2 м, лежить плоске дзеркало. Промінь світла падає на поверхню води під кутом 30° . На якій відстані від місця падіння цей промінь вийде з води після відбиття від дзеркала? Показник заломлення води — 1,33.
3. Висота Сонця над горизонтом 38° . Під яким кутом до горизонту треба поставити дзеркало, щоб сонячні промені потрапили на дно колодязя?
4. Плоске дзеркало утворює зі столом двогранний кут α . На столі на відстані l від ребра двогранного кута лежить монета. Визначте відстань d , на яку зміщується зображення монети у дзеркалі, коли дзеркало повернути на кут φ відносно ребра двогранного кута.
5. Радіус кривизни увігнутого дзеркала 80 см. На якій відстані від дзеркала слід розташувати предмет, щоб його дійсне зображення було удвічі більше за предмет?
6. На головній оптичній осі увігнутого дзеркала радіусом 40 см лежить світна точка S на відстані 30 см від дзеркала. На якій відстані перед увігнутим дзеркалом потрібно розташувати плоске, щоб промені, відбиті дзеркалами, повернулись у точку S ?

§ 43

Заломлення світла

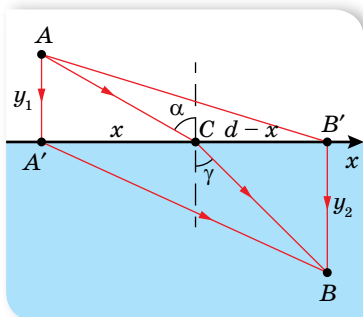
Закон заломлення світла. Повне відбиття. Пригадаймо закон заломлення світла:

падаючий промінь, заломлений промінь та перпендикуляр до межі поділу середовищ, проведений у точці падіння, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення γ світла є величиною сталою, яка дорівнює **відносному показнику заломлення**

двох середовищ, $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$, де n_1 і n_2 — абсолютні показники заломлення першого і другого середовищ, n_{21} — відносний показник заломлення.

З принципу Ферма можна отримати й закон заломлення світлових променів (його ще називають законом Снеля).

Розглянемо випадок (мал. 191), коли першим середовищем є вакуум, у якому швидкість світла c , а другим — прозора речовина, швидкість світла в якій v ($v < c$).



Мал. 191. Доведення закону заломлення за принципом Ферма

Як і у випадку доведення закону відбиття, з нескінченної множини можливих шляхів між точками A і B розглянемо лише три шляхи: $AA'B$, $AB'B$ та ACB . Згідно з принципом Ферма, світло поширюється тим шляхом, на який витрачається мінімальний час. Шлях $AA'B$ не є таким, оскільки світло у вакуумі, де його швидкість максимальна, проходить найменшу відстань до межі поділу, а велику — у середовищі, де його швидкість мала.

На шляху $AB'B$, навпаки, світло з малою швидкістю проходить мінімальну відстань, а більшу ділянку шляху проходить у середовищі, де його швидкість руху максимальна.

Проте оптимальним, з позиції мінімуму часу, буде деякий шлях ACB , за умови, що довжини пройдених шляхів у середовищах будуть пропорційними швидкостям руху світла в цих середовищах.

Запишемо цю умову математично. Для цього з'ясуємо, де має бути розташована точка, в якій світловий промінь перетинає межу поділу середовищ. Позначимо відстань $A'B'$ через d . Якщо шукана точка C перетину межі поділу середовищ лежить на відстані x від точки A' , то від B' вона перебуває на відстані $d - x$ (мал. 191). Тоді шлях AC в першому середовищі становить $\sqrt{y_1^2 + x^2}$, відповідно час проходження цього шляху

$$t_1 = \frac{\sqrt{y_1^2 + x^2}}{c}.$$

Аналогічно у другому середовищі шлях CB світло проходить за час $t_2 = \frac{\sqrt{y_2^2 + (d-x)^2}}{v}$. Загальний час $t = t_1 + t_2 = \frac{\sqrt{y_1^2 + x^2}}{c} + \frac{\sqrt{y_2^2 + (d-x)^2}}{v}$.

Як видно з цієї формули, час руху світла залежить від x , оскільки інші величини — фіксовані.

З'ясуємо, за якого значення x час t буде мінімальним. Для цього визначимо похідну від t по x та прирівняємо отриманий результат до нуля.

Отримаємо рівняння $\frac{x}{c\sqrt{y_1^2 + x^2}} - \frac{d-x}{v\sqrt{y_2^2 + (d-x)^2}} = 0$. З малюнка видно,

що $\frac{x}{\sqrt{y_1^2 + x^2}} = \sin \alpha$, а $\frac{d-x}{\sqrt{y_2^2 + (d-x)^2}} = \sin \gamma$, де α — кут падіння, γ — кут заломлення.

Таким чином, умова мінімального часу проходження набуває вигляду $\frac{\sin \alpha}{c} = \frac{\sin \gamma}{v}$, або $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v} = n$.

Цей вираз і є законом заломлення світла для розглядуваного випадку: *відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення дорівнює відношенню швидкостей поширення світла у вакуумі та середовищі, яке з ним межує, тобто дорівнює абсолютному показнику заломлення цього середовища.*

Згідно з принципом Ферма, шлях, який вимагає мінімального часу, лежить у площині падіння. Отже, формулювання закону варто доповнювати твердженням: *падаючий промінь, заломлений промінь та перпендикуляр, опущений в точку падіння променя, лежать в одній площині.*

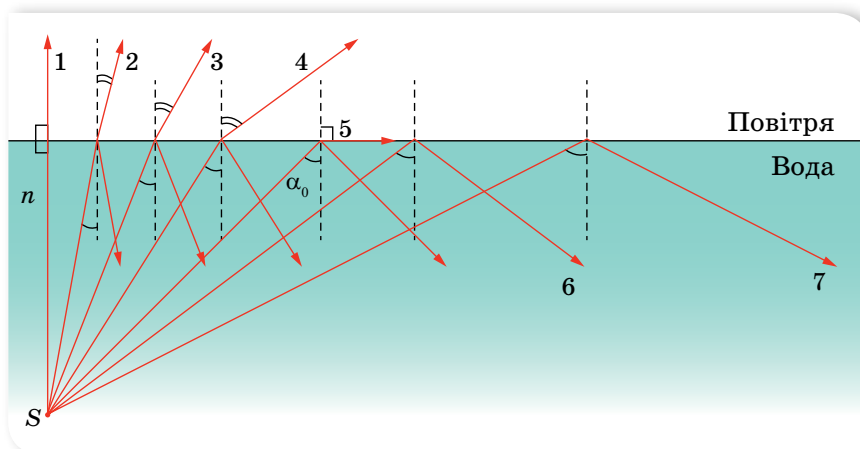
Закон заломлення світла дає змогу пояснити цікаве й практично важливе явище — *повне відбиття світла.*

Якщо промінь світла поширюється від точкового джерела з оптично більш густого в оптично менш густе середовище, то кут заломлення більший за кут падіння. Зі збільшенням кута падіння світлового променя збільшується і кут заломлення, водночас, інтенсивність заломленого променя зменшується (мал. 192, с. 202). Досягши певного значення кута падіння α_0 , промінь взагалі не перетинає межу поділу середовищ — кут заломлення становить 90° . Коли кут падіння $\alpha > \alpha_0$, світло не переходить у друге середовище, а лише відбивається від його межі, тобто відбувається *явище повного внутрішнього відбиття.*

Явище, за якого світло, поширюючись у більш густому середовищі, відбивається від межі поділу з менш густим середовищем, не заломлюючись, називається **явищем повного відбиття**.

Кутом повного внутрішнього відбиття називається найменший кут падіння α_0 , починаючи з якого світло повністю відбивається від межі поділу середовищ. Із закону заломлення світла випливає, що ним є кут,

синус якого дорівнює $\frac{1}{n}$, тобто $\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right)$.



Мал. 192. Визначення умови повного відбиття



Мал. 193. Оптичні волокна

Саме повне відбиття спричиняє яскравий блиск краплинок роси, уламків скла тощо. Це явище використовують, огранюючи та шліфуючи дорогоцінне каміння. Оброблювальному камінцеві надають такої форми, щоб більшість падаючих на нього променів після заломлення відбивались від внутрішніх граней.

Волоконна оптика. Явище повного відбиття використовують у *волоконній оптиці*. Термін *волоконна оптика* з'явився у 50-х роках ХХ ст. Основним елементом волоконної оптики є оптичне волокно (мал. 193) (найчастіше тонка прозора скляна нитка). Зазначаючи повного внутрішнього відбиття, світло поширюється всередині світловоду і здатне передавати оптичні сигнали без зменшення інтенсивності на великі відстані.

Явище повного відбиття використовують у біноклях, перископах, катафотах засобів дорожнього руху тощо.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть суть явища повного внутрішнього відбиття світла. Що називають граничним кутом повного внутрішнього відбиття світла? Чому він дорівнює? 2. Яке практичне застосування повного внутрішнього відбиття світла? Що таке волоконна оптика?



Рекомендації до розв'язування задач

Серед задач геометричної оптики, у яких використовується закон заломлення світла, виділяють задачі на хід променів у прозорих плоскопаралельних пластинках та призмах.

Після проходження крізь плоскопаралельну пластинку промені виходять під тим самим кутом, під яким вони на неї падають. При цьому пластинка зміщує промінь світла паралельно йому самому на відстань x (мал. 194).

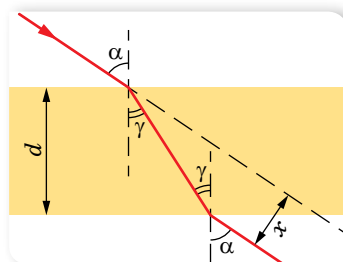
Зміщення променя на виході з плоскопаралельної пластинки можна знайти з формули

$$x = d \frac{\sin(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma} \text{ або } x = d \sin \alpha \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \alpha}{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right),$$

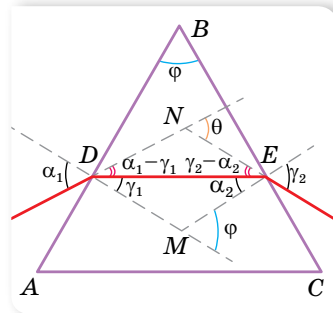
тут α — кут падіння, γ — кут заломлення, d — товщина пластинки, n — показник заломлення речовини пластинки.

Заломлення променя в призмі відбувається на її заломних гранях AB і BC (мал. 195). Якщо матеріал призми оптично більш густий, ніж навколишнє середовище, промінь, заломлюючись, обидва рази відхиляється до основи призми AC . Кут φ між заломними гранями називають заломним кутом призми. Кут θ між продовженням променя, що падає на призму, і променя, що виходить з призми, називають кутом відхилення променя від початкового напрямку. Між цими кутами існує співвідношення: $\varphi = \alpha_1 + \gamma_2 - \theta$.

Якщо кут φ малий, то можна користуватись наближеною формулою $\theta = (n - 1)\varphi$.



Мал. 194.
Проходження світла крізь плоскопаралельну пластинку



Мал. 195. Заломлення світла у тригранній призмі



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Монохроматичний промінь падає під кутом $\alpha_1 = 60^\circ$ на бічну поверхню скляної рівнобедреної призми. Кут при вершині призми $\varphi = 40^\circ$. На який кут відхилиться промінь, що виходить із призми, якщо показник заломлення матеріалу призми $n = 1,54$?

Виведіть формулу для визначення кута зміщення променя для випадку, коли кут падіння на поверхню призми та заломний кут призми φ — малі.

Дано:

$\alpha_1 = 60^\circ$

$\varphi = 40^\circ$

$n = 1,54$

$\theta = ?$

$\theta = f(\varphi) = ?$

Розв'язання:

Скористаймося малюнком 195 (с. 203).

З $\triangle DEM$: $\gamma_1 + \alpha_2 = \varphi$, звідки $\alpha_2 = \varphi - \gamma_1$. З $\triangle DEN$:

$$\theta = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\gamma_2 - \alpha_2) = \alpha_1 + \gamma_2 - \varphi \text{ або } \gamma_2 = \varphi + \theta - \alpha_1.$$

За законом заломлення на першій грані $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = n$.

$$\text{Тоді } \sin \gamma_1 = \frac{\sin \alpha_1}{n} = 0,562; \gamma_1 = 34^\circ 12'.$$

Закон заломлення на виході з призми: $\frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} = \frac{1}{n}$. Звідки:

$$\sin \gamma_2 = n \sin \alpha_2 \text{ або } \sin(\varphi + \theta - \alpha_1) = n \sin(\varphi - \gamma_1).$$

Підставляючи числові значення, отримуємо:

$$\sin(\theta - 20^\circ) = n \sin 5^\circ 48' = 1,54 \cdot \sin 5^\circ 48'.$$

Оскільки кут малий, то синус кута можна замінити його значенням, маємо: $\theta - 20^\circ = 8^\circ 54'$, тоді $\theta = 28^\circ 54'$.Щоб вивести формулу для визначення кута θ для малих α_1 і φ , запишемо:

$$\text{мо: } \frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} \approx \frac{\alpha_1}{\gamma_1} \approx n \text{ і } \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} \approx \frac{\alpha_2}{\gamma_2} \approx \frac{1}{n}, \text{ тоді } \alpha_1 \approx n\gamma_1 \text{ і } \gamma_2 \approx n\alpha_2.$$

Підставимо ці значення у вираз для θ :

$$\theta = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\gamma_2 - \alpha_2) = n\gamma_1 - \gamma_1 + n\alpha_2 - \alpha_2 = (n-1)(\gamma_1 + \alpha_2);$$

оскільки $\gamma_1 + \alpha_2 = \varphi$, маємо $\theta = (n-1)\varphi$.**Відповідь:** $\theta = 28^\circ 54'$; $\theta = (n-1)\varphi$.**Задача 2.** Промінь падає на плоскопаралельну скляну пластинку під кутом $\alpha = 30^\circ$ (мал. 196). Показник заломлення скла $n = 1,5$. Визначте товщину пластинки, якщо зміщення променя (відрізок CD) дорівнює 3,88 см.**Дано:**

$\alpha = 30^\circ$

$n = 1,5$

$CD = 3,88 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

$d = ?$

Розв'язання:З малюнка видно, що $\angle BAD = \alpha$;

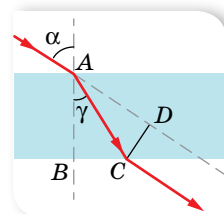
$$\angle CAD = \alpha - \gamma; AC = \frac{CD}{\sin(\alpha - \gamma)};$$

$$AB = AC \cos \gamma.$$

$$\text{Звідси } AB = \frac{CD \cos \gamma}{\sin(\alpha - \gamma)}.$$

Кут заломлення γ визначаємо із закону заломлення $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$.

$$\text{Звідси } \sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n} \approx 0,333, \gamma \approx 19^\circ 30', \alpha - \gamma = 10^\circ 30'.$$

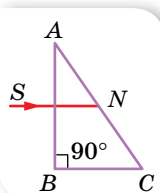
Після підстановки даних отримуємо $AB = 0,2 \text{ м}$.**Відповідь:** 0,2 м.

Мал. 196



Вправа 27

1. На нижню грань плоскопаралельної скляної пластинки нанесено риску. Спостерігає, що дивиться згори, бачить риску на відстані 4 см від верхньої грані пластинки. Яка товщина пластинки?
2. Промінь падає під кутом 60° на скляну пластинку завтовшки 2 см з паралельними гранями. Визначте зміщення променя, який вийшов із пластини. Визначте зміщення за умови, що промінь під таким же кутом падає на цю саму скляну пластинку, розташовану у воді.
3. Маємо дві плоскопаралельні пластинки, притиснені щільно одна до одної. Товщина першої — 16 мм, показник заломлення — 1,5, товщина другої — 24 мм, показник заломлення — 1,8. На поверхню першої пластинки падає світло під кутом 48° . Визначте зміщення променя після виходу його з пластинок.
4. Чи може промінь, пройшовши крізь пластинку з паралельними гранями, зміститися так, щоб відстань між ним та його початковим напрямком була більшою за товщину пластинки?
5. Промінь SN падає на прямокутну скляну призму BAC (мал. 197) перпендикулярно до грані AB . Заломиться промінь на грані AC в точці N його падіння чи зазнає повного відбиття, якщо кут $A = 30^\circ$?
6. За якого найменшого значення заломного кута A скляної призми BAC (мал. 197) промінь SN зазнаватиме повного відбиття?
7. Промінь падає під кутом 50° на пряму трикутну скляну призму із заломленим кутом 60° . Визначте кут заломлення променя в точці виходу з призми.
8. Промінь падає перпендикулярно на бічну грань прямої скляної призми, в основі якої лежить рівнобедрений трикутник з кутом при вершині 20° . На скільки градусів відхилиться промінь, вийшовши з призми, від початкового напрямку, якщо промінь усередині призми падає: а) на другу бічну грань; б) на основу?
9. Визначте заломний кут призми зі скла з показником заломлення 1,56, якщо промінь падає перпендикулярно на одну її грань і виходить уздовж другої.
10. Визначте кут відхилення променя скляної призмю, заломний кут якої 3° , якщо кут падіння променя на передню грань дорівнює нулю.
11. Промінь світла виходить із призми під тим самим кутом, під яким входить у неї, причому відхиляється від початкового напрямку на кут 15° . Заломний кут призми 45° . Визначте показник заломлення матеріалу лінзи.
12. Промінь світла входить у скляну призму під кутом $\alpha = \frac{\pi}{6}$ і виходить з неї в повітря під кутом $\frac{\pi}{3}$, причому, пройшовши крізь призму, відхиляється на кут $\frac{\pi}{4}$ від попереднього напрямку. Визначте заломний кут призми.



Мал. 197

§ 44 Лінзи

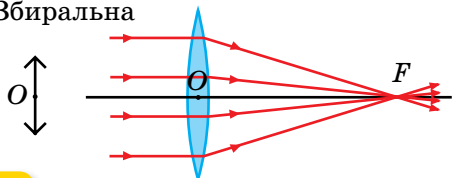
Лінзи. У 9 класі ми вже ознайомилися з лінзами та правилами побудови зображень, які отримують за їх допомогою. Пригадаймо основні поняття.

Лінзою називають прозоре тіло, обмежене з обох боків сферичними поверхнями (одна з поверхонь може бути плоскою).

Унаслідок кривизни поверхонь промені, які проходять крізь лінзу, два рази заломлюються (як і в призмі), змінюючи свій напрямок поширення. Якщо товщина лінзи значно менша від радіуса її кривизни, то таку лінзу називають *тонкою*.

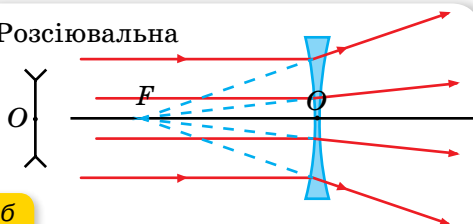
Якщо паралельний пучок променів, пройшовши крізь лінзу, сходиться в одній точці (фокусі), то таку лінзу називають *збиральною*, якщо ж паралельний пучок променів після проходження крізь лінзу стає розхідним, то таку лінзу називають *розсіювальною*.

Збиральна



а

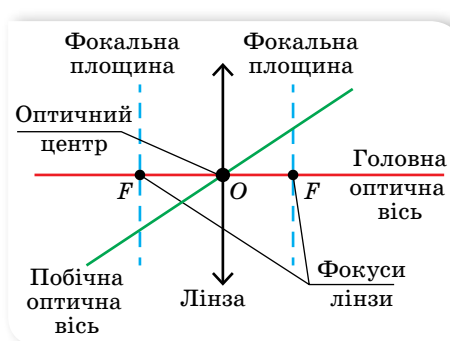
Розсіювальна



б

Мал. 198. Збиральна та розсіювальна лінзи

На малюнку 198, а зображено збиральну лінзу, хід променів у ній та її умовне зображення, а на малюнку 198, б — розсіювальна лінза, хід променів у ній та її умовне зображення. (Зауважимо, що збиральна лінза є опуклою, а розсіювальна увігнутою, лише коли показник заломлення речовини лінзи більший за показник заломлення навколишнього середовища.)



Мал. 199. Характеристики лінз, які використовуються для побудови зображень

Лінза як оптична система має низку характеристик: фокус, фокальну площину, головну оптичну вісь тощо. Зміст деяких термінів зрозумілий з малюнка 199.

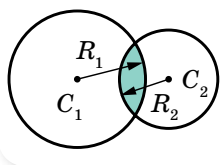
Відстань від фокуса до оптичного центра називають *фокусною відстанню лінзи F*. Фокусна відстань збиральної лінзи є додатною, а розсіювальної — від'ємною. Величину, обернену до фокусної відстані, називають *оптичною силою лінзи D*, $D = \frac{1}{F}$.

У СІ оптичну силу лінзи вимірюють у діоптріях,

$$1 \text{ дптр} = \frac{1}{\text{м}}$$

$$\text{Для сферичної лінзи } D = (n_{21} - 1) \left(\pm \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right),$$

де n_{21} — відносний показник заломлення матеріалу лінзи; R_1, R_2 — радіуси кривизни поверхонь лінзи (мал. 200).



Мал. 200. Радіуси кривизни лінзи

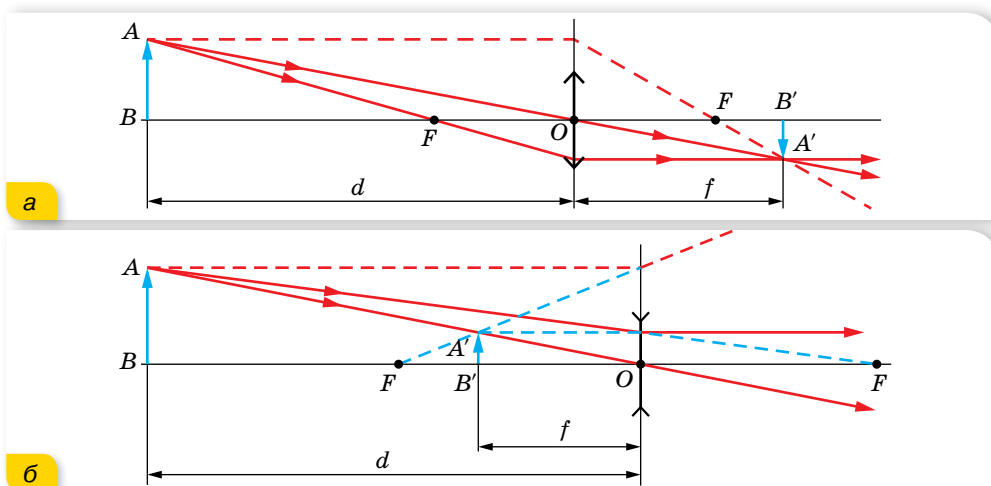
Знак «+» використовується для опуклих поверхонь, знак «-» — для увігнутих.

Побудова зображень, одержаних за допомогою лінз. Лінзи як оптичні прилади цінні тим, що за допомогою них отримують зображення предметів, які можуть випромінювати або відбивати світло.

На практиці для побудови зображень, отриманих за допомогою лінз, використовують чотири так звані зручні промені, хід яких відомий без використання закону заломлення.

Хід зручних променів (мал. 201):

1. Якщо падаючий промінь паралельний головній оптичній осі, то заломлений промінь пройде через фокус.
2. Якщо падаючий промінь пройшов через фокус, то заломлений піде паралельно головній оптичній осі.
3. Промінь, який пройшов через оптичний центр, не заломлюється.
4. Якщо падаючий промінь паралельний побічній осі, то заломлений перетнется із цією віссю у фокальній площині.



Мал. 201. Побудова зображень у збиральній та розсіювальній лінзах

Зображення в лінзі може бути прямим або перевернутим, збільшеним або зменшеним, дійсним або уявним.

Якщо d — відстань від предмета до лінзи, f — відстань від лінзи до зображення на екрані, F — фокусна відстань, то розміщення предмета і його зображення можна визначити за *формулою тонкої лінзи*:

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm D.$$

Користуючись формулою тонкої лінзи, варто зважати на правило знаків:

- ▶ якщо лінза розсіювальна, то величину F беруть зі знаком «-»;
- ▶ якщо лінза дає уявне зображення, то і f також беруть з «-»;
- ▶ якщо предмет уявний, то і d беруть зі знаком «-».

Якщо h — висота предмета, а H — висота зображення, то можна визначити збільшення лінзи:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

Тип і положення зображення предмета в збиральній лінзі залежать від його відстані d до лінзи. Характер співвідношення між предметом і його зображенням у збиральній лінзі наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Відстань від предмета до лінзи, d	Відстань до зображення, f	Тип зображення
$d \rightarrow \infty$	$f \approx F$	Дійсне, обернене, зменшене, $\Gamma < 1$
$d > 2F$	$2F > f > F$	Дійсне, обернене, зменшене, $\Gamma < 1$
$d = 2F$	$f = 2F$	Дійсне, обернене, рівне, $\Gamma = 1$
$2F > d > F$	$f > 2F$	Дійсне, обернене, збільшене, $\Gamma > 1$
$d \approx F$	$f \rightarrow \infty$	Не існує $\Gamma \rightarrow \infty$
$d < F$	$f < 0$	Уявне, пряме, збільшене, $\Gamma > 1$

Зображення предмета в розсіювальній лінзі за будь-якої відстані d від предмета до лінзи завжди уявне, пряме, зменшене та розміщене між переднім фокусом і лінзою, причому $f < d$.

Якщо оптична система складається з кількох лінз (їхні оптичні сили D_1, D_2, \dots, D_n), розміщених близько одна до одної, то виконується така формула:

$$D_{\text{системи}} = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n.$$

Якщо ж лінзи розміщені в різних точках простору, то спочатку будують зображення, отримане від першої лінзи. Це зображення слугує предметом для другої лінзи і т. д. Повторюючи цей процес необхідну кількість разів, знаходять потрібне зображення для всієї оптичної системи.

Якщо лінза щільно прилягає до сферичного дзеркала, то $D = 2D_1 + D_2$, де D_1 — оптична сила лінзи, D_2 — оптична сила дзеркала.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть усі випадки побудови зображень, отриманих за допомогою збиральної лінзи; розсіювальної лінзи. **2.** Що називають оптичною силою лінзи? У якому випадку оптична сила лінзи є додатною, а в якому — від'ємною? У яких одиницях вимірюють оптичну силу лінзи? **3.** У яких умовах двоопукла скляна лінза з показником заломлення $n = 1,6$ стане розсіювальною? **4.** Симетричну лінзу розрізали точно навпіл по площині симетрії. Яку частину початкової оптичної сили матимуть дві утворені лінзи?

§ 45

Оптичні прилади та системи

У 9 класі ми ознайомилися з основними оптичними приладами, як-от мікроскоп, телескоп, труба Кеплера, фотоапарат, проєкційний апарат тощо. Око людини теж можна назвати оптичною системою. Коротко пригадаймо основні відомості про оптичні прилади й розкриємо нові поняття — аберації та роздільна здатність оптичних систем.

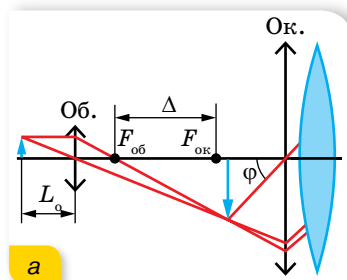
Оптичні прилади. Оптичні прилади призначені для *отримання зображень* (фотоапарат, проєкційний апарат тощо) або *збільшення кута зору* (луна, мікроскоп, телескоп тощо).

Луна — збиральна лінза з певною фокусною відстанню. Предмет, який розглядають у лупу, розміщують у фокальній площині лінзи або трохи ближче. Луна створює уявне, пряме та збільшене зображення, розташоване перед лупою. Збільшення, яке дає луна, визначається за формулою $\Gamma = \frac{L_0}{F} = \frac{0,25}{F}$, оскільки для людей з нормальним зором відстань найкращого зору — $L_0 = 0,25$ м.

Мікроскоп (оптичний) — прилад, призначений для дослідження дрібних об'єктів. Він складається з двох основних оптичних систем: об'єктива (об.) й окуляра (ок.). Об'єктив створює збільшене зображення, а окуляр збільшує кут зору на це зображення (діє як луна) (мал. 202). Збільшення

мікроскопа $\Gamma = \Gamma_{об} \cdot \Gamma_{ок}$ або $\Gamma = \frac{L_0 \Delta}{F_{об} F_{ок}}$, де Δ — відстань між фокусами об'єктива й окуляра, $F_{об}$, $F_{ок}$ — фокусні відстані об'єктива й окуляра відповідно.

Перші **телескопи** також стали використовувати в XVII ст. Сконструйований Галілео Галілеєм телескоп допоміг йому зробити ряд астрономічних відкриттів. Пізніше, в 1656 р. Християн Гюйгенс створив телескоп зі стократним збільшенням. Ісаак Ньютон дав нове життя телескопу, використавши дзеркальну систему. Саме такі телескопи зараз є аматорськими (для астрономів-початківців). За конструкцією телескопи можна поділити на три групи: *рефрактори*, або лінзові телескопи (лат. *refractus* — заломлення); *рефлектори*, або дзеркальні телескопи (лат. *reflectio* — відбиваю); *катадіоптрики*, або *дзеркально-лінзові телескопи*, схеми яких представлено на малюнку 203 (с. 210). Телескоп не тільки



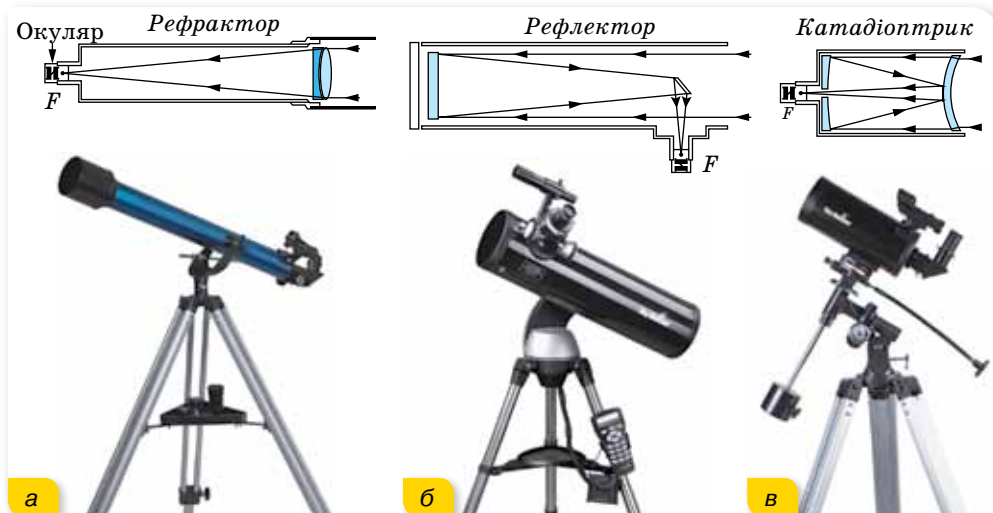
а



б

Мал. 202. Хід променів у мікроскопі та його зовнішній вигляд

допомагає розрізняти об'єкти, розміщені на близькій кутовій відстані один від одного, а й дає змогу спостерігати дуже слабкі джерела світла завдяки тому, що об'єктив збирає широкий пучок променів.



Мал. 185. Схеми та зовнішній вигляд телескопів:
а — рефрактора; б — рефлектора; в — катадіоптрика

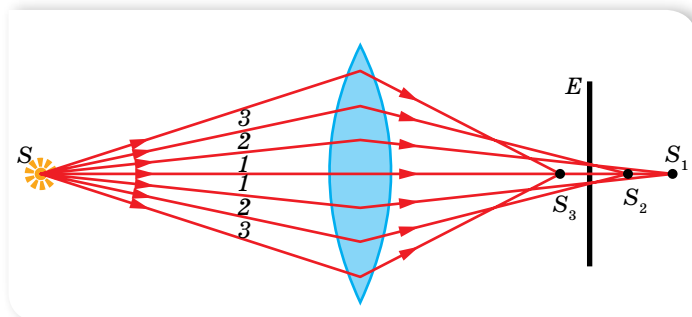
Нові технології та досягнення науки відкрили «нове дихання» для наземних оптичних телескопів. Уже подолано рубіж телескопів з діаметром дзеркала в 10 м, і нові телескопи будуть удвічі-утричі більшими. Під час спостережень виникає потреба наводити телескоп у будь-яку точку неба. Із цією метою трубу телескопа встановлюють на спеціальному монтуванні.

Аберації. Під час побудови зображень у тонкій лінзі ми, не акцентуючи на цьому уваги, користувалися світловими променями, які йдуть поблизу головної оптичної осі під невеликим кутом до неї. Водночас нехтували залежністю показника заломлення матеріалу лінзи від довжини хвилі падаючого світла. У реальних оптичних приладах, наприклад фотоапаратах, для отримання доброї освітленості зображення світловий пучок, що падає на лінзу, має бути досить широким, тобто використовуються промені, що утворюють великий кут з головною оптичною віссю. Це, у свою чергу, впливає на якість отриманого зображення. Уважне вивчення похибок оптичних систем дає змогу виявити способи їх усунення, і в сучасних оптичних приладах ці похибки зменшено так, що вони практично мало позначаються на якості зображення.

Похибки оптичних систем називають *абераціями*.

Сферична аберація зумовлена широким світловим пучком (мал. 204). Промені, більш віддалені від центра лінзи, сильніше заломлюються й перетинають головну оптичну вісь ближче до центра лінзи. У результаті цього замість точкового зображення на екрані буде розпливчата пляма.

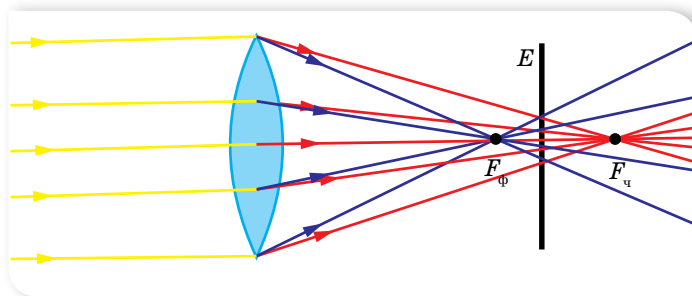
Для кількісної характеристики сферичної аберації вводяться поняття повздовжньої аберації, що дорівнює лінійній відстані між точками перетину крайніх (промені 3 на малюнку 204) і центральних (промені 1) променів пучка з головною оптичною віссю. Лінійна аберация залежить від матеріалу та кривизни поверхонь лінзи. Повздовжні аберации збиральної та розсіювальної лінз протилежні за знаком. Це дає змогу, комбінуючи такі лінзи, зменшувати сферичну аберацию. Сферичну аберацию також можна зменшити, якщо провести спеціальну обробку сферичної поверхні так, щоб на кожній частині поверхні лінзи заломлення було однаковим.



Мал. 204. Утворення сферичної аберации

Для точок об'єкта, які не лежать на осі лінзи, виникають додаткові аберации: *кома* (форма зображення нагадує комету, а не круг) та *астигматизм* (зображення точки у вигляді двох відрізків прямої, взаємно перпендикулярних і розташованих у різних площинах). Указані аберации характерні для монохроматичного світла. У випадку немонахроматичного світла виникає ще й *хроматична аберация*.

Хроматична аберация зумовлена тим, що показник заломлення речовини лінзи залежить від довжини світлової хвилі (дисперсія). Хроматична аберация призводить до того, що фокуси для різних кольорів виявляються зміщеними один відносно одного (мал. 205), у результаті чого зображення білої плями виходить кольоровим.



Мал. 205. Утворення хроматичної аберации

Хроматична аберация кількісно характеризується повздовжньою хроматичною аберациєю аналогічно сферичній. Для зведення, за можливості, до мінімуму хроматичної аберации використовують комбінацію лінз, виготовлених зі спеціальних матеріалів.

Роздільна здатність оптичних приладів. Будь-який оптичний прилад має певні граничні можливості. Навіть якщо усунуто всі аберации, зображення світної точки не завжди є точкою. Зокрема, об'єктив будь-якого оптичного приладу обов'язково має вхідний отвір. Дифракція світла на вхідному отворі об'єктива спричинює те, що зображення окремих точок спостережуваного предмета мають вигляд дисків, оточених темними та світлими кільцями. Якщо розглядувані точки предмета лежать близько одна від одної, то їх дифракційні зображення більше чи менше перекриваються.

Щоб кількісно схарактеризувати роздільну здатність об'єктива оптично-го приладу, використовують *критерій Релея*, що визначає мінімальну кутову відстань φ , за якої дві точки можна бачити роздільно, $\varphi \geq 1,22 \frac{\lambda}{D}$, де λ — довжина хвилі, D — діаметр об'єктива.

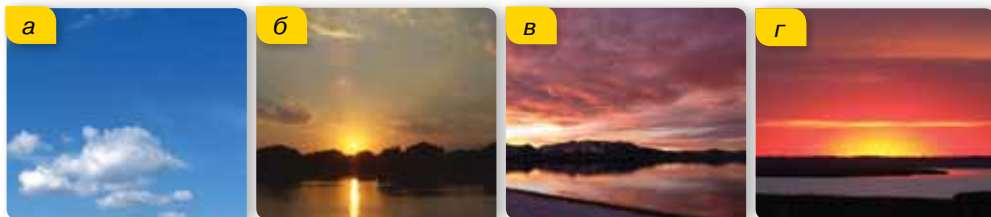
Цю умову використовують для телескопів, зорових труб, фотоапаратів. Роздільну здатність мікроскопа прийнято характеризувати не мінімальним кутом, а відстанню між двома найближчими точками, які ще видно роздільно. У сучасних оптичних мікроскопах ця відстань становить $3 \cdot 10^{-7}$ м.

Підвищення роздільної здатності оптичного мікроскопа може бути досягнуто завдяки зменшенню довжини хвилі світла, за допомогою якого ведеться спостереження, наприклад, застосувавши ультрафіолетове випромінювання та фотографування спостережуваних об'єктів.

Крім звичайних оптичних мікроскопів, існують електронні мікроскопи, роздільна здатність яких набагато більша.

Оптичні явища в атмосфері. Під час проходження крізь атмосферу світло розсіюється, тобто змінює напрямок поширення. Таке можливо в оптично неоднорідному середовищі, де показник заломлення змінюється. Такою є й атмосфера. Навіть за умови чистого повітря його густина постійно змінюється у зв'язку з тепловим рухом молекул. До того ж в атмосфері завжди є краплі рідини, кристали льоду й солей, пил тощо. Що більше в повітрі аерозолів, то більшим буде розсіювання. Воно залежить і від параметрів самого випромінювання. Так, фіолетові промені розсіюються в 14 разів сильніше, ніж червоні. Фіолетові та сині промені розсіюються більше, ніж блакитні, однак їхня енергія значно менша, ніж енергія блакитних променів, цим пояснюють блакитний колір неба (мал. 206, а). Що довший шлях сонячних променів в атмосфері, то більше розсіюється коротких хвиль і більшою залишається частка довгих хвиль у прямій радіації. Цим пояснюють жовте й червоне забарвлення Сонця та Місяця біля обрію, особливо коли в повітрі є багато пилу, крапель чи кристалів (мал. 206, б).

Наслідком розсіювання є вечірні й уранішні сутінки або присмерки (мал. 206, в). Часто до заходу й після сходу Сонця супутниками сутінок стають зміни кольорів небосхилу над цим світилом, які називають *вечірньою* та *вранішньою зорею* (мал. 206, г).



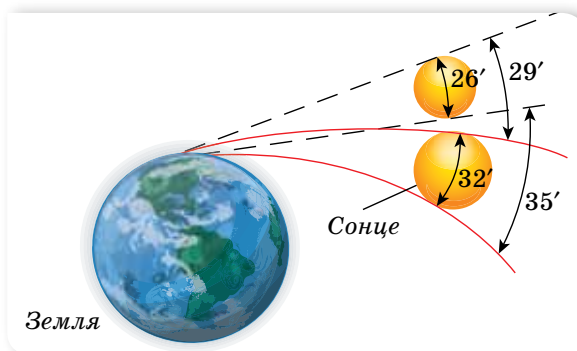
Мал. 206. Приклади оптичних явищ в атмосфері

Заломленням світла пояснюють виникнення міражів. Удень у пустелі нижні шари повітря дуже прогріваються від гарячого піску, внаслідок чого повітря стає неоднорідним. Пройшовши крізь таке середовище, промінь плавно викривляється. Унаслідок цього промінь, що йде зверху від блакитного неба, потрапляє в око мандрівникові знизу, і йому здається, ніби він бачить блакитне озеро (мал. 207, а). Такі міражі можна спостерігати спекотного літнього дня на автомобільних дорогах. Водію або пасажиру здається, що на асфальті є «калюжі», хоча насправді шосе сухе. Міражі спостерігають і над морем. У цьому випадку тепліші шари повітря розташовані над холоднішими, й виникає так званий верхній міраж (мал. 207, б).



Мал. 207. Утворення міражів: а — нижнього; б — верхнього

Рефракція — явище викривлення світлових променів у атмосфері.



Мал. 208. Рефракція

У результаті атмосферної рефракції ми бачимо Місяць, Сонце й інші зорі трохи вище того місця, де вони розташовані насправді (мал. 208). Завдяки цьому явищу тривалість дня на Землі завжди довша, ніж це було б на планеті, позбавленій атмосфери.



Мал. 209. а — гало виникає внаслідок заломлення та відбиття світла в льодяних кристалах і спостерігається найчастіше в атмосфері в перисто-шаруватих хмарах як світле, слабко забарвлене коло навколо світила; б — вінці (ореол) виникають у високо-купчастих хмарах, які закривають диск світила і складаються з дрібних однорідних крапель води, а також у туманах навколо штучних джерел світла.

Це світле кільце, яке прилягає впритул до диска світила, голубуватого кольору, а зовнішній край його — червонуватий; в — глорію спостерігають на тлі хмар або туману, які розташовані просто перед спостерігачем або нижче від нього, тобто явище можна спостерігати в горах або з літака. Це ореол навколо точки, прямо протилежної диску світила. На ці хмари падає тінь спостерігача, й ореол вінчає тінь його голови; г — райдуга (веселка) спостерігають на тлі хмар, з яких іде дощ і які підсвічуються прямими сонячними променями

Краплі води та кристалики льоду створюють суттєву неоднорідність атмосфери. У краплинах води та кристалах льоду відбувається відбивання, заломлення та дифракція (розкладання) сонячних променів. Тому в хмарах досить часто спостерігають світлові (оптичні) явища (мал. 209). Вони не мають практичного значення, але дають деяку інформацію про самі хмари, в яких виникають.

ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Що називають кутом зору; роздільною здатністю оптичних приладів? 2. Що таке аберация? Які основні види абераций? 3. Яка з абераций лінзи може бути усунута склеюванням з іншою лінзою, а яка — у результаті ускладнення процесу обробки її поверхні?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. За допомогою лінзи з фокусною відстанню 20 см на екрані одержали зображення предмета. Відстань від лінзи до зображення — 1 м. Визначте відстань від лінзи до предмета.

Дано:

$$F = 0,2 \text{ м}$$

$$f = 1 \text{ м}$$

$$d = ?$$

Розв'язання:

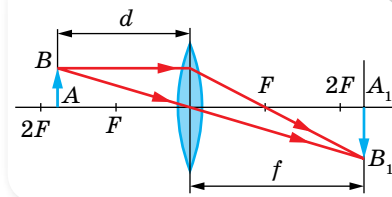
Оскільки зображення одержано на екрані, то лінза збиральна. У нашому випадку $f > 2F$, тоді $F < f < 2F$, тобто предмет розміщений між фокусною і подвійною фокусною відстанню.

Побудуємо хід променів через лінзу, використовуючи для побудови точки A два будь-які зручні промені (мал. 210).

Значення d визначимо з формули лінзи:

$$d = \frac{Fh}{f - F}; \quad d = \frac{0,2 \text{ м} \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ м} - 0,2 \text{ м}} = 0,25 \text{ м}.$$

Відповідь: 0,25 м.



Мал. 210

Задача 2. Оптична система складається з двох збиральних лінз 1 і 2 з фокусними відстанями $F_1 = 10$ см і $F_2 = 5$ см. Лінзи розташовані на відстані $L = 35$ см одна від одної. Предмет розміщено на відстані $d_1 = 25$ см від першої лінзи. Визначте, де міститься зображення, утворене даною системою лінз, та яке збільшення системи.

Дано:

$$F_1 = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$F_2 = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$$

$$L = 35 \text{ см} = 0,35 \text{ м}$$

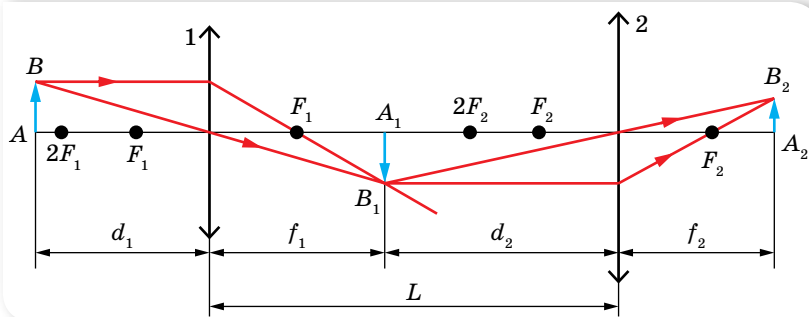
$$d_1 = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$$

$$f_2 = ?; \Gamma = ?$$

Розв'язання:

$$\text{З формули тонкої лінзи } f_1 = \frac{F_1 d_1}{d_1 - F_1}; \quad f_1 = 0,166 \text{ м}.$$

Побудуємо хід променів через систему лінз (мал. 211, с. 216).



Мал. 211

Збільшення, яке дає перша лінза: $\Gamma_1 = \frac{f_1}{d_1}$; $\Gamma_1 = 0,664$. З малюнка видно, що $d_2 = L - f_1$, $d_2 = 0,184$ м. Тоді $f_2 = \frac{F_2 d_2}{d_2 - F_2}$, $f_2 = 0,0688$ м. Збільшення другої лінзи: $\Gamma_2 = \frac{f_2}{d_2}$, $\Gamma_2 = 0,375$. Збільшення системи $\Gamma = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2$, $\Gamma = 0,25$.

Відповідь: $f_1 = 0,0688$ м; $\Gamma = 0,25$.

Задача 3. Граничний кут зору ока людини приблизно дорівнює $1'$. Якою має бути відстань між точками, що лежать на відстані найкращого зору (25 см), щоб людина могла бачити їх роздільно?

Дано:

$$\frac{d = 0,25 \text{ м}}{l - ?}$$

Розв'язання:

Зважаючи на величину кута зору, відстань між точками $l = 25 \text{ см} \cdot \tan \alpha \approx 25 \text{ см} \cdot \alpha$, де α — кут, виражений у радіанах;

$$l = 25 \text{ см} \cdot \frac{1}{60 \cdot 57,3} = 0,073 \text{ мм} \approx 0,1 \text{ мм}.$$

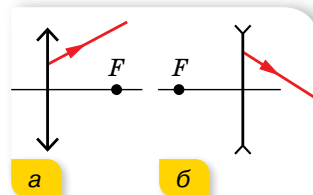
Відповідь: 0,1 мм.



Вправа 28

- Визначте фокусну відстань двоопуклої скляної лінзи, зануреної у воду, якщо відомо, що її фокусна відстань у повітрі — 20 см. Абсолютний показник заломлення скла — 1,5; води — 1,33.
- Предмет міститься на відстані 90 см від екрана. Між предметом та екраном переміщують лінзу. З першої позиції лінза дає на екрані збільшене зображення предмета, а з другої — зменшене. Яка фокусна відстань лінзи, якщо лінійні розміри першого зображення в чотири рази більші за розміри другого?
- Екран міститься на відстані l від свічки. Ставлячи між свічкою та екраном збиральну лінзу, можна дістати чітке зображення свічки на екрані для двох положень лінзи, віддалених одне від одного на відстань a . Доведіть, що в даному випадку головну фокусну відстань лінзи можна обчислити за формулою $F = \frac{l^2 - a^2}{4l}$.

4. Світна точка міститься на головній оптичній осі лінзи, фокусна відстань якої $F = 3$ см, на відстані $d = 4$ см від її оптичного центра. На відстані $\Delta = 3$ см від першої лінзи розміщена друга лінза такої самої оптичної сили. Оптичні осі обох лінз збігаються. Де буде зображення світної точки?
5. На оптичній лаві розміщено дві збиральні лінзи з фокусними відстанями $F_1 = 12$ см і $F_2 = 15$ см. Відстань між лінзами $l = 36$ см. Предмет встановлено на відстані $d = 48$ см від першої лінзи. На якій відстані f від другої лінзи буде зображення предмета?
6. Об'єктив складається з трьох контактуючих тонких лінз: перша двоопукла з фокусною відстанню 12,5 см, друга двовгнута з фокусною відстанню 10 см і третя двоопукла з фокусною відстанню 5 см. Визначте фокусну відстань об'єктива.
7. На якій найменшій відстані одна від одної мають бути поділки вимірювального приладу, щоб учень, який сидить на останній парті за 8 м від столу, чітко розрізняв їх? Вважайте, що граничний кут зору — $2'$.
8. Мікроскоп складається з об'єктива й окуляра, відстань між головними фокусами яких 18 см. Визначте збільшення, що дає мікроскоп, якщо фокусні відстані об'єктива й окуляра відповідно 2 і 40 мм. Побудуйте зображення предмета.
9. Побудуйте графік залежності відстані f (від зображення до лінзи) від відстані d (від предмета до лінзи). Розгляньте також випадок, коли предмет уявний.
10. Обчисліть лінійне збільшення k через фокусну відстань F і відстань від предмета до лінзи d для випадків: а) $d > F$; б) $d < F$. Побудуйте графік залежності k від d .
11. На малюнку 212 зображено хід променя після виходу зі збиральної (а) та розсіювальної (б) лінз. Знайдіть побудовою хід цих променів до лінзи.



Мал. 212

Перевірте себе (§ 42–45)

1. Посередині між двома плоскими дзеркалами, паралельними одне одному, розміщено точкове джерело світла. Визначте швидкості (однакові), з якими мають рухатися обидва дзеркала, залишаючись паралельними одне одному, щоб перші уявні зображення в дзеркалах зближувалися зі швидкістю $6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

- А $6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
 Б $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
 В $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
 Г $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

2. Визначте кут падіння світлового променя на скло ($n = 1,6$), щоб кут заломлення був удвічі меншим від кута падіння.

- А 53°
 Б 74°
 В 30°
 Г 38°

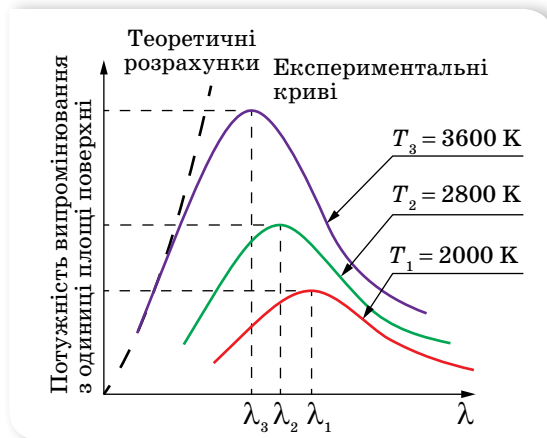
3. Промінь падає нормально на бічну грань рівнобедреної трикутної скляної призми ($n = 1,5$). Визначте кут відхилення променя від початкового напрямку, якщо заломлюючий кут призми становить 40° .
- А 40°
Б 30°
В 35°
Г 45°
4. Предмет заввишки 4 м розташований на відстані 20 м від спостерігача. Фокусна відстань оптичної системи ока дорівнює 1,5 см. Визначте розмір зображення на сітківці ока.
- А 3 см
Б 3 мм
В 2 см
Г 4 мм
5. Визначте оптичну силу системи, що складається з двох щільно складених лінз із оптичними силами 3 дптр і 1,5 дптр.
- А 1,5 дптр
Б 2,5 дптр
В 4,5 дптр
Г 2 дптр
6. На який кут потрібно повернути дзеркало, щоб кут між падаючим і відбитим променями збільшився на α ?
- А на α
Б на $\frac{\alpha}{2}$
В на $-\alpha$
Г на 180°
7. Радіус кривизни увігнутого дзеркала — 48 см. Визначте фокусну відстань цього дзеркала.
- А 48 см
Б 36 см
В 0,24 м
Г 0,96 м
8. У дно озера забито стовп заввишки 4 м, який виступає з води на 1 м. Визначте довжину тіні від стовпа на дні озера, якщо промені падають на воду під кутом 45° .
9. На яку максимальну глибину можна занурити у воду точкове джерело світла, щоб квадратний пліт зі стороною 4 м не пропускав світла в простір над поверхнею води? Центр плоту розміщений над джерелом.
10. Заломлюючий кут скляної призми дорівнює 60° . Кут падіння променя на бічну грань призми — 30° . Визначте кут відхилення променя від початкового напрямку після проходження крізь призму.

§ 46

Гіпотеза квантів Планка. Фотон

Зародження квантової теорії. Сьогодні ми знаємо, що світлу притаманні корпускулярні та хвильові властивості. Проте науковий доказ цьому було отримано шляхом тривалих досліджень і революційних рішень. Вивчення явищ дифракції, інтерференції та поляризації світла привело до утвердження в кінці XIX ст. електромагнітної хвильової теорії світла. Проте ця теорія не пояснювала розподілу енергії у спектрі випромінювання *абсолютно чорного тіла*. Абсолютно чорне тіло — це уявна модель. Абсолютно чорним вважають тіло, яке за будь-якої температури поглинає повністю всю енергію світла, що падає на нього. Незважаючи на назву, абсолютно чорне тіло може випромінювати тепло. Відповідно випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла найкраща, у порівнянні з усіма іншими тілами за тієї ж температури. Наближеним до випромінювання абсолютно чорного тіла є випромінювання багаття, Сонця тощо.

У чому ж суть проблеми? На малюнку 213 зображено експериментально отримані криві розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла. По осі абсцис відкладено довжину хвиль, по осі ординат — потужність випромінювання з одиниці поверхні абсолютно чорного тіла.



Мал. 213. Розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла

Звернімо увагу на форму кривих розподілу за різних температур. Для всіх кривих характерним є наявність максимуму, тобто існує довжина хвилі λ_{\max} , на якій випромінювання найбільше. З підвищенням температури λ_{\max} стає чимраз коротшою. Саме тому розжарене тіло з підвищенням температури стає спочатку червоним, потім оранжевим і, нарешті, жовто-білим. І саме наявність максимуму не вдавалося пояснити, ґрунтуючись на хвильовій теорії випромінювання.

Необхідне пояснення запропонував у 1900 р. німецький фізик Макс Планк. На відміну від зрозумілого уявлення про те, що поглинання й випромінювання світлових хвиль відбувається неперервно, Макс Планк припустив, що тіло випромінює світло окремими порціями, які він назвав *квантами*¹ енергії. Енергія кванта пропорційна частоті випромінювання, $E = h\nu$. Коефіцієнт пропорційності h дістав назву *сталої Планка*.

Спіраючись на цю ідею, Планк дістав закон розподілу енергії у спектрі нагрітого тіла, який добре узгоджувався з експериментальними даними. На сьогодні значення сталої Планка визначено з високою точністю: $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Для більшості розрахунків використовують наближене значення $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Інколи використовують так звану зведену сталу Планка $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Для виходу із ситуації, коли одні експерименти доводять, що світло поводить себе як хвиля, а інші — як потік частинок, данський фізик Нільс Бор (1885–1962) запропонував *принцип доповнюваності*, згідно з яким для пояснення природи світла потрібно використовувати й корпускулярні, й хвильові властивості світла — як два складники його природи, що доповнюють один одного. Хвильові й квантові властивості світла не можна протиставляти. Властивості неперервності, характерні для електромагнітного поля світлової хвилі, не виключають властивостей дискретності, характерних для квантів світла — фотонів.

Ідея Планка про переривчастий (дискретний) характер випромінювання й поглинання світла значно вплинула на весь подальший розвиток фізики. Проте сам Планк сприймав свою ідею як деякий математичний прийом, який давав змогу отримати правильний результат, пояснюючи теплове випромінювання, настільки неймовірно було уявити неперервний хвильовий процес дискретним, адже, за класичними уявленнями, неперервність принципово відрізняє хвилю від частинки.

Таким чином, світло має електромагнітну природу і йому притаманні двоїсті квантово-хвильові властивості, саме цю двоїстість мають на увазі, коли говорять про *корпускулярно-хвильовий дуалізм* світла. У видимого світла квантові та хвильові властивості виявляються однаковою мірою. Хвильові властивості світла виявляються у процесах його поширення, інтерференції, дифракції, поляризації, а корпускулярні — у процесах взаємодії світла з речовиною.

Для інших видів випромінювання спостерігається важлива закономірність: на малих частотах більшою мірою виявляються хвильові властивості (наприклад, для радіовипромінювання), а на великих частотах — квантові (наприклад, рентгенівське випромінювання).

Властивості фотона. Мінімальну порцію (квант) світлової енергії, яка локалізована в частинці, Альберт Ейнштейн називав *фотоном*.

У сучасній фізиці фотон розглядають як одну з елементарних частинок, проте на відміну від частинок речовини він має специфічні властивості:

¹ Від лат. *quantum* — порція.

1. Фотон є електрично нейтральною частинкою, тобто його заряд дорівнює нулю.
2. Зупинити чи загальмувати фотон неможливо, він або рухається зі швидкістю світла, або не існує. Швидкість руху фотона не залежить від вибору системи відліку й завжди дорівнює швидкості світла у вакуумі, $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
3. На відміну від частинок речовини (електронів, атомів), фотони можуть порівняно легко випромінюватись або поглинатись. Тому не слід плутати швидкість поширення світлової хвилі в речовині зі швидкістю руху фотона. Фотони в речовині рухаються від частинки до частинки, поглинаються ними й знову виникають.
4. Енергія фотона пропорційна частоті електромагнітного випромінювання, квантом якого він є, $E = h\nu$. Повну енергію фотона можна визначити і за законом взаємозв'язку маси-енергії, $E = mc^2$.
5. Імпульс фотона пов'язаний з його енергією співвідношенням $p = \frac{E}{c}$.
Після перетворень: $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.
6. Маса спокою фотона дорівнює нулю. Ця властивість стосується тільки окремого фотона, а світло в цілому (як потік фотонів) має масу.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. У чому полягає суть гіпотези Планка? 2. Чому довелося звернутися до уявлення про дискретність світлового потоку? 3. Яке значення сталої Планка? Покажіть, що стала Планка вимірюється в тих же одиницях, що й момент імпульсу. 4. Назвіть основні властивості фотона. 5. Як визначити масу та імпульс фотона? Як напрямлений імпульс фотона?



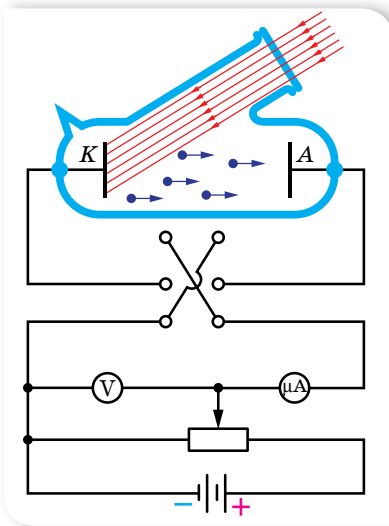
Вправа 29

1. Визначте довжину хвилі фотона, імпульс якого дорівнює імпульсу електрона, що має швидкість $10^4 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.
2. Визначте енергію фотонів, які відповідають найдовшим $\lambda = 0,75 \text{ мкм}$ і найкоротшим $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ хвилям видимої частини спектра.
3. До якого виду належать промені, енергія фотонів яких дорівнює $2 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$, $4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $3 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}$?
4. Визначте довжину хвилі променів, кванти яких мають таку саму енергію, що й електрон, який пролетів різницю потенціалів $4,1 \text{ В}$.
5. Визначте довжину хвилі й частоту випромінювання, маса фотонів якого дорівнює масі спокою електрона. Якого типу це випромінювання?
6. Джерело світла, потужність якого 100 Вт , випускає $5 \cdot 10^{20}$ фотонів за 1 с . Обчисліть середню довжину хвилі випромінювання.
7. Натреноване око, тривалий час перебуваючи в темряві, може сприймати світло з довжиною хвилі $0,5 \text{ мкм}$, якщо воно має потужність не менше $2 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$. Скільки фотонів потрапляє в такому разі на сітківку за 1 с ?

§ 47 Фотоефект

Явище фотоефекту. *Фотоефект* — це явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини й останні переходять у новий енергетичний стан.

Це явище може виявлятися по-різному: як фотойонізація окремих атомів і молекул газу під дією опромінення світлом; як фотоелектронна емісія під дією електромагнітного випромінювання (зовнішній фотоефект); у зміні електропровідності під дією світла (внутрішній фотоефект); в ініціюванні фотоядерних реакцій тощо.



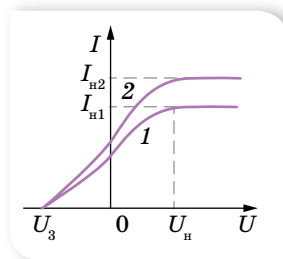
Мал. 214. Схема установки для дослідження фотоефекту

Уперше закономірності фотоефекту дослідив російський учений Олександр Григорович Столетов (1839–1896). У 1888 р. він створив установку, яка дала змогу добути електричний струм за допомогою зовнішнього фотоефекту (фотострум) і дослідити його залежність від інтенсивності та довжини хвилі випромінювання. На малюнку 214 зображено більш сучасну схему установки для дослідження явища фотоефекту. У скляний балон, з якого викачано повітря, уміщено два електроди. У балон на один з електродів крізь кварцове скло (прозоре не лише для видимого світла, а й для ультрафіолетового) надходить світло. На електроди подається напруга, яку можна змінювати за допомогою потенціометра й вимірювати вольтметром. Якщо освітлювати електрод, приєднаний до негативно-

го полюса батареї, то з нього вивириватимуться електрони, які, рухаючись в електричному полі, утворюватимуть струм. Фотострум, що виникає, вимірюють міліамперметром.

За малих напруг не всі електрони, що їх вириває світло, досягають другого електрода. Якщо, не змінюючи світлового потоку, збільшувати різницю потенціалів між електродами, то сила струму зростатиме. За певної напруги вона досягає максимального значення і вже не збільшується. Найбільший фотострум, який дістають за незмінного світлового потоку, називають *фотострумом насичення*. Очевидно, що фотострум насичення створюється за таких напруг, коли всі електрони, вирвані світловим потоком з катода, досягають анода. Отже, фотострум насичення може бути кількісною характеристикою фотоефекту.

Змінюючи характеристики падаючого світла (збільшуючи або зменшуючи світловий потік чи змінюючи частоту випромінювання), можна встановити залежність величини фотоструму від характеристик світлового випромінювання. Якщо, не змінюючи світлового потоку, зменшувати напругу, то фотострум починає зменшуватись, однак навіть коли напруга спадає до нуля, фотострум не зникає. Це означає, що випромінювання, яке падає на катод, вириваючи з нього електрони, ще їй надає їм кінетичну енергію. Величину цієї енергії визначають так. Якщо поміняти місцями полюси батареї, то електричне поле між електродами гальмуватиме рух електронів. Поступово підсилюючи затримуюче поле, можна зовсім припинити фотострум (мал. 215). У цьому разі навіть електрони, що вилетіли з максимальною швидкістю, вже не можуть подолати гальмівну дію електричного поля й долетіти до анода. Вимірявши затримуючу напругу U_3 , за якої припиняється фотострум, можна виміряти максимальну кінетичну енергію вибитих електронів $eU_3 = \frac{mv^2}{2}$.



Мал. 215.
Вольт-амперні характеристики фотоелектру (графіку 1 відповідає менший світловий потік, ніж графіку 2)

Продовжуючи дослід, можна встановити *залежність величини максимальної кінетичної енергії фотоелектронів від характеристик світлового випромінювання.*

І ще одну закономірність фотоелектру можна виявити, якщо замінювати матеріал, з якого виготовлено катод.

Закони зовнішнього фотоелектру. У результаті дослідів було встановлено три закони фотоелектру.

Кількість електронів, що вилітають з поверхні тіла під дією електромагнітного випромінювання, (а отже, і фотострум насичення) пропорційна його інтенсивності.

Перший закон фотоелектру легко пояснити з погляду хвильової природи світла: що більшою є енергія хвилі, то ефективніша її дія. Наступні два закони фотоелектру пояснити з позицій хвильової теорії світла не вдавалось. Виявилось, що:

максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно залежить від частоти опромінення й не залежить від його інтенсивності.

Для кожної речовини залежно від її температури й стану поверхні існує мінімальна частота ν_0 , за якої ще можливий зовнішній фотоелектр. Мінімальну частоту ν_0 (або максимальну довжину λ_0) електромагнітного випромінювання, за якої відбувається фотоелектр, називають *червоною*

межею фотоефекту. Термін «червона межа» підкреслює, що фотоефект обмежений з боку довгохвильової частини спектра. Отже, не кожне випромінювання здатне спричинювати фотоефект. Світло, довжина хвилі якого більша за червону межу λ_0 , не викликає фотоефекту, якою б не була його інтенсивність.

Досліди з освітлення катодів з різних матеріалів показали, що червона межа фотоефекту різна для різних речовин і залежить від хімічної природи речовини й стану поверхні тіла.

Червона межа фотоефекту визначається лише матеріалом освітлюваного катода й не залежить від його освітленості.

Другий і третій закони фотоефекту не можна пояснити на основі електромагнітної теорії світла. Справді, за хвильовою теорією фотоефект має спостерігатися за будь-якої частоти (довжини) світлової хвилі, оскільки енергія, яку одержує електрон під час розгойдування його електромагнітною хвилею, залежить від енергії хвилі, а остання визначається амплітудою коливачь, а не довжиною хвилі. Крім того, кінетична енергія вибитих електронів мала б залежати від освітленості поверхні, оскільки зі збільшенням освітленості електрону передавалась би більша енергія.

Рівняння фотоефекту. У 1905 р. Альберт Ейнштейн показав, що закони фотоефекту можна пояснити тільки з квантових уявлень про природу світла.

Пригадаймо, що електрон може вийти за межі якого-небудь тіла (наприклад, металу), тільки тоді, коли його кінетична енергія дорівнює або більша за роботу виходу $A_{\text{вих}}$ із цієї речовини. Нехай монохроматичне випромінювання, яке падає на метал, складається з фотонів, енергія яких $h\nu$. Електрони, розміщені недалеко від поверхні металу, поглинають фотони, які проникають у метал, набуваючи їхню енергію. Взаємодія випромінювання з речовиною в цьому разі складається з безлічі елементарних процесів, у кожному з яких один електрон поглинає повністю один квант енергії (один фотон). Якщо значення енергії фотона більше за роботу виходу, то електрон може вилетіти з металу. (Поясніть самостійно, чи може відбуватися зовнішній фотоефект за взаємодії світла з будь-якою речовиною.)

Таким чином, енергія фотона, що поглинається в процесі зовнішнього фотоефекту, витрачається на виконання роботи виходу електрона з металу й надання йому кінетичної енергії. Математично це записують *рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту*: $h\nu = A_{\text{вих}} + E_k$.

Квантова теорія дає таке пояснення законам фотоефекту:

1. Зі збільшенням інтенсивності монохроматичного випромінювання зростає кількість поглинутих металом фотонів, а отже, і кількість електронів, які вилітають з нього, прямо пропорційна інтенсивності випромінювання (перший закон).
2. З рівняння фотоефекту видно, що кінетична енергія електронів, які вилітають, залежить тільки від роду металу (який характеризується відповідною роботою виходу $A_{\text{вих}}$) та від частоти (довжини) падаючого

випромінювання ($h\nu$), а від інтенсивності не залежить, $E_{\text{к}} = h\nu - A_{\text{вих}}$ (другий закон).

3. Якщо енергія фотона менша від роботи виходу $A_{\text{вих}}$, то за будь-якої інтенсивності випромінювання електрони з металу не вилітатимуть (третій закон). Мінімальну частоту падаючого випромінювання (червону межу ν_0) можна визначити з рівняння фотоелектру, припустивши, що вся енергія падаючого фотона йде на виконання роботи виходу ($E_{\text{к}} = 0$): $h\nu_0 = A_{\text{вих}}$ або $h \frac{c}{\lambda_0} = A_{\text{вих}}$.

З рівняння Ейнштейна можна визначити сталу Планка. Розрахунки підтверджують теоретично запропоноване Максом Планком значення $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с, яке він отримав, пояснюючи теплове випромінювання тіл. Збіг значень сталої Планка, здобутих різними методами, підтверджує правильність квантової теорії світла.

Внутрішній фотоелектр. У 1873 р. англійські електрики Мей і Сміт, досліджуючи провідний кабель із селену, помітили, що під час освітлення його опір зменшується.

Пригадаймо, що селен належить до напівпровідників. Оскільки за звичайних умов у напівпровідників дуже мало вільних носіїв зарядів (електронів і дірок), напівпровідники мають великий питомий опір. Проте валентні електрони в них порівняно слабко зв'язані з атомами і, діставши надлишкову енергію під час опромінення, вони можуть відірватися від атомів і перейти у вільний стан.

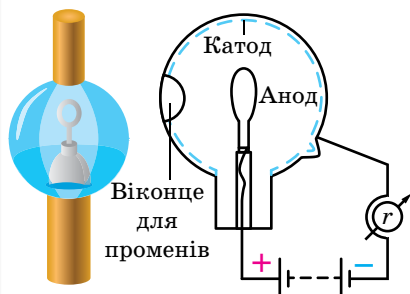
Подальші дослідження показали, що подібні процеси можуть відбуватися не тільки в напівпровідників. Спостережуване явище дістало назву *внутрішнього фотоелектру*.

Внутрішній фотоелектр — явище перерозподілу електронів за енергетичними станами в рідинах і твердих тілах унаслідок поглинання ними електромагнітного випромінювання.

На відмінну від зовнішнього фотоелектру опромінені електрони залишаються в тілі, але переходять у якісно новий енергетичний стан — стають «вільними», утворюючи пару «електрон–дірка». Таким чином у разі опромінення напівпровідника чи діелектрика в них збільшується концентрація вільних носіїв заряду, а отже, підвищується провідність.

Застосування фотоелектру. Відкриття явища фотоелектру мало велике значення для кращого розуміння природи світла. Але цінність науки полягає не лише в тому, що вона з'ясує складну й багатогранну будову доквілля, а й у тому, що наука дає нам засоби, за допомогою яких можна удосконалювати виробництво, поліпшувати умови матеріального та культурного життя. Широкого практичного використання набули *фотоелементи із зовнішнім фотоелектром та напівпровідникові фотоелементи з внутрішнім фотоелектром*.

Фотоелементи із зовнішнім фотоелектром — це вакуумні прилади для одержання фотострумів. Найпростіший вакуумний фотоелемент є скляним балоном, майже вся внутрішня поверхня якого покрита



Мал. 216. Вакуумні фотоелементи



Мал. 216. Сонячні батареї

світлочутливим шаром металу, котрий відіграє роль фотокатода (мал. 216). Відкритим є невелика частина для доступу світла. Анодом є металеве кільце, закріплене в балоні.

За умови освітлення катода з нього вибиваються електрони, і в колі виникає електричний струм. Фотоелементи широко використовують для автоматизації різних процесів. У поєднанні з електричними підсилювачами фотоелементи входять до складу різних фотореле — пристроїв автоматичного керування, які використовують безінерційність фотоефекту, тобто здатність фотоелемента майже миттєво реагувати на світловий вплив або його зміну. Це дає змогу створювати різноманітні апарати, які «стежать» за освітленістю вулиць, своєчасно запалюють і гасять бакени на річках, працюють «контролерами» в метро, рахують готову продукцію, контролюють якість обробки деталей тощо.

До напівпровідникових фотоелементів із внутрішнім фотоефектом належать фотоопори (фоторезистори), фотодіоди, сонячні батареї та ін. (мал. 217).

Пристрої, дія яких ґрунтується на використанні фотопровідності напівпровідників, називаються *фотооперами* (фоторезисторами). Їх застосовують для автоматичного керування електричними колами за допомогою світлових сигналів. На відміну від фотоелементів, фоторезистори можна використовувати в колах змінного струму, оскільки їхній електричний опір не залежить від напрямку струму.

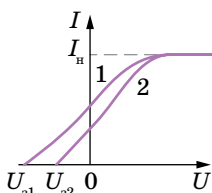
Виготовляючи фоторезистори, тонкий шар напівпровідника наносять на ізолятор з електродами й покривають плівкою прозорого лаку. Виготовляти фоторезистори із цільного напівпровідника немає потреби, оскільки випромінювання проникає в напівпровідник лише на невелику глибину.

Як матеріал для фоторезисторів використовують кремній, селен, сірчатий вісмут тощо. Кожний із цих матеріалів має свої особливості, які визначають галузь його застосування. Переваги фоторезисторів: висока чутливість, великий строк служби, малі розміри, простота виготовлення, можливість вибору фотоматеріалів. Недоліки: відсутність прямої пропорційності між струмом у колі та інтенсивністю освітлення, вплив на величину опору температури довкілля, інерційність. Останній недолік пояснюється тим, що електрони й дірки після припинення освітлення починають рекомбінувати, тому в умовах швидких змін світлового потоку провідність провідника не встигає слідувати за цими змінами.

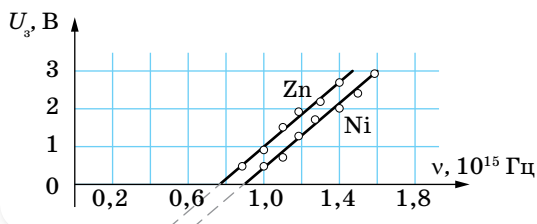


ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Які закономірності виявляються у процесі зовнішнього фотоефекту? **2.** Які суперечності виявились між закономірностями фотоефекту і хвильовою теорією світла? **3.** Як з позицій квантової фізики пояснюються закони фотоефекту? **4.** На малюнку 214 показано схему установки для вивчення зовнішнього фотоефекту. Змінюючи напругу між анодом і катодом вакуумної трубки, вимірюють силу струму в колі та знімають вольт-амперну характеристику фотоефекту (мал. 215). Поясніть: а) від чого залежить значення затримуючої напруги U_3 , за якої значення фотоструму дорівнює нулю; б) чому за умови великих додатних значень анодної напруги фотострум перестає збільшуватись, досягаючи максимально можливого в даних умовах значення I_H ; в) від чого залежить значення I_H ; г) чим пояснити, що для двох наведених графіків значення U_3 однакові, а значення I_H — різні? **5.** Однією лампою, інтенсивність випромінювання якої не змінюється з часом, по черзі освітлюють два фотокатоди й одержують дві вольт-амперні характеристики зовнішнього фотоефекту, графіки яких наведено на малюнку 218. Установіть: а) чому для вказаних графіків значення затримуючої напруги U_3 відрізняються; б) у якого з фотокатодів більша робота виходу й чому; 3) чому на графіках значення фотоструму насичення однакові. **6.** На малюнку 219 наведено експериментальні криві залежності U_3 від ν для фотоефекту на двох металах — цинку та нікелі. Як видно з графіка, ці криві є прямими, тобто залежності носять лінійний характер. Поясніть: 1) чому залежності $U(\nu)$ носять лінійний характер; 2) які величини можна визначити, якщо за графіками виміряти: а) відрізки, що відтинають криві на осі напруг; б) нахил кривих до осі частот.



Мал. 218. Вольт-амперні характеристики зовнішнього фотоефекту



Мал. 219. Залежності U_3 від частоти ν для фотоефекту на двох металах



Приклади розв'язування задач

Задача. Металева пластинка освітлюється світлом довжиною хвилі 420 нм. Робота виходу електронів з поверхні пластинки дорівнює 2 еВ. Визначте затримуючу різницю потенціалів, за якої припиниться фотострум.

Дано:

$$\lambda = 420 \text{ нм}$$

$$A_{\text{вих}} = 2 \text{ еВ}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$U_3 \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Рівняння Ейнштейна для фотоелекту:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вих}}.$$

Фотострум припиниться, коли потенціальна енергія електрона в затримуючому полі почне дорівнювати його кінетичній енергії, тобто

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3.$$

Підставивши цей вираз у рівняння Ейнштейна, отримуємо:

$$eU_3 = h\nu - A_{\text{вих}}.$$

Оскільки $\nu = \frac{c}{\lambda}$, зрештою маємо:
$$U_3 = \frac{h \frac{c}{\lambda} - A_{\text{вих}}}{e}.$$

Після підстановки даних і враховуючи, що $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, визначаємо $U_3 = 0,95 \text{ В}$.

Відповідь: $U_3 = 0,95 \text{ В}$.



Вправа 30

1. Якої довжини промені світла треба спрямувати на поверхню цезію, щоб максимальна швидкість виривання фотоелектронів дорівнювала $2000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$? Червона межа фотоелекту для цезію — 690 нм.
2. Найбільша довжина хвилі світла, за якої відбувається фотоелект для вольфраму, дорівнює 0,275 мкм. Визначте роботу виходу електронів з вольфраму; найбільшу швидкість руху електронів, що виривається з вольфраму світлом довжиною хвилі 0,18 мкм; найбільшу енергію цих електронів.
3. Енергія фотона дорівнює кінетичній енергії електрона, що має початкову швидкість $10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ і прискорюється різницею потенціалів 4 В. Визначте довжину хвилі фотона.
4. У явищі фотоелекту електрони, що вириваються з поверхні металу випромінюванням частотою $2 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, повністю затримуються гальмівним полем з різницею потенціалів 7 В, а частотою $4 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ — з різницею потенціалів 15 В. За цими даними обчисліть сталу Планка.
5. На поверхню деякого металу падає фіолетове світло довжиною хвилі 0,4 мкм. При цьому затримуюча напруга для вибитих світлом електронів — 2 В. Чому дорівнює затримуюча напруга в разі освітлення того самого металу червоним світлом довжиною хвилі 0,77 мкм?
6. Краплина води об'ємом 0,2 мл нагрівається світлом довжиною хвилі 0,75 мкм, поглинаючи щосекунди 10^{10} фотонів. Визначте швидкість нагрівання води.

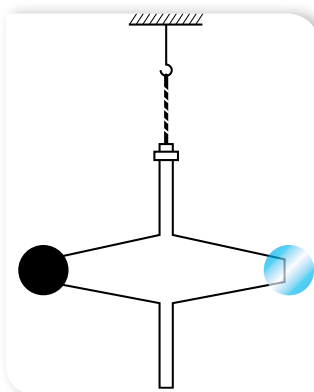
7. Цезієву пластинку, робота виходу електронів з якої 1,9 еВ, опромінують фіолетовим світлом довжиною хвилі $4 \cdot 10^{-7}$ м. До якого максимального потенціалу зарядиться пластинка?
8. Фотони з енергією 4,9 еВ виривають електрони з металу з роботою виходу 4,5 еВ. Визначте максимальний імпульс, що передається поверхні металу за вильоту кожного електрона.
9. Плоска пластинка з металу, червона межа фотоэффекту для якого дорівнює $4 \cdot 10^{-7}$ м, освітлюється ультрафіолетовими променями довжиною хвилі 300 нм. За межами пластинки є однорідне магнітне поле індукцією $6 \cdot 10^{-5}$ Тл, напрямком якого паралельний площині пластинки. Визначте радіус кола, який описують фотоелектрони, що вилітають із пластинки.

§ 48 Тиск світла

Дослід Лебедева. Уперше висловив припущення про існування тиску світла Йоганн Кеплер у 1619 р., пояснюючи цим тиском відхилення хвостів комет, які наближались до Сонця. У 1873 р. Джеймс Максвелл теоретично розрахував силу тиску сонячного випромінювання на чорну поверхню, розташовану перпендикулярно до сонячних променів. Цей тиск приблизно дорівнював $4 \cdot 10^{-6}$ Па. Згідно з теорією Максвелла світло, як і будь-яка електромагнітна хвиля, чинить тиск на перешкоду. Під дією електричного поля хвилі електрони в тілах коливаються. Утворюється електричний струм. Цей струм напрямлений уздовж напруженості електричного поля. На електрони, які рухаються впорядковано, діє сила Лоренца магнітного поля. За правилом лівої руки Лоренца напрямлена вздовж хвилі. Це і є сила тиску світла.

Проте жодних експериментальних даних, які б підтвердили існування світлового тиску, на той час не було. Виявити й виміряти тиск світла вдалось у 1900 р. російському фізику Петру Миколайовичу Лебедеву.

В експериментальній установці Лебедева (мал. 220) на тонкій пружній кварцовій нитці було підвішено коромисло з тонкими легкими пластинками з металевої фольги. Одна з пластин була покрита тонким шаром сажі. Світло падало на пластинки. Чорною пластинкою світло поглиналось, дзеркальною — відбивалось. Про величину світлового тиску можна було зробити висновок, вимірявши кут закручування нитки. Проте на закручування нитки впливало неоднакове нагрівання боків пластин (той бік, що повернутий до джерела світла, нагрівається дужче, ніж протилежний). Молекули повітря, що відбиваються від нагрітого боку, передають пластинці більший імпульс, ніж молекули, що відбиваються від холоднішого боку. Унаслідок



Мал. 220. Схема дослідження вимірювання тиску світла

цього виникає закручуючий момент, який у 1000 разів більший за закручуючий момент, зумовлений тиском світла. Щоб позбутися цього впливу, Лебедєв помістив установку в скляний балон, з якого викачали повітря. Тиск світла, отриманий з експерименту, збігався зі значенням світлового тиску, розрахованим Максвеллом, з точністю до 2 %.

Пояснення тиску світла з квантових позицій. Квантова теорія світла пояснює причину світлового тиску досить просто. Фотони, подібно до звичайних частинок речовини, мають імпульс. Коли фотони поглинаються тілом, то вони передають тілу свій імпульс. За законом збереження, набутий імпульс тіла дорівнює зміні імпульсу фотонів. У випадку дзеркальної поверхні фотони відбиваються, і тіло отримує подвійний імпульс, а чорна пластина, що поглинає фотони, отримує вдвічі менший імпульс, ніж дзеркальна. Це й зумовлює обертання пластин. За другим законом Ньютона, зміна імпульсу тіла означає, що на тіло діє сила. Відношення сили до площі поверхні, на яку вона діє, і є тиском.

Таким чином, тиск світла пояснюється і хвильовою, і квантовою теоріями світла.

Тиск світла розраховують за формулою $p = (1 + k)\omega$, де $k = 0$ — для чорної поверхні, $k = 1$ — для дзеркальної поверхні, ω — густина енергії електромагнітної хвилі.

Інтенсивність хвилі, або густина потоку випромінювання I , визначається формулою $I = \frac{nh\nu}{S\Delta t}$ або $I = \omega c$, де c — швидкість світла, $nh\nu$ — сумарна енергія всіх фотонів, які падають на поверхню.

Сонячні промені приносять щосекунди 1370 Дж енергії на кожний квадратний метр поперечного перерізу Землі. Цю величину називають сонячною сталою, $I_c = 1370 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть ідею досліду Лебедєва. 2. Яка основна складність виникла під час вимірювання тиску світла і як її вдалось подолати Лебедєву?



Приклади розв'язування задач

Задача. Потік монохроматичного світла $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м падає нормально на плоску дзеркальну поверхню й тисне на неї із силою 10^{-8} Н. Визначте кількість фотонів, які щосекунди падають на цю поверхню.

Дано:

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$F = 10^{-8} \text{ Н}$$

$$k = 1$$

$$n = ?$$

Розв'язання:

Тиск світла за нормального падіння на поверхню дорівнює $p = \frac{nh\nu}{Stc}(1 + k)$.

За визначенням, тиск $p = \frac{F}{S}$, а $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

Підставивши ці вирази в рівняння, отримуємо $\frac{F}{S} = \frac{nhc}{Stc\lambda}(1+k)$,

звідки $n = \frac{Ft\lambda}{h(1+k)}$.

$$n = \frac{10^{-8} \text{ Н} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 1 \text{ с}}{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2} = 3,78 \cdot 10^{18} \text{ фотонів.}$$

Відповідь: $3,78 \cdot 10^{18}$ фотонів.



Вправа 31

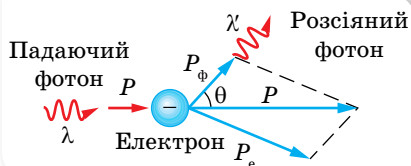
1. На поверхню площею 50 см^2 , що повністю поглинає світло, за 1 с падає нормально до неї $1,5 \cdot 10^{20}$ фотонів жовтого випромінювання з довжиною хвилі 589 нм . Яка сила тиску цього випромінювання діє на дану поверхню у вакуумі?
2. На поверхню площею 100 см^2 щохвилини падає 63 Дж світлової енергії. Визначте світловий тиск у випадках, коли поверхня повністю відбиває й повністю поглинає світло.
3. Визначте силу світлового тиску сонячного випромінювання, що падає нормально на дзеркальну поверхню площею 30 м^2 . Вважайте, що сонячна стала дорівнює $1,4 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$.
4. Пучок світла з довжиною хвилі $0,49 \text{ мкм}$, що падає перпендикулярно до поверхні, чинить на неї тиск 5 мкПа . Скільки фотонів щосекунди потрапляє на 1 м^2 цієї поверхні? Коефіцієнт відбиття світла від даної поверхні — $0,25$.
5. Визначте тиск світла на стінки електричної лампи потужністю 100 Вт . Колба лампи має сферичну поверхню радіусом 5 см , стінки якої відбивають 10% світла. Вважайте, що вся спожита лампою потужність іде на випромінювання.

§ 49

Явища, що пояснюються квантовими властивостями світла

Ефект Комптона. До експериментів, які були проведені на початку 20-х років ХХ ст. і підтвердили квантову природу світла, належить ефект Комптона, названий так на честь його відкривача Артура Комптона (1892–1962). Комптон вивчав розсіювання короткохвильового випромінювання різними речовинами, зокрема розсіювання фотонів рентгенівського випромінювання на вільних електронах у графіті та парафіні.

У ході досліджень Комптон виявив, що частота хвилі розсіяного світла менша від частоти падаючого світла. Відповідно довжина хвилі розсіяного фотона λ' більша за довжину хвилі падаючого фотона λ . Досліди показали, що різниця $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не залежить від довжини падаючого світла і природи речовини, яка розсіює, а визначається тільки значенням кута розсіяння θ (мал. 221), а саме, визначається формулою



Мал. 221. Комптонівське розсіяння фотона

$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) = 2\frac{h}{mc}\sin^2\frac{\theta}{2}$, де $\frac{h}{mc} = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м (m — маса електрона).

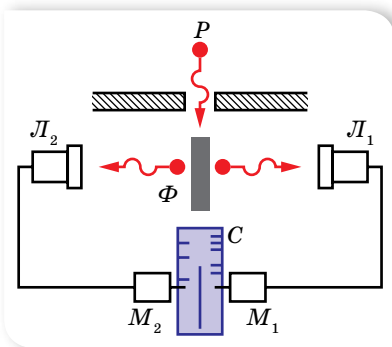
Вираз $\frac{h}{mc} = \lambda_K$ називають комптонівською довжиною хвилі.

Зменшення частоти (збільшення довжини хвилі) вказувало на втрату енергії. Пояснити цей ефект у рамках електромагнітної теорії світла не вдавалось. Довжина хвилі розсіяного випромінювання не має змінюватись, адже під його дією в речовині повинні утворитись електромагнітні хвилі тієї самої частоти, що й падаючого випромінювання.

Комптон показав, що виявлений ним ефект можна пояснити на основі квантової теорії світла, а саме, співударом налітаючого фотона з електроном речовини. Під час співудару падаючий фотон передає частину свого імпульсу електрону. Відповідно до закону збереження імпульсу: $\vec{p} = \vec{p}_e + \vec{p}_\phi$, звідси $p_\phi < p$, тобто $\lambda' > \lambda$.

Установлено, що ефект Комптона не спостерігається в діапазоні видимого випромінювання, оскільки енергія світлового кванта в цьому разі сумірна з енергією зв'язку електрона в атомі. Рентгенівський фотон має набагато більшу енергію, яка перевищує енергію зв'язку електрона в атомі, і тому зіткнення фотона з електроном відбувається за законами пружного удару. За таких умов спостерігається розсіювання рентгенівських променів, довжина хвилі яких при цьому зростає.

Дослід Боте. Ще один чудовий дослід, який безпосередньо підтверджував гіпотезу Альберта Ейнштейна про корпускулярну природу світла, зокрема й рентгенівського випромінювання, провів німецький фізик Вальтер Боте. У досліді Боте на певній відстані від джерела рентгенівського випромінювання розміщували два лічильники Гейгера — Мюллера (мал. 222). З курсу фізики 9 класу ви знаєте, що ці лічильники здатні реєструвати появу в них заряджених частинок, зокрема й вільних електронів. У досліді Боте поява вільних електронів була зумовлена фото-ефектом або комптон-ефектом після попадання в лічильник рентгенівського випромінювання.



Мал. 222. Схема досліді Боте

Рентгенівські промені випромінювала звичайна рентгенівська трубка P . Вони потрапляли на пластинку з тонкої металеві фольги Φ , унаслідок чого в ній також збуджувались рентгенівські промені, але інтенсивність їх була дуже слабкою. Ідея досліді полягала в тому, щоб зареєструвати електрони в лічильниках L_1 і L_2 . Якщо збуджене рентгенівське випромінювання виходить із пластинки Φ у вигляді електромагнітної хвилі, то в обох лічильниках електрони мають виникати одночасно, і лічильники одночасно мали давати

імпульс. Якщо ж рентгенівське випромінювання є потоком фотонів, кожний з яких випускається з пластинки Φ незалежно від інших, то одночасна реєстрація механізмами M_1 і M_2 (які робили відповідні відмітки на рухомій стрічці C) влучання в лічильники L_1 і L_2 рентгенівських фотонів має бути випадковою подією.

Дослід Боте показав, що одночасний показ лічильників справді випадковий, що є підтвердженням квантової природи рентгенівського випромінювання.

Фотохімічна дія світла. Поглинання світла речовиною може супроводжуватись також хімічною дією світла. Хімічна дія світла виявляється в тому, що світло викликає такі хімічні перетворення, які без світла не відбуваються. Хімічні реакції, що перебігають унаслідок дії світла, називають *фотохімічними*. Наприклад, під дією ультрафіолетового випромінювання з молекул кисню утворюються молекули озону, $3\text{O}_2 + h\nu = 2\text{O}_3$. Як видно, у процесі фотохімічної реакції кожний поглинутий фотон взаємодіє з однією молекулою.

Найважливішою фотохімічною реакцією є *фотосинтез* — процес утворення під дією світла вуглеводнів з виділенням кисню в рослинах і деяких мікроорганізмах за реакцією $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \frac{1}{6}(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) + \text{O}_2$.

Завдяки фотосинтезу на Землі зберігається безперервний кругообіг вуглецю й підтримується життя. Учені встановили, що фотосинтез хлорофілом вуглеводів, що містяться в рослинах, відбувається під дією червоних променів спектра сонячного світла. Приєднуючи до вуглеводневого ланцюга атоми інших елементів, одержуваних із ґрунту, рослини будують молекули вуглеводів, жирів і білків, створюючи їжу для людини й тварин.

Хімічну дію світла покладено в основу фотографії на фотоплівку (фотопластину). Основу такої фотографії становить фотохімічна реакція розкладу бромистого срібла. Зір людини також пояснюється особливими фотохімічними процесами, які відбуваються в сітківці ока.

Сьогодні такі приймачі випромінювання, як фотоемульсії, фотоелектронні помножувачі, електронно-оптичні перетворювачі (що перетворюють інфрачервоне випромінювання на видиме), ПЗЗ-матриці (від скорочення: прилади із зарядовим зв'язком), дають змогу астрономам реєструвати випромінювання небесних тіл у всьому діапазоні електромагнітного спектра.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. У чому полягає суть ефекту Комптона? Чому не вдається його пояснити, виходячи з хвильової теорії світла? **2.** У чому суть досліду Боте? Який висновок можна зробити з цього досліду? **3.** У чому виявляється хімічна дія світла? **4.** Які реакції називають фотохімічними? Наведіть приклади фотохімічних реакцій.



Приклади розв'язування задач

Задача. В ефекті Комптона фотон унаслідок співудару з електроном розсіявся під кутом 90° . Визначте енергію фотона до розсіювання, якщо після розсіювання енергія фотона дорівнює $0,4 \text{ MeV}$.

Дано:

$$\theta = 90^\circ$$

$$E' = 0,4 \text{ MeV}$$

$$E = ?$$

Розв'язання:

$$\text{За формулою Комптона } \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta).$$

Тоді формулу Комптона можна записати у вигляді:

$$\frac{hc}{E'} - \frac{hc}{E} = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta).$$

Урахувавши, що енергія спокою електрона $E_0 = mc^2$, отримуємо:

$$\frac{hc}{E'} - \frac{hc}{E} = \frac{hc}{E_0} (1 - \cos \theta), \text{ звідси: } E = \frac{E_0 E'}{E_0 - E' (1 - \cos \theta)}.$$

Після підстановки даних отримуємо:

$$E = \frac{0,51 \text{ MeV} \cdot 0,4 \text{ MeV}}{0,51 \text{ MeV} - 0,4 \text{ MeV} (1 - \cos 90^\circ)} = 1,85 \text{ MeV}.$$

Відповідь: $E = 1,85 \text{ MeV}$.



Вправа 32

1. Рентгенівські промені з довжиною хвилі $70,8 \text{ пм}$ зазнають комптонівського розсіяння на парафіні. Визначте довжину розсіяного рентгенівського випромінювання в напрямках: а) $\theta = \frac{\pi}{2}$; б) $\theta = \pi$.
2. Якою була довжина хвилі рентгенівського випромінювання, якщо внаслідок комптонівського розсіяння цього випромінювання графітом під кутом 60° довжина хвилі розсіяного випромінювання дорівнює $25,4 \text{ пм}$?
3. Рентгенівські промені довжиною хвилі 20 пм зазнають комптонівського розсіяння під кутом 90° . Визначте зміну довжини хвилі рентгенівського випромінювання, а також енергію та імпульс електрона віддачі.
4. В акті комптонівського розсіяння енергія падаючого фотона розподіляється порівну між розсіяним фотоном та електроном віддачі. Кут розсіяння — 90° . Визначте енергію та імпульс розсіяного фотона.
5. Енергія рентгенівських променів — $0,6 \text{ MeV}$. Визначте енергію електрона віддачі, якщо довжина хвилі рентгенівських променів після комптонівського розсіяння змінилась на 20% .



Виконуємо навчальні проекти

- ▶ Сонце — основне джерело енергії. Використання сонячної енергії.
- ▶ Тиск світла в космічних масштабах.
- ▶ Фотоелементи, їх використання.

Перевірте себе (§ 46–49)

1. Укажіть явище, у якому більше проявляються корпускулярні властивості світла.

А фотоефект	В дисперсія
Б дифракція	Г поляризація
2. Обчисліть частоту хвилі, якій відповідає фотон з енергією $4,9 \cdot 10^{-19}$ Дж.

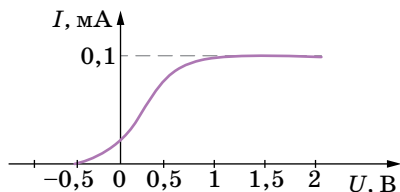
А $6,5 \cdot 10^{14}$ Гц	Б $7,4 \cdot 10^{14}$ Гц
В $8 \cdot 10^{14}$ Гц	Г $6,9 \cdot 10^{14}$ Гц
3. Обчисліть імпульс фотона, енергія якого $5 \cdot 10^{-19}$ Дж.

А $4,82 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$	В $1,3 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$
Б $4,3 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$	Г $1,67 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$
4. Укажіть, від чого залежить максимальна кінетична енергія фотоелектронів і як саме.

А від маси фотонів; обернено пропорційно	Б від заряду електронів; обернено пропорційно
В від частоти світла; лінійно	Г від швидкості фотонів; прямо пропорційно
5. Обчисліть червону межу фотоефекту для калію.

А 532 нм	В 565 нм
Б 510 нм	Г 458 нм
6. Червоною межею фотоефекту для металу є зелене світло. Укажіть, опроміювання цього металу яким світлом викличе фотоефект.

А червоним	В синім
Б жовтим	Г зеленим
7. При освітленні фотоелемента червоним світлом із частотою $3,9 \cdot 10^{14}$ Гц запірна напруга дорівнювала 0,5 В. При освітленні фотоелемента фіолетовим світлом, частота якого $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц, запірна напруга дорівнювала 2 В. Яке значення сталої Планка було одержано в досліді?
8. За вольт-амперною характеристикою вакуумного фотоелемента, катод якого освітлюється світлом з довжиною хвилі 0,4 мкм, визначте червону межу фотоефекту.



9. Визначте довжину хвилі рентгенівського випромінювання, що падає на графіт, якщо після розсіювання на кут 90° довжина хвилі зросла на 30 %.

Розділ 4

КВАНТОВА
ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

На початку ХХ ст. завдяки дослідям Резерфорда вдалося встановити будову атома. Одночасно зі створенням квантової теорії та спробами пояснити будову атома та його електронних оболонок розпочалось дослідження й атомного ядра. Що, у свою чергу, відкрило таємниці мікросвіту елементарних частинок, дослідження яких триває і до цього часу.

§ 50

Будова атома

Постулати Бора. Відкриття складної будови атома — найважливіший етап становлення сучасної фізики, який позначився на її наступному розвитку. Багато часу та зусиль учених різних країн світу знадобилося, щоб сформувалися сучасні уявлення про будову атома.

Основоположною в галузі атомної фізики стала модель атома, що була одержана з низки дослідів, які називають дослідями Резерфорда.

Згідно з моделлю Резерфорда, атом складається з масивного важкого ядра й електронів, що обертаються навколо нього. Будучи прогресивним кроком у розумінні будови мікросвіту, модель атома Резерфорда має лише історичну цінність. Проблема цієї моделі полягала в її нестабільності. Відповідно до теорії Максвелла, заряджена частинка, що рухається з прискоренням, має випромінювати. Відповідно, електрон, обертаючись навколо ядра, рухається з доцентровим прискоренням, а отже, має випромінювати та, втрачаючи кінетичну енергію, падати на ядро. Такий атом має існувати протягом неймовірно малих інтервалів часу (близько 10 мільярдних долі секунди).

Вихід із ситуації запропонував данський фізик Нільс Бор у 1913 р. Він дійшов висновку, що планетарну модель атома Резерфорда слід доповнити ідеями квантової теорії, яка починала утверджуватись. Бор припустив, що електрони в атомах також не випромінюють енергію неперервно, випромінювати вони можуть лише під час переходу з одного енергетичного стану в інший.

Пригадати історію становлення наукових пояснень будови атома й дослідів Резерфорда, які ви вивчали в 9 класі, можете за допомогою електронного додатку.



Нільс Бор доповнив планетарну модель атома такими *постулатами*:

1. Атомна система може перебувати тільки в особливих стаціонарних, або квантових, станах, кожному з яких відповідає певна енергія E_n . У стаціонарному стані електрон рухається по коловій орбіті радіусом r й атом енергію не випромінює (у Нільса Бора йшлося про радіус орбіти електрона, зараз ми говоримо про орбіталі електронів).
2. Перехід атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням або поглинанням фотонів, енергію яких $h\nu$ визначають за формулою $h\nu = E_k - E_n$, де k і n — цілі числа (номери стаціонарних станів) (мал. 223).

3. Момент імпульсу електрона, що рухається зі швидкістю v_n на n -ій орбіті, радіус якої r_n , набуває дискретних значень:

$$L = m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar, \text{ де } n = 1, 2, 3 \dots,$$

m — маса електрона, \hbar — зведена стала Планка.

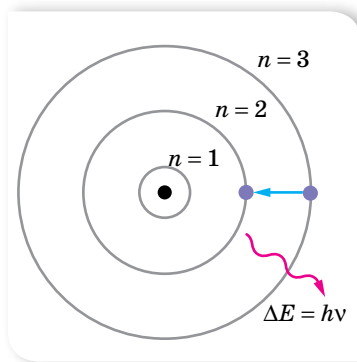
Використовуючи закони механіки Ньютона та правила квантування, Бор зумів з високою точністю обчислити енергетичні стани атома Гідрогену. Проте застосування її до складніших атомів не давало таких блискучих результатів. По своїй суті вона була спрямована на вирішення конкретної проблеми: обґрунтування стабільності атома та пояснення лінійчатих спектрів. Незважаючи на це, теорія Бора в розвитку фізики відіграла значну роль.

По-перше, ідея квантування в моделі атома Бора узгоджувалася з ідеями де Бройля. Тим самим підтверджувалося, що *корпускулярно-хвильовий дуалізм закладений у самій структурі атома*.

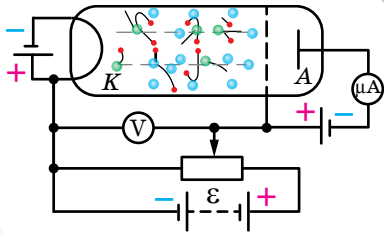
По-друге, вона стала поштовхом для розвитку *квантової фізики*.

Досліди Франка і Герца. Першими експериментальними, що підтвердили теорію Бора, стали досліди Джеймса Франка і Генріха Герца 1913 р. Ідея дослідів була така. Якщо через газ пропускати потік електронів певної енергії, то електрони стикатимуться з атомами, внаслідок чого енергія електронів буде змінюватись. Якщо співударі будуть пружними, то внаслідок того, що маса електронів набагато менша за масу атомів, втрати їхньої кінетичної енергії будуть незначними. Під час непружного удару електрон може передати всю свою енергію або її частину одному з електронів атома. Згідно із законами класичної механіки кількість переданої енергії буде визначатись умовами зіткнення та може набувати довільних значень. Якщо ж стаціонарні стани справді існують, то зміни енергії електронів не будуть довільними, — вони будуть дорівнювати різниці значень енергій стаціонарних рівнів атомів.

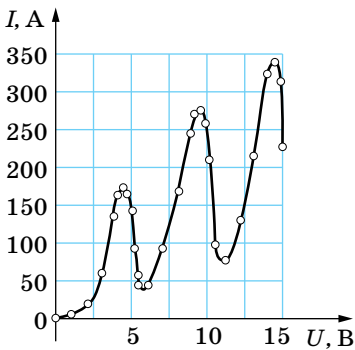
Схему дослідів наведено на малюнку 224 (с. 238). Скляна колба заповнена парою ртуті (хімічний елемент Меркурій).



Мал. 223. Перехід атома з одного стаціонарного стану в інший



Мал. 224. Схема досліджу Франка й Герца



Мал. 225. Залежність сили струму від напруги в досліді Франка й Герца

Електрони з катода K під дією електричного поля, створеного між електродами джерелом струму E , прямують до сітки й анода A . Між сіткою та анодом A існує незначна напруга (0,5 В), яка гальмує повільні електрони, перешкоджаючи їхньому рухові до анода.

Результати дослідження залежності сили струму I в колі анода від напруги U показали, що ця залежність має складний нелінійний характер (мал. 225).

Існування максимумів струму за напруг 4,9; 9,8 і 14,7 В можна пояснити лише однією причиною — існуванням в атомі Меркурію стаціонарних станів. Очевидно, за напруги $U < 4,9$ В електрони не встигають набути достатньої енергії та, зіткнувшись із атомами Меркурію, пружно відбиваються (адже $m_e < m_{\text{Hg}}$) і легко долають гальмівну напругу між сіткою та анодом. За напруги $U = 4,9$ В відбувається вже їх непружне зіткнення й електрони втрачають енергію, збуджуючи атоми Меркурію (енергії електрона достатньо для цього). Але, втративши свою енергію, електрони не можуть подолати гальмівної напруги, і сила струму в колі

анода різко спадає. З подальшим зростанням напруги між катодом K і сіткою сила анодного струму знову зростає, досягаючи максимуму за напруги 9,8 В. Знову відбуваються непружні зіткнення з передавання енергії від електрона до атома, тобто енергія атома Меркурію змінюється на 4,9 еВ.

ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. У чому сутність планетарної моделі атома?
2. У чому планетарна модель атома не узгоджується із законами класичної фізики?
3. Сформулюйте постулати Бора.
4. У чому полягала ідея досліді Франка й Герца? Який висновок можна зробити на основі його результатів?

§ 51

Теорія атома Гідрогену за Бором

Енергетичні рівні атома Гідрогену. Згідно з постулатами Бора перехід атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням чи поглинанням фотонів, енергію яких $h\nu$ визначають за форму-

лою $h\nu = E_k - E_n$, або $\nu = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}$, де k і n — цілі числа (номери стаціонарних станів), якщо $E_k > E_n$, фотон із частотою ν випромінюється, якщо $E_k < E_n$, — поглинається.

Для наочності прийнято зображати значення енергій атомів у вигляді горизонтальних прямих, розташованих одна над одною на відстані, пропорційній різниці їх енергій. Найнижча пряма відповідає нормальному стану атома.

На малюнку 226 зображено схему рівнів енергії атома Гідрогену.

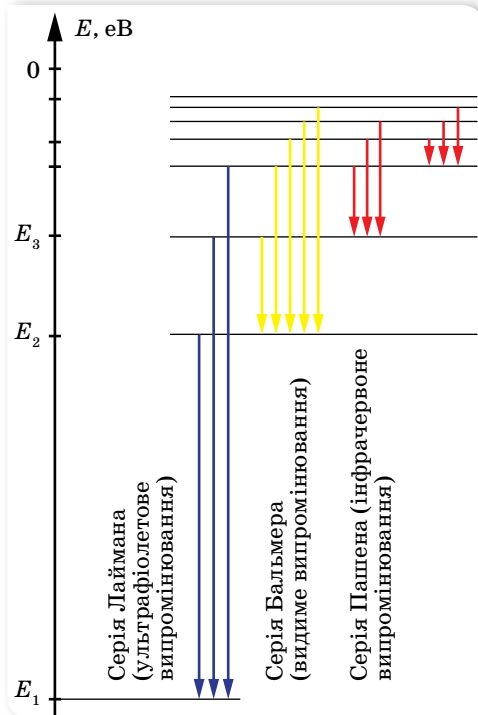
Енергію електрона, що покинув атом (міститься на нескінченній відстані від ядра), приймають за нуль. Зрозуміло, що в цьому разі енергія будь-якого електрона, який перебуває ближче до ядра, буде меншою, а отже, від'ємною. У нормальному (не збудженому) стані енергія атома буде мінімальною й у випадку атома Гідрогену її значення $E_1 = -13,55$ еВ. У першому збудженому стані (другий енергетичний рівень) атом Гідрогену матиме енергію $E_2 = -3,38$ еВ, у другому — $E_3 = -1,5$ еВ.

З основного стану в збуджений атом може перейти, діставши ззовні в будь-який спосіб (наприклад, поглинувши фотон або зіткнувшись з іншим атомом) порцію енергії, яка дорівнює різниці енергії стаціонарних рівнів. Так, у випадку Гідрогену атом може перейти у збуджений стан, поглинувши енергію: $E_2 - E_1 = 10,17$ еВ, або $E_3 - E_1 = 12,05$ еВ і т.д.

У збудженому стані електрон не може перебувати тривалий час. Під час переходів на перший рівень ($n = 1$) із другого, третього й т. д. випромінюються ультрафіолетові промені (серія Лаймана), під час переходів на другий рівень з вищих рівнів — випромінювання оптичного діапазону (серія Бальмера), під час переходів на третій рівень — інфрачервоне випромінювання (серія Пашена). Серії названо на честь учених, які їх відкрили.

У 1885 р. вчителю фізики однієї зі швейцарських шкіл Йогану Бальмеру вдалося встановити для Гідрогену, що його частоти випромінювання у видимій частині спектра можна визначити за формулою

$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right)$, де R — постійна величина, $R = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, яку називають сталою Рідберга, k — ціле число, що набуває значень 3, 4, 5, ...



Мал. 226. Енергетичні рівні в атомі Гідрогену

Із часом, після відкриття спектральних ліній не лише у видимій частині спектра, а й в інфрачервоній та ультрафіолетовій, формула набула вигляду $\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$, де n і k — цілі числа, $k > n$. Ця формула дістала назву формули Бальмера¹.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗЦІМЮ

1. Зобразіть за допомогою схеми енергетичних рівнів атома Гідрогену перехід, який відповідає випромінюванню ультрафіолетових променів. **2.** За яким принципом спектральні лінії Гідрогену об'єднано в серії? **3.** Чи можуть фотони, утворені при випромінюванні атома Гідрогену, мати однакові імпульси, якщо їх енергії різні?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Визначте радіус першої борівської орбіти² для атома Гідрогену, а також лінійну та кутову швидкості електрона на цій орбіті.

Дано:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$r_1 - ?; v_1 - ?; \omega_1 - ?$$

Розв'язання:

За теорією Бора, електрон у атомі Гідрогену обертається по коловій орбіті з доцентровим прискоренням, якого йому надає кулонівська сила, $ma_d = F_K$, або $\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2}$, звідки $mv_n^2 r_n = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}$. (1)

За постулатом Бора, момент імпульсу електрона $r_n m v_n = n \frac{h}{2\pi}$, звідки $v_n = \frac{nh}{2\pi m r_n}$.

Підставляючи даний вираз у формулу (1), отримуємо:

$$m \left(\frac{nh}{2\pi m r_n} \right)^2 r_n = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}, \text{ звідки } r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2 n^2}{\pi m e^2} \quad (2),$$

де ε_0 — електрична стала, h — стала Планка, m — маса електрона, e — заряд електрона, n — номер орбіти.

Після підстановки даних обчислюємо радіус першої орбіти:

¹ У деяких навчальних посібниках можна зустріти й такий запис формули Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Річ у тім, що такий вигляд формули використовують у спектроскопії, коли спектральні лінії характеризують не частотою, а величиною, оберненою довжині хвилі. Звертаємо вашу увагу на те, що стала величина в обох випадках позначається однаково, але вона має різне значення. У даному випадку $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ (відрізняється від попередньої сталої на с. 226).

² Будемо вживати термін орбіта, оскільки саме такий термін вживається в теорії Бора атома Гідрогену.

$$r_1 = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Виходячи з формули (2), можна розрахувати радіус n -ї орбіти, як

$$r_n = r_1 \cdot n^2. \quad (3)$$

Знаючи радіус орбіти, можемо розрахувати швидкість руху електрона на цій орбіті: $v_n = \frac{nh}{2\pi mr_n}$, або $v_n = \frac{h}{2\pi m r_1 n}$. Отже $v_1 = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Щоб визначити швидкість на n -ій орбіті, можна скористатися співвідношенням $v_n = \frac{v_1}{n}$.

$$(4)$$

Кутова швидкість обертання електрона на n -ій орбіті:

$$\omega_n = \frac{v_n}{r_n}, \quad \omega_1 = \frac{v_1}{r_1} = 4,1 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}.$$

Ураховуючи формули (3) і (4), можна записати $\omega_n = \frac{\omega_1}{n^3}$.

$$(5)$$

Відповідь: $r_1 = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м}; v_1 = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \omega_1 = 4,1 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$.

Задача 2. Визначте потенціальну, кінетичну й повну енергії електрона на першій орбіті в атомі Гідрогену.

Дано:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$E - ?; E_{\text{пот}} - ?; E_{\text{к}} - ?$$

Розв'язання:

Повна енергія електрона в атомі Гідрогену дорівнює сумі кінетичної $E_{\text{к}}$ і потенціальної $E_{\text{пот}}$ енергій взаємодії електрона з ядром. З урахуванням того, що потенціальна енергія електрона в атомі від'ємна, оскільки нульовий рівень відліку береться на нескінченності, маємо:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad E = E_{\text{к}} + E_{\text{пот}} = \frac{mv_n^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}.$$

За теорією Бора, електрон в атомі Гідрогену обертається по коловій орбіті з доцентровим прискоренням, якого йому надає кулонівська сила:

$$ma_{\text{д}} = F_{\text{к}}, \quad \frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}, \quad \text{звідки } v_n^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n m},$$

$$\text{тоді } E = E_{\text{к}} + E_{\text{пот}} = \frac{m}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n m} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}.$$

З формули випливає, що повна енергія дорівнює половині потенціальної, або потенціальна вдвічі більша за повну $E_{\text{пот}} = 2E$, тоді кінетична енергія: $E_{\text{к}} = E - E_{\text{пот}} = -E$.

З урахуванням формули для визначення радіуса орбіти $r_n = \frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m e^2}$, маємо:

$$E = -\frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}; \quad E = -2,485 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = -13,53 \text{ еВ},$$

$$\text{тоді } E_{\text{пот}} = -27,1 \text{ еВ}, \quad E_{\text{к}} = 13,53 \text{ еВ}.$$

Значення повної енергії електрона на n -ій орбіті можна визначати, як $E_n = \frac{E_1}{n^2}$.

Відповідь: $E = -13,53$ еВ; $E_{\text{пот}} = -27,1$ еВ; $E_{\text{к}} = 13,53$ еВ.

Увага! Розглянуті задачі демонструють спробу застосувати класичні закони механіки до руху електрона. Насправді такі розрахунки не є точними.



Вправа 33

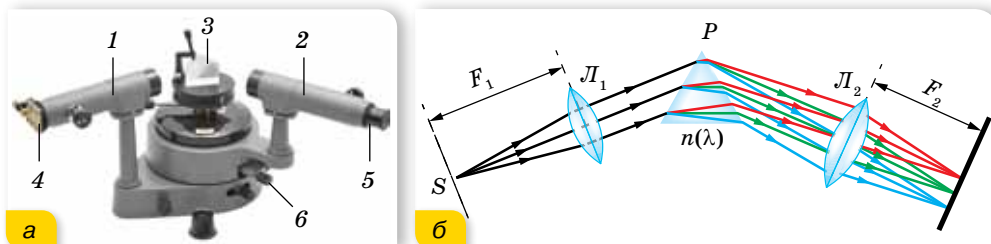
- Унаслідок переходу електрона в атомі Гідрогену з третього стаціонарного рівня на другий випромінюються фотони, що відповідають довжині хвилі $6,52 \cdot 10^{-7}$ м. Яку енергію втрачає атом Гідрогену при цьому?
- Електрон у незбудженому атомі Гідрогену отримав енергію 12 еВ. На який енергетичний рівень він перейшов? Скільки ліній можна буде побачити у спектрі випромінювання при переході електрона на нижчі енергетичні рівні? Енергія основного стану атома Гідрогену — 13,5 еВ.
- Визначте номер орбіти, на якій швидкість електрона в атомі Гідрогену дорівнює $734 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.
- Визначте для першої та другої орбіти атома Гідрогену значення сили кулонівського притягання та напруженість електричного поля.
- У скільки разів збільшиться радіус орбіти електрона в атомі Гідрогену, що перебуває в основному стані, після збудження його фотоном енергією 12,09 еВ?
- Як зміниться повна енергія електрона, якщо збільшити в k разів: а) радіус орбіти; б) номер орбіти в атомі Гідрогену?
- Накресліть графік залежності повної енергії електрона в атомі Гідрогену від номера орбіти.
- У скільки разів зміниться енергія електрона на першій орбіті атома Гідрогену, якщо збільшити заряд ядра в k разів?
- У скільки разів довжина n -ї орбіти електрона в атомі Гідрогену відрізняється від довжини $(n + 1)$ -ї орбіти?

§ 52

Спектри. Спектральний аналіз

Спектральні прилади. Спостерігають й досліджують випромінювання за допомогою спеціального приладу — *спектроскопа* (мал. 227).

Основними елементами спектроскопа є коліматор 1, зорова труба 2, трикутна призма 3. У коліматорі є щілина 4, через яку проходить світло від досліджуваного джерела світла S . Проходячи крізь призму, світло заломлюється й дає спектр, який спостерігається крізь окуляр 5 зорової труби. Для захисту призми від стороннього світла її прикривають кришкою. За допомогою мікрометричного гвинта 6 можна зміщувати зорову трубу в горизонтальній площині та визначати довжину світлової хвилі, яка відповідає певній лінії спектра.



Мал. 22.7. Будова та принцип дії спектроскопа

Потрапляючи через об'єктив у зорову трубу, усі паралельні промені дають зображення щілини у фокальній площині об'єктива, а оскільки промені різних частот (кольорів) паралельні різним побічним осям, кожне зображення щілини (лінія певної частоти) буде на певному місці. Якщо спектроскоп призначено для вимірювань, то на зображення ліній за допомогою спеціального пристрою накладається зображення шкали з поділками, що дає змогу точно визначити положення лінії у спектрі.

Якщо замість зорової труби поставити лінзу та фотопластинку (або інший світлочутливий матеріал), то можна зафіксувати зображення спектра для подальшого дослідження. Такий прилад називають спектрографом, фотографію спектра — спектрограмою.

Для астрономічних досліджень спектральні прилади розміщують за фокусом об'єктива телескопа. Хоча нині в астрофізиці використовують і складніші прилади для спектрального аналізу різних видів випромінювання.

Види спектрів. Найвужчі лінії різних кольорів, що дістають під час світіння газів (або пари), називають *лінійчатим спектром випромінювання*.

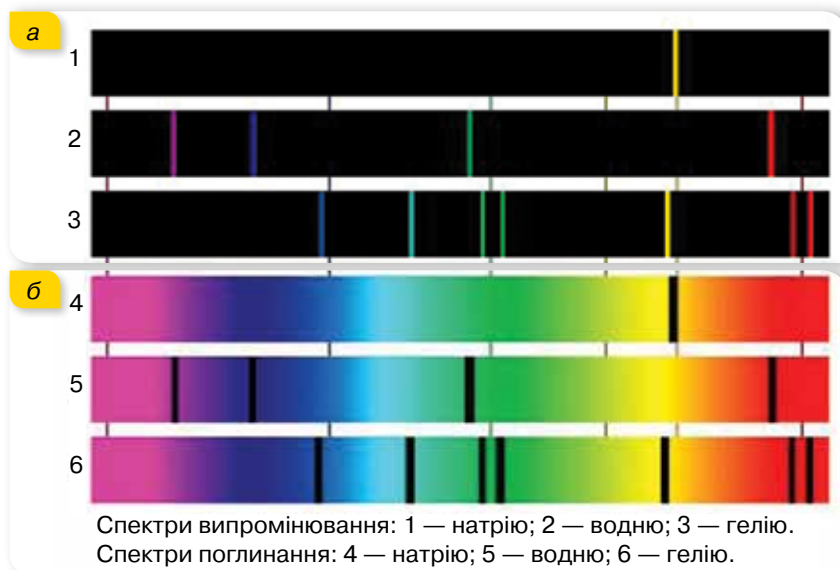
Спектральний склад випромінювання різних речовин досить різноманітний. Проте всі спектри можна поділити на три групи: *лінійчаті*, *смугасті* та *неперервні*.

Лінійчатий спектр — це оптичне випромінювання поодиноких збуджених атомів, яке виникає завдяки квантовим переходам між електронними рівнями енергії (*атомні спектри*).

Лінійчаті спектри випромінюють усі речовини в газоподібному атомарному (але не молекулярному) стані, причому кожний хімічний елемент дає свій лінійчатий спектр, який не збігається зі спектрами інших елементів (мал. 228, а; с. 244).

Головна властивість лінійчатих спектрів полягає в тому, що довжини хвиль (або частоти) лінійчатого спектра якої-небудь речовини залежать лише від властивостей атомів цієї речовини й зовсім не залежать від способу збудження світіння атомів.

Виняткову сталість частот випромінювання атомів було використано для визначення еталону основної одиниці часу — секунди. Для цього було взято одну із частот випромінювання атомів Цезію-133 і секунду означили як інтервал часу, протягом якого здійснюється певне число коливань (9 192 631 770), що відповідає цій частоті.



Мал. 228. Лінійчаті спектри випромінювання та поглинання

Поглинання світла речовинами також залежить від його довжини хвилі. Уперше такі дослідження провів у 1854 р. Густав Кірхгоф, який установив, що *будь-яка речовина поглинає переважно промені такої довжини хвилі, які сама може випромінювати*. Пояснення спектрів поглинання випливає з постулатів Бора. *Лінійчаті спектри поглинання* мають вигляд темних ліній на фоні неперервної райдуги, розташування яких збігається з розташуванням кольорових ліній у спектрі випромінювання даного газу (мал. 228, б).

Смугасти́й спектр має вигляд кольорових смуг, розділених темними проміжками (*молекулярні спектри*).

Утворення молекули з атомів змінює енергетичні рівні зовнішніх електронів, оскільки в молекулі вони взаємодіють один з одним. До того ж, виникають додаткові рівні, що відповідають коливанням атомів й обертанню молекули як цілого. Енергетичні рівні коливального та обертального рухів також квантовані. Таким чином, кожний атомний рівень розчіплюється на низку близьких рівнів. У результаті переходів між цими рівнями й виникає сукупність ліній, що утворює смугу.

У *неперервному* спектрі немає темних проміжків, і на екрані спектрального апарата можна побачити суцільну різнокольорову смугу. Це означає, що в спектрі наявні всі довжини хвиль.

Неперервний спектр випромінюють розжарені тверді тіла й розігріті рідини, які перебувають за даної температури у стані термодинамічної рівноваги з випромінюванням. Гази під високим тиском теж можуть випромінювати неперервний спектр. Ця обставина свідчить про те, що існування неперервного спектра зумовлене не тільки властивостями окремих випромінюючих атомів, а й значно *залежить від взаємодії атомів між собою*.

Спектральний аналіз і його застосування. Спектральний аналіз широко використовують у науці й техніці. Це один з найшвидших і найпростіших способів визначення складу різних хімічних сполук, оскільки кожний хімічний елемент має свій характерний лінійчатий спектр випромінювання (поглинання). За спектрами поглинання Сонця та зір досліджено їхній хімічний склад. Випромінювання поверхні Сонця (фотосфери), дає неперервний спектр. Це випромінювання має температуру близько $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ і, проходячи крізь атмосферу Сонця (температура якої $2000\text{--}3000\text{ }^{\circ}\text{C}$), частково поглинається. Атмосфера Сонця поглинає світло певних частот фотосфери, і на тлі неперервного спектра фотосфери з'являється майже 20 000 ліній поглинання. За цими лініями було встановлено, що на Сонці є Гідроген, Кальцій, Натрій, Ферум та інші хімічні елементи. Уперше дослідження ліній поглинання у спектрі сонячного випромінювання провів у 1817 р. Йозеф фон Фраунгофер, тому ці лінії називають *фраунгоферовими*.

Під час проведення спектрального аналізу користуються спеціальними таблицями або атласами спектральних ліній, у яких наведено точне розміщення ліній спектра кожного хімічного елемента або довжини хвиль, що їм відповідають. За допомогою спектрального аналізу було відкрито нові хімічні елементи — Рубідій і Цезій. Цікава історія відкриття Гелію. Спочатку його було виявлено під час аналізу спектра сонячного випромінювання в 1868 р., звідки й походить його назва (від грец. «геліос» — Сонце).

Основні переваги спектрального аналізу — дуже висока чутливість, простота й швидкість проведення — зумовлюють його широке використання в металургії й машинобудуванні, хімії й геології, медицині й біології та багатьох інших галузях науки й техніки.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Які речовини дають суцільний спектр? Які — лінійчатий? **2.** Чим відрізняються лінійчаті спектри різних газів і пари? **3.** Чому біле світло, проходячи крізь призму, розкладається в кольоровий спектр? **4.** Схарактеризуйте роль спектрального аналізу в астрономії.

§ 53

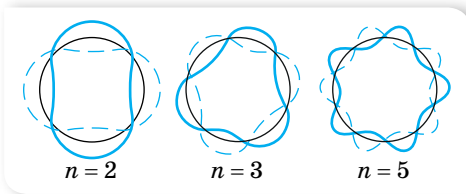
Хвильові властивості матерії

Гіпотеза де Бройля. У 1923 р. французький фізик Луї де Бройль (1892 – 1987) розширив уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм. Усвідомлюючи наявну в природі симетрію, він використав *принцип симетрії* й висловив таку гіпотезу. Оскільки світло поводить себе в одних випадках як хвиля, а в інших — як частинка, то й об'єкти природи, які ми

вважаємо частинками (електрони та інші матеріальні тіла), мали би хвильові властивості.

Одним з вихідних аргументів на користь гіпотези де Бройля про хвильову природу матеріальних частинок, зокрема електронів, була правдивість для неї теорії Бора. Де Бройль припустив, що формули для розрахунку енергії ($E = h\nu$) та імпульсу $p = \frac{h}{\lambda}$ є універсальними — такими, що справджуються як для фотонів, так і для будь-яких інших частинок. Так, частинці масою m , що рухається зі швидкістю v , відповідає хвиля довжиною $\lambda = \frac{h}{mv}$.

Величину λ називають *дебройлівською довжиною хвилі*.



Мал. 229. Електронні стоячі хвилі

Кожному електрону в атомі, вважав де Бройль, відповідає стояча хвиля, яка виникає за умови, що на довжині колової орбіти має вклатися ціле число довжин хвиль (мал. 229).

Довжина борівської орбіти радіусом r_n дорівнює $2\pi r_n$, тому $2\pi r_n = n\lambda$, де $n = 1, 2, 3 \dots$. Ураховуючи, що

$\lambda = \frac{h}{mv}$, отримуємо $2\pi r_n = \frac{nh}{mv}$, звідки $mvr_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$. Як видно, останній вираз — це ніщо інше, як умова квантування, запропонована Нільсом Бором. Саме цим обґрунтовується умова квантування енергії електрона в атомі. Таким чином, ідея де Бройля дає змогу пояснити квантування орбіт і станів у моделі атома Бора, інакше кажучи, *корпускулярно-хвильовий дуалізм закладений у самій структурі атома*.

Важливо зазначити, що корпускулярно-хвильовий дуалізм — це модель, яку використовують для пояснення властивостей матерії. Не варто думати, що електрон можна вважати хвилею або частинкою у прямому розумінні. Хвиля, корпускула — це також моделі, які ми використовуємо для вивчення властивостей матерії. Зауважимо, що хвилі де Бройля, пов'язані з рухомими частинками, не є електромагнітними хвилями, вони не мають жодного зв'язку із поширенням електромагнітного поля. Хвилі де Бройля мають специфічну квантову природу, яка не має аналогії у класичній фізиці.

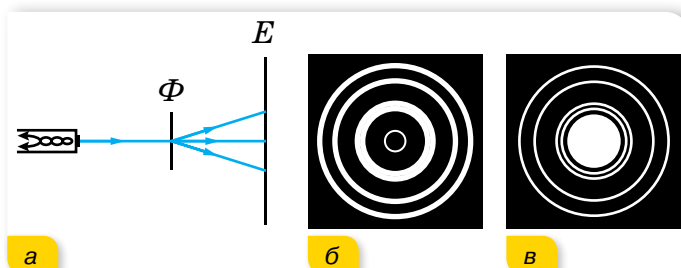
Дебройлівська довжина хвилі звичайного тіла дуже мала, щоб її можна було виявити та виміряти. Так, наприклад, дебройлівська довжина хвилі м'яча масою 200 г, що летить зі швидкістю $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, становить приблизно $2,2 \cdot 10^{-34}$ м. Пригадайте, що типові хвильові властивості — інтерференція та дифракція — виявляються тільки в тому разі, коли розміри предметів або щілин співрозмірні з довжиною хвилі. Оскільки нам не відомі предмети або щілини, на яких могли б дифрагувати хвилі завдовжки $2,2 \cdot 10^{-34}$ м, то хвильові властивості звичайних тіл виявити не вдається.

Для тіл малої маси (наприклад, електронів) дебройліська довжина хвилі має вже значно більше значення. Так, електрону, що рухається зі швидкістю $5,6 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, відповідає дебройлівська довжина хвилі $1,2 \cdot 10^{-10}$ м. Такі хвилі вже можна виявити експериментально.

Як показали дослідження, хвильові властивості мають не лише електрони, а й інші частинки: протони, нейтрони тощо.

Дифракція електронів. Оскільки атоми в кристалі твердого тіла розташовані на відстанях порядку 10^{-10} м і до того ж впорядковано, то кристал можна використати як дифракційну ґратку.

У 1927 р. американські фізики Клінтон Девіссон і Лестер Джермер досліджували відбивання електронів від монокристала нікелю (мал. 230, а). Під час дослідів учені спостерігали неоднаковий розподіл відбитих пучків електронів. Отримані результати можна було пояснити як результат дифракції електронів. Незабаром у 1928 р. англійський фізик Джордж Томсон (син Джозефа Томсона) спостерігав дифракцію електронів під час проходження ними тонких металевих плівок. На малюнку 230, б зображено дифракційну картину від розсіювання електронів на алюмінієвій фользі, а на малюнку 230, в — аналогічну фотографію, отриману в момент опромінення фольги рентгенівським випромінюванням.



Мал. 230. а — схема дослідів з дифракції електронів; б — дифракційна картина від розсіювання електронів на алюмінієвій фользі; в — дифракційна картина від розсіювання рентгенівських променів

Існування дифракції електронів незаперечно свідчить про хвильові властивості електронів.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Електрон і протон рухаються з однаковими швидкостями. Якій із цих частинок відповідає менша довжина хвилі? **2.** Яке співвідношення між довжиною n -ї орбіти електрона в атомі Гідрогену і довжиною λ хвилі де Бройля, що характеризує електрон у цьому стані? **3.** Про що свідчить дифракція електронів? Яке практичне застосування вона має?

§ 54

Основні положення квантової механіки

Поняття про квантову механіку. Теорія Бора з досить високою точністю пояснила весь спектр атома Гідрогену, проте застосування її до складніших атомів не давало таких блискучих результатів. За своєю суттю вона була спрямована на вирішення конкретної проблеми: обґрунтувати стабільність атома й пояснити лінійчаті спектри. Незважаючи на це, теорія Бора в розвитку фізики відіграла значну роль: вона підштовхнула розвиток *квантової механіки*. Квантова механіка пояснила спектри складних атомів, відмінності в яскравості їхніх спектральних ліній, утворення молекул з атомів. Квантова механіка, яка переважно займається вивченням мікросвіту, водночас має більш широкий і узагальнювальний характер, оскільки властивості всіх макроскопічних тіл залежать від їхньої внутрішньої структури. Тому квантову механіку вважають фундаментальною теорією. Із законів квантової механіки випливають закони класичної фізики.

Не вдаючись у деталі математичного апарату квантової механіки (він досить складний), ми окреслимо деякі її основні ідеї та розглянемо, як за їх допомогою пояснюється будова атома.

Хвильова функція. З погляду класичної механіки кожна частинка рухається вздовж певної траєкторії і потік частинок не може виявляти хвильових властивостей. Основною задачею класичної механіки є визначення положення тіла в будь-який момент часу. Якщо, наприклад, задано початкове положення тіла (його координати) і початкову швидкість руху, то за другим законом Ньютона можна визначити положення та швидкість тіла в будь-який наступний момент часу. При цьому вважають, що початкові координати та швидкість руху тіла можна задати з будь-яким ступенем точності, який залежить лише від якості приладів, за допомогою яких вимірюють координати та швидкості.

Квантова ж механіка має статистичний характер. У квантовій механіці можна лише передбачити, з якою *імовірністю* в даний момент часу частинка може перебувати в певній точці простору.

Основними характеристиками хвиль є довжина, частота й амплітуда. У квантовій механіці амплітуду хвилі де Бройля називають *хвильовою функцією* й позначають грецькою літерою ψ (пси). Однією із задач квантової механіки є визначення хвильової функції для конкретного випадку (наприклад, для електрона в атомі). Рівняння, яке дозволяє визначати хвильову функцію, запропонував 1926 р. німецький фізик Ервін Шредінгер. Через відсутність відповідної математичної підготовки ми не подаємо загальний вигляд рівняння та його розв'язок. Розглянемо лише якісний зміст хвильової функції.

З дослідів з дифракції електронів, нейтронів та інших частинок речовини випливає, що в цих дослідах виявляється неоднаковий розподіл пучків електронів чи нейтронів, відбитих або розсіяних у різних напрямках, — у певних напрямках спостерігається більша кількість частинок, ніж у всіх інших. Із хвильової точки зору наявність максимумів кількості частинок у певних напрямках означає, що ці напрямки відповідають найбільшій інтенсивності хвиль де Бройля. Пояснимо це на прикладі світлової електромагнітної хвилі.

Як відомо, інтенсивність I будь-якої хвилі пропорційна квадрату амплітуди. У випадку електромагнітної хвилі $I^2 \sim E^2$, де E — напруженість електричного поля. З погляду корпускулярної теорії, інтенсивність світлового потоку пропорційна кількості фотонів N , що проходять через одиничний переріз за одиницю часу, $I \sim N$. Об'єднавши два вирази, отримуємо $N \sim E^2$. Якщо ж ми маємо справу з одиничним фотоном, то цей вираз означає, що квадрат напруженості електричного поля E^2 характеризує ймовірність того, що фотон перебуває в певній точці. У точках, де значення E^2 велике, більша ймовірність виявити фотон.

Ці міркування послужили німецькому фізику Максів Борну основою для своєрідного статистичного, ймовірнісного, тлумачення хвиль де Бройля: *квадрат модуля амплітуди хвиль де Бройля в даній точці є мірою ймовірності того, що частинка перебуває в цій точці.*

Таким чином, якщо електрони (або інші частинки речовини) розглядаються як хвилі, то хвильова функція описує амплітуду відповідної хвилі, якщо ж електрони розглядаються як частинки — то хвильова функція визначається як імовірність.

Квадрат хвильової функції ψ^2 електрона в заданій точці простору і в даній момент часу характеризує ймовірність перебування цього електрона в даній точці простору у вибраний момент часу.

Принцип невизначеностей Гейзенберга. Пояснимо, як у квантовій механіці розуміють точність виявлення частинки в певній точці простору.

Як відомо, проводячи будь-які вимірювання в мікросвіті, ми отримуємо наближені значення вимірюваних величин. Похибки, які виникають під час вимірювань, зумовлені багатьма причинами.

У квантовій механіці, яка має справу з об'єктами мікросвіту, не можна виконати вимірювань, не вплинувши на об'єкт вимірювання. Припустимо, вам потрібно знайти в темній кімнаті тенісний м'ячик. Ви на дотик (рукою чи якимось предметом) намагаєтесь визначити його місцезнаходження, і в той момент, коли ви до нього доторкаєтесь, ви зсосуєте його з місця (положення м'ячика ви вже визначите неточно).

Значно легше визначити положення м'ячика, увімкнувши світло в кімнаті. М'ячик стає видно, адже ті фотони, що відбилися від нього, створюють зоровий образ. У випадку взаємодії фотонів із м'ячиком переданий м'ячику імпульс фотона незначний. Якщо досліджувати частинки мікросвіту за допомогою фотонів (наприклад, з використанням електронного

мікроскопа), то взаємодія фотона з електроном і переданий імпульс уже відіграють значну роль.

Таким чином, сам акт спостереження частинки мікросвіту вносить суттєву невизначеність або в положення, або в імпульс частинки.

У квантовій механіці ступінь точності, з якою можна виявити частинку в певній точці простору, визначається співвідношенням невизначеностей, яке встановив у 1927 р. німецький фізик Вернер Гейзенберг. Згідно з цим принципом, ми не можемо знати одночасно точних значень координати x і відповідної їй координаті складової імпульсу p_x . Якщо невизначеність Δx у вимірюванні координати порядку λ , $\Delta x \approx \lambda$, а невизначеність у зміні імпульсу $\Delta p_x \approx \frac{h}{\lambda}$, то добуток $\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$.

Точніші дослідження Гейзенберга показали, що невизначеності одночасного вимірювання координати й відповідної складової імпульсу задовольняють умову $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}$.

Принцип невизначеності можна записати й через енергію та час: $\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$.

Частинка в потенціальній ямі. Тунельний ефект. Яскраво ілюструють розбіжність поглядів класичної і квантової механіки задачі на перебування частинки в потенціальній ямі та на проходження частинки крізь потенціальний бар'єр.

Потенціальна яма — скінченна область простору, в якій потенціальна енергія частинки менша, ніж за межами цієї області. Потенціальна яма зазвичай характеризується шириною та глибиною (або висотою). Точка з найнижчим значенням потенціальної енергії називається *дном ями*. Найчастіше розглядають прямокутну яму з нескінченно високими стінками.

Розглянемо поведінку частинки в такій ямі. Якщо повна енергія частинки менша за висоту потенціальної ями, то частинка здійснює в ямі коливання, частота яких визначається формою та розмірами ями.

Вона рухається в цій області, зазнаючи багаторазових відбивань від стінок. З погляду хвильової теорії між стінками в зустрічних напрямках рухаються дві хвилі де Бройля. Це нагадує картину двох зустрічних хвиль, що біжать по струні із закріпленими кінцями. Як і для випадку струни, стаціонарним станам відповідають стоячі хвилі, які утворюються за умови, що на довжині L укладається ціла кількість півхвиль:

$$L = n \cdot \left(\frac{\lambda}{2} \right) \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Таким чином, стаціонарним станам частинки, замкненої в потенціальній ямі, відповідає дискретний набір довжин хвиль. Оскільки в квантово-механічному випадку довжина хвилі λ однозначно зв'язана з імпульсом частинки: $\lambda = \frac{h}{p}$, а імпульс частинки p визначає енергію її руху: $E = \frac{p^2}{2m}$ (нерелятивістське наближення), то квантованою (дискретною) виявля-

ється й енергія частинки. Отже, енергія частинки в потенціальній ямі набуває не довільних, а дискретних значень E_1, E_2, E_3, \dots , які зображені на малюнку 231 відповідними енергетичними рівнями. Густина ймовірності $|\psi|^2$ залежить від координати частинки, при цьому по-різному для кожного квантового стану. Наприклад, для центра ями вона максимальна в стані $n = 1$ і дорівнює нулю в стані $n = 2$.

Потенціальний бар'єр — частина простору, в якому є локальний максимум потенціальної енергії, тобто діють сили, що виштовхують частинку з цього простору, і вона не може проникнути в цю область без надання їй певної енергії для здійснення роботи проти цих сил. Максимальне значення потенціальної енергії в бар'єрі називають висотою бар'єру.

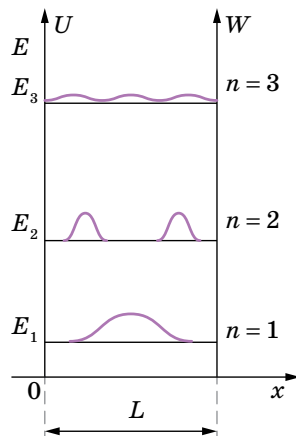
Нехай на шляху деякої частинки з енергією E є потенціальний бар'єр заввишки U_0 і завширшки L (мал. 232).

З погляду класичної механіки можливий такий рух частинки. Якщо енергія частинки $E > U_0$, то частинка подолає бар'єр. При цьому на ділянці бар'єра $0 \leq x \leq L$ швидкість частинки буде меншою, але після проходження бар'єра вона знову набуде попереднього значення. Якщо енергія частинки $E < U_0$, то частинка відіб'ється від бар'єра й переміщуватиметься у зворотному напрямку; через бар'єр частинка пройти не зможе.

З погляду квантової механіки, у першому випадку, коли енергія частинки $E > U_0$, існує деяка відмінна від нуля ймовірність того, що частинка відіб'ється від бар'єра й рухатиметься у зворотному напрямку. У другому випадку, коли $E < U_0$, існує деяка відмінна від нуля ймовірність того, що частинка пройде крізь потенційний бар'єр і виявиться в області $x > L$.

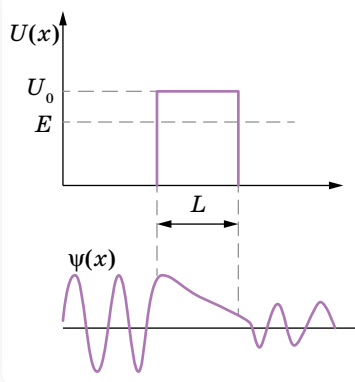
Інакше кажучи, за законами квантової механіки, частинка не витрачає і не отримує енергії ззовні, а проходить через так званий тунель (відбувається «протікання» частинки крізь бар'єр).

Багато говорять про те, що всередині потенціального бар'єра частинка начебто повинна мати від'ємну потенціальну енергію, але це парадокс! І знову спроба пояснити квантові закономірності з класичних позицій!



Мал. 231.

Поведінка частинки в потенціальній ямі



Мал. 232. «Протікання»

частинки крізь потенціальний бар'єр

Труднощі справді існують, але пов'язані вони з тим, що неможливо уявити повну енергію частинки як точну суму її кінетичної та потенціальної енергій. Співвідношення невизначеностей не дають змоги одночасно точно задати координату x та імпульс p_x , а отже, точно задати потенціальну і кінетичну енергію. До того ж може виявитися, що невизначеність у кінетичній енергії, зумовлена неточною фіксацією координати частинки, буде більшою за різницю потенціальної та кінетичної енергій.

Інакше кажучи, у квантовій фізиці потрібно відмовитися від уявлення про повну енергію частинки як суму точно визначених її складників: кінетичної й потенціальної.

Тунельний ефект дає змогу пояснити явище α -розпаду, контактні явища в напівпровідниках і багато іншого.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. У чому полягає суперечність між ньютонівською та квантовою механікою? **2.** Місце електрона можна визначити з точністю $1,6 \cdot 10^{-8}$ м. З якою точністю можна визначити його швидкість? **3.** Користуючись принципом невизначеностей, оцініть невизначеність положення електрона в основному стані атома Гідрогену. *Примітка:* імпульс електрона визначте на основі борівської моделі, отриманий результат порівняйте з борівським радіусом.

§ 55

Фізичні основи побудови періодичної системи хімічних елементів

Будова електронної оболонки. На уроках хімії ви вже ознайомилися з будовою електронної оболонки атома. Умієте записувати електронні конфігурації атомів, знаєте, що властивості хімічних елементів періодично повторюються, оскільки періодично повторюється будова зовнішніх енергетичних рівнів у їх атомах. Розглянемо більш детально, як квантова механіка пояснює будову складних атомів.

За уявленнями квантової механіки, в атомі не існує чітких колових орбіт, як це стверджувала теорія Бора. Через хвильову природу електрон «розмитий» у просторі подібно «хмарі» негативного заряду. Рухаючись в атомі, електрон займає тривимірну ділянку простору біля ядра (утворює «хмару»), що називається *атомною орбіталлю*.

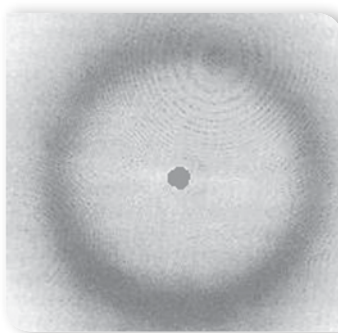
Атомна орбіталь — тривимірна ділянка простору навколо ядра, в якій перебування електрона найімовірніше.

Щодо тієї частини електронної орбіталі, де її густина найбільша, то можна говорити про її розмір і форму. Залежно від величини енергії електронні орбіталі розрізняють за розмірами. Що сильніше притягається електрон до ядра, то його електронна орбіталь менша за розміром, але гущіша. Орбіталі розрізняються не лише за розмірами, а й за формою. Розміри й форму електронної орбіталі можна визначити з рівняння Шредінгера, визначивши хвильову функцію.

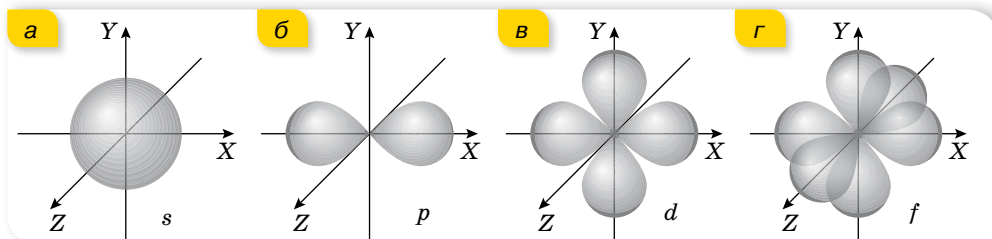
Так, єдиний електрон в атомі Гідрогену, рухаючись навколо ядра, утворює орбіталь сферичної форми (мал. 233). Такі орбіталі позначають літерою *s*, а електрони, орбіталі яких мають сферичну форму, називають *s*-електронами.

Як видно з малюнка, хмара в атомі Гідрогену має найбільшу густину на деякій відстані від ядра. Розрахунки показують, що ця відстань приблизно $0,53 \cdot 10^{-10}$ м. Саме такий радіус першої орбіти в моделі атома Гідрогену за Бором. Але, з позицій квантової механіки електрон у будь-який момент часу може перебувати і ближче до ядра, і далі від нього.

Окрім сферичної, орбіталі можуть мати й інші форми (мал. 234). Так, *p*-орбіталь має вигляд об'ємної вісімки, центр якої збігається із центром ядра. У просторі *p*-орбіталі розміщуються вздовж трьох взаємно перпендикулярних координатних осей. Орбіталі складніших форм позначають буквами *d*, *f* та ін.



Мал. 233. Орбіталь електрона в атомі Гідрогену



Мал. 234. Схематичне зображення орбіталей

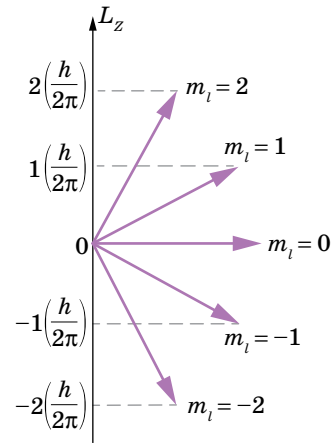
Квантові числа. Як відомо, в теорії Бора квантується енергія атома та момент імпульсу електронів у атомі, тобто ці величини виражаються через квантове число n : $E_n = -\frac{13,55 \text{ eV}}{n^2}$ та $L = \frac{nh}{2\pi}$, де $n = 1, 2, 3 \dots$ — ціле число, яке називають квантовим числом.

У квантовій механіці стан атома описується чотирма квантовими числами.

1. Квантове число n з теорії Бора зберігається і в квантовій механіці під назвою **головне квантове число** $n = 1, 2, 3 \dots$ і збігається з номером енергетичного рівня.

2. **Орбітальне квантове число** l визначає модуль моменту імпульсу електрона. Його визначають із співвідношення $L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi}$, де L — момент імпульсу електрона. Воно може набувати значень від 0 до $n-1$.

3. **Магнітне квантове число** m_l — характеризує орієнтацію моменту імпульсу й може набувати значень від $-l$ до $+l$. Це пояснюється тим, що момент імпульсу — векторна величина, тому вона квантується і за числовим значенням, і за модулем. Наприклад, якщо $l=2$, то m_l може мати значення $-2, -1, 0, +1, +2$. У квантовій механіці, як правило, орієнтацію моменту імпульсу задають через його компоненту L_z (мал. 235), що пов'язана з m_l співвідношенням $L_z = m_l \frac{h}{2\pi}$.



Мал. 235. Орієнтація моменту імпульсу

Назва «магнітне квантове число» зумовлена тим, що під час експериментальних досліджень було виявлено, що в газовому розряді в магнітному полі спектральні лінії розщеплюються на декілька ліній. (Таке розщеплення називають *ефектом Зеемана*.) Це означає, що розщеплюються й енергетичні рівні. Залежність енергії від орієнтації моменту імпульсу пояснюється взаємодією рухомого електрона з магнітним полем.

4. **Спінове квантове число** m_s , яке може набувати двох значень: $m_s = +\frac{1}{2}$

та $m_s = -\frac{1}{2}$. *Спін* — фундаментальна характеристика мікроскопічної частки (яка в деякому відношенні аналогічна «власному моменту імпульсу частинки»). Спін є квантовою властивістю частинок і не має аналогів у класичній фізиці. Якщо класичний момент імпульсу виникає внаслідок обертання масивного тіла скінченних розмірів, то спін властивий навіть частинкам, які на сьогодні вважаються точковими, і не пов'язаний із жодним обертанням мас усередині такої частинки.

Про два можливі значення спінового квантового числа $m_s = +\frac{1}{2}$ та $m_s = -\frac{1}{2}$ часто говорять «спін вгору» та «спін вниз», маючи на увазі, що можливі два напрямки спінового моменту імпульсу. Для цього ж використовують позначення $\uparrow\downarrow$. Отже, стан електрона в атомі характеризується чотирма квантовими числами: n, l, m_l, m_s . В. Паулі (1900–1958) довів, що два електрони в одному атомі не можуть мати однакового набору квантових чисел. Це обмеження називають *принципом заборони Паулі*.

Принцип Паулі: два електрони не можуть перебувати в атомі в одному і тому ж квантовому стані.

Згідно з принципом Паулі, даному n відповідає n^2 станів, які відрізняються значеннями l та m_l . Квантове число m_s може набувати тільки двох значень: $+\frac{1}{2}$ і $-\frac{1}{2}$. Тому в атомі у стані із заданим n можуть перебувати не більше $2n^2$ електронів.

Розглянемо будову деяких атомів, використовуючи принцип Паулі.

Наступний за атомом Гідрогену в періодичній системі атом Гелію має два електрони. Обидва електрони можуть мати головне квантове число $n = 1$, оскільки їхні спіни можуть мати протилежні напрямки. Отже квантові числа l та m_l повинні дорівнювати нулю. Відповідно, в основному стані атома Гелію електрони можуть мати квантові числа, наведені в таблиці 8.

У Літію три електрони, двоє з яких можуть перебувати у стані $n = 1$, а третій, щоб не порушувався принцип Паулі, має $n = 2$. Квантові числа електронів Літію в основному стані наведено в таблиці 8. Квантові числа третього електрона можуть бути й іншими, наприклад, $n = 2$ та $l = 1$, але в такому разі він перебуватиме у збудженому стані, оскільки рівень з $n = 2$ і $l = 1$ має вищу енергію, ніж рівень $n = 2$ і $l = 0$. Тому з часом електрон переїде в основний стан з випромінюванням фотона.

Таблиця 8

n	l	m_l	m_s
He			
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
Li			
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\frac{1}{2}$

Аналогічно можна продовжити перелік квантових чисел для основного стану складніших атомів.

Електронні конфігурації атомів. Як відомо, кількість електронів в атомі дорівнює кількості протонів у ядрі атома та порядковому номеру хімічного елемента в таблиці Менделєєва. Відкриття фізичного змісту порядкового номера та принципу Паулі обґрунтовує періодичність розміщення хімічних елементів.

Розподіл електронів по орбіталях в основному (незбудженому) стані атома записують за допомогою електронної формули. Для запису електронної формули користуються певними позначеннями.

Сукупність електронів, що мають однакові значення числа n , утворюють оболонку, яку прийнято позначати буквеним символом (табл. 9).

Таблиця 9

Значення n	1	2	3	4	5	6	...
Позначення оболонки	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	...

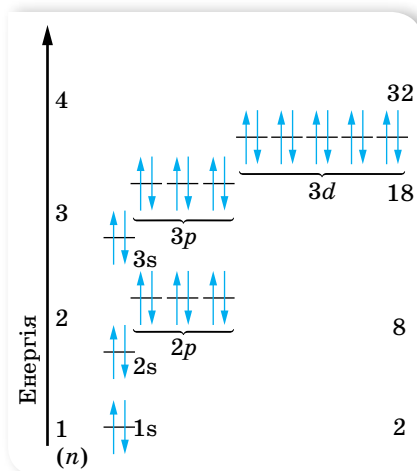
Електрони з однаковим значенням l належать одній підоболонці (орбіталі). Числові значення l замінюють буквеним позначенням (табл. 10).

Таблиця 10

Значення l	0	1	2	3	4	...
Позначення оболонки	<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	...

Складаючи схеми будови електронних оболонок атомів, керуються таким алгоритмом:

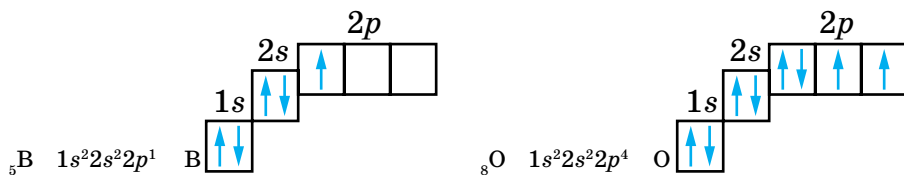
1. Визначають кількість електронів в електронній оболонці атома (хімічного елементу) за його порядковим номером у таблиці Менделєєва.
2. За номером періоду визначають кількість енергетичних рівнів n в електронній оболонці.
3. Визначають максимальну кількість електронів на кожному енергетичному рівні за формулою $2n^2$ (кількість електронів на зовнішньому рівні визначається номером групи для елементів головних підгруп у таблиці Менделєєва).
4. Кількість орбіталей на енергетичних рівнях різне, воно дорівнює n^2 . Кількість форм орбіталей, які утворюють енергетичний рівень, дорівнює номеру цього рівня. На першому рівні ($n = 1$) — одна *s*-орбіталь, на другому ($n = 2$) — чотири: одна *s*- і три *p*-орбіталі, на третьому ($n = 3$) — дев'ять: одна *s*-, три *p*-орбіталі та п'ять *d*-орбіталей.
5. На кожній орбіталі може перебувати максимум два електрони з протилежними спінами.
6. Заповнення електронами орбіталей підпорядковується *правилу Гунда*: заповнення орбіталей, що належать одному енергетичному рівню, починається з одиночних електронів з паралельними спінами, і лише після того, як електрони займуть усі орбіталі, починається заповнення орбіталей парами електронів (із протилежними спінами).



Мал. 236. Схема заповнення енергетичних рівнів

На малюнку 236 показано схему будови енергетичних рівнів.

На малюнку 237 наведено приклади електронних формул та електронних конфігурацій деяких хімічних елементів.



Мал. 237. Електронні формули та конфігурації для Бору та Оксигену

Оскільки будова зовнішніх енергетичних рівнів періодично повторюється, то це зумовлює періодичну повторюваність властивостей хімічних елементів. Так, у межах періоду металічні властивості елементів поступово послаблюються, а неметалічні — посилюються; основні властивості оксидів і гідроксидів елементів поступово послаблюються, а кислотні — посилюються. У головних підгрупах елементів — навпаки.

Знаючи місце елемента в періодичній системі, можна судити про будову його атома, а відтак — і про властивості простої речовини, утвореної цим елементом, характер його оксиду й гідрату оксиду тощо. Для прикладу, схарактеризуємо хімічний елемент Натрій.

Натрій розміщений у 3-му періоді, в 1А групі. Порядковий номер 11, відносна атомна маса 23. В атомі Натрію є 11 електронів, які розподіляються на 3-х енергетичних рівнях (згідно з номером періоду): на першому рівні ($n = 1$) — одна s -орбіталь, яка містить 2 s -електрони, на другому ($n = 2$) — одна s -орбіталь (2 s -електрони) і три p -орбіталі (6 p -електронів), тоді на третьому рівні ($n = 3$) — є лише один електрон (s -електрон). Третій рівень в атомі Натрію починає забудовуватись. Оскільки на початку періоду розміщуються елементи, у яких невелика кількість валентних електронів (на зовнішньому енергетичному рівні) і великий радіус атома, то атом Натрію, що має один валентний електрон, легко його втрачає. Тому Натрій виявляє яскраво виражені металічні властивості.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Як за допомогою квантової механіки пояснюється будова електронних оболонок атомів? **2.** Чим відрізняється будова атома Гідрогену за теорією Бора та за квантовою механікою? **3.** У чому суть принципу Паулі? **4.** Яка з наведених електронних формул неможлива: а) $1s^2 2s^2 2p^5$; б) $1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 4p^2$; в) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$? **5.** Запишіть електронні формули атомів Са, Сl та зобразіть їх електронні конфігурації.

§ 56

Рентгенівське випромінювання

Відкриття і властивості рентгенівського випромінювання. Наприкінці XIX ст. загальну увагу фізиків привернув газовий розряд під малим тиском. У газорозрядній трубці виникав потік частинок невідомої природи. Оскільки промені випромінювались із катода трубки, їх називали *катодними*. Пізніше було з'ясовано, що катодні промені — це потік електронів.

Іван Павлович Пулюй (1845–1918) народився в місті Гримайлові на Тернопільщині. За своє життя Пулюй написав понад 50 робіт на наукові, суспільно-політичні та соціальні теми, які були тісно пов'язані із ситуацією в Україні. Значним доробком є його праці з дослідження «*X-променів*», які вразили науковий світ того часу.

Досліджували катодні промені Іван Пулюй та Вільям Рентген. Пулюй досліджував катодні промені за 10 років до відкриття Рентгена. Він помітив, що фотопластинка поблизу газорозрядної трубки засвічувалась навіть тоді, коли трубка була обгорнута чорним папером. Таким чином, йому вдалося встановити, що невідомі промені, які виникають під час роботи трубки, здатні виходити за її межі. Якщо між трубкою та фотопластинкою розташовували якийсь предмет, невідомі промені проникали крізь нього й засвічували фотопластинку. У такий спосіб до 1890 р. Пулюй отримав «фотографії» скелета жаби та дитячої руки, що були опубліковані в журналах Європи. Зі своїми працями І. Пулюй ознайомив В. Рентгена, який і запатентував відкриття. Рентген назвав ці промені невідомої природи *X-променями*. Ця назва збереглася донині в англомовній та франкомовній науковій літературі, увійшовши в мови багатьох народів світу. У нашій країні ми частіше використовуємо назву *рентгенівські промені*, хоча доцільно їх назвати *пулюївські промені*.



Рентгенівські промені утворюються під час гальмування швидких електронів. Навколо потоку цих електронів існує магнітне поле, оскільки напрямлений рух електронів є електричним струмом. У момент зіткнення з перешкодою й різкого гальмування електрона його магнітне поле швидко змінюється, і в простір випромінюється електромагнітна хвиля, довжина якої тим менша, що більша швидкість електрона до зіткнення.

Рентгенівські промені добувають за допомогою спеціальних двоелектродних ламп (мал. 238), на які подається висока напруга порядку 50–200 кВ. Принцип дії рентгенівської трубки такий. Електрони, що їх випускає розжарений катод рентгенівської трубки, прискорюється потужним електричним полем у просторі між анодом і катодом і з великою швидкістю зіткнуться з анодом. До того ж з поверхні анода випромінюється рентгенівські промені, які виходить назовні крізь скло трубки.

Якщо ж електрони в прискорюючому полі набувають достатньої швидкості, щоб проникнути всередину атомів речовини анода й вибити один з електронів його внутрішнього шару, то на його місце переходить електрон з віддаленого шару з випромінюванням кванта великої енергії.

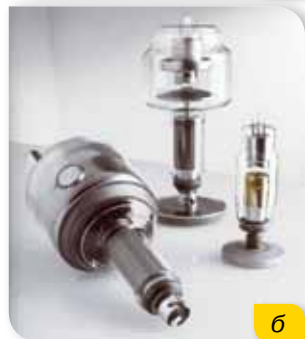
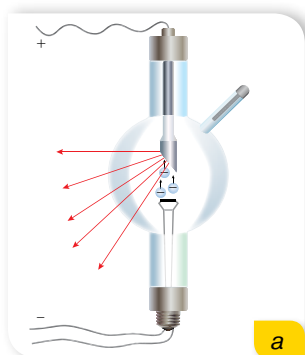
Отже, рентгенівські промені виникають внаслідок гальмування швидких електронів у речовині та випромінюються під час енергетичних переходів електронів між рівнями внутрішніх оболонок атома.

Рентгенівські промені розрізняють за їх *жорсткістю*: що коротшою є довжина хвилі рентгенівських променів, то жорсткіші вони.

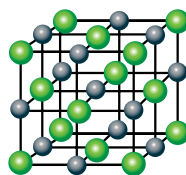
Важливою особливістю рентгенівських променів є їхня висока проникна здатність. Що жорсткіші рентгенівські промені, то слабше вони поглинаються і вища їхня проникна здатність. Поглинання рентгенівських променів речовиною залежить від її природи. Добре поглинають рентгенівські промені атоми важких елементів, незалежно від того, до складу яких хімічних речовин вони входять.

Як і будь-які електромагнітні хвилі, рентгенівські промені не відхиляються в електричному й магнітному полях. Вони майже не заломлюються, переходячи з одного середовища в інше. Цю властивість разом з їх високою проникною здатністю використовують із практичною метою в медицині, техніці, виробництві.

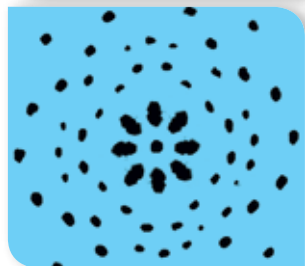
Довгий час після відкриття рентгенівських променів не вдавалося встановити їх хвильові властивості — спостерігати їх дифракцію та виміряти довжину хвилі. Усі спроби використати дифракційні ґратки, призначені для подібних досліджень, не давали жодних результатів. У 1912 р. німецький фізик Макс фон Лауе запропонував використати для спостереження дифракції рентгенівських променів природні кристали (мал. 239). Досліди показали, що вузький пучок рентгенівських променів, пройшовши крізь кристал, дає на екрані або фотоплівці складну дифракційну картину. За нею визначають структуру речовини — розташування атомів у кристалах даної речовини.



Мал. 238.
Рентгенівські трубки:
а — схематичне зображення;
б — зовнішній вигляд



● Na ● Cl



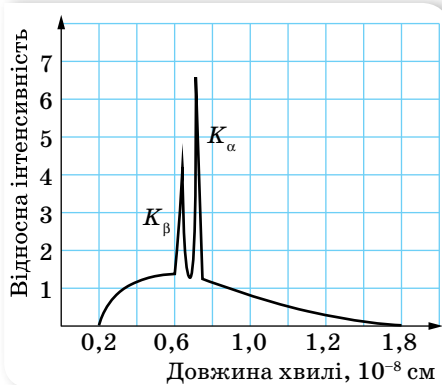
Мал. 239.
Дифракційна картина від кристалу кухонної солі

Вивчення дифракційної картини, утвореної під час використання кристала кам'яної солі, дало змогу визначити довжину хвилі рентгенівського випромінювання, оскільки відстань між вузлами кристалічних ґраток цієї речовини відома. Було з'ясовано, що довжина хвилі рентгенівського променів в десятки й сотні разів менша від довжини хвилі видимого світла. Стало зрозуміло, чому оптичні дифракційні ґратки не давали потрібних результатів.

Рентгенівське випромінювання — електромагнітне випромінювання, що має частоту від $3 \cdot 10^{17}$ до $3 \cdot 10^{19}$ Гц (відповідно довжина хвилі у вакуумі — 10^{-9} – 10^{-11} м).

Досліди з дифракції рентгенівського випромінювання допомогли підтвердити гіпотезу де Бройля щодо хвильових властивостей частинок.

Рентгенівські спектри. Розглянемо особливості спектра випромінювання рентгенівської трубки. Вигляд типового рентгенівського спектра наведено на малюнку 240. Як видно з малюнка, *рентгенівський спектр* — це неперервний спектр, який обмежується граничною довжиною хвилі λ_0



Мал. 240. Рентгенівський спектр

та має характерні максимуми, що накладаються на неперервний спектр.

Якщо енергія електронів, що бомбардують анод, не дуже велика, то спостерігається лише гальмівне випромінювання, саме воно має неперервний спектр, обрізаний на довжині хвилі λ_0 , яка залежить лише від прикладеної до трубки напруги. З підвищенням напруги неперервний спектр і його гранична довжина хвилі будуть зміщуватись ліворуч.

Якщо ж енергія електронів достатня для виривання електронів із внутрішніх оболонок атомів речовини анода, то виникають характерні лінії. Їх положення не змінюється зі зміною напруги. Це свідчить про те, що частота цих ліній залежить від природи речовини, з якої виготовлено електрод (тому випромінювання називають *характеристичним*). Природу лінійчатого спектра характеристичного рентгенівського випромінювання можна зрозуміти, виходячи з уявлень про будову атома. Кількість електронів в атомі визначається зарядом їхнього ядра. Згідно з положеннями квантової механіки, ці електрони можуть мати лише певні дискретні значення енергії, розташовуючись на певних орбіталях. Зовнішні електрони атомів визначають їхні хімічні властивості та оптичні спектри. Електрони внутрішніх оболонок обертаються навколо ядер з великою швидкістю і мають значну енергію. Спектр значень цієї енергії характерний для атома кожного хімічного елемента і не залежить від того, до якої сполуки входить хімічний елемент.

Характеристичне випромінювання виникає в тому випадку, коли внаслідок зіткнення зі швидким електроном один з електронів внутрішньої оболонки покидає атом. Переходячи на незайнятий рівень, зовнішній електрон випромінює в рентгенівській області спектра, й частота цього випромінювання залежить від сорту атома й тих орбіталей, між якими відбувається перехід. Частоти E_i визначені для кожного хімічного елемента й не залежать від типу хімічних зв'язків.

Залежність від речовини виявляється тільки в тому, що зі збільшенням порядкового номера елемента в системі Менделєєва весь його характеристичний рентгенівський спектр зміщується в бік коротших хвиль. Генрі Мозлі в 1913 р. показав, що квадратний корінь із частоти (або величини, оберненої до довжини хвилі) даної спектральної лінії пов'язаний лінійною залежністю з атомним номером елемента Z . Закон Мозлі відіграв дуже важливу роль у фізичному обґрунтуванні періодичної системи Менделєєва.

Проаналізуємо на підставі квантової теорії світла неперервний спектр рентгенівського випромінювання.

Швидкі електрони, ударяючись об перешкоду, можуть втрачати або частину своєї кінетичної енергії, або всю кінетичну енергію. (Майже 99 % енергії електронів, що вдарились об перешкоду, перетворюється на теплову, тому рентгенівські трубки охолоджують.) Неперервний характер спектра рентгенівського випромінювання вказує на те, що електрони втрачають довільні значення енергії. Короткохвильова межа рентгенівського випромінювання відповідає випадку, коли вся кінетична енергія електрона витрачається на випромінювання одного фотона. Довжина хвилі

такого фотона $\lambda_0 = \frac{hc}{E_k} = \frac{hc}{eU}$, де E_k — кінетична енергія електрона, яка надається йому прискорюючим електричним полем $E_k = eU$. Розрахована в такий спосіб величина λ_0 точно збігається з експериментальними даними.

Застосування рентгенівського випромінювання в науці, техніці, медицині, на виробництві. Як ми з'ясували, кожний елемент дає свій характеристичний спектр незалежно від того, цей елемент до випускання рентгенівських променів перебуває у вільному стані чи у складі якоїсь речовини. Ця особливість характеристичного спектра рентгенівських променів використовується для ідентифікації різних елементів у складних з'єднаннях і є основою рентгеноспектрального аналізу.

Рентгеноспектральний аналіз — це розділ аналітичної хімії, який використовує рентгенівські спектри елементів для хімічного аналізу речовин.

Найбільш широко рентгеноспектральний аналіз застосовують в металургії та геології для визначення макро- і мікрокомпонентів; для визначення вмісту Pb і Br в нафті та бензинах, сірки в газоліні, домішок — у мастилах і продуктах зношування в машинах; для аналізу каталізаторів; для експресних силікатних аналізів та ін.

Важливою сферою застосування рентгенівських променів є рентгенографія металів і сплавів, яка перетворилася на окрему галузь науки. «Рентгенографія» охоплює різні способи використання рентгенівських променів — рентгенівську дефектоскопію (просвічування), рентгено-спектральний аналіз, рентгеноструктурний аналіз, рентгенівську мікроскопію та інше.

Рентгенівська спектроскопія для отримання спектра використовує явище дифракції променів на кристалах. Дифракція рентгенівських променів є основним методом визначення структури кристалів. Методами рентгеноструктурного аналізу вивчають метали, сплави, мінерали, неорганічні та органічні сполуки, полімери, аморфні матеріали, рідини й гази, молекули білків, нуклеїнових кислот і т.д.

Властивості рентгенівських променів широко використовують у медицині для виявлення змін в організмі (рентгенодіагностика) та для лікування злоякісних пухлин. Хворі клітини й тканини організму мають підвищену чутливість до дії рентгенівських променів, тому відповідною дозою випромінювання можна стримувати ріст і навіть руйнувати хворі тканини організму, не пошкоджуючи сусідніх здорових тканин.



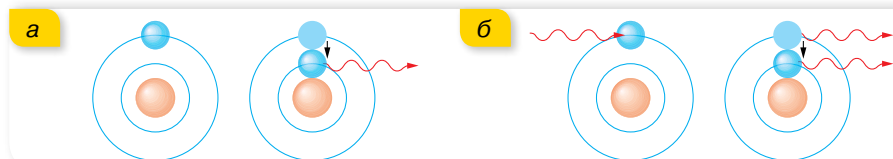
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть принцип збудження рентгенівських променів. Що таке рентгенівське характеристичне випромінювання? **2.** На малюнку 240, с. 260 наведено характеристичний спектр рентгенівського випромінювання, отриманий за деякої напруги на рентгенівській трубці. Як зміниться вигляд кривої, якщо напругу на трубці зменшити вдвічі? **3.** Назвіть основні властивості рентгенівських променів.

§57

Квантові генератори та їх застосування

Спонтанне і вимушене випромінювання. Як ми знаємо, перехід квантової системи (атома, йона, молекули) з одного енергетичного стану в інший супроводжується випромінюванням або поглинанням кванта електромагнітного випромінювання. Досі ми говорили лише про такий механізм випромінювання (теплого випромінювання, люмінесценції), за якого атом переходить на нижчий енергетичний рівень *спонтанно* (самодовільно, без будь-якого зовнішнього впливу) (мал. 241, а).



Мал. 241. Механізм спонтанного (а) та вимушеного (б) випромінювання

Перейти на нижчий енергетичний рівень та випромінити квант енергії квантова система може і під впливом зовнішнього електромагнітного поля (мал. 241, б). Таке випромінювання називають *вимушеним* (індукованим). Характерною особливістю вимушеного випромінювання є те, що воно тотожне первинному падаючому на речовину випромінюванню, тобто збігається з ним за частотою, напрямками поширення й поляризації та когерентне в усьому об'ємі речовини. Цю особливість використовують у джерелах потужного когерентного випромінювання — *квантових генераторах (лазерах, мазерах)*.

З'ясуємо деякі особливості механізму індукованого випромінювання. Припустимо, що через речовину проходить електромагнітна хвиля. Як відомо, за рахунок поглинутої енергії частина атомів речовини переходить у збуджений стан (вищий за енергією). Збуджений атом може віддати свою енергію, що дорівнює $h\nu = E_2 - E_1$, сусіднім атомам під час зіткнення чи випромінити фотон у будь-якому напрямку. Якщо зовнішня електромагнітна хвиля має частоту $\nu = \frac{E_2}{h} - \frac{E_1}{h}$, то вона ніби «струшує» зі збудженого атома подібні до себе кванти випромінювання, не витрачаючи на це енергії. Під її дією атоми узгоджено переходять на нижчі енергетичні рівні, випромінюючи хвилі, які збігаються за частотою та фазою з падаючою хвилею.

У випадку квантової системи, що має два енергетичні рівні (загальна кількість рівнів завжди велика, але йдеться про «діючі» рівні), якою б потужною не була зовнішня хвиля, кількість збуджених атомів буде не більшою ніж незбуджених. Бо хвиля одночасно збуджує атоми та спричинює індуковані переходи з верхнього рівня на нижній.

Для створення потужного індукованого випромінювання необхідна така квантова система, де кількість атомів у збудженому стані перевищувала б кількість атомів в основному стані (говорять, система з *інверсним* станом). Такою може бути квантова система з трьох енергетичних рівнів.

Принцип дії квантових генераторів. Можливість *індукованого (вимушеного) випромінювання* передбачив ще 1917 р. Альберт Ейнштейн. Можливість інверсного заповнення електронами енергетичних рівнів атома передбачив радянський фізик Валентин Олександрович Фабрикант у 1939 р. Таким чином зародилась нова галузь фізики — квантова електроніка, розвиток якої спричинив створення квантових генераторів — *мазерів і лазерів*.

У 1951–1954 рр. радянські фізики Микола Геннадійович Басов й Олександр Михайлович Прохоров запропонували застосовувати для збудження атомів газорозрядну лампу, яка оточує прозорий стержень. Під час спалаху цієї лампи атоми стержня переходять у збуджений стан, після чого можливе підсилення світла. 1954 р. Микола Басов і Олександр Прохоров та американський фізик Чарлз Таунс сконструювали прилад, який працює на довжині хвилі $\lambda = 1,27$ см, його назвали «мазер», а в 1960 р. в США вдалося побудувати прилад, який випромінює в оптичному діапазоні; його назвали «лазер».

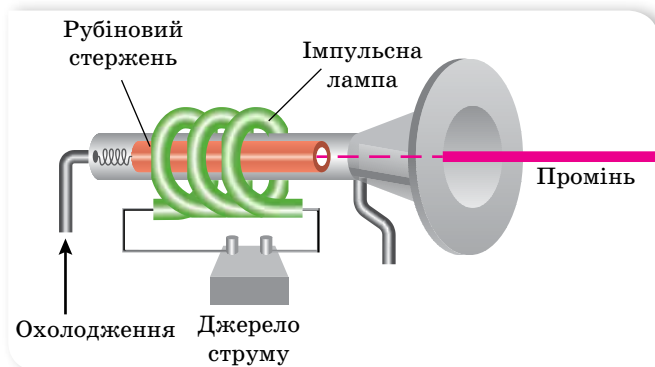
Квантові генератори — це джерела когерентного електромагнітного випромінювання з певною частотою та високою напрямленістю.

Лазер — квантовий генератор когерентних хвиль оптичного діапазону. Назва «лазер» є аббревіатурою англійської фрази: «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» — підсилення світла за допомогою індукованого (вимушеного) випромінювання.

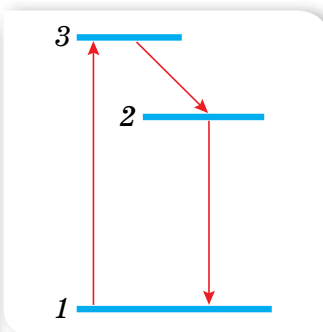
Мазер — генератор когерентного вузько направленого монохроматичного електромагнітного випромінювання сантиметрового радіодіапазону (ультракороткі хвилі). Принцип його дії подібний до принципу дії лазера й ґрунтується на вимушеному випромінюванні.

Розглянемо принципи дії рубінового лазера, схему якого наведено на малюнку 242. Він складається зі штучного рубінового стержня (окис алюмінію з домішками хрому), торці якого точно паралельні, гладенько відполіровані й покриті сріблом, причому лівий торець роблять непрозорим, а правий (вихідний) — напівпрозорим.

Світлове випромінювання лазера створюють атоми Хрому. Саме атоми Хрому в кристалі мають три енергетичні рівні (мал. 243), для збудження яких використовують спеціальну потужну газорозрядну лампу, що має форму спіралі й дає синьо-зелене світло.



Мал. 242. Схема рубінового лазера



Мал. 243. Енергетичні рівні атомів хрому

У разі опромінення світлом ксенонової лампи атоми хрому переходять з основного енергетичного рівня 1 на збуджений рівень 3. На рівні 3 електрон перебуває не довго, приблизно 10^{-8} с, після цього самовільно без випромінювання переходить до стану 2 (енергія при цьому передається кристалічним ґраткам). На рівні 2 електрони можуть перебувати тривалий час (приблизно 10^{-3} с), чим забезпечується інверсний (перенаселений) стан. У цьому разі кристал рубіна є активним середовищем. Якщо тепер декілька електронів перейдуть зі стану 2 в стан 1, вони стимулюють вимушене випромінювання інших атомів, і починається лазерна генерація.

Унаслідок переходів $2 \rightarrow 1$ випромінюються фотони в різних напрямках. Ті з них, які йдуть під кутом до осі кристала, виходять з нього і для наступних процесів не мають ніякого значення. А хвиля, що проходить уздовж осі кристала, багато разів відбивається від спеціальних дзеркал, які нанесені на торцях кристала й утворюють так званий резонатор. Хвиля

індукції випромінювання збуджених атомів хрому швидко підсилюється. Через один з торців стержня (напівпрозорий) виходить потужний короткочасний імпульс червоного світла. Рубіновий лазер працює в імпульсному режимі. Але є лазери безперервної дії. Наразі розроблено різні лазери на склі, газах, напівпровідниках і т. ін. Коефіцієнт корисної дії газового лазера на CO_2 досягає 20 %, саме їх використовують у промисловості.

Лазерне випромінювання має такі властивості:

- ▶ лазери здатні створювати пучки світла з дуже малим кутом розбіжності;
- ▶ світло лазера є монохроматичним;
- ▶ лазер є найпотужнішим джерелом світла.

Лазери використовують для зв'язку в космосі, випаровування або зварювання матеріалів у вакуумі, в хірургічних операціях (офтальмологія), для збудження хімічних реакцій, здійснення керованої термоядерної реакції та ін.

Поняття про нелінійну оптику. Квантові генератори створюють світлові пучки дуже високої інтенсивності. Вектор напруженості такої хвилі змінює оптичні характеристики середовища, у якому поширюється хвиля (показник заломлення, коефіцієнт поглинання тощо), тобто поляризація середовища нелінійно залежить від напруженості поля хвилі. При поширенні таких хвиль порушується принцип суперпозиції, і хвилі можуть впливати одна на одну.

Нелінійний характер залежності між поляризацією середовища й напруженістю діючого світлового поля веде до виникнення нових оптичних ефектів і до істотних змін у перебігу вже відомих оптичних явищ.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Яке випромінювання називають спонтанним і чому воно є некогерентним? **2.** Яке випромінювання називають вимушеним (або індукованим)? Виконайте малюнок і поясніть процес утворення вимушеного випромінювання. **3.** Поясніть принцип дії рубінового лазера. **4.** Чим відрізняється лазерне випромінювання від випромінювань, створених іншими джерелами світла? **5.** Назвіть основні сфери застосування лазерів.

§ 58

Атомне ядро

Протонно-нейтронна модель атомного ядра. Історію ядерної фізики прийнято відліковувати з 1896 р. У цьому році Анрі Беккерель відкрив явище радіоактивності, яке не можна було пояснити на основі тогочасних уявлень про будову атома.

На початку 30-х років ХХ ст. було досліджено структуру атомного ядра й розроблено його модель, яку й донині використовують для пояснення процесів мікросвіту. Згідно з цією моделлю, до складу ядра атома входять частинки двох видів — протони та нейтрони. (Надалі ми частіше

вживатимемо термін «частинки», але не забуваймо, що ці частинки мають і хвильові властивості.)

Протон (позначається p) — стабільна елементарна частинка. З одного протона складається ядро атома Гідрогену. Протон має елементарний позитивний заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Нейтрон (позначається n) — електрично нейтральна частинка. Нейтрон — стабільна частинка лише у складі стабільних атомних ядер. Вільний нейтрон — нестабільна частинка, яка розпадається на інші частинки.

Нейтрони та протони як складові частини атомного ядра мають спільну назву — *нуклони*.

Оскільки атом в цілому електронейтральний, а заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона, то кількість протонів Z у ядрі дорівнює кількості електронів в атомній оболонці. Число Z в атомному ядрі визначає атомний номер і його місце в таблиці Менделєєва. Кожне атомне ядро характеризується зарядом Ze , масою $m_{\text{я}}$ і масовим числом A , що дорівнює кількості нуклонів у ядрі, $A = N + Z$, де N — кількість нейтронів, Z — кількість протонів.

Позначаючи ядра хімічного елемента, вказують кількість протонів Z знизу й масове число A — зверху. Наприклад, ядро Гелію позначається так: ${}^4_2\text{He}$.

Енергія зв'язку. У ядрі зосереджена майже вся (понад 99,95 %) маса атома. Маси ядер прийнято вимірювати в атомних одиницях маси (а. о. м.). Маса протона $m_p = 1,672617 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00728 а. о. м. Маса нейтрона $m_n = 1,674920 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00866 а. о. м. (Згідно з формулою взаємозв'язку маси-енергії $E = mc^2$ маси ядер також вимірюють одиницями енергії — електрон-вольтами.)

Дослідженнями доведено, що *загальна маса ядра завжди менша від суми мас частинок, з яких воно складається*, тобто $M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n$. Різницю між сумою мас нуклонів (нейтронів і протонів), які входять до складу ядра, і масою ядра називають *дефектом маси Δm* . Дефект маси визначає енергію зв'язку: що більший дефект мас, то більша енергія зв'язку й стійкіше ядро.

Енергія зв'язку ядра $E_{\text{зв}}$ визначається роботою, яку потрібно виконати, щоб розділити ядро на окремі частинки й віддалити їх одну від одної на таку відстань, на якій їхньою взаємодією можна нехтувати.

Згідно із законом взаємозв'язку маси-енергії: $E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$. Оскільки енергію зв'язку зазвичай виражають у МеВ, а дефект мас — в а.о.м.,

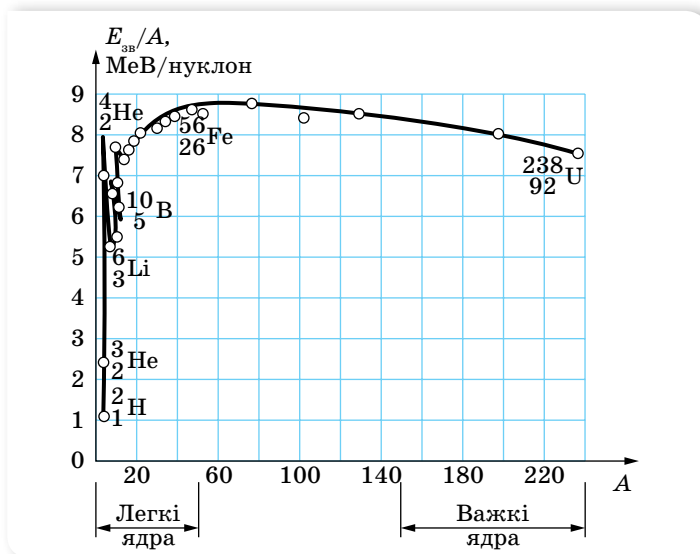
і враховуючи, що $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$ і $1\text{еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж, для обчислень

можна користуватись формулою $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а.о.м.}}$.

Якби не було дефекту маси, то ядро розпалося б на нуклони самостійно, без виконання роботи. Для забезпечення стабільності ядра його маса має бути меншою від суми мас його нуклонів.

Питомою енергією зв'язку називають енергію зв'язку, яка припадає на один нуклон.

На малюнку 244 наведено криву залежності питомої енергії зв'язку від масового числа для стабільних ядер. Як видно з малюнка, питома енергія зв'язку спочатку зростає зі збільшенням масового числа, досягає насичення (близько 8 МеВ/нуклон для $A \approx 15$) і для $A > 60$ крива повільно спадає. Питома енергія зв'язку має максимум (приблизно 8,8 МеВ) для $A \approx 56$. Максимум кривої відповідає найстабільнішим ядрам.



Мал. 244. Крива залежності питомої енергії зв'язку від масового числа для стабільних ядер

Сильна взаємодія. Ядра атомів можна аналізувати не лише з погляду енергії, а й з позиції тих сил, які утримують нуклони в ядрі. Сили, які діють між ядерними частинками й зумовлюють утворення атомних ядер, мають особливий характер. Оскільки ці сили перевищують електромагнітну кулонівську силу відштовхування, яка, своєю чергою, перевищує гравітаційну силу притягання, то ці сили дістали назву *сильних (ядерних) сил*. Ядерні сили належать до нового типу взаємодії — *сильної взаємодії*.

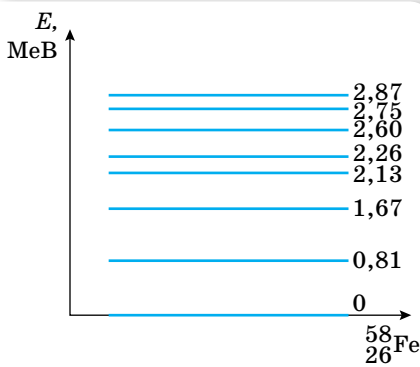
Дослідження показали, що ядерні сили притягання діють між будь-якими двома нуклонами на відстанях між центрами частинок близько $2 \cdot 10^{-15}$ м і різко зменшуються зі збільшенням відстані; на відстанях, більших за $3 \cdot 10^{-15}$ м, вони вже практично дорівнюють нулю. Коли ж нуклони, зіткнувшись, зближуються до відстані $0,5 \cdot 10^{-15}$ м, ядерні сили перетворюються на сили відштовхування. Пригадайте, подібний характер має взаємодія між молекулами, але сили й енергія взаємодії нуклонів у мільйони разів більші, а відстані між частинками — в мільйони разів менші.

Дуже малий радіус дії ядерних сил свідчить про те, що нуклони всередині ядра взаємодіють лише із сусідніми, а не з усіма нуклонами ядра. Відповідно можна помітити деяку схожість між атомним ядром та краплиною рідини. Нуклони в ядрі, як і молекули в рідині, взаємодіють тільки зі своїми найближчими сусідами. Густина ядра, як і краплини, не залежить від розміру. Поверхневі нуклони односторонньо пов'язанні з внутрішніми, і під дією сил поверхневого натягу ядро, як і краплина, має набувати сферичної форми. У збудженому ядрі нуклони коливаються, подібно до молекул у нагрітій краплині. Численні зіткнення можуть привести до того, що який-небудь з нуклонів дістане енергію, достатню для подолання ядерних сил, і вилетить з ядра. Коли заряджена частинка, наприклад, протон або α -частинка, перебуває на відстані, що перевищує радіус дії ядерних сил, то ядро діє на неї просто як позитивно заряджена краплина. Наведений опис називають *краплинною моделлю ядра*. Краплинна модель ядра дає змогу обчислити радіуси ядер і наочно пояснити деякі їхні властивості.

Але чи завжди процес зіткнення ядра з іншим ядром або частинкою буде супроводжуватись вильотом нуклона? Чи не може атомне ядро поглинути енергію, одержану під час зіткнення, і перерозподілити її між нуклонами, що входять до його складу, змінивши тим самим свою внутрішню енергію? Що відбуватиметься з таким ядром далі?

Відповіді на ці запитання дали досліди з вивчення взаємодії протонів з атомними ядрами. Виявляється, з поступовим збільшенням енергії протонів спочатку спостерігаються тільки пружні зіткнення з атомними ядрами, кінетична енергія не перетворюється на інші види енергії, а лише перерозподіляється між протоном і атомним ядром як однією цілою частинкою. Однак, починаючи з деякого значення енергії протона, можуть відбуватись і непружні зіткнення, в яких протон поглинається ядром і повністю віддає йому свою енергію. Ядро кожного ізотопу характеризується певним набором «порцій» енергії, які воно може сприйняти. Пояснення властивостей ядра в цьому разі здійснюють за допомогою *оболонкової моделі*. Згідно із цією моделлю, нуклони в ядрі не перемішані як завгодно, а, подібно до електронів в атомі, розміщуються зв'язаними групами, заповнюючи дозволені ядерні оболонки.

Таким чином, квантування енергії та низки інших параметрів є властивістю не лише атомів, а й атомних ядер. Проте між енергетичними діаграмами атомів та атомних ядер є суттєві відмінності. На малюнку 245 зображено енергетичну діаграму ядра ізотопу Феруму ${}_{26}^{58}\text{Fe}$. Зверніть увагу, що енергія, потрібна для переведення атомного ядра в збуджений стан, —



Мал. 245. Енергетичні рівні ядра атома Феруму

порядку мегаелектронвольт, коли для переведення у збуджений стан атома достатньо кількох електронвольт.

Самодовільний перехід атомного ядра зі збудженого стану в основний супроводжується випромінюванням *гамма-квантів*. Гамма-кванти є найбільш короткохвильовим видом електромагнітного випромінювання.

Незважаючи на те, що оболонкова модель атома дає змогу пояснити спектри енергетичних станів, вона, як і краплинна модель, не спроможна пояснити всіх властивостей сильної взаємодії, зокрема *обмінний характер ядерних сил*. Як ми з'ясуємо згодом, нуклони взаємодіють між собою через третю частинку, якою вони постійно обмінюються.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Які характерні властивості ядерних сил відрізняють їх від інших типів сил — електричних, магнітних, гравітаційних? **2.** Не користуючись відповідними таблицями, порівняйте енергії зв'язку таких двох ядер: ${}^7_3\text{Li}$ та ${}^7_4\text{Be}$. **3.** Нуклони в ядрі мають кінетичну й потенціальну енергії. Яка за модулем сумарна енергія нуклонів більша? Чому?



Приклади розв'язування задач

Задача. Розрахуйте енергію зв'язку ядра атома Дейтерію. Відповідь наведіть в електрон-вольтах. Використайте необхідні довідкові дані з таблиць мас ізотопів.

Дано:

$$\begin{aligned} m_p &= 1,00728 \text{ а. о. м.} \\ m_n &= 1,00866 \text{ а. о. м.} \\ M_{{}^2_1\text{H}} &= 2,01410 \text{ а. о. м.} \\ m_e &= 0,00055 \text{ а. о. м.} \\ E_{\text{зв}} &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

Енергія зв'язку ядра визначається як $E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$, де Δm — різниця суми мас вільних частинок, що входять до складу ядра, і маси ядра (дефект маси ядра); c — швидкість світла у вакуумі.

Для знаходження різниці мас використовуємо з таблиць відомості про маси протона m_p , нейтрона m_n та атома Дейтерію $M_{{}^2_1\text{H}}$. Для знаходження дефекту маси ядра Дейтерію Δm необхідно вирахувати з маси атома дейтерію масу електрона, що утворює його оболонку:

$$\Delta m = m_p + m_n - m_{\text{я}} = m_p + m_n - (M_{{}^2_1\text{H}} - m_e).$$

Виконавши розрахунки, отримуємо: $\Delta m = 0,00239$ а. о. м.

Оскільки $1 \text{ а. о. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$ і $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$,

то для обчислень можна користуватись формулою $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а. о. м.}}$.

$$E_{\text{зв}} = 0,00239 \text{ а. о. м.} \cdot 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а. о. м.}} = 2,23 \text{ МеВ.}$$

Відповідь: $E_{\text{зв}} = 2,23 \text{ МеВ}$.



Вправа 34

1. Обчисліть енергію зв'язку ядра Дейтерію ${}^2_1\text{H}$ в МеВ.
2. Визначте енергію зв'язку ядра Алюмінію ${}^{27}_{13}\text{Al}$.
3. Визначте енергію зв'язку, яка припадає на один нуклон у ядрах ${}^7_3\text{Li}$, ${}^{16}_8\text{O}$.
4. Йони двох ізотопів Урану, що мають однакову валентність, рухаються в магнітному полі мас-спектрографа по дугах кіл з радіусами $R_1 = 1,224$ м і $R_2 = 1,232$ м. Визначте відношення мас ізотопів. Яка маса m_1 йонів легкого ізотопу (в атомних одиницях маси), якщо маса йонів важкого ізотопу $m_2 = 238$ а. о. м.?

§ 59

Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду

Ізотопи. Природна і штучна радіоактивність. Одним з найбільш переконливих доказів складної будови атомів стало відкрите в 1896 р. французьким фізиком Антуаном Беккерелем явище природної радіоактивності. Унаслідок спостереження за великою кількістю радіоактивних перетворень поступово з'ясувалося, що є речовини, які мають різні радіоактивні властивості (тобто розпадаються по-різному), але цілком однакові за хімічними властивостями. На цій підставі Фредерік Содді в 1911 р. висловив припущення про можливість існування елементів з однаковими хімічними властивостями, які, однак, відрізняються іншими властивостями (зокрема щодо радіоактивності). Ці елементи треба ставити в одну й ту саму чарунку періодичної системи Менделєєва. Фредерік Содді назвав такі елементи *ізотопами* (тобто такими, що займають однакові місця).

Атомні ядра з однаковим Z , але різними кількостями нейтронів N називають *ізотопами*.

Наразі відомі ізотопи всіх хімічних елементів. Наприклад, Гідроген має три ізотопи:

${}^1_1\text{H}$ — Гідроген звичайний — основний ізотоп стабільний.

${}^2_1\text{H} = {}^2_1\text{D}$ — Дейтерій (важкий водень); входить як домішка до природного водню (його вміст становить $\frac{1}{4500}$ частину).

${}^3_1\text{H} = {}^3_1\text{T}$ — надважкий водень — Тритій; отримують штучно, він радіоактивний.

Існування ізотопів доводить, що заряд атомного ядра й, отже, будова електронної оболонки визначають не всі властивості атома, а лише його хімічні властивості й ті фізичні, які залежать від периферії електронної оболонки, наприклад, розміри. Маса ж атома та його радіоактивні властивості не залежать від порядкового номера в таблиці Менделєєва.

З явищем радіоактивності ви вже частково ознайомилися в курсі фізики 9 класу. Пригадаймо його.

Радіоактивність — це спонтанне перетворення нестійких ізотопів хімічного елемента на ізотопи іншого хімічного елемента, яке супроводжується випусканням певних частинок.

Радіоактивний розпад ядер (радіоактивність) є властивістю самого атомного ядра; на швидкість протікання цього процесу не впливають зовнішні фактори (температура, тиск, електричне або магнітне поля тощо).

Радіоактивність нестабільних ізотопів, що трапляються в природі, називають *природною*. *Штучна* радіоактивність — це радіоактивність нестабільних ізотопів, отриманих у лабораторних умовах як продукти штучних перетворень атомних ядер.

Види радіоактивного випромінювання. Дослідження Антуана Беккереля, Ернеста Резерфорда, П'єра Кюрі, Марії Склодовської-Кюрі та інших учених показали, що радіоактивне випромінювання є трьох видів. Вони були названі умовно першими трьома літерами грецького алфавіту: α -, β -, γ -випромінювання.

Дослідження методом відхилення в магнітному полі, проведені Склодовською-Кюрі, а згодом й Резерфордом, показали, що радіоактивне випромінювання має різний електричний заряд: α -частинки — позитивний, β -частинки — негативний і γ -промені — електрично нейтральні. Детальні дослідження радіоактивного випромінювання підвели до з'ясування його природи.

α -частинки — це ядра атома Гелію (2 протони та 2 нейтрони). Характерною величиною α -частинок є їхня енергія (від 4 до 9 МеВ). Різні радіоактивні речовини випромінюють α -частинки різної енергії, однак усі α -частинки, випущені даною радіоактивною речовиною, мають цілком конкретну енергію. Найчастіше радіоактивна речовина випромінює не одну, а кілька груп α -частинок із цілком певним значенням початкової енергії. Пролітаючи крізь речовину, α -частинки поступово втрачають енергію, йонізуючи молекули речовини й, урешті, зупиняються. У повітрі за нормальних умов α -частинки утворюють у середньому приблизно 50 000 пар йонів на 1 см шляху. Довжина їхнього вільного пробігу в повітрі — від 2 до 12 см, у твердих речовинах і рідинах — кілька мікрометрів. Тому вони легко затримуються аркушем паперу.

β -частинки — це потік швидких електронів. Швидкості β -частинок можуть наближатись до швидкості світла й сягати $0,999 \cdot c$. На відміну від α -частинок, β -частинки даної радіоактивної речовини мають не однакові значення енергії. Енергія β -частинок може набувати значення від 0 до деякого максимального значення (характерного для даного хімічного елемента). Унаслідок відносно малої маси β -частинки розсіюються в речовині, їхні траєкторії мають покручений вигляд, для них не існує певної довжини вільного пробігу. Щоб затримати β -частинки, потрібен шар металу завтовшки близько 3 мм.

γ -промені — це короткохвильовий вид електромагнітного випромінювання, який виникає внаслідок переходу ядра зі збудженого стану в основний. Довжина хвилі γ -променів — порядку 10^{-10} м, що зумовлює їхню високу проникну здатність. Енергія γ -променів — від 0,02 до 2,6 МеВ. Для поглинання γ -променів потрібен шар свинцю завтовшки понад 20 см.

Альфа- й бета-розпади. Радіоактивне випромінювання є продуктом самодовільного розпаду атомних ядер радіоактивних елементів. При цьому деякі з ядер випускають лише α -частинки, інші — β -частинки. Є радіоактивні ядра, які випускають обидва види випромінювання. Зауважимо, що γ -промені, як правило, не є самостійним типом радіоактивності, воно супроводжує α - і β -розпади. Розглянемо детальніше види радіоактивного розпаду.

У процесах радіоактивного розпаду всіх трьох видів виконуються класичні закони збереження: енергії, імпульсу, моменту імпульсу та електричного заряду. Для радіоактивного розпаду виконується ще один закон — **закон збереження кількості нуклонів**: загальна кількість нуклонів у будь-якому радіоактивному розпаді залишається незмінною (нуклони не зникають і не виникають, відбувається їх перетворення).

Радіоактивний розпад супроводжується перетворенням одного хімічного елемента на інший. Ядро, що утворюється внаслідок α -розпаду, буде відрізнитись від вихідного тим, що воно втрачає 2 протони та 2 нейтрони. Наприклад, при α -розпаді радію ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ утворюється елемент, порядковий номер якого $Z = 88 - 2 = 86$ і масове число $A = 226 - 4 = 222$. Отже, у результаті утворюється радон ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$.

Загальне **рівняння α -розпаду** записують у вигляді ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\text{He}$.

Якщо механізм α -розпаду дістав просте й природне пояснення, то механізм β -розпаду довгий час залишався нерозгаданим. Дійсно, звідки при β -розпаді з'являються електрони, адже їх немає у складі ядра?

Зрозуміло, що β -частинка не є електроном оболонки атома, тому що виділення електрона з оболонки є йонізацією атома, у результаті якої не відбувається зміни хімічної природи атома. Таким чином, оскільки β -частинка не є складовою частиною ядра і не є електроном, вирваним з оболонки атома, можна припустити, що β -частинка «народжується» в результаті процесів, які відбуваються всередині ядра. Перевіримо цю гіпотезу.

У процесі β -розпаду масове число залишається незмінним, отже, залишається незмінним загальна кількість нуклонів у ядрі. При цьому змінюється (підвищується) на одиницю заряд ядра, тобто кількість протонів збільшується на одиницю. Відповідно кількість нейтронів має зменшитись на одиницю (оскільки масове число A залишається незмінним). Отже, β -розпад можна пояснити як перетворення одного з нейтронів на протон з випусканням β -частинки. Дійсно, самодовільний процес перетворення протона в нейтрон має супроводжуватись виділенням енергії (якби цього не було, то такий процес не міг би відбутися самодовільно, ядру потрібне було б надходження енергії ззовні).

Згідно із законом взаємозв'язку маси-енергії, виділена енергія має відповідати масі електрона. Проте було встановлено, що енергії, які виділялись під час β -розпаду, мають значення від 0 до деякого максимального значення E_m . Неперервний характер спектрів β -випромінювання виявився несподіваним, адже це начебто означало невиконання закону збереження енергії. Як показали детальніші дослідження, закон збереження імпульсу та моменту імпульсу також не виконувалися при β -розпаді. Для подолання цих труднощів швейцарський фізик Вольфганг Паулі в 1931 р. запропонував гіпотезу, згідно з якою при β -розпаді з ядра вилітає ще одна

частинка, яка не має електричного заряду й маса якої надзвичайно мала. Гіпотетична частинка могла б мати відповідну енергію, імпульс, що й забезпечило б виконання законів збереження. Експериментально виявити цю частинку вдалося лише у 50-х роках ХХ ст.

Згодом були відкриті й інші процеси перетворення частинок і виявлені нові частинки (та їх античастинки), що зумовило появу нового напрямку у фізиці — *фізики елементарних частинок*. Більш детально про це — в наступних параграфах.

Щодо процесів β -розпаду, то встановлено їх два види: β^+ - та β^- -розпади. При β^- -розпаді один з нейтронів усередині ядра перетворюється на протон, електрон і *антинейтрино*: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$. Електрон і *антинейтрино* вилітають з ядра, а нуклони, які залишилися, утворюють нове ядро.

Таким чином, загальне *рівняння β -розпаду* (природного) записують у вигляді: ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$.

При β^+ -розпаді протон перетворюється на нейтрон і одночасно випускаються *позитрон* і *нейтрино*: ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_{+1}^0e + \nu$. Це перетворення відбувається з поглинанням енергії, оскільки маса протона менша від маси нейтрона, і самодовільно відбуватись не може.

Що ж до *γ -випромінювання*, то воно зазвичай виникає услід за α - і β -розпадами, оскільки атомне ядро в результаті розпадів перебуває у збудженому стані, і, переходячи на нижчий енергетичний рівень (у нормальний стан), випромінює γ -квант.

Закон радіоактивного розпаду. Макроскопічний зразок радіоактивного ізотопу містить величезну кількість радіоактивних ядер. Ці ядра розпадаються не одночасно, а протягом деякого часу. Процес розпаду має випадковий характер: ми не можемо точно передбачити, коли розпадеться певне ядро. Проте, використовуючи теорію ймовірності, ми можемо визначити, скільки ядер розпадеться протягом деякого часу. Іншими словами, кількість розпадів ΔN (або ядер, які розпались), що відбуваються протягом малого інтервалу часу Δt , пропорційна цьому інтервалу Δt і повній кількості ядер N : $\Delta N = -\lambda N \Delta t$.

Коефіцієнт пропорційності λ називають *сталою розпаду*. Для кожного ізотопу стала розпаду має своє значення. Що більша λ , то більшою є швидкість розпаду (активність ізотопу). Знак «мінус» указує на те, що кількість радіоактивних ядер зменшується.

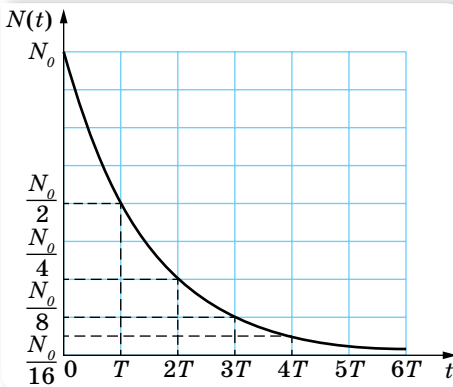
Для $\Delta t \rightarrow 0$ ΔN буде дуже малою величиною порівняно з N , і отримане рівняння можна записати в диференціальній формі: $dN = -\lambda N dt$ або $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$.

Після інтегрування $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt$, де N_0 — початкова кількість ядер при $t = 0$, N — кількість ядер, що не розпалась на момент часу t , отримуємо $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$ або $N = N_0 e^{-\lambda t}$. Отриманий вираз і є *законом радіоактивного розпаду*.

Закон радіоактивного розпаду описує розпад великої кількості ядер будь-якого радіоактивного ізотопу: $N = N_0 e^{-\lambda t}$, λ — стала радіоактивного розпаду — характеризує частку радіоактивних ядер, які розпадутися за час t .

Закон справджується в середньому для великої кількості ядер. Якщо атомів мало, то говорити про певний закон радіоактивного розпаду не можна. Закон радіоактивного розпаду є ще одним прикладом статистичного закону, оскільки він установлює, яка в середньому кількість атомів розпадеться за даний інтервал часу. Але завжди бувають неминучі відхилення від середнього значення, і що менше атомів у досліджуваному зразку, то більші ці відхилення.

Швидкість розпаду (або загальна кількість розпадів за одиницю часу) називають **активністю ізотопу**:



Мал. 246. Графічне відображення закону радіоактивного розпаду

$$A = -\lambda N = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

Одиниця активності — бекерель, 1 Бк.

1 Бк дорівнює активності джерела, з якою за 1 с відбувається один акт розпаду. Позасистемна одиниця — кюрі, 1 Кі = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Як видно, активність A ізотопу зменшується з часом за експонентою з такою ж швидкістю, як і кількість ядер, що не розпалась, N (мал. 246).

Період піврозпаду. Швидкість розпаду характеризують також **періодом піврозпаду T** .

Період піврозпаду T — інтервал часу, за який розпадається половина радіоактивних ядер.

Періоди піврозпаду для різних ізотопів достатньо сильно різняться, наприклад, у $^{11}_6\text{C}$ він становить 20 хв, у $^{14}_6\text{C}$ — 5600 років.

Закон радіоактивного розпаду, записаний через період піврозпаду, має вигляд $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$, де N — кількість атомних ядер, що не розпались на даний момент часу t , N_0 — початкова кількість ядер. Не важко побачити, що період піврозпаду обернено пропорційний сталій розпаду. Що більшим є період піврозпаду, то менша стала розпаду. Точний зв'язок сталої розпаду з періодом піврозпаду має вигляд: $T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$.

Отримання та застосування радіонуклідів. Радіоактивні ізотопи різних хімічних елементів (як природні, так і отримані у процесі штучної

радіоактивності) мають свою сферу застосування. Основою їх практичного використання є такі їхні властивості:

- ▶ будь-який радіоактивний ізотоп є «міченим» атомом відповідного елемента, тобто атомом, який за фізичними й хімічними властивостями не відрізняється від звичайного атома, однак поведінку якого можна спостерігати за його радіоактивним випромінюванням;
- ▶ будь-яке радіоактивне випромінювання має певну проникну здатність, тобто властивість поширюватись і поглинатись у даному середовищі певним чином;
- ▶ радіоактивні випромінювання йонізують речовину;
- ▶ під дією нейтронів та інших випромінювань великої енергії в речовині утворюється наведена радіоактивність.

Відповідно до цих властивостей виділяють і основні методи їх використання. Наприклад, використовуючи «мічений» атом, можна дізнатися про швидкість обміну речовин у тканинах живого організму, про швидкість руху крові в судинах або нафтопродуктів трубопроводами тощо. У медицині за допомогою мічених атомів проводять діагностику деяких захворювань, вивчають вміст тих чи тих речовин у різних тканинах і органах людини, обмін речовин в організмі тощо. Йонізуюча здатність радіоактивних випромінювань використовується для руйнування злоякісних пухлин, стерилізації фармацевтичних препаратів та харчових продуктів.

Наведена радіоактивність (зокрема, опромінення нейтронами) використовується для дослідження вмісту речовини. Деякі з атомів стабільних ізотопів досліджуваної речовини, захопивши нейтрони, перетворюються на радіоактивні ізотопи. За характером наведеного радіоактивного випромінювання можна зробити висновки про наявність у речовині тих чи тих домішок. Особливістю методу є те, що він дає змогу виявити домішки в дуже малих концентраціях. Цей метод використовують для встановлення віку археологічних об'єктів (за вмістом у них радіоактивного ізотопу Карбону-14).



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Що є причиною радіоактивного випромінювання? Яка природа α -, β -, γ -випромінювання? **2.** Альфа-частинку поглинула речовина. Куди поділась α -частинка? **3.** Чому під час радіоактивного розпаду з ядра атома вилітає саме α -частинка, а не окремо один або два протони чи нейтрони? **4.** Чому виникає γ -квант у ядрі атома в процесі його радіоактивного розпаду? **5.** Який закон електродинаміки постулює той факт, що в разі перетворення нейтрона на протон виникає саме електрон, що випромінюється з ядра як β -частинка? **6.** Чим характеризується швидкість розпаду радіоактивного ізотопу?



Приклади розв'язування задач

Задача. Деяка маса радіоактивного Радію містить $25 \cdot 10^6$ атомів. Скільки атомів розпадеться за добу, якщо період піврозпаду Радію — 1602 роки?

Дано:

$$N_0 = 25 \cdot 10^6$$

$$t = 1 \text{ доба}$$

$$T = 1602 \text{ роки}$$

$$\Delta N = ?$$

Розв'язання:

Оскільки час t малий порівняно з періодом піврозпаду, то можна скористатись наближеною формулою для визначення кількості ядер, що розпались:

$$\Delta N = \frac{0,693}{T} N_0 t.$$

$$\Delta N = \frac{0,693 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 1 \text{ доба}}{1602 \cdot 365 \text{ дб}} \approx 30.$$

Відповідь: $\Delta N = 30$.

Вправа 35

1. Яка частка радіоактивних ядер деякого елемента розпадається за час, що дорівнює половині періоду піврозпаду?
2. За який час розпадеться 80 % атомів радіоактивного ізотопу Хрому $^{51}_{24}\text{Cr}$, якщо період його піврозпаду — 27,8 доби?
3. Було встановлено, що в радіоактивному препараті відбувається $6,4 \cdot 10^8$ розпадів ядер за хвилину. Визначте активність цього препарату в бекерелях $\left(1 \text{ Бк} = 1 \frac{\text{розп}}{\text{хв}}\right)$.
4. За який час у препараті з постійною активністю 8,2 МБк розпадеться $25 \cdot 10^8$ ядер?
5. Визначте період піврозпаду Радону, якщо за 1 добу з мільйона атомів розпадається 175 000 атомів.
6. Радіоактивний Натрій-24 розпадається, викидаючи β -частинки. Період піврозпаду Натрію — 14,8 год. Обчисліть кількість атомів, що розпадається в 1 мг даного радіоактивного зразка за 10 год.
7. Маємо урановий препарат з активністю 20,7 МБк. Визначте в препараті масу ізотопу $^{235}_{92}\text{U}$ з періодом піврозпаду $7,1 \cdot 10^8$ років.
8. Під час археологічних розкопок знайдено шматок деревини, у якій вміст радіоактивних ядер ізотопу Карбону C^{14} на 1,5 % менший, ніж у свіжозрубаній деревині. Період піврозпаду ізотопу Карбону становить 5579 років. Установіть, скільки років тому було зрубано знайдено деревину.
9. Зразок, що містить 1 мг Полонію-210, уміщено в калориметр із теплоємністю $8 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$. У результаті α -розпаду полоній перетворюється на Плюмбум-206. На скільки підніметься температура в калориметрі за 1 год? Період піврозпаду Полонію — 138 дб. Вважайте, що α -частинки не вилітають за межі калориметра.

§ 60

Ядерні реакції

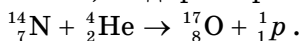
Ядерні реакції. Вивчення природної радіоактивності показало, що перетворення одного хімічного елемента на інший зумовлене внутрішньоядерними процесами, тобто змінами, які відбуваються всередині атомних ядер. У зв'язку з цим було здійснено спроби штучного перетворення одних хімічних елементів на інші завдяки впливу на атомні ядра. Виняткова стабільність ядер нерадіоактивних елементів свідчить про те, що їх

зміна може статись лише під час надзвичайно великого енергетичного зовнішнього впливу. Ефективним засобом такого впливу виявилось бомбардування атомних ядер частинками високої енергії. Спочатку для бомбардування використовували α -частинки радіоактивного випромінювання. Пізніше почали використовувати й інші заряджені частинки, попередньо надавши їм великої швидкості (кінетичної енергії) у спеціальних прискорювачах. Процес перетворення атомних ядер називають ядерною реакцією.

Ядерні реакції — процес перетворення атомних ядер унаслідок їх взаємодії з елементарними частинками або з іншими ядрами.

Як видно з визначення, ядерні реакції зумовлюються зовнішніми чинниками. Частинки високої енергії (α , β , n , p), зіткнувшись із ядром, можуть спричинити різноманітні перетворення.

У 1919 р. Ернест Резерфорд здійснив першу ядерну реакцію, бомбардуючи азотну мішень α -частинками, і відкрив протон (p):



Відкриття Резерфорда привело до створення нової галузі наукових досліджень — штучного перетворення хімічних елементів, яка й сьогодні має важливе наукове та практичне значення. У 1932 р. вперше було застосовано штучно отримані прискорені протони для розщеплення ядра Літію: ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$. Цього ж року Джеймс Чедвік відкрив нейтрон (n): ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$, а Фредерік Жолю-Кюрі, здійснивши реакцію ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$, уперше отримав штучний радіоактивний ізотоп фосфору ${}^{30}_{15}\text{P}$, який є джерелом позитронів. Так було відкрито позитрон ${}^+_1e$.

Енріко Фермі показав, що нейтрони є більш придатними для ініціювання ядерних реакцій, оскільки вони не мають електричного заряду й не відштовхуються ядром, як протони чи α -частинки (котрі мають долати «кулонівський бар'єр»). У 1938 р. Отто Ган, Фриц Штрассман і Ліза Мейтнер здійснили поділ ядра Урану-235 нейтронами: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{145}_{56}\text{Ba} + {}^{88}_{36}\text{Kr} + 3{}^1_0\text{n}$ (один із можливих варіантів поділу). Це відкриття було не лише значним науковим досягненням — воно стало доленосним для всього світу. Саме реакція поділу ${}^{235}_{92}\text{U}$ лежить в основі дії й атомної електростанції, й атомної бомби.

Залежно від виду частинок, якими бомбардується ядро хімічного елемента, від енергії цих частинок, а також від виду бомбардованих ядер можуть відбуватись різні ядерні реакції. Розрізняють такі типи ядерних реакцій:

- 1. Реакція захоплення.** Ядро поглинає бомбардуючу частинку й перетворюється на нове, масивніше ядро. Прикладом може бути реакція ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$, у якій протон поглинається ядром Бору й виникає ядро Карбону. Зазвичай у реакціях такого типу нове ядро утворюється в збудженому стані та, випромінивши один або кілька γ -квантів, переходить у нормальний (основний) стан.

2. **Поглинання** ядром бомбардуючої частинки та **випускання** новоутвореним ядром однієї або кількох частинок. Прикладом такої реакції може бути реакція ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0n$. Тут Дейтрон поглинається ядром Берилію, а проміжне ядро, що утворилось, випромінює нейтрон і перетворюється на ядро атома Бору.

3. **Поділ ядра.** Під дією бомбардування ядер частинками великих енергій можливе розщеплення ядра на кілька частин. Так, наприклад, ядро атома Бору внаслідок бомбардування протонами достатньо великої енергії може розпастись на три α -частинки. Ця реакція відбувається у два етапи. Спочатку вилітає одна α -частинка ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1p \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$, але ядро Берилію виявляється сильнозбудженим і розпадається ще на дві α -частинки: ${}^8_4\text{Be} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$.

Якщо частинка високої енергії влучає в ядро масивного елемента, останнє може розпастись на велику кількість частинок або на уламки приблизно однакової маси.

4. **Реакція синтезу.** Це реакція злиття (синтезу) легких атомних ядер у більш важке. Синтез можливий лише за дуже високих температур — порядку 10^8 К і вищих (тому їх ще називають *термоядерними реакціями*). Наприклад, синтез Гелію з Дейтерію і Тритію, ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0n$.

Термоядерні реакції відіграють вирішальну роль в еволюції Всесвіту, зокрема шляхом термоядерних реакцій сформувались існуючі нині хімічні елементи. Енергія випромінювання Сонця і зір — це енергія термоядерних реакцій, що відбуваються в їхніх надрах. Для Сонця основною реакцією є перетворення чотирьох протонів на ядро атома Гелію, що супроводжується виділенням енергії понад 26 МеВ за один цикл.

У земних умовах отримати температуру, за якої можлива термоядерна реакція, можна, лише застосувавши ядерний вибух (на цьому ґрунтується принцип дії водневої бомби) або потужний імпульс лазерного випромінювання (керована термоядерна реакція синтезу).

Енергетичний вихід ядерної реакції. Під час ядерних реакцій обов'язково виконуються закони збереження (електричного заряду, енергії, імпульсу та моменту імпульсу, кількості нуклонів). На основі закону збереження й перетворення енергії можна розрахувати енергетичний вихід ядерної реакції.

Енергетичний вихід ядерної реакції $E_{\text{вих}}$ — це енергія, яка виділяється як продукт реакції (або затрачається для здійснення реакції). Вона дорівнює різниці енергій спокою всіх ядер і частинок до та після реакції.

$E_{\text{вих}} = \Delta mc^2$, де Δm — *дефект маси*, який можна розрахувати як різницю між сумою мас спокою ядер і частинок до та після ядерної реакції. Якщо сумарна маса продуктів реакції менша від суми мас вихідних ядер, то реакція супроводжується виділенням енергії — у вигляді кінетичної енергії утворених частинок. Якщо ж сумарна маса продуктів реакції

більша за сумарну масу вихідних ядер, то така реакція для свого перебігу потребує енергетичної підтримки.

Ядерна енергетика. Пошук способів перетворення й використання енергії є не просто проблемою дослідження науковців. Енергонезалежність, енергетична безпека є однією з найважливіших проблем внутрішньої та зовнішньої політики держав. Розвиток людського суспільства нерозривно пов'язаний з використанням природних ресурсів нашої планети, зі споживанням різних видів енергії у дедалі більших масштабах. Усі здобутки сучасної цивілізації можливі завдяки тій величезній кількості штучної енергії, яку виробляє людство. Виробництво теплової та електричної енергії ґрунтується на процесі спалювання копалин-енерго-ресурсів — вугілля, нафти, газу. Завдяки науковим дослідженням людина дістала у своє розпорядження величезну силу, нове могутнє джерело енергії, закладене в ядрах атомів, — ядерну енергію. В історії людства не було наукової події, більш визначної за своїми наслідками, ніж відкриття ділення ядер урану.

Для України атомна (ядерна) енергетика є стратегічно важливим елементом енергозабезпечення. Сьогоднішній і прогнозований внесок її становить близько 55 % електроенергії, що виробляється в країні. За кількістю ядерних реакторів Україна посідає дев'яте місце у світі та третє в Європі. В Україні діють 4 атомні електростанції з 15 енергоблоками, одна з яких — Запорізька АЕС, яка із 6 енергоблоками загальною потужністю в 6000 МВт, є найпотужнішою в Європі.

Детальніше про принципи дії ядерних реакторів, проблеми та перспективи використання ядерної енергетики читайте в електронного додатку.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Чим ядерна реакція відрізняється від хімічної? Які бувають типи ядерних реакцій? У чому полягає основна відмінність ядерних реакцій на нейтронах? 2. Як обчислюється енергетичний вихід ядерної реакції?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Обчисліть енергетичний вихід ядерної реакції ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$. Для наближених обчислень можна використати відносні атомні маси елементів (див. табл. на форзацах).

Дано:

$$m_0(\text{N}) = 14,00307 \text{ а. о. м}$$

$$m_0(\text{He}) = 4,00260 \text{ а. о. м}$$

$$m_0(\text{O}) = 16,99991 \text{ а. о. м}$$

$$m_0(\text{H}) = 1,00783 \text{ а. о. м}$$

$$E_{\text{вих}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Енергетичний вихід ядерної реакції:

$$E_{\text{вих}} = \Delta mc^2 \text{ (у Дж)} \text{ або } \Delta E = \Delta m_{\text{а.о.м.}} \cdot 931 \frac{\text{MeV}}{\text{а. о. м.}}$$

$$\Delta m = m_0(\text{N}) + m_0(\text{He}) - m_0(\text{O}) - m_0(\text{H}).$$

Після підстановки даних отримуємо $\Delta m = -0,0014$ а.о.м.

$$\Delta E = -0,0014 \text{ а.о.м.} \cdot 931 \frac{\text{МеВ}}{\text{а.о.м.}} = -1,303 \text{ МеВ.}$$

Знак мінус вказує на те, що енергія в даній реакції поглинається.

Відповідь: $-1,303 \text{ МеВ.}$

Задача 2. Потужність атомної установки підводного човна дорівнює $14,7 \text{ МВт}$. Ядерним паливом є збагачений уран ${}^{235}_{92}\text{U}$. Визначте запас пального, необхідний для місячного плавання човна, якщо за поділу одного ядра урану виділяється 200 МеВ енергії.

Дано:

$$P = 14,7 \text{ МВт} = 1,47 \cdot 10^7 \text{ Вт}$$

$$t = 24 \text{ год} \cdot 3600 \text{ с} \cdot 30 \text{ діб}$$

$$E_0 = 200 \text{ МеВ} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$$

$$\mu = 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$m = ?$

Розв'язання:

Спожита потужність за місяць становить: $P = \frac{E}{t}$, де E — енергія, що виділяється за поділу всіх N ядер урану, які містяться в пальному масою m .

$$N = \frac{m}{\mu} N_a, \text{ де } \mu \text{ — молярна маса урану.}$$

Оскільки за поділу одного ядра виділяється енергія E_0 , то за поділу всіх ядер: $E = NE_0$.

$$\text{Таким чином, } P = \frac{E_0 m N_a}{\mu t}. \text{ Звідси } m = \frac{P \mu t}{E_0 N_a}.$$

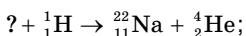
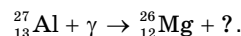
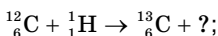
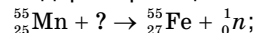
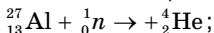
$$m = \frac{1,47 \cdot 10^7 \text{ Вт} \cdot 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 24 \text{ год} \cdot 3600 \text{ с} \cdot 30 \text{ діб}}{3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 0,495 \text{ кг.}$$

Відповідь: $0,495 \text{ кг.}$

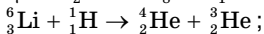
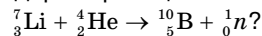
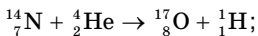


Вправа 36

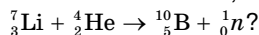
1. Допишіть позначення, яких бракує в рівняннях таких ядерних реакцій:



2. Виділяється чи поглинається енергія під час таких ядерних реакцій:



3. Яку мінімальну енергію повинна мати α -частинка, щоб відбулася ядерна реакція:



4. Кінетична енергія α -частинки після лобового пружного зіткнення зменшилась на 64 %. З ядром якого атома могло відбутися зіткнення?

5. Протон з кінетичною енергією 5 МеВ налітає на ядро ${}^7_3\text{Li}$, що перебуває у спокої. У результаті реакції вилітають дві α -частинки з однаковими енергіями. Визначте кут між напрямками руху α -частинок.

6. Визначте мінімальну енергію та частоту гамма-кванта, здатного «розбити» ядро Дейтерію на протон і нейтрон.

§ 61

Методи реєстрації йонізуючого випромінювання

Принцип дії приладів для реєстрації йонізуючого випромінювання.

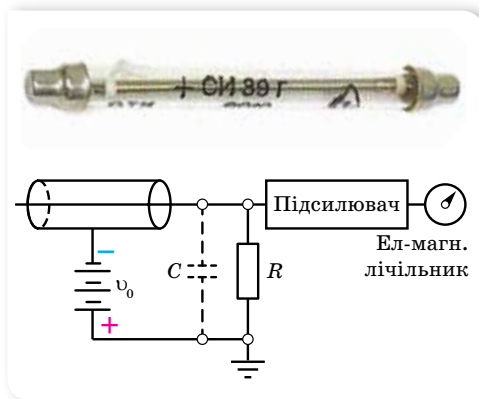
Арсеналом ядерної фізики є реєструвальні пристрої, які дають потрібну інформацію про події в мікросвіті. Частинки для досліджень випромінюються під час радіоактивних перетворень, входять до складу космічних променів або створюються на спеціальних потужних прискорювачах. Розміри частинок настільки малі, що спостерігати їх не можна навіть за допомогою електронного мікроскопа. Однак фізики сконструювали прилади, які дають можливість реєструвати частинки, спостерігати їх траєкторії, вимірювати енергії та швидкості руху.

Оскільки заряджені частинки здатні йонізувати атоми речовини, впливати на фотопластинки, викликати свічення деяких речовин, то ці властивості використовують у конструкції відповідного типу реєструвального пристрою.

Лічильники йонізуючих частинок. Лічильники йонізуючих частинок за принципом своєї дії здебільшого фіксують факт проходження частинки. До них відносять: лічильник Гейгера — Мюллера, сімейство сцинтиляційних лічильників, напівпровідникові лічильники та інші.

Одним з перших лічильників є *лічильник Гейгера — Мюллера*, який понад півстоліття використовується в ядерних дослідженнях.

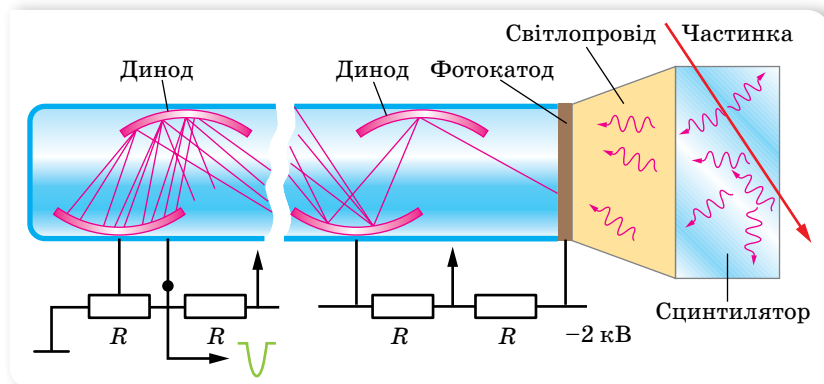
Зовнішній вигляд і схема цього лічильника показані на малюнку 247. У скляну трубку вміщено два електроди: анод (тонка металева нитка) та циліндричний катод, до яких прикладається постійна (декілька сотень вольт) напруга. Скляна трубка заповнена інертним газом під зниженим тиском (для збільшення довжини вільного пробігу й полегшення ударної йонізації). Заряджена частинка, потрапляючи в трубку, йонізує газ. Утворені електрони та йони, рухаючись прискорено до електродів, здійснюють вторинну йонізацію, яка веде до пробивання газу, — відбувається електричний розряд, і сила струму через лічильник різко зростає. Поки триває розряд, лічильник не може реєструвати наступну частинку, тому в коло лічильника вмикають резистор з великим опором R . Імпульс напруги з навантаження R подається в реєструючий пристрій (підсилювач і лічильний механізм).



Мал. 247. Зовнішній вигляд та схема лічильника Гейгера — Мюллера

Лічильник Гейгера — Мюллера застосовують не лише для реєстрації частинок, за його допомогою можна визначати проникну здатність йонізуючого випромінювання (поміщаючи перед ним різні екрани). Використовуючи послідовне з'єднання лічильників, можна визначити напрямок руху частинок.

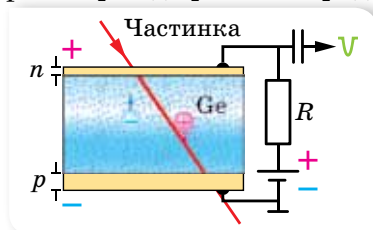
Принцип дії *сцинтиляційних* (від лат. «сцинтиляціо» — блискання, спалах) лічильників полягає у виникненні спалаху на екрані, покритому люмінесцентною речовиною за потрапляння на нього частинки з досить високою енергією. Подібний пристрій використав Резерфорд у досліді із розсіювання α -частинок.



Мал. 248. Схема сцинтиляційного лічильника

На малюнку 248 показано схему більш сучасного сцинтиляційного лічильника. Заряджена частинка зумовлює спалах люмінофору. Оскільки спалах може бути дуже слабким, його варто підсилити. Для цього спалах через світловод передається на фотокатод. Фотони спалаху вибивають із фотокатода електрони, які спрямовуються на перший електрод помножувача (перший динод). Матеріал диноду має малу роботу виходу, тому електрони вибивають із нього новий потік електронів, які потрапляють на другий динод. Таких динодів може бути від 10 до 20, що дає змогу підсилити сигнал до 10^8 разів.

Напівпровідниковий лічильник — це плоский напівпровідниковий діод (мал. 249), ввімкнений у непротіканому режимі. Якщо через p - n -перехід пролітає заряджена частинка, то вона утворює додаткові пари електрон-дірка, які під дією електричного поля рухаються до електродів, створюючи імпульс струму.



Мал. 249. Схема напівпровідникового лічильника

Напівпровідникові лічильники за чутливістю перевищують сцинтиляційні, в яких отриманий спалах ще необхідно підсилювати. Кристали германію, активовані літєм, дозволяють вимірювати енергії частинок з точністю до 0,1 %.

Різновидом напівпровідникових лічильників є *стрипові детектори*, у яких напів-

провідникові кремнієві смужки розташовані взаємно перпендикулярно. Це дозволяє вимірювати координати частинки. Таким чином напівпровідникові лічильники дають змогу не просто фіксувати йонізуючу частинку, а й досліджувати її.

На особливу увагу заслуговують так звані *черенковські лічильники*, названі на честь Павла Олексійовича Черенкова. У 1934 р. Черенков відкрив явище випромінювання світла електронами, які рухаються в середовищі зі швидкістю, більшою за швидкість світла в цьому середовищі. Такі лічильники дають змогу досліджувати не лише заряджені частинки, а й нейтральні. На малюнку 250 наведено фотографію нейтринного детектора.



Мал. 250. Нейтринний детектор

У цю ємність заливають 167 тонн мінерального масла з домішками сцинтилятора. При взаємодії нейтрино з атомами речовини утворюються електрони високої енергії, швидкість руху яких більша за швидкість світла в цьому середовищі. Рух таких електронів супроводжується свіченням у вигляді конуса, яке фіксують 1220 помножувачів, що розташовані на стінках посудини.

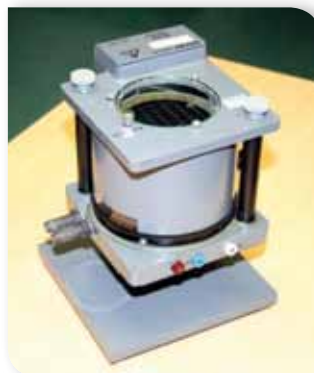
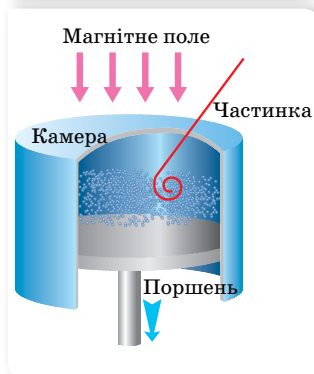
Камери для дослідження частинок. Камери (трекові детектори) — це пристрої для спостереження траєкторії (треку) зарядженої частинки.

Першим трековим детектором була камера Вільсона (туманна камера). Цю камеру побудував у 1912 р. англійський учений Чарльз Вільсон. Принцип її дії ґрунтується на конденсації перенасиченої пари на йонах, що утворюються в робочому об'ємі камери вздовж траєкторії руху зарядженої частинки.

На малюнку 251 показано схему та зовнішній вигляд лабораторної камери Вільсона.

Циліндрична посудина з поршнем заповнена сумішшю повітря з парою води або спирту, у стані, близькому до насичення. Якщо різко опускати поршень, то пара в камері адіабатно розширюється. Від цього вона охолоджується і стає перенасиченою. Якщо в цей час крізь камеру пролітає заряджена частинка, вона йонізує молекули повітря. Утворенні йони стають центрами конденсації, і на них утворюються крапельки, які роблять «видимую» траєкторію руху частинки. Цю картину можна спостерігати безпосередньо через віконце або фотографувати.

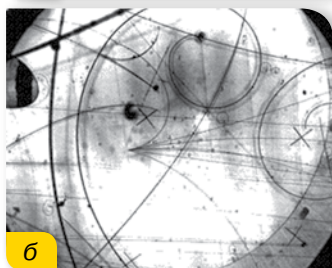
Щоб підготувати камеру до подальшого використання, всередині неї створюють електричне поле, яке притягує йони до електродів, де вони нейтралізуються.



Мал. 251. Схема та зовнішній вигляд камери Вільсона



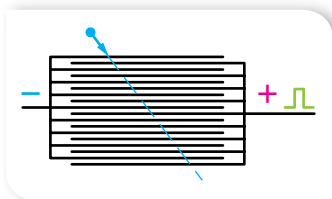
а



б

Мал. 252.

а — бульбашкова камера;
б — фотографії треків



Мал. 253. Схема іскрової камери

Фотографії треків, отримані за допомогою камери Вільсона, дають повнішу інформацію про характер частинки. За довжиною треку можна визначити її енергію, швидкість. Якщо камеру помістити в магнітне поле, то на частинку діятиме сила Лоренца, яка викривлятиме її траєкторію. За радіусом кривизни траєкторії можна визначити відношення заряду частинки до її маси.

Пізніше (у 1952 р.) американський учений Дональд Глазер запропонував для спостереження треків частинок використовувати перегріту рідину. У такій рідині на йонах, що утворюються під час руху заряджених частинок, виникають бульбашки пари, які дають видимий трек. Камери цього типу дістали назву *бульбашкових* (мал. 252, а). Перевага бульбашкової камери порівняно з камерою Вільсона зумовлюється більшою густиною робочої речовини. Унаслідок цього пробіги частинок короткі, й частинки навіть високих енергій застряють у камері. Це дає змогу спостерігати та фотографувати (мал. 252, б) серію послідовних перетворень частинки тих реакцій, які вона спричинює.

Для реєстрації частинок застосовують також *товстошарові фотоемульсії*. Заряджена частинка, рухаючись у фотоемульсії, руйнує молекули бромистого срібла на своєму шляху.

Головна частина *іскрової (стрімерної) камери* нагадує багатошаровий конденсатор, пластини якого розміщено на відстані кількох міліметрів одна від одної (мал. 253).

У момент проходження через камеру частинки на пластини подається імпульс високої напруги. У місцях руху частинки виникають іскри (стрімери), які можна фотографувати.

Розглянуті нами пристрої не вичерпують усієї їх множини. Сучасні установки для дослідження елементарних частинок використовують у колайдерах.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Яку властивість заряджених частинок покладено в основу дії реєструючих пристроїв? 2. У чому відмінність між лічильниками й камерами реєстрації йонізуючого випромінювання? 3. Опишіть будову та принцип дії одного з пристроїв для реєстрації йонізуючого випромінювання.

§ 62

Біологічна дія радіації та захист від йонізуючого випромінювання

Біологічна дія йонізуючого випромінювання. Біологічна дія йонізуючих випромінювань на живі тканини пов'язана зі збудженням та йонізацією атомів і молекул, утворенням вільних радикалів. Збуджені атоми та йони, вільні радикали мають високу хімічну активність, тому в клітинах організму утворюються нові хімічні сполуки, руйнуються клітини, порушується їх здатність до поділу. Найчутливіші до йонізованого випромінювання — ядра клітин, особливо тих клітин, які швидко діляться. Тому радіоактивне випромінювання уражає в організмі насамперед кістковий мозок, унаслідок чого порушується процес утворення крові. Потім ушкоджуються клітини травного тракту та інших органів. Ураження статевих органів призводить до необоротних генетичних змін (мутацій) хромосом, унаслідок чого виникають спадкові хвороби нащадків. небезпека радіоактивного випромінювання посилюється тим, що воно не спричинює відчуття болю навіть за смертельних доз.

Організм людини постійно підлягає дії радіоактивного випромінювання. Джерелами цього випромінювання є космічні промені, природні копалини в надрах Землі, будинки, де ми живемо (радіоактивними будівельними матеріалами є граніт, бетон, цегла), електронно-променеві трубки кінескопів телевізорів, рентгенівські апарати. Навіть у самої людини в тілі міститься близько 0,01 г радіоактивного Калію, який розпадається зі швидкістю 4000 розпадів за секунду.

Характер впливу радіоактивних речовин залежить від їхнього виду та кількості (доз).

Дози випромінювання. Для оцінки дії радіоактивного випромінювання користуються дозиметричними величинами.

Незалежно від природи йонізуючого випромінювання його вплив на речовину оцінюють енергією, яка поглинається одиницею маси речовини, тобто *поглинутою дозою випромінювання*, $D = \frac{W}{m}$.

Одиниця в СІ поглинутої дози йонізуючого випромінювання — грей, 1 Гр.

1 Гр дорівнює дозі випромінювання, за якої опроміненій речовині масою 1 кг передається енергія будь-якого йонізуючого випромінювання 1 Дж.

Використовують також і позасистемну одиницю 1 рад (*rad* — за першими літерами англійського словосполучення *radation absorbed dose* — поглинута доза випромінювання).

1 рад — це доза, за якої опроміненій речовині масою 1 кг передається енергія 10^{-2} Дж.

Поглинута енергія затрачується на нагрівання речовини, на її хімічні й фізичні перетворення.

Поглинута доза випромінювання має властивість накопичуватись із часом: за інших однакових умов вона тим більша, що триваліший час опромінення. Тому застосовують поняття *потужності дози*, $N = \frac{D}{t}$.

Інтенсивність радіоактивного випромінювання оцінюють також за його йонізаційною здатністю, оскільки фізична дія будь-якого випромінювання пов'язана насамперед з йонізацією атомів і молекул речовини.

Цю характеристику називають *експозиційною дозою*: $D_e = \frac{q}{m}$.

У СІ експозиційну дозу вимірюють у кулонах на кілограм, $1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

$1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ означає, що сумарний заряд усіх йонів одного знака, утворених в 1 кг сухого атмосферного повітря, дорівнює 1 Кл.

Позасистемна одиниця експозиційної дози — рентген (Р).

1 Р означає, що під час опромінення рентгенівським або гамма-випромінюванням в 1 см³ повітря за нормальних умов створюється йонів із загальним зарядом кожного знака в $\frac{1}{3 \cdot 10^9}$ Кл.

Зв'язок між позасистемною (Р) та системною одиницями $\left(\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}\right)$:

$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ або $1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}$. Відповідно 1 рад = 1,1 Р.

При дозі 1 Р утворюється приблизно $2,08 \cdot 10^9$ пар йонів.

Експозиційна доза більш зручна на практиці, оскільки йонізацію повітря легко виміряти за допомогою *дозиметра* — приладу для вимірювання доз випромінювання. В основу дії дозиметрів покладено методи реєстрації йонізуючого випромінювання.

При опроміненні живих організмів, зокрема людини, виникають біологічні ефекти, які за тієї самої поглинutoї дози різні для різних видів випромінювання. Прийнято порівнювати біологічні ефекти, які зумовлюються будь-якими йонізуючими випромінюваннями, з ефектами від рентгенівського й гамма-випромінювань. Для цього користуються поняттям *еквівалентної дози випромінювання*.

Еквівалентна доза $D_{\text{ек}}$ — це поглинута доза, помножена на коефіцієнт K , що відображає здатність випромінювання певного типу чинити дію на тканини організму: $D_{\text{ек}} = KD$, де K — відносна біологічна ефективність, або коефіцієнт якості. Для рентгенівського γ - і β -випромінювань $K = 1$, для теплових нейтронів $K = 5$, для швидких нейтронів і протонів $K = 10$, для α -частинок $K = 20$.

У СІ еквівалентну дозу вимірюють у зівертах, 1 Зв.

Позасистемну одиницю еквівалентної дози йонізуючого випромінювання називають *біологічним еквівалентом рентгена* (бер): 1 бер = 1 Р = = 0,01 Гр = 0,01 Зв.

При оцінці біологічної дії радіоактивного випромінювання треба враховувати ще й те, що різні частини тіла мають різну чутливість до опромінення. Через це дози опромінення органів і тканин потрібно обчислювати з різними *коефіцієнтами радіаційного ризику*: 0,03 — для кісткової тканини та щитоподібної залози; 0,12 — для червоного кісткового мозку; 0,15 — для легенів; 0,25 — для статевих залоз; 0,3 — для інших органів.

Помноживши еквівалентні дози на відповідні коефіцієнти ризику для всіх органів і тканин та підсумувавши їх, дістанемо значення ефективної еквівалентної дози, що відображає сумарний ефект опромінення організму.

У процесі короткочасного опромінення людини доза у 20–50 Р призводить до змін у крові, доза у 100–250 Р спричинює променеву хворобу, а доза в 600 Р — смертельна. Природний фон радіації дорівнює річній дозі 0,2 Р, гранично допустима доза — 5 Р за рік.

Захист від іонізуючого випромінювання. Оскільки радіоактивне випромінювання шкідливо впливає на живі клітини, то, зрозуміло, потрібно організувати захист від нього. Для зниження дози опромінення навколо джерел радіоактивного випромінювання розташовують біологічний захист із речовин, що добре поглинають випромінювання. Найпростішим методом захисту є віддалення на достатню відстань від джерел випромінювання. Якщо це неможливо, то для захисту використовують перешкоди з різних поглинальних матеріалів, а робота з радіаційними препаратами здійснюється за допомогою маніпуляторів. Відомо, що α -частинки затримуються навіть аркушем паперу, β -випромінювання слід екранувати шаром пластмаси або спеціального скла, що містить свинець. Для захисту від γ -використовують свинцеві контейнери. Для захисту від особливо потужних джерел (ядерних реакторів, прискорювачів частинок) споруджують бетонні стіни відповідної товщини.

Радіоактивні речовини можуть потрапити в організм під час вдихання забрудненого радіоактивними елементами повітря, із харчовими продуктами або водою. Щоб деякою мірою захистити організм від радіації, застосовують речовини-оксиданти, що належать до радіопротекторів (їх необхідно вживати до опромінення).



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Який вплив справляє радіоактивне випромінювання на живі тканини? 2. Які дозиметричні величини характеризують радіоактивне випромінювання? Назвіть їх одиниці.
3. Які допустимі та небезпечні дози опромінення людини?

§ 63

Елементарні частинки

Поняття елементарної частинки. Ще 1949 р. Луї де Бройль (1892–1987, Франція) запропонував створити міжнародну організацію для здійснення наукових досліджень мікросвіту. У 1954 р. офіційно відкрито європейську



Мал. 254. Прискорювачі елементарних частинок

організацію з ядерних досліджень (ЦЕРН) — найбільшу у світі лабораторію фізики високих енергій. Сьогодні фізика елементарних частинок стала новою, великою і самостійною галуззю науки. Дослідження елементарних частинок у земних умовах здійснюється за допомогою прискорювачів частинок різних конструкцій: лінійних прискорювачів, циклотронів, синхрофазотронів, колайдерів (мал. 254) тощо. Проводять дослідження і природних потоків частинок — *космічного проміння*.

На початок 60-х років ХХ ст. кількість відкритих елементарних частинок стала настільки великою, що виникли сумніви, чи всі частинки, які називають елементарними, повністю відповідають цій назві.

Поняття елементарних частинок ґрунтується на факті дискретної будови речовини. Ряд елементарних частинок має складну внутрішню структуру, проте розділити їх на частини неможливо. Інші елементарні частинки є безструктурними й можуть вважатися первинними *фундаментальними частинками*.

Елементарна частинка — збірний термін, що належить до мікрооб'єктів у суб'ядерному масштабі.

Найхарактернішою особливістю елементарних частинок є їхня здатність до перетворень і взаємодії. Водночас дочірні частинки не є структурними складовими материнських, а народжуються в актах перетворення.

Отже, за сучасними уявленнями, елементарні частинки не просто «цеглинки» світобудови, це специфічні об'єкти мікросвіту. До того ж їм властивий особливий вид фундаментальної взаємодії — *слабка взаємодія*. За інтенсивністю слабка взаємодія в багато (приблизно в 10^{14}) разів менша від сильної і навіть електромагнітної взаємодії. Проте вона значно більша за гравітаційну взаємодію, оскільки маси елементарних частинок надто малі, а радіус їхньої взаємодії становить лише 10^{-18} м.

Типи фундаментальних взаємодій. Щоб зрозуміти механізм слабкої взаємодії, пригадаймо інші відомі нам типи взаємодій і їхній характер.

Вивчаючи механіку, ми ознайомились із гравітаційною взаємодією (силами всесвітнього тяжіння) і деякими виявами електромагнітної взаємодії (силами пружності, тертя). В електродинаміці ми вивчили електромагнітну взаємодію, а в ядерній фізиці — сильну (ядерну).

Щоб зрозуміти характер слабкої взаємодії, звернімося ще раз до електромагнітної. На самому початку вивчення електродинаміки ми з'ясували, що електричні сили діють на відстані. Посередником, що передає взаємодію, є поле. Можна стверджувати, що сила, з якою одна заряджена частинка діє на іншу, зумовлена електричним полем, яке створює перша частинка. Аналогічним способом магнітне поле є посередником магнітних сил.

Згодом ми з'ясували, що електромагнітні поля можуть поширюватись у вигляді хвиль у просторі, а також що світлу властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм. Унаслідок чого можна пояснити електромагнітну взаємодію між зарядженими частинками: 1) як *взаємодію через поле* і 2) як *обмін фотонами між частинками*.

На малюнку 255 зображено наочний приклад того, як у результаті обміну частинками відбувається взаємодія. На малюнку 255, а діти кидають одне в одного подушки. Спіймавши подушку, кожна дитина відкочується назад. Це ілюстрація сили відштовхування. Якщо діти намагаються вирвати подушки з рук одне одного (мал. 255, б), то кожний тягне партнера до себе. Це ілюстрація сили притягання.

Подібним чином може відбуватись електромагнітна взаємодія між зарядженими частинками: одна із заряджених частинок випромінює фотон і зазнає внаслідок цього віддачу. Інша частинка поглинає фотон. За такої взаємодії відбувається передача енергії та імпульсу від однієї частинки до іншої, і посередником при цьому є фотон.

У 1935 р. японський фізик Хідекі Юкава (1907–1981) висловив припущення, що подібним чином відбувається і сильна взаємодія між нуклонами в ядрі. Подальші дослідження показали, що посередником сильної взаємодії є глюони.

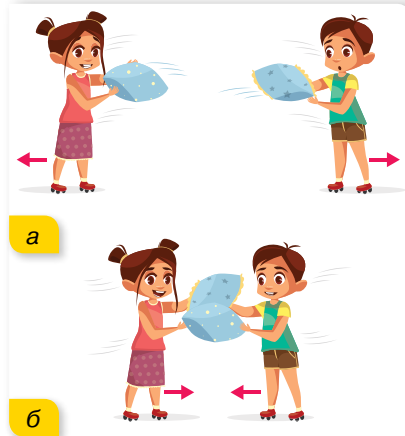
Таким чином, природно припустити, що мають існувати посередники слабкої та гравітаційної взаємодій. Пошук таких частинок тривав десятиліття. У 1983 р. Карло Руббіа заявив про довгоочікуване відкриття *проміжних бозонів* — частинок, через які відбуваються слабкі взаємодії.

Пошук квантів гравітаційного поля — гравітонів — поки що не дав результатів.

Властивості відомих на цей час основних типів взаємодій зведено в таблиці 11.

Таблиця 11

Тип взаємодії	Характер взаємодії	Радіус дії	Квант взаємодії
Сильна	Забезпечує зв'язок нуклонів у ядрі	$r = 10^{-15}$ м	Мезон/глюон
Електромагнітна	Взаємодія між електрично зарядженими частинками	$r = \infty$	Фотон
Слабка	Взаємодія, яка виявляється в розпадах частинок, а також у дії нейтрино на речовину	$r = 10^{-15}$ м	Бозон
Гравітаційна	Універсальна взаємодія, властива всім без винятку частинкам, які мають масу (у мікросвіті суттєвої ролі не відіграє)	$r = \infty$	Гравітон (?)



Мал. 255. Ілюстрація обмінного характеру взаємодії

Перед фізиками поставлено задачу створити теорію, яка б об'єднала всі типи взаємодій, пояснивши їх з єдиної точки зору. Ця ідея впливає зі сприйняття навколишнього світу як єдиного цілого. Задача ця надзвичайно складна. Ейнштейн у свій час витратив багато років (40 останніх років свого життя), щоб об'єднати гравітаційну та електромагнітну взаємодії, проте це йому не вдалося.

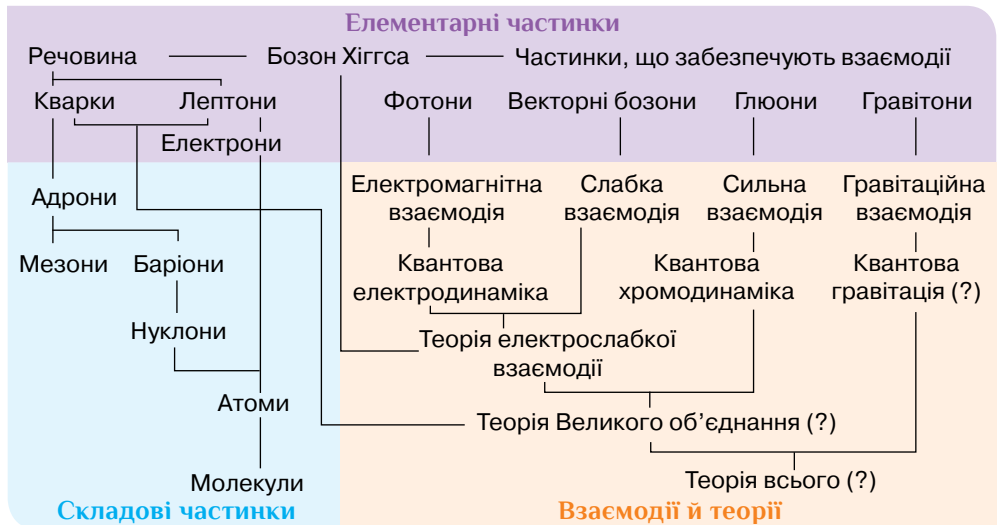
На початку 60-х років американські фізики Стівен Вайнберг і Шелдон Глешоу та пакистанський фізик Абдус Салам запропонували так звану калібрувальну теорію, яка об'єднує слабку й електромагнітну взаємодії. У цій теорії слабка й електромагнітна взаємодії розглядаються як два різні вияви єдиної, більш фундаментальної взаємодії. У ній фотони — посередники електромагнітної взаємодії — розглядаються як векторні бозони. А проміжні бозони: W^+ -бозон, W^- -бозон та Z^0 -бозон (нестабільні частинки, час життя яких $3 \cdot 10^{-25}$ с) — є посередниками слабкаї взаємодії.

Створення теорії електрослабкаї взаємодії було відзначено присудженням Вайнбергу, Глешоу, й Саламу Нобелівської премії з фізики 1979 р.

Класифікація частинок. За властивостями елементарні частинки поділяють на такі групи:

- ▶ за масою. Легкі частинки — *лептони* (до них належить електрон), найважчі — *адрони* (до них належать протони та нейтрони), й особлива частинка — *фотон*, частинка без маси, яка здатна існувати лише в русі зі швидкістю світла;
- ▶ за видом взаємодії. Для гравітаційної — *гравітони*¹, для електромагнітної взаємодії — *фотони*, сильну взаємодію зумовлено *глюонами*, слабку — *векторними бозонами*.

Більше про елементарні частинки ви дізнаєтеся, проаналізувавши малюнок 256.

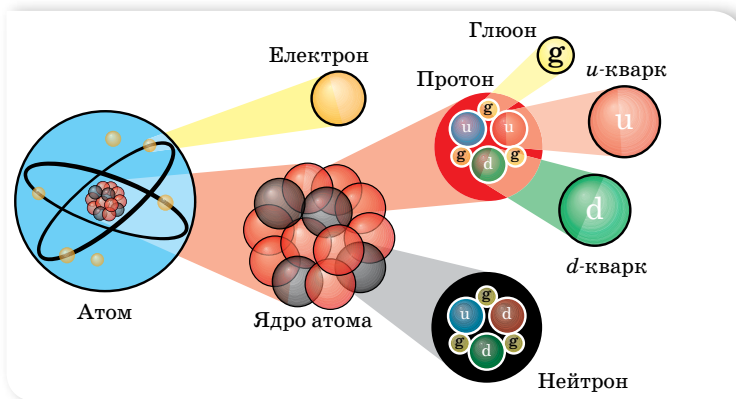


Мал. 256. Класифікація елементарних частинок

¹ Існування гравітонів поки не доведено експериментально через слабкість гравітаційної взаємодії, проте його вважають цілком імовірним.

Майже всі частинки, які можна безпосередньо спостерігати, належать до лептонів або адронів. Головна відмінність між ними в тому, що адрони беруть участь у сильній взаємодії, а лептони — ні. До того ж лептонів є лише 6, а адронів — понад сотню. Це дало підставу вважати, що адрони не є суто елементарними частинками й мають певну внутрішню структуру. У 1964 р. фізики Марі Гелл-Манн (нар. 1929, США) та Джордж Цвейг (нар. 1937, США) запропонували модель, за якою адрони мають складатися з фундаментальніших частинок — **кварків**.

Саме кварки та лептони є «будівельним матеріалом» для речовин. Завдяки взаємодії кварків існують ядра атомів. Формування електронних оболонок навколо ядра веде до утворення атомів (мал. 257).



Мал. 257. «Будівельний матеріал» речовин

Кожна частинка має **античастинку** (позначається тильдою над позначенням частинки). Маса, час існування і спіни частинки й античастинки однакові. Інші параметри, зокрема електричний заряд і магнітний момент, рівні за модулем, але протилежні за знаком. Прикладами частинок й античастинок є електрон і позитрон, протон й антипротон, нейтрон й антинейтрон, нейтрино й антинейтрино. Зіткнення частинки і античастинки приводить до їх взаємної анігіляції, унаслідок якої вони перетворюються на інші форми матерії.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Яку частинку називають елементарною? Назвіть стабільні елементарні частинки.
2. Який тип фундаментальної взаємодії характерний для елементарних частинок?
3. Що загального можна сказати про механізм усіх фундаментальних взаємодій?



Виконцемо навчальні проекти

- ▶ Які питання ядерної енергетики вирішуються в нашій країні та світі?
- ▶ Альтернативні джерела енергії.
- ▶ Проблеми реєстрації нейтрино.
- ▶ Біологічна дія радіаційного випромінювання.

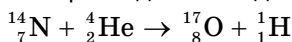


Перевірте себе (§ 50–63)



- Укажіть, від чого залежить максимальна кінетична енергія фотоелектронів і як саме.
 - від заряду електронів; обернено пропорційно
 - від частоти світла; лінійно
 - від маси електронів; прямо пропорційно
 - від швидкості фотонів; прямо пропорційно
- Червона межа фотоефекту для срібла дорівнює 0,26 мкм. Визначте роботу виходу електронів зі срібла.
 - $4,65 \cdot 10^{-9}$ Дж
 - $6,37 \cdot 10^{-19}$ Дж
 - $7,37 \cdot 10^{-19}$ Дж
 - $7,65 \cdot 10^{-19}$ Дж
- Укажіть правильне продовження твердження «Лінійчатий спектр випромінює речовина в...».
 - газоподібному молекулярному стані
 - газоподібному атомарному стані
 - твердому стані
 - будь-якому агрегатному стані
- У результаті серії послідовних радіоактивних розпадів атом Урану ${}_{92}^{238}\text{U}$ перетворився на стабільний атом Плюмбуму ${}_{82}^{206}\text{Pb}$. Визначте кількість α -розпадів і β -розпадів.
 - 6 і 4
 - 8 і 4
 - 8 і 6
 - 6 і 2
- Період піврозпаду ізотопу Цезію (${}_{55}^{137}\text{Cs}$) дорівнює 30 рокам. Визначте, скільки відсотків атомів цього ізотопу розпадеться за 150 років.
 - 82,2 %
 - 87,5 %
 - 96,9 %
 - 98,1 %
- Поверхню літію опромінують світлом частотою 10^{15} Гц. Визначте максимальну кінетичну енергію фотоелектронів, якщо робота виходу електронів з літію — 2,4 еВ.
- Атоми Гідрогену в основному стані поглинають фотони з довжиною хвилі 102,8 нм. Скільки різних спектральних ліній можна спостерігати за переходу атомів у незбуджений стан?
- На яку мінімальну відстань α -частинка наблизиться до нерухомого ядра атома Стануму, якщо її маса $6,7 \cdot 10^{-27}$ кг, а швидкість руху — $10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$?

9. Скільки води можна нагріти від $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ за рахунок енергії, що виділяється під час поділу $4,7\text{ г}$ урану-235? Вважайте, що за кожного поділу ядра Урану виділяється енергія 200 МеВ .
10. Виділяється чи поглинається енергія під час наведеної ядерної реакції?



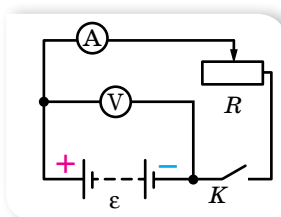
ПРАКТИКУМ

ВИМІРЮВАННЯ ЕРС І ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

Обладнання: гальванічний елемент (акумулятор або батарейка кишенькового ліхтарика), лабораторний амперметр, лабораторний вольтметр, реостат ($6\text{--}8\text{ Ом}$, 2 А), ключ, з'єднувальні провідники.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Складіть електричне коло за схемою, зображеною на малюнку 258.
2. Запишіть покази вольтметра при розімкнутому вимикачі K . Ця напруга приблизно дорівнює ЕРС джерела, за умови, що опір вольтметра значно перевищує внутрішній опір джерела.
3. Замкніть коло й реостатом відрегулюйте силу струму так, щоб відлік амперметра дорівнював цілому числу поділок.
4. Запишіть значення сили струму I й напруги на зовнішній ділянці кола U .
5. Обчисліть напругу на внутрішній ділянці кола $U_{\text{в}} = \varepsilon - U$.
6. Визначте внутрішній опір джерела струму за формулою $r = \frac{U_{\text{в}}}{I}$.
7. Змінюючи положення повзунка реостата, повторіть дослід тричі. Виконайте обчислення. Визначте середнє значення внутрішнього опору джерела струму.



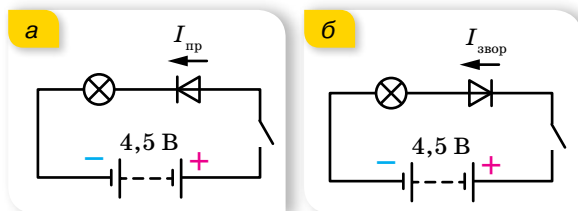
Мал. 258

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ДІОДОМ

Обладнання: батарея гальванічних елементів; лампочка розжарювання, розрахована на напругу $3,5\text{ В}$; будь-який з діодів серії Д7, Д226, КД226, КД220; з'єднувальні проводи, вимикач лабораторний; джерело електроживлення постійного струму; міліамперметр постійного струму; вольтметр постійного струму; реостат повзунковий; ключ.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Складіть електричне коло так, щоб анод діода був з'єднаний через лампочку з позитивною клемою батареї, а катод — з негативною клемою (мал. 259, а).
2. Замкніть вимикач і спостерігайте за яскравістю горіння лампочки, увімкнутої в електричне коло. Зробіть висновок про величину опору напівпровідникового діода, увімкнутого в пропускну напрямку.
3. Змініть порядок включення електродів діода в електричне коло на зворотний (мал. 259, б).

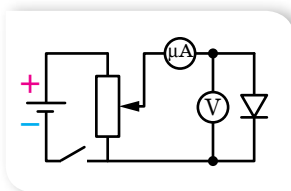


Мал. 259

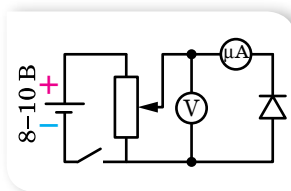
4. Замкніть вимикач і спостерігайте за станом лампочки, увімкнутої в електричне коло. Зробіть висновок про величину опору напівпровідникового діода, увімкнутого в зворотному напрямку.
5. Дослідіть залежність сили прямого струму від прикладеної до діода напруги. Для цього складіть електричне коло за схемою, зображеною на малюнку 260. Діод увімкніть у пропускну напрямку, звернувши увагу на знаки «+» і «-», позначені на його панелі. Напругу на діод подайте з потенціометра й виміряйте вольтметром зі шкалою 3 В, силу прямого струму діода виміряйте міліамперметром, увімкнутим спочатку зі шкалою 7,5 мА, а потім зі шкалами 15 мА і 30 мА.
6. Збільшуючи напругу на діоді щоразу приблизно на 0,02 В, запишіть показання обох приладів у таблицю.

Застереження. Сила прямого струму діода не має перевищувати 300 мА, інакше діод вийде з ладу.

7. Дослідіть залежність сили зворотного струму від прикладеної до діода напруги. Для цього складіть електричне коло за схемою, зображеною на малюнку 261, звернувши увагу на відмінність вмикання діода та вольтметра.



Мал. 260



Мал. 261

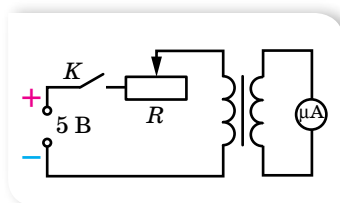
8. Напругу на діод подайте за допомогою потенціометра; виміряйте її вольтметром зі шкалою 15 В, а силу струму — міліамперметром зі шкалою 1,5 мА.
9. Збільшуючи напругу на діоді щоразу приблизно на 0,02 В, запишіть показання обох приладів у таблицю.
10. За результатами вимірювань побудуйте вольт-амперну характеристику діода. (Зверніть увагу, що масштаби осей графіка для першої та другої серії вимірювань (прямий і зворотний струм) краще обрати різними).

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Обладнання: котушка з 1200 витками, дві котушки з осердями, два підковоподібні магніти, гальванометр демонстраційний, джерело постійного струму на 5–6 В, реостат на 30 Ом, реостат на 10 Ом, ключ, з'єднувальні провідники.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Приєднайте котушку з 1200 витків до гальванометра. Швидко вставте магніт у котушку, спостерігаючи одночасно за показами приладу. Залишіть магніт у котушці та спостерігайте за стрілкою приладу. Потім швидко витягніть магніт з котушки, спостерігаючи за показами гальванометра. Зробіть висновок.
2. Повільно вставте в котушку, яка замкнена на гальванометр, або витягніть з неї два магніти, складені однойменними полюсами. Повторіть дослід, збільшивши швидкість руху магнітів. З'ясуйте, в яких випадках сила індукційного струму більша та як змінюється напрямок струму під час дослідів.
3. Повторіть досліді, рухаючи котушку відносно нерухомого магніту. Зробіть висновок.
4. Послідовно з гальванометром приєднайте ще й реостат і приблизно з однаковою швидкістю вставляйте в котушку (або витягуйте з неї) магніт. При цьому реостат спочатку виведіть на нуль ($R = 0$), а в іншому досліді введіть повністю ($R = 10$ Ом). Зафіксуйте покази гальванометра й зробіть висновок.
5. Складіть електричне коло за схемою (мал. 262).



Мал. 262

6. Використовуючи ключ, замкніть і розімкніть коло, зафіксуйте напрямок відхилення стрілки гальванометра. За напрямком відхилення стрілки визначте напрямок індукційного струму, напрямком індукції магнітного поля цього струму, а за полярністю джерела струму — напрямком струму в первинній котушці та напрямком індукції магнітного поля цього струму. Поясніть, який напрямок має індукційний струм порівняно з індукуючим під час замикання й розмикання індукуючого струму, а також під час збільшення та зменшення індукуючого струму. Перевірте виконання в цих дослідіх правила Ленца.
7. Використовуючи те само коло, повністю виведіть реостат, замкніть коло й за допомогою реостата швидко збільшуйте й зменшуйте опір кола. Зафіксуйте максимальне відхилення стрілки гальванометра в момент замикання кола, під час швидкого та повільного зменшення опору кола. Зробіть висновок про значення ЕРС індукції в цих дослідіх.
8. Вставте й вийміть з обох котушок сталеве осердя. Увесь час спостерігайте за показами гальванометра.

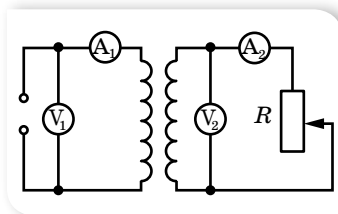
ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт трансформації трансформатора; дослідити залежність ККД трансформатора від опору навантаження.

Прилади та матеріали: трансформатор лабораторний, джерело змінного струму (36 В або 42 В), амперметр змінного струму, вольтметр змінного струму, реостат повзунковий РПП-2, вимикач, комплект з'єднувальних провідників.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Під'єднайте трансформатор до мережі змінної напруги (36 В або 42 В), замкніть коло. Виміряйте напругу на первинній обмотці U_1 .
2. Виміряйте напругу на вторинній обмотці U_2 .
3. Обчисліть коефіцієнт трансформації k .
4. Дослідіть залежність ККД трансформатора від навантаження. Для цього у вторинне коло увімкніть через ключ реостат, як показано на малюнку 263.



Мал. 263

5. Виміряйте сили струмів у первинній I_1 і вторинній I_2 обмотках.
6. Виміряти напруги на первинній і вторинній обмотках U_1 і U_2 .
7. Дослід повторіть для інших опорів R .
8. Обчисліть потужності, які споживають первинна і вторинна обмотки трансформатора за різних навантажень.
9. Обчисліть ККД трансформатора для кожного навантаження. На основі результатів усіх дослідів зробіть висновок.

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ

Обладнання: електрична лампа з прямою ниткою розжарювання, вимірювальна установка з лінійкою 1 мм/под. та екраном з поділками, дифракційна ґратка (1/100).

Вказівки щодо виконання роботи

1. Визначте період дифракційної ґратки d за формулою $d = \frac{1}{N}$ (мм), де $N = 100$.
2. Помістіть дифракційну ґратку в рамку приладу й зафіксуйте його в підставці.
3. Дивлячись крізь дифракційну ґратку, спрямуйте прилад так, щоб джерело світла було видно крізь вузьку прицільну щілину. Водночас по обидва боки екрана на лінійці видно дифракційні спектри кількох порядків. (У випадку похилого розташування спектрів поверніть ґратку на певний кут до усунення перекосу.)

4. За шкалою визначте положення середин кольорових смуг l у спектрах першого порядку. Вимірювання l проведіть для смуг одного кольору ліворуч і праворуч та визначте середні значення відстаней. Результати запишіть у таблицю.
5. Визначте за допомогою лінійки відстань L від дифракційної ґратки до шкали рухомого екрана.
6. Обчисліть довжини світлових хвиль $\lambda = \frac{d \cdot \sin \varphi}{k}$ для семи кольорів і запишіть їх у таблицю.
7. Повторіть вимірювання з іншою відстанню екрана від ґратки та для інших дифракційних порядків. Порівняйте отримані результати.
8. Спрямуйте на дифракційну ґратку промінь монохроматичного світла від лазерної указки. Отримайте дифракційну картину. Запишіть у зошиті, чим відрізняється ця картина від попередньої. Проведіть вимірювання аналогічно до попередніх завдань і визначте довжину хвилі лазерного випромінювання.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ НЕПЕРЕРВНОГО Й ЛІНІЙЧАТОГО СПЕКТРІВ РЕЧОВИНИ

Обладнання: спектроскоп двотрубний з відліковим мікрометричним гвинтом, трубки спектральні, прилад для засвічування спектральних трубок «Спектр», джерело електроживлення для практикуму ИВП-І, ключ, комплект з'єднувальних провідників, дротина зі жмутком вати на підставці, колба зі спиртом, сіль кухонна, сірники.

Вказівки щодо виконання роботи

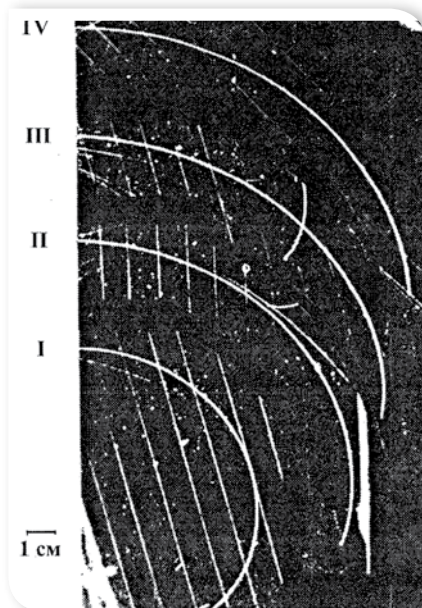
1. Вставте трубку з гелієм у тримач приладу для засвічування спектральних трубок і приєднайте прилад через вимикач до джерела постійного струму напругою близько 6 В. Щілину коліматора підведіть упритул до спектральної трубки й увімкніть струм.
2. Спостерігаючи крізь окуляр зорової труби й обертаючи мікрометричний гвинт, поступово побачте всі спектральні лінії гелію. Переміщаючи окуляр, отримайте чітке їх зображення.
3. Мікрометричним гвинтом поверніть зорову трубу вправо так, щоб у полі зору з'явилася крайня червона спектральна лінія. Сумістіть зображення вертикальної нитки з цією лінією і запишіть покази мікрометра в таблицю. Мікрометричний гвинт має крок 1 мм, а головку його поділено на 50 рівних частин, отже, ціна поділки на головці — 0,02 мм. Цілі міліметри відлічуйте за нерухомою шкалою на циліндрі, а частки сотих — за шкалою на головці гвинта.
4. Обертаючи мікрометричний гвинт, пересувайте зорову трубу до суміщення нитки з кожною з наступних спектральних ліній. Для кожної лінії запишіть відлік мікрометра в таблицю проти зазначених довжин хвиль гелію, взятих з довідника.
5. За записами відліків мікрометричного гвинта й довжинами хвиль, які відповідають цим відлікам, побудуйте криву. Для цього вздовж осі абсцис відкладайте показання мікрометра, а вздовж осі ординат — довжину світлових хвиль, узявши відповідний масштаб. Через знайдені точки проведіть плавну криву.
6. Змочіть шматочок вати, намотаний на дротину, і закріпіть його за допомогою підставки на висоті щілини коліматора. Підпаліть вату і спостерігайте слабкий суцільний спектр. Обсипте вату, на якій горить спирт, дрібною кухонною сіллю і спостерігайте появу на тлі суцільного спектра яскравої жовтої лінії пари натрію. Сумістіть з нею нитку й запишіть показання мікрометричного гвинта. Користуючись побудованою кривою, визначте довжину хвилі жовтої лінії натрію.

ВИВЧЕННЯ ТРЕКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ЗА ГОТОВИМИ ФОТОГРАФІЯМИ

Обладнання: фотографії треків заряджених частинок, трикутник або лінійка із ціною поділки 1 мм, циркуль, аркуш прозорого паперу, олівець.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Розгляньте фотографії треків (мал. 264). Трек I належить протону, треки II, III і IV — частинкам, які потрібно ідентифікувати. Вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площини фотографії й дорівнює 2,17 Тл. Початкові швидкості всіх частинок однакові й перпендикулярні до напрямку магнітного поля.
2. Накладіть на фотографію аркуш прозорого паперу й перенесіть на нього треки.
3. Для кожного треку проведіть дві хорди та в їхніх серединах поставте перпендикуляри. На перетині перпендикулярів лежать центри кіл.
4. Виміряйте радіуси кривизни треків частинок, перенесених на папір, на початкових ділянках. Поясніть, чому траєкторії частинок є дугами кіл. Яка причина відмінностей у кривизні траєкторій різних ядер? Пояснення запишіть у зошит.
5. Виміряйте радіуси кривизни на початку і в кінці одного з треків. Поясніть, чому кривизна траєкторії кожної частинки змінюється від початку до кінця пробігу частинки.
6. Поясніть причини відмінності в товщині треків різних ядер. Чому трек кожної частинки товстіший у кінці пробігу, ніж на початку? Пояснення запишіть у зошит.
7. Порівняйте питомі заряди $\frac{q}{m}$ частинки III і протона I, знаючи, що початкові швидкості частинки й протона — однакові. Відношення питомих зарядів частинок обернене до відношення радіусів їхніх траєкторій, оскільки $\frac{q}{m} = \frac{v}{B \cdot R}$.
8. Ідентифікуйте частинку III за наслідками дослідження.
9. Інші треки належать ядрам Дейтерію та Тритію. З'ясуйте, якому саме ядру належить трек II, а якому — трек IV.



Мал. 264

Відповіді

Вправа 1

- З'єднати три провідники паралельно й один послідовно.
- 18 і 9 Ом.
- 3,3 Ом.
- $U_{AC} = 12$ В; $U_{DB} = 18$ В; $I_1 = 4$ А; $I_2 = 2$ А; $I_4 = 3,6$ А; $I_5 = 1,8$ А; $I_6 = 0,6$ А.
- 100 м.
- 400 Ом, 100 Ом, 100 Ом, 40 В, 0,1 А, 0,4 А.
- 0,48 В.
- 6 кОм.
- У 10 разів.

Вправа 2

- 4,5 В; 1 Ом.
- 6 Ом; 4 Ом.
- 5,5 А.
- $q = C\varepsilon \frac{R_2}{R_2 + r}$.
- 4 В; 2 В.

Вправа 3

- 15 кг.
- Збільшилась в 1,23 разу.
- 4 Ом.
- 45 %.
- 3 В; 2 Ом.
- 6 Ом, 33 %, 67 %.
- $q = C\varepsilon \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$; $q = C\varepsilon$.

Вправа 4

- а) 0,6 Ом; б) 2 Ом; в) 1,3 Ом; г) 1 Ом; д) 0,5 Ом; е) 1, 4 Ом; є) 1,8 Ом.
- 3 А.
- $\approx 1,1$ А.
- $I_1 = I_2 = 0,44$ А; $I_3 = 0,88$ А; $I_4 = 2,75$ А; $I_5 = 2,18$ А; $I_6 = 1,45$ А; $I_7 = 3,63$ А.
- $I_1 = 1,25$ А; $I_2 = 0,25$ А; $I_3 = 1,5$ А.
- 6,7 Ом.
- $I = 0,04$ А; $I_1 = 0$; $I_2 = 0,04$ А.
- $I = 1$ А; $I_1 = 0,6$ А; $I_2 = I_4 = 0,5$ А; $I_3 = 0,4$ А; $I_5 = 0,1$ А.
- $U = 20$ В; $I = 2$ А; $r = 2$ Ом; $P = 40$ Вт; $\Delta P = 8$ Вт; $P_{\text{пов}} = 48$ Вт.

Вправа 5

- $\alpha = \frac{R_1 - 1}{R_2} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$;
 $t_1 - t_2 \frac{R_1}{R_2}$

$$R_1 = \frac{U^2}{10P} \approx 14,4 \text{ Ом.}$$

- 19,2 м.
- $l_1 \approx 43,6l_2$.
- $\Delta R = \frac{2\alpha\rho_0 l_0 t}{S}$; $\Delta R' = \frac{2\rho_0 l_0 t}{S}(\alpha + \beta)$.

Вправа 6

- 6,1 год; 5,3 Вт · год.
- 0,054 кг.
- 20 Вт.
- 1,3 Ом.
- 297 К.

Вправа 7

- 6,03 В.
- 180 В.
- 4 нс.
- 1,6 нс.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- В. 2. Б. 3. Г. 4. Г. 5. А. 6. Б. 7. В.
- 18 кДж. 9. $2,09 \cdot 10^{-2}$ кг, 0,23 м³.
- 3,1 Ом.

Вправа 8

- $B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{I_1}{l+s} + \frac{l_2}{s} \right]$.
- 58 А.
- 66,6 мкТл.
- $5,5 \cdot 10^{-5}$ Тл.
- $2 \cdot 10^{-3}$ Н; $8 \cdot 10^{-3}$ Н; $6 \cdot 10^{-3}$ Н.

Вправа 9

- 20 мТл.
- $B = \frac{mg \cdot \text{tg } \alpha}{I \cdot l}$.
- 0,04 Тл.
- 0,1 Н · м.

Вправа 10

- $9,3 \cdot 10^{-24}$ А · м².
- $6,3 \cdot 10^{-13}$ Н; 3,1 мм.
- $\frac{R_n}{R_e} = \frac{m_n}{m_e}$.
- $6 \cdot 10^3$ м/с; $6 \cdot 10^{-7}$ Тл; 0,18 м.
- $7,6 \cdot 10^6$ м/с.
- 1000 км/с.

Вправа 11

- а) 0,5 А; б) 0,7 А; в) 0,3 А, ліворуч зі швидкістю 10 м/с.

$$2. I = \frac{Bvl}{r + R} = 0,1 \text{ А}; F = \frac{B^2vl^2}{r + R} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Н};$$

$$P = \frac{B^2v^2l^2}{r + R} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт.}$$

$$3. q = BvlC = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл};$$

$$W = \frac{B^2v^2l^2C}{2} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Дж.}$$

4. 13 В.
5. За 0,49 с.
6. 100 витків.
7. 29 см.

Вправа 12

1. 2 мТл.
2. 0,1 А.
3. 120 Дж, зменшиться в 4 рази.
4. 2,5 Дж.
5. 6,4 Дж.
6. 2500 В.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Г. 2. В. 3. Б. 4. Б. 5. Г. 6. В. 7. А. 8. 0,5 Тл.
9. 0,1 Тл. 10. $4 \cdot 10^{-16}$ Н.

Вправа 13

1. $q = 10^{-4} \cos 500t$; $i = -0,05 \sin 500t$;
 $u = 100 \cos 500t$; 50 мА; 100 В.
2. $4\pi \cdot 10^{-5}$ с; 2 мкКл; 0,5 В (на кожному конденсаторі).
3. $i = U_m \sqrt{\frac{3C}{4L}}$.
4. 120 мкДж; 40 мкДж.

Вправа 14

2. $Q = \frac{3}{8} CU_m^2 = 0,6 \text{ Дж.}$
3. $4,7 \cdot 10^{-2} \text{ Дж.}$
4. $v_1 = 132 \text{ Гц, } \Delta v = 16 \text{ Гц.}$

Вправа 15

1. $e = 0,1\pi \sin 10\pi t$; нормаль до площини рамки паралельна лініям індукції; 5 с^{-1} ; 0,01 Вб; 0,314 В.
2. $\Phi = BS \cos \omega t = 0,08 \cos 50t$;
 $e = BS\omega \sin \omega t = 0,4 \sin 50t$.
3. 50 В; 0,4 с; 2,5 Гц; $e = 50 \cos 5\pi t$.
4. 100 Гц; 10 мс; 5 А; 2,5 А.
5. 100 В; 0; -200 В.
6. Половину.

Вправа 16

1. 26,4 мкФ; 130 В.
2. 4,6 мА; 73,4 В; 146,6 В.

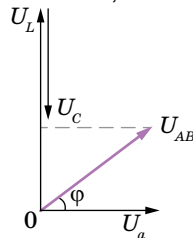
3. 72,5 %; 68,5 %.
4. 3,74 мкФ.
5. Не менше ніж 319 В.
6. $i = 1,38 \sin 314t$; напруга відстає від струму за фазою на $\pi/2$;
 $q = -4,4 \cdot 10^{-3} \cos 314t$.

Вправа 17

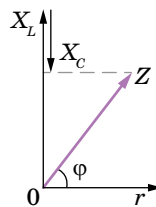
1. 0,13 Гн; 30 Вт; 11 Вт.
2. 4,1 Ом.
3. 300 Гц.
4. 74 %; 68 %.

Вправа 18

1. 1,34 А; 121 В; 134 В; 295 В.
2. 156 В.
3. 130 В; 26 Ом; 5 А.
4. 12,7 мГн.
5. 5 Ом;



6. 50 В;



Вправа 19

1. а) 24 000 об/хв; б) у n разів менше, ніж у випадку а).
2. При зменшенні частоти обертання ротора зменшуються частота струму й максимальне значення сили струму й напруги. У промислових колах змінного струму не допускають значних змін частоти.
3. Вона також збільшиться в n разів.
4. 50 Гц.
5. 24.
6. 0,91; 25°.
7. 16 А.
8. $P = UI \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) = 96 \text{ Вт.}$
9. 500 об/хв.
10. 2 кГц.

Вправа 20

- 95 %.
- 880; 144; 6, 11.
- 124 Вт.
- 9,6 мм².
- 1,5 А.
- 120 кВ.
- $e = \sin 314t$; 222 В.

Вправа 21

- Збільшити в 9 разів.
- 18 км; 8300 с⁻¹.
- 9000; 225 м.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- А. 2. А. 3. А. 4. А. 5. А. 6. Б. 7. 10 АА.
- $e = 4,71 \sin(157t)$; 4,71 В; 3,33 В; 0,04 с; 25 Гц. 9. 2 мкФ. 10. 5,6 А.

Вправа 22

- 0,3 м.
- $8 \cdot 10^4$ лк.
- Стане в 3 рази більшим.
- 60°.
- 12 лк.
- 173 кд.
- $15 \cdot 10^3$ лм.
- 30 лк.
- На відстані 1,4 м від лампи в 100 кд.
- 50 см.

Вправа 23

- $\Delta = S_1O - SO = 0$.
- 2,4 мм.
- 600 нм.
- Відстань між максимумами освітленості а, б, в збільшується.

Вправа 24

- $1,9 \cdot 10^{-3}$ м.
- 295 нм.
- Чорною; плівка буде здаватись то жовтою, то чорною.
- $5,13 \cdot 10^{-5}$ рад.
- $k = 5$; $k + 1 = 6$; $\lambda = 0,5$ мкм.
- 1,5 мкм.
- 675 нм.
- 1,56.

Вправа 25

- 1,5°.
- 0,17 мкм.
- 5 мкм.
- 3,9 мкм.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- Б. 2. А. 3. В. 4. Б. 5. Б. 6. В.

7. Збільшиться в 1,4 рази. 8. Освітленість вертикального майданчика більша в 5,7 рази.

- 0,13 мкм. 10. 2; 3.

Вправа 26

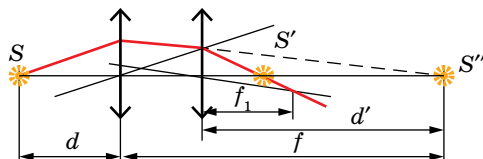
- 3,9 м.
- 97 см.
- 64°.
- $d = 2l \sin \varphi$ Зображення монети повернеться на кут 2φ навколо ребра двогранного кута, залишаючись на тій само відстані від нього.
- 0,6 м.
- 0,45 м.

Вправа 27

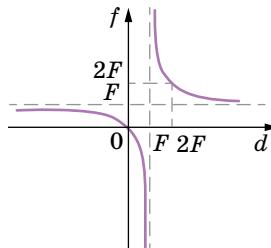
- $6 \cdot 10^{-2}$ м.
- 1,2 см; 1 см.
- На 1,6 см.
- Не може.
- Відбудеться.
- 39°.
- 56°.
- а) на 13° вниз; б) на 20° вгору.
- 39°52'.
- 0,026 рад.
- 1,3.
- $\pi/4$.

Вправа 28

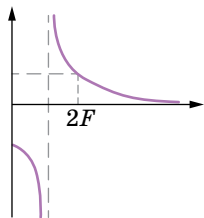
- 0,78 м.
- $F = 2/9$, $L = 20$ см.
- 2,25 см;



- 60 см.
- $$F = \frac{F_1 F_2 F_3}{F_1 F_2 + F_2 F_3 + F_1 F_3} \approx 5,5 \text{ см.}$$
- 0,5 см.
- 562.
-



10. а) $k = \frac{F}{d-F}$; б) $|k| = \frac{F}{F-d}$;



ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Г. 2. Б. 3. В. 4. Б. 5. В. 6. Б. 7. В. 8. 2,9 м.
9. 1,7 м. 10. 82° .

Вправа 29

- $0,73 \cdot 10^{-10}$ м.
- $2,6 \cdot 10^{-19}$ Дж; $5 \cdot 10^{-19}$ Дж.
- Рентгенівські; видимі; радіохвилі.
- 0,3 мкм.
- $2,4 \cdot 10^{-12}$ м; $1,2 \cdot 10^{20}$ Гц.
- 0,99 мкм.
- 53.

Вправа 30

- 94 нм.
- $7,2 \cdot 10^{-19}$ Дж; $9,1 \cdot 10^5$ м/с;
 $3,8 \cdot 10^{-19}$ Дж.
- $1,8 \cdot 10^{-7}$ м.
- $6,4 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
- 0,51 В.
- $3,15 \cdot 10^{-9}$ К/с.
- 3,1 В.
- $3,45 \cdot 10^{-25}$ кг·м/с.
- 5,7 см.

Вправа 31

- $1,7 \cdot 10^{-5}$ Н.
- $7 \cdot 10^{-7}$ Па; $3,5 \cdot 10^{-7}$ Па.
- $2,8 \cdot 10^{-4}$ Н.
- $2,9 \cdot 10^{21}$.
- 12 мкПа.

Вправа 32

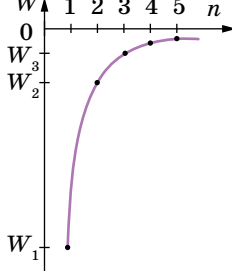
- а) 2,42 пм, 73,22 пм; б) 4,8 пм, 75,6 пм.
- 24,2 пм.
- 2,42 пм, 6,6 кеВ, $4,4 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с.
- 0,26 МеВ, $9,3 \cdot 10^{-12}$ кг·м/с.
- 0,1 МеВ.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. А. 2. Б. 3. Г. 4. В. 5. В. 6. В.
7. $6,66 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. 8. 0,477 мкм. 9. 8,1 пм.

Вправа 33

- $3 \cdot 10^{-19}$ Дж.
- На третій. Три лінії.
- 3.
- 81,7 нН, 511 ГВ/м; 5,11 нН, 31,9 ГВ/м.
- 9 разів.
- а) Зменшиться за модулем у n разів;
б) зменшиться за модулем в n^2 разів.
- 7.



- Зменшиться (враховуючи її знак)
у k^2 разів.
- Більша в $(1 + n^{-1})^2$ разів.

Вправа 34

- 2,2 МеВ.
- 220 МеВ.
- 5,6 МеВ; 8 МеВ.
- 1,013; 235 а. о. м.

Вправа 35

- 0,29.
- Через 64,5 доби.
- 10,7 МБк.
- За 5 хв 5 с.
- $3,3 \cdot 10^5$ с.
- $9,3 \cdot 10^{18}$.
- 0,26 кг.
- 121 рік.
- 25 %.

Вправа 36

- ${}_{11}^{24}\text{Na}$; ${}_{+1}^0e$; ${}_{12}^{26}\text{Mg}$; ${}_{1}^1\text{H}$; ${}_{1}^1\text{H}$.
- Поглинається.
- 2,8 МеВ.
- Ізотоп Оксигену ${}_{8}^{16}\text{O}$.
- 161° .
- 2,2 МеВ; $5,3 \cdot 10^{20}$ Гц.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Б. 2. Г. 3. Б. 4. В. 5. В. 6. $2,79 \cdot 10^{-19}$ Дж.
7. Три. 8. $6,9 \cdot 10^{-14}$ м. 9. 1147 т. 10. По-
глинається.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- Аберації оптичних систем 210
- Автоколивання 110
- Акцепторні домішки 41
- Альфа-частинка 271
- Аніон 49
- Античастинка 291
- Бета-частинка 271
- Взаємодія
- ▶ гравітаційна 289
 - ▶ електромагнітна 289
 - ▶ сильна 267, 289
 - ▶ слабка 289
- Діюче (ефективне) значення напруги 115
- сили струму 115
- Діамагнетик 80
- Дірка 40
- Дисперсія 186
- Дифракція 178
- Донорні домішки 41
- Гамма-промені 271
- Ґратка дифракційна 180
- Електроліз 49
- Електрорушійна сила 14
- Енергія зв'язку ядра 266
- Ефект
- ▶ Доплера 151
 - ▶ Комптона 231
- Закон
- ▶ Ампера 62
 - ▶ Біо — Савара — Лапласа 66
 - ▶ Брюстера 191
 - ▶ відбиття світла 194
 - ▶ електромагнітної індукції 87, 89
 - ▶ заломлення світла 200
 - ▶ Ома для повного кола 15
 - ▶ радіоактивного розпаду 274
 - ▶ фотоэффекту 223, 224
- Індуктивність 94
- Індукційний струм 84
- Інтерференція 166
- Кандела 162
- Катіон 49
- Квант 220
- Кварк 291
- Коливальний контур 102
- Коливання
- ▶ вільні 103
 - ▶ вимушені 113
- Когерентність 166
- Коефіцієнт
- ▶ потужності 129
 - ▶ трансформації 140
- Корпускулярно-хвильовий дуалізм 160
- Лінза 205
- Люмен 161
- Люкс 163
- Магнітна індукція 64
- Магнітний гістерезис 82
- Модуляція 153
- Момент обертальний 71
- Надпровідність 34
- Опір
- ▶ індуктивний 117, 123
 - ▶ ємнісний 117, 120
- Оптична сила лінзи 206
- Орбіталь атома 252
- Освітленість 163
- Парамагнетик 80
- Період піврозпаду 274
- Планка стала 220
- Показник заломлення
- ▶ абсолютний 146
 - ▶ відносний 200
- Поле
- ▶ вихрове 64
 - ▶ індукційне 88
 - ▶ електромагнітне 98
 - ▶ магнітне 64
- Поляризація світла 189
- Постулати Бора 237
- Потік
- ▶ магнітної індукції 84
 - ▶ світловий 161
- Правила Кірхгофа 22
- Правило Ленца 85
- Принцип Паулі 255
- Радіоактивність 271
- Розряд газовий 52
- Резонанс
- ▶ напруг 134
 - ▶ струмів 134
- Самоіндукція 93
- Сила
- ▶ Ампера 69
 - ▶ Лоренца 73
 - ▶ світла 161
- Спектри 243
- Термоелектрорушійна сила 38
- Трансформатор 139
- Фотон 220
- Фотоэффект 222
- Хвиля
- ▶ де Бройля 246
 - ▶ електромагнітна 145
- Частинка елементарна 288
- Ядерна реакція 277
- Яскравість 163

Навчальне видання

*ЗАСЕКІНА Тетяна Миколаївна
ЗАСЕКІН Дмитро Олександрович*

ФІЗИКА

(профільний рівень, за навчальною програмою
авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.)

Підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Редактор *О. С. Ісак*
Головний художник *І. П. Медведовська*
Технічний редактор *Е. А. Авраменко*
Коректор *С. В. Войтенко*

При оформленні підручника використано малюнки та фотоілюстрації авторів:
*Alexandru Panoiu, Andy Stones, CERN, David Monniaux, Fermilab, Hi Tec Art, Jonathan Knowles, Kamioka Observatory, ICRR,
Kare Chin, Kari Siren, Marco Schenone, Maximilien Brice, Michael Gwyther-Jones, Priya Deonarain, Rhonda Clements,
Sindre Skrede, Sinead Friel, а також матеріали сайту freepik.com.*

Формат 70x100 ¹/₁₆.
Ум. друк. арк. 24,624 + 0,324 форзац.
Обл.-вид. арк. 22,20 + 0,55 форзац.
Зам. №
Наклад 9600 пр.

ТОВ «Український освітянський видавничий центр «Оріон»»

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
Серія ДК № 4918 від 17.06.2015 р.
Адреса видавництва: вул. Миколи Шепелева, 2, м. Київ, 03061

Віддруковано у ТОВ «КОНВІ ПРІНТ»

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
Серія ДК № 6115, від 29.03.2018 р.
03680, м. Київ, вул. Антона Цедіка, 12, тел. +38 044 332-84-73.