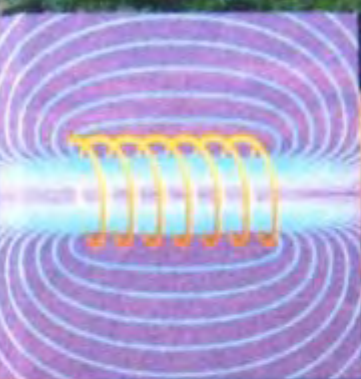


Тетяна ЗАСЕКІНА, Дмитро ЗАСЕКІН

ФІЗИКА



11

АКАДЕМІЧНИЙ РІВЕНЬ
ПРОФІЛЬНИЙ РІВЕНЬ

ББК 22.3я721
3 50

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(Наказ від 16.03.2011 р. № 235)*

ВИДАНО ЗА РАХУНОК ДЕРЖАВНИХ КОШТІВ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО

**Наукову експертизу підручника проводив
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова
Національної академії наук України**

**Психолого-педагогічну експертизу підручника проводив
Інститут педагогіки
Національної академії педагогічних наук України**

Засєкіна, Т. М.

3 50 Фізика: підруч. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл.: (академічний рівень, профільний рівень) / Т. М. Засєкіна, Д. О. Засєкін. — Харків: Сидія, 2012. — 336 с.


ISBN 978-966-2542-03-5

ББК 22.3я721


ISBN 978-966-2542-03-5

© Т. М. Засєкіна, Д. О. Засєкін, 2012
© Видавництво «Сидія», 2012
© Художнє оформлення,
Н. Г. Антоненко, 2012

Дорогі старшокласники!

У цьому році ви завершуєте вивчення систематичного курсу фізики. Цей підручник адресований учням 11-х класів, які вивчають фізику на академічному або профільному рівні. Матеріал, що вивчається на профільному рівні, виділено у тексті позначкою .

Ви ознайомитесь з такими розділами фізики, як «Електродинаміка», «Оптика», «Квантова фізика», «Фізика атомного ядра та елементарних частинок». Автори прагнули представити фізику як живу науку, що є частиною загальної людської культури, з одного боку, і як фундаментальну науку про природу, одну з найважливіших природничих наук, з іншого. Тож у підручнику наводиться багато прикладів вияву і застосування фізичних законів у житті, сучасній науці і техніці, відомостей з історії фізики, подається опис фізичних дослідів.

Чітка структура підручника полегшить сприйняття, усвідомлення та розуміння навчального матеріалу: головне в тексті (означення, найвагоміші факти, твердження) виділено позначкою  та напівжирним шрифтом.

Крім основного навчального матеріалу, підручник містить рубрику «Для додаткового читання», де ви самостійно зможете ознайомитись із корисною для вас інформацією.

Наприкінці кожного параграфа подано рубрику «Дайте відповіді на запитання», що допоможе перевірити рівень засвоєння вивченого матеріалу.

Одним із найбільш важливих видів навчальної роботи у профільній школі є розв'язування фізичних задач. Тому автори вважали за доцільне подати методичні рекомендації щодо розв'язування задач та приклади розв'язування типових задач. Їх дібрано так, щоб ви могли самостійно розібратись у фізичній суті задачі, закріпити попередньо вивчений теоретичний матеріал й набути навичок використання найзагальніших і найдоцільніших методів розв'язування задач. Задачі у вправах диференційовано за ступенем складності: ті, що призначені для учнів, які вивчають фізику на профільному рівні, виділено відповідною позначкою. Розв'язуючи задачі, ви зможете скористатись довідниковими матеріалами, розміщеними на форзацах.

Доповненням до даного підручника є зошит для лабораторних робіт з фізики (академічний рівень, профільний рівень). Робота за даним зошитом дозволить учителеві та учням більш ефективно використовувати навчальний час.

Сподіваємось, що вивчати фізику за цим підручником буде для вас просто і цікаво.

Автори

Зміст

Дорогі старшокласники!	3
------------------------------	---

Розділ 1. Електричне поле

§ 1. Взаємодія електрично заряджених тіл	6
§ 2. Електричне поле	10
🏠 § 3. Електричне поле заряджених поверхонь	15
🏠 § 4. Провідники та діелектрики в електричному полі	19
🏠 § 5. Електрети і сегнетоелектрики. Рідкі кристали в електричному полі	23
§ 6. Робота по переміщенню заряду в електричному полі	25
§ 7. Потенціал електричного поля	29
§ 8. Електроємність	35
§ 9. Використання конденсаторів у техніці	38
§ 10. Енергія електричного поля	41

Розділ 2. Електричний струм

§ 11. Електричний струм	44
§ 12. Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола	46
§ 13. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа	50
§ 14. Електричний струм у металах	61
🏠 § 15. Термоелектричні явища	67
§ 16. Струм у вакуумі та його застосування	70
§ 17. Електропровідність напівпровідників	75
§ 18. Напівпровідникові прилади та їх застосування	79
§ 19. Електричний струм в рідинах та його використання	82
§ 20. Електричний струм у газах	87
§ 21. Технічне використання самостійного газового розряду та плазми	90

Розділ 3. Електромагнітне поле

§ 22. Магнітна взаємодія провідників зі струмом. Закон Ампера	98
§ 23. Магнітне поле струму	101
§ 24. Дія магнітного поля на провідник зі струмом	107
§ 25. Дія магнітного поля на рухомі заряджені частинки	110
§ 26. Магнітні властивості речовини	115
§ 27. Виникнення індукційного струму	119
🏠 § 28. Електрорушійна сила індукції	122
🏠 § 29. Механізми виникнення індукційного струму в провідниках	125
§ 30. Самоіндукція	129
§ 31. Енергія магнітного поля струму	132
🏠 § 32. Змінний струм	136
🏠 § 33. Активний опір у колі змінного струму	141
🏠 § 34. Конденсатор у колі змінного струму	143
🏠 § 35. Котушка індуктивності в колі змінного струму	146
🏠 § 36. Електричне коло змінного струму із активним та реактивним навантаженнями	149
🏠 § 37. Робота і потужність змінного струму	152
🏠 § 38. Резонанс у колі змінного струму	156
🏠 § 39. Генератори змінного струму	158
§ 40. Трансформатор	159

Розділ 4. Електромагнітні коливання та хвилі

§ 41. Отримання вільних електромагнітних коливань	165
§ 42. Рівняння, що описують процеси в ідеальному коливальному контурі	168

§ 43. Затухаючі електромагнітні коливання	170
§ 44. Автоколивання	173
§ 45. Утворення і поширення електромагнітних хвиль	175
§ 46. Характеристики електромагнітних хвиль	178
§ 47. Властивості електромагнітних хвиль	183
§ 48. Передавання інформації за допомогою електромагнітних хвиль	187
§ 49. Властивості електромагнітних хвиль різних діапазонів частот	190

Розділ 5. Хвильова та геометрична оптика

§ 50. Природа світла	195
§ 51. Явище інтерференції	198
§ 52. Інтерференційні картини в тонких пластинках і плівках	202
§ 53. Практичне використання інтерференції	207
§ 54. Дифракція світла	210
§ 55. Дифракційна ґратка	212
§ 56. Дисперсія світла	216
§ 57. Поляризація світла	219
§ 58. Геометрична оптика як граничний випадок хвильової оптики	223
§ 59. Відбивання світла. Дзеркала	225
§ 60. Заломлення світла	230
§ 61. Лінзи	235
§ 62. Оптичні прилади і системи	239
§ 63. Елементи фотометрії	245

Розділ 6. Квантові властивості матерії

§ 64. Гіпотеза квантів Планка	251
§ 65. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла	253
§ 66. Тиск світла	255
§ 67. Фотоефект	257
§ 68. Застосування фотоефекту	262
§ 69. Явища, що пояснюються квантовими властивостями світла	264
§ 70. Модель атома Резерфорда-Бора	267
§ 71. Експериментальне підтвердження постулатів Бора	270
§ 72. Хвильові властивості матерії	274
§ 73. Основні положення квантової механіки	276
§ 74. Фізичні основи побудови періодичної системи хімічних елементів Д.І. Менделєєва	279
§ 75. Спектри теплового випромінювання та люмінесценції	283
§ 76. Рентгенівське випромінювання	287
§ 77. Квантові генератори та їх застосування	291

Розділ 7. Фізика атомного ядра та елементарних частинок

§ 78. Атомне ядро	296
§ 79. Радіоактивність	300
§ 80. Закон радіоактивного розпаду	304
§ 81. Ядерні реакції	307
§ 82. Ланцюгова реакція поділу ядер урану	310
§ 83. Методи реєстрації йонізуючого випромінювання	314
§ 84. Біологічна дія радіації та захист від йонізуючого випромінювання	318
§ 85. Загальна характеристика елементарних частинок	320
§ 86. Види взаємодій	324
§ 87. Класифікація елементарних частинок	327

Розділ I

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ



У цьому розділі розглянемо три групи питань:

- електричний заряд, закон збереження зарядів, закон Кулона;
- електричне поле і його властивості, основні характеристики електричного поля – напруженість, різниця потенціалів, напруга;
- речовина в електричному полі, електроємність, енергія електричного поля.

Всі ці питання є об'єктом вивчення в електростатиці – розділі електродинаміки, в якому вивчають властивості і взаємодії нерухомих (відносно спостерігача) заряджених частинок і тіл.

§ 1. Взаємодія електрично заряджених тіл

Електричний заряд. У всіх фізичних явищах проявляють себе ті чи інші взаємодії. Вивчаючи механіку, ми ознайомились з одним із типів взаємодії – *гравітаційною* – властивістю тіл притягатись. Кількісною величиною, що описує здатність тіл вступати у гравітаційну взаємодію, є їхня *маса*: чим більша маса тіл, тим сильніше вони притягаються одне до одного. Силу F гравітаційного притягання між двома тілами масами m_1 та m_2 , розташованими на відстані r , визначає закон всесвітнього тяжіння І. Ньютона:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

де $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ – гравітаційна стала. Як видно, це вельми мала величина, тому не дивно, що гравітаційні взаємодії мають суттєвий прояв лише у масштабах Всесвіту – між тілами, маси яких величезні. В середині речовини частинки утримуються силами *електромагнітної* природи, які на відміну від гравітаційних сил притягання можуть не лише притягувати частинки, а й відштовхувати їх. У курсі механіки, а також молекулярної фізики ми ознайомились із проявами *електромагнітної взаємодії* – із силами тертя, пружності, міжмолекулярної взаємодії. У 9-му класі ми вивчали електромагнітні явища. Узагальнимо відомі нам факти.

Основною характеристикою електромагнітної взаємодії є *електричний заряд*.



Електричний заряд q – це фізична величина, яка кількісно характеризує електромагнітну взаємодію.

Бувають частинки без електричного заряду, але не існує електричного заряду без частинки. У 1911 р. була створена *планетарна модель атома*. Її автор англійський фізик Ернест Резерфорд показав, що у центрі атома розташоване ядро, навколо якого обертаються електрони.

Подальші дослідження довели, що атомне ядро складається з позитивно заряджених протонів та електронейтральних нейтронів. Електричний заряд протона за величиною дорівнює заряду електрона, але протилежний за знаком. У цілому атом електронейтральний, оскільки кількість протонів у ядрі дорівнює кількості електронів у атомі. Кількість протонів у ядрі визначає хімічні властивості атома та його місце у періодичній системі хімічних елементів.

Електричний заряд дискретний: існує *елементарний електричний заряд*, що дорівнює за абсолютним значенням заряду електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Одиниця електричного заряду – кулон, $[q] = 1$ Кл.

Числове значення електричного заряду 1 Кл дорівнює сумі зарядів $6,25 \cdot 10^{18}$ електронів.

Наявність електричного заряду q у макротіл пояснюється нерівномірним перерозподілом позитивних і негативних дискретних елементарних зарядів. Електричний заряд тіла $q = ne$, де n – кількість елементарних несконденсованих електричних зарядів.

Як відомо, однойменно заряджені тіла відштовхуються, різнойменно – притягаються. Наелектризувати тіло можна тертям або дотиком до електрично зарядженого тіла.



Явище нерівномірного перерозподілу позитивних і негативних електричних зарядів у макротілах називається **електризацією (електростатичною індукцією)**.

Існують й інші способи електризації тіл. Наприклад, метал можна зробити позитивно зарядженим, якщо його освітити відповідним світловим потоком. У результаті взаємодії світла з металом відбувається виривання електронів із поверхні металу. Втрачаючи електрони, метал стає позитивно зарядженим. Але за будь-якого способу електризації тіл електричні заряди не виникають і не зникають, а лише перерозподіляються між усіма тілами, які беруть участь у тому чи іншому процесі. Це твердження називають *законом збереження електричного заряду*. Математично він формулюється так.



Алгебраїчна сума електричних зарядів тіл, що утворюють замкнену систему при будь-яких взаємодіях залишається сталою: $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$.

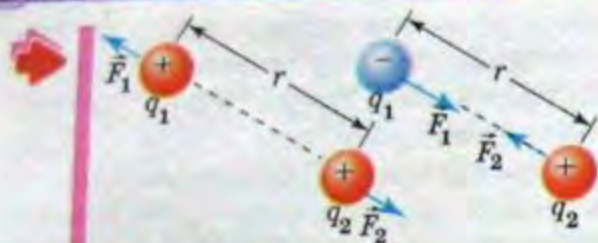
Закон Кулона. В електростатиці, як і у будь-якому розділі фізики, використовують певні моделі. Однією з моделей електростатики є *точковий електричний заряд*.



Точкові електричні заряди – це заряджені тіла, розміри яких малі порівняно з відстанню між ними.

Інколи для спрощення вживають термін «заряд». Слід пам'ятати, що цим терміном можуть називати як точкове електрично заряджене тіло, так і значення електричного заряду на ньому.

Кількісно взаємодію між точковими електричними зарядами описує закон, експериментально встановлений Ш. Кулоном у 1785 р.



Мал. 1. Сили взаємодії між точковими електричними зарядами

Сила взаємодії F двох точкових зарядів q_1 і q_2 прямо пропорційна добутку абсолютних величин їх зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними r , напрямлена вздовж прямої, що сполучає заряди і відповідає притягання для різноіменних зарядів та відштовхуванню – для однойменних (мал. 1).

Модуль цієї сили

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2},$$

тут ϵ_0 – електрична стала (її величина і розмірність залежать від вибраної системи одиниць), ϵ – відносна діелектрична проникність середовища.

Відносна діелектрична проникність середовища ϵ показує, у скільки разів сила взаємодії електричних зарядів у цьому середовищі менша, ніж у вакуумі. Її числове значення для багатьох речовин визначене дослідним шляхом і занесене до таблиць. Відповідно для вакууму $\epsilon = 1$.

Встановлено, що два точкові заряди по 1 Кл на відстані 1 м один від одного у вакуумі взаємодіють із силою $9 \cdot 10^9$ Н. Із закону Кулона можна визначити електричну сталу:

$$\epsilon_0 = \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2 F} = \frac{1 \text{ Кл}^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ Н}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

У фізиці, як ви знаєте, слід враховувати межі виконання законів. Правильність закону Кулона підтверджена численними перевірками. Встановлено, що він діє між зарядженими частинками, відстань між якими може бути від 10^{-15} м до десятків кілометрів.

? Дайте відповіді на запитання

1. Як на досліді можна виявити електромагнітну взаємодію?
2. Що таке електричний заряд? Сформулюйте і поясніть закон збереження електричного заряду.
3. У скільки разів зміниться сила взаємодії між двома точковими зарядами, якщо відстань між ними збільшити у два рази, а значення електричного заряду одного із них збільшити в три рази?
4. Чим подібні й чим відрізняються закон всесвітнього тяжіння і закон Кулона?
5. У системі відліку K значення деякого заряду q . Яким буде значення цього заряду q' у системі відліку K' , що рухається відносно системи K зі швидкістю v , яка набагато менша за швидкість поширення світла?
6. Яким є сумарний заряд моля електронів?

Загальні рекомендації до розв'язування задач

Силу взаємодії між зарядженими тілами обчислюють за законом Кулона. Розраховуючи взаємодію між кількома (двома і більше) зарядженими тілами, слід користуватися принципом незалежності дії електричних зарядів, який полягає в тому, що сила взаємодії між кожною парою заряджених тіл не залежить від наявності інших заряджених тіл. Результуюча сила, що діє на певне заряджене тіло, є геометричною сумою сил, що діють на нього з боку всіх інших зарядів (принцип суперпозиції електричних сил).

Закони електростатики слід використовувати сумісно з законами кінематики, статистики, динаміки, якщо в задачі потрібно розрахувати або рух заряджених тіл, або умову рівноваги системи заряджених тіл.

Приклади розв'язування задач

Задача. Однойменні точкові заряди, модулі яких $q_1 = q_2 = q_3 = 1 \cdot 10^{-6}$ Кл, розміщені у вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $a = 20$ см. Визначити силу, що діє у повітрі на один із цих зарядів з боку двох інших.

Дано:

$$q_1 = q_2 = q_3 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$a = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

$F = ?$

Розв'язання

Виконаємо схематичний малюнок до задачі (мал. 2).

Визначимо силу, що діє

на точковий заряд q_3 , який перебуває в точці C . Заряди q_1 (в точці A) і q_2 (в точці B) діють на заряд q_3 з силами \vec{F}_1 і \vec{F}_2 .

Рівнодійну цих сил $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ визначимо за правилом паралелограма. Напрямок результуючої сили \vec{F} , що діє на заряд q_3 , зображено на мал. 2. Обчислимо її модуль F , використовуючи модулі векторів F_1 , F_2 , які дорівнюють довжинам відрізків, що зображують ці вектори. Легко довести, що $F_1 = F_2$, $\angle DCM = 30^\circ$,

оскільки $\angle MCN = \angle ACB = 60^\circ$. Тоді $\frac{F}{2} = F_1 \cos 30^\circ$, в

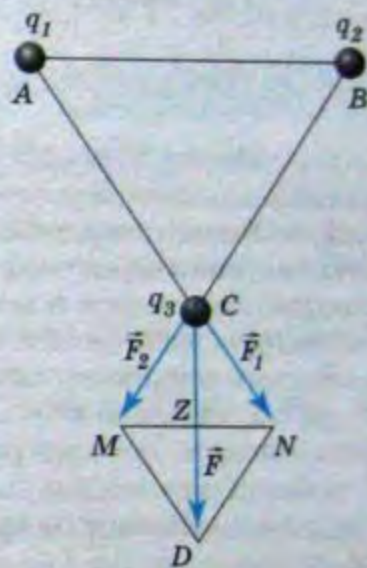
$\triangle CNZ$ сторона $CZ = \frac{F}{2}$.

За законом Кулона модуль сили $F_1 = k \frac{q_1 q_3}{(AC)^2}$, де $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ (для вакууму і повітря).

$$F_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}}{(0,2)^2 \text{ м}^2} = 0,225 \text{ Н},$$

$$F = 0,225 \text{ Н} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2 \approx 0,39 \text{ Н}.$$

Відповідь: 0,39 Н.



Мал. 2

Вправа 1

1. Дві однакові металеві кульки зарядили так, що заряд однієї з них у 5 разів більший, ніж заряд іншої. Кульки доторкнули одну до одної і розсунули на ту саму відстань. Як змінилася (за модулем) сила взаємодії, якщо кульки мали однойменні заряди? різнойменні заряди?
2. У вершинах правильного шестикутника, сторона якого дорівнює a , розташували один за одним заряди $+q$, $+q$, $+q$, $-q$, $-q$, $-q$. Визначити силу, що діє на заряд $+q$, який міститься в центрі шестикутника.
3. Дві маленькі кульки масою m підвішені поряд на тонких шовкових нитках довжиною $l = 2$ м. Після того, як кульки зарядили рівними однойменними

зарядами $q_1 = q_2 = 1 \cdot 10^{-8}$ Кл, вони відштовхнулись одна від одної на відстань $r = 16$ см. Визначити натяг ниток.


4. Два позитивно заряджені тіла, заряди яких 1,67 і 3,33 нКл, закріплено на відстані 20 см один від одного. В якій точці на прямій, що сполучає ці тіла, необхідно розмістити третє тіло з зарядом $-0,67$ нКл, щоб воно було у рівновазі? Масами тіл знехтувати.
5. Побудувати графік залежності сили взаємодії між двома точковими зарядами від відстані між ними, $F = f(r)$, в інтервалі $2 \leq r \leq 10$ см через кожні 2 см. Заряди $q_1 = 20$ нКл і $q_2 = 30$ нКл.

§ 2. Електричне поле

Електричне поле. Між науковцями довгий час тривала дискусія щодо механізму передачі взаємодії між тілами, що перебувають на відстані один від одного. Якщо тіла розміщені у середовищі, то зрозуміло, що взаємодіяти будуть частинки середовища. Наприклад, ми вже знаємо, що звукові хвилі поширюються в повітрі зі швидкістю 331 м/с, у вакуумі звук не поширюється. А світло (що є електромагнітною хвилею) може поширюватись і у вакуумі, і ця швидкість поширення світлового сигналу $3 \cdot 10^8$ м/с є максимально можливою у природі. Оскільки жодна взаємодія у природі не може передаватись миттєво, то це доводить, що, крім речовини, у природі існує ще один вид матерії – поле. У механіці гравітаційна взаємодія між тілами, що знаходяться на відстані одне від одного, відбувається через *гравітаційне поле (поле тяжіння)*, яке існує навколо будь-яких тіл. І хоча закон всесвітнього тяжіння був відкритий Ньютоном ще у XVII ст., теорію гравітаційного поля створено набагато пізніше.

Електромагнітна взаємодія між електрично зарядженими тілами відбувається через *електромагнітне поле*. Вирішальними у становленні теорії електромагнітного поля були дослідження М. Фарадея (1791–1867) та Дж. Максвелла (1831–1879). Якщо в певній системі відліку електрично заряджені тіла нерухомі, то поле, що існує навколо них, називають *електричним (електростатичним)*.

Електричне поле має певні властивості, які можна дослідити. Для дослідження електричного поля використовують ще одну модель – так званий *пробний електричний заряд*.

 **Пробний електричний заряд** – позитивно заряджене тіло, власне поле якого не змінює поле, в яке він внесений.

Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції. Головна властивість електричного поля – здатність діяти на внесені в нього електричні заряди з деякою силою. Нехай електричне поле створюється точковим зарядом q^1 . Будемо по черзі поміщати в одну і ту ж точку поля пробні заряди різної величини: q_1, q_2, \dots – і щоразу вимірювати силу, що діє на пробний заряд, F_1, F_2, \dots . Виявляється, що відношення сили до заряду в даній точці поля завжди є сталою величиною, $\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \dots = \text{const}$.

¹ Тут і надалі, описуючи поведінку заряду в електричному полі, будемо мати на увазі саме позитивний заряд q .

В іншій точці поля (або в електричному полі іншого зарядженого тіла) це відношення також виконується, але його значення може бути іншим. Отже, відношення $\frac{F}{q}$ залежить тільки від вибраної точки поля і є характеристи-

кою силової дії поля. Силова характеристика електричного поля називається **напруженістю** поля і позначається буквою E .



Напруженість електричного поля \vec{E} – це фізична величина, яка є силовою характеристикою поля і визначається відношенням сили \vec{F} , яка діє в даній точці поля на пробний заряд q , до величини цього заряду, $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$.

Якщо пробний заряд дорівнює одиниці, то можна дати і таке визначення напруженості електричного поля в деякій точці: *напруженість електричного поля у даній точці дорівнює силі, що діє на одиничний пробний заряд, розміщений у цій точці.*

Одиниця напруженості електричного поля – ньютон на кулон, $[E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$.

Як далі буде з'ясовано, одиницею напруженості є також вольт на метр, $[E] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Увівши таку характеристику, ми можемо говорити не про силу, з якою один точковий заряд діє на інший, а про силу, з якою на точковий заряд діє поле у тій точці, де він розміщений. За допомогою сучасних приладів можна проводити вимірювання напруженості поля. І, відповідно, можна розрахувати дію поля в даній точці на будь-яке заряджене тіло за формулою $\vec{F} = \vec{E}q$.

Якщо електричне поле створене одним точковим зарядом q , то за законом Кулона на пробний заряд q_0 у точці r з боку поля, створюваного зарядом q , діє сила, модуль якої $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r^2}$. Тоді напруженість поля

точкового заряду q на відстані r від нього

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}.$$

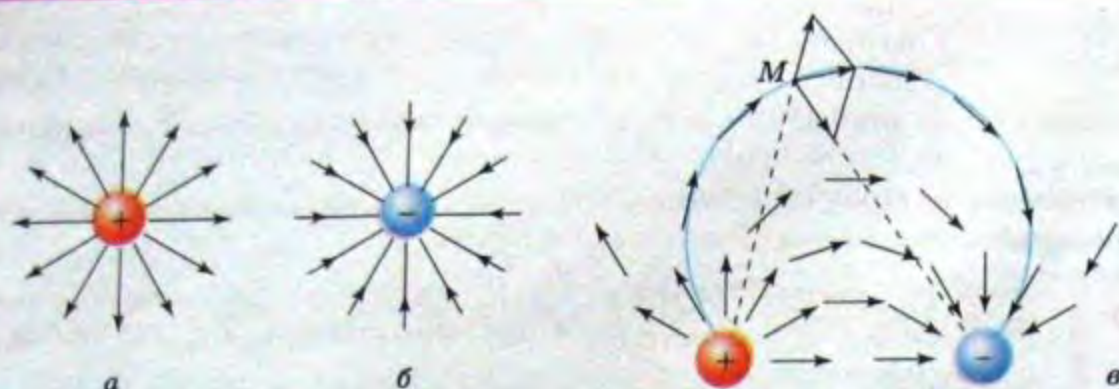
З формули видно, що напруженість електричного поля точкового заряду зменшується пропорційно квадрату відстані від заряду.

Принцип суперпозиції застосовується, коли електричне поле створено не одним зарядженим тілом, а кількома. Оскільки напруженість, як і сила, векторна величина, то вектор напруженості результуючого поля дорівнює векторній сумі напруженостей електричних полів, створених кожним із цих зарядів окремо. У цьому й полягає *принцип суперпозиції (накладання) електричних полів*.



Напруженість поля, створеного системою нерухомих зарядів, дорівнює векторній сумі напруженостей електричних полів, створених кожним із цих зарядів окремо,

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n.$$



Мал. 3. Лінії напруженості точкових зарядів (а, б), диполя (в)

Цим пояснюється те, що напруженість електричного поля навколо тіла, до складу якого входять і позитивно, і негативно заряджені частинки, може дорівнювати нулю, і тіло в цілому буде електронейтральним.

Графічне зображення електричних полів. Щоб задати електричне поле, треба вказати напрям і значення сили, що діє на пробний заряд, коли його розмістити в тій чи іншій точці поля. Це можна зробити графічним способом, запропонованим Фарадеєм, за допомогою *силових ліній* (ліній напруженості електричного поля).

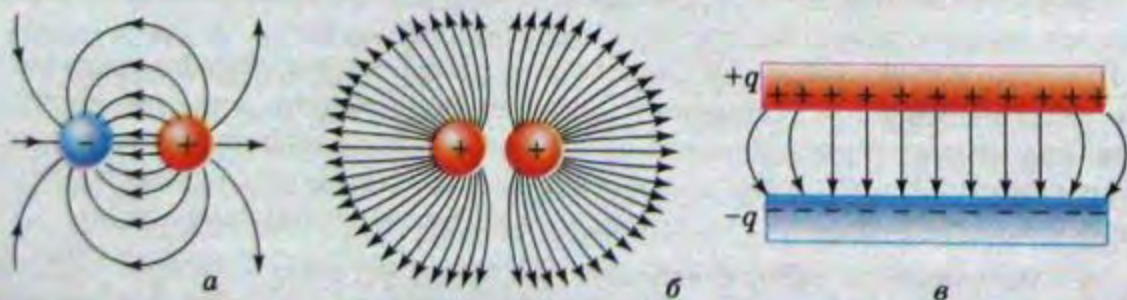
Напрямок силових ліній збігається з напрямом вектора напруженості. У випадку точкових зарядів силові лінії напрямлені від позитивного заряду і закінчуються у нескінченності (мал. 3, а) або починаються у нескінченності і йдуть до негативного заряду (мал. 3, б).

Складніше провести лінії напруженості, коли поле створено кількома зарядами, наприклад двома. Така система з двох зарядів називається *диполем*. Провести лінію так, щоб вектори напруженості у кожній точці збігалися з нею, здебільшого не можна. Тому лінії напруженості проводять так, щоб вектори напруженості були напрямлені по дотичній (мал. 3, в).

Отже, лінією напруженості електричного поля називається така лінія, у кожній точці якої вектор напруженості поля напрямлений по дотичній.

На мал. 4 зображено ще кілька прикладів електричних полів.

Графічно зображуючи поле, слід пам'ятати, що лінії напруженості електричного поля ніде не перетинаються одна з одною, не перериваються між



Мал. 4. Графічне зображення електричних полів:

а – однакових за значенням різноіменних зарядів; б – однакових за значенням однойменних зарядів; в – двох пластин, заряджених різноіменними зарядами однакової величини

зарядами, починаються на позитивному заряді (або у нескінченності) і закінчуються на негативному (або у нескінченності).

Поле, напруженість якого в усіх точках однакова за модулем і напрямком, називають *однорідним електростатичним полем*. Прикладом такого поля є поле всередині простору між зарядженими пластинами (мал. 4, в) (біля країв пластин поле неоднорідне).

? Дайте відповіді на запитання

1. Що таке електричне поле? Назвіть його основні властивості.
2. Що називають напруженістю електричного поля? Як вона визначається? Який напрям має вектор напруженості?
3. У чому полягає принцип суперпозиції?
4. Що називають лініями напруженості електричного поля?
5. Яке електричне поле називають однорідним?
6. Яку напруженість у центрі правильного шестикутника створюють заряди q і $-q$, по чергово розміщені у вершинах фігури?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Три однакових позитивних заряди q розташовані у вершинах рівностороннього трикутника. Сторона трикутника дорівнює a . Визначити напруженість поля у вершині правильного тетраедра, для якого цей трикутник служить основою.

Дано:

q
 a

$E = ?$

Розв'язання

За принципом суперпозиції повна напруженість у вершині тетраедра (мал. 5) дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створюваних окремими зарядами, модулі яких однакові:

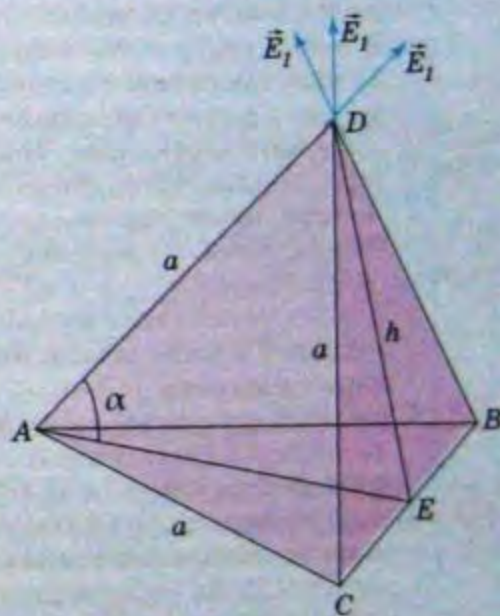
$$E_1 = E_2 = E_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{a^2}.$$

Вектори утворюють з вертикаллю кути $90^\circ - \alpha$, де α – кут між ребром тетраедра і висотою h трикутника ABC .

Горизонтальні складові цих векторів в сумі дають нуль. Вертикальні складові однакові й дорівнюють $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{a^2} \sin \alpha$.

Оскільки $\sin \alpha = \frac{\sqrt{2}}{3}$, то $E = \frac{\sqrt{6}}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{a^2}$.

Відповідь: $\frac{\sqrt{6}}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{a^2}$.



Мал. 5

Задача 2. На діелектричній нитці висить кулька масою m . Вся ця система розміщена в однорідному електростатичному полі, напруженість якого \vec{E} напрямлена вертикально вгору. Визначити силу пружності нитки, коли кулька не заряджена і коли їй надають негативний заряд $-q$.

Дано:

 m E $-q$ $F_{\text{пр}} - ?$

Розв'язання

На незаряджену кульку діє сила тяжіння $m\vec{g}$ і сила пружності $\vec{F}_{\text{пр}1}$. Якщо кульку зарядити, виникне ще й електрична сила \vec{F}_e (мал. 6), у результаті чого сила пружності зміниться – $\vec{F}_{\text{пр}2}$.

Спроекуємо ці сили на вісь OY . Оскільки і в першому, і в другому випадках кулька перебуває у рівновазі, сума проекцій сил, що діють на неї, дорівнює нулю.

У першому випадку $F_{\text{пр}1} - mg = 0$, тобто $F_{\text{пр}1} = mg$.

У другому випадку $F_{\text{пр}2} - mg - F_e = 0$, тобто

$$F_{\text{пр}2} = mg + F_e = mg + qE.$$

Відповідь: $F_{\text{пр}1} = mg$, $F_{\text{пр}2} = mg + qE$.



Мал. 6

Вправа 2

1. Два заряди, один з яких за модулем у 4 рази більший від другого, розташували на відстані a один від одного. В якій точці поля напруженість дорівнює нулевій, якщо заряди однойменні? різнойменні?
2. В однорідному полі, напруженість якого 40 кВ/м , розташували заряд 27 нКл . Визначити напруженість результуючого поля на відстані 9 см від заряду в точках: а) розташованих на силовій лінії однорідного поля, яка проходить через заряд; б) розташованих на прямій, яка проходить через заряд перпендикулярно до силових ліній.
3. В основі рівностороннього трикутника із стороною a розташовано заряди по $+q$ кожний, а у вершині – заряд $-q$. Визначити напруженість поля в центрі трикутника.
4. У двох протилежних вершинах квадрата зі стороною 30 см розташовано заряди по $0,2 \text{ мкКл}$ кожен. Визначити напруженість поля у двох інших вершинах квадрата.
5. На який кут відхилиться у вакуумі заряджена бузинова кулька, підвішена на шовковій нитці, якщо її помістити в горизонтальне однорідне електричне поле, напруженість якого $1 \cdot 10^5 \text{ Н/Кл}$? Заряд кульки $4,9 \text{ нКл}$, маса $0,4 \text{ г}$.
6. Заряджену металеву кульку, підвішену на ізолюючій нитці, внесли в однорідне горизонтально напрямлене поле, від чого нитка утворила з вертикаллю кут 45° . На скільки зменшиться кут відхилення нитки, якщо з кульки стече десята частка її заряду?
7. В однорідному електричному полі, силові лінії якого горизонтальні, на тонкій нерозтяжній нитці довжиною $l = 35 \text{ см}$ висить кулька масою $m = 15 \text{ г}$, заряд якої $q = 3 \text{ мкКл}$. Визначити період коливань кульки, якщо напруженість електричного поля $E = 40 \text{ кВ/м}$.
8. Кулька, що має масу m і заряд q , вільно падає в однорідному електричному полі. Вектор напруженості поля \vec{E} напрямлений паралельно до поверхні землі. Який рух кульки? Написати рівняння траєкторії $y = y(x)$, спрямувавши вісь x горизонтально вздовж поля, а вісь y – вертикально вниз.



§ 3. Електричне поле заряджених поверхонь

Потік напруженості електричного поля. Теорема Остроградського–Гаусса. Розглянемо поле точкового позитивного заряду. Кількість силових ліній N можна зобразити довільно, оскільки поле існує у всіх точках простору навколо заряду. Оточимо уявно заряд сферами, центр яких збігається з точковим зарядом (мал. 7). Як видно, кількість ліній напруженості, що перетинають першу і другу сфери, однакова. Яку б кількість сфер ми не провели, кількість ліній напруженості, що їх перетинають, залишається однаковою.



Мал. 7. Ілюстрація до введення поняття потоку напруженості електричного поля

Модуль напруженості поля, створюваного точковим зарядом q , у довільній точці сфери радіусом r становить $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$. Перепишемо цю формулу у такому вигляді:

$4\pi r^2 E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$. Площа сфери $S = 4\pi r^2$, отже, дана формула набуває вигляду

$$ES = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}.$$

Оскільки площа сфери збільшується, як квадрат радіуса, а напруженість поля в точках на сфері зменшується, як квадрат радіуса, добуток ES залишається однаковим для всіх сфер.

Раніше ми встановили, що однаковою для всіх сфер буде кількість ліній напруженості, що їх перетинають, N . Отже, з точністю до деякої сталої можна прирівняти: $ES = N$, або $N = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$.

Як видно, кількість ліній напруженості, що виходять із точкового заряду, пропорційна величині цього заряду.

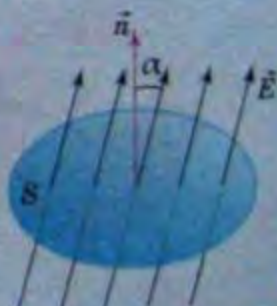
У розглянутому нами випадку поверхня сфери площею S , всередині якої знаходиться точковий заряд, є замкнутою поверхнею, перпендикулярною

до ліній напруженості. Для цього випадку ми й отрима-

ли $N = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$. Такий самий результат можна отримати і

для довільної системи зарядів: якщо оточити довільну систему зарядів замкнутою поверхнею (не обов'язково сферою), то кількість силових ліній, що перетинають цю поверхню, визначається сумарним зарядом системи, $N = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$. Це твердження називають *теоремою*

Остроградського–Гаусса.



Мал. 8. Обчислення потоку вектора напруженості



Сукупність ліній напруженості, що перетинають площину, перпендикулярну до ліній напруженості і площа якої S , називають **потокм вектора напруженості**, $N = ES$.

Якщо поверхня не перпендикулярна до напрямку вектора напруженості електричного поля, то формула записується так: $N = EScos\alpha$, де α – кут між напрямком вектора напруженості \vec{E} і нормаллю \vec{n} до поверхні (мал. 8).

Використовуючи поняття потоку вектора напруженості, теорему Остроградського–Гаусса формулюють так:



Потік вектора напруженості електричного поля через довільну замкнену поверхню дорівнює $N = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum q_i$, де $\sum q_i$ – алгебраїчна сума зарядів, що перебувають усередині цієї поверхні.

Приклади застосування теореми Остроградського–Гаусса. Теорема Остроградського–Гаусса полегшує знаходження значень вектора E , коли площу поверхні, що охоплює заряд, легко обчислити за формулами геометрії.

Наприклад, обчислимо напруженість поля, створюваного рівномірно зарядженою сферою. Але перед цим введемо поняття густини електричного заряду.



Густина електричного заряду – фізична величина, що характеризує розподіл електричного заряду в просторі.

Користуються поняттями:

- лінійної густини τ , якщо електричний заряд q розподілений уздовж лінії довжиною l , $\tau = \frac{q}{l}$;
- поверхневої густини σ , якщо заряд q розподілений по поверхні площею S , $\sigma = \frac{q}{S}$;
- об'ємної густини ρ , якщо електричний заряд q розподілений по всьому об'єму V , $\rho = \frac{q}{V}$.



Мал. 9. Електричне поле зарядженої сфери

Якщо на поверхні сфери радіусом R (мал. 9) рівномірно розподілено заряд q , то поверхнева густина заряду дорівнює $\sigma = \frac{q}{S} = \frac{q}{4\pi R^2}$.

Розглянемо всередині сфери будь-яку точку A на відстані r від її центра, тобто точку, для якої $r < R$. Із центра O проведемо допоміжну поверхню теж у вигляді сфери радіусом r і за теоремою Остроградського–Гаусса обчислимо потік вектора напруженості N крізь цю поверхню, $N = \frac{q}{\epsilon_0\epsilon}$. Оскільки всередині

допоміжної поверхні радіусом r електрич-

них зарядів немає, $q = 0$, то і напруженість поля $E = \frac{N}{S}$ також дорівнює нулю.

Отже, всередині зарядженої провідної сфери (чи іншого провідника будь-якої форми, на якому електричний заряд завжди розміщується тільки на поверхні) електричного поля немає.

Обчислимо напруженість для точок, які містяться біля самої поверхні сфери, тобто для яких можна вважати, що $r = R$. Тоді за теоремою Остроградського-Гаусса $E = \frac{N}{S} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$. Оскільки $q = 4\pi R^2\sigma$, то

$$E = \frac{4\pi R^2\sigma}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon} \text{ при } r = R.$$

Для точок, що значно віддалені від поверхні зарядженої сфери (точка В на мал. 9), маємо $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$, або $E = \frac{R^2\sigma}{\epsilon_0\epsilon r^2}$.

За допомогою теореми Остроградського-Гаусса можна обчислити напруженість електричного поля довільних заряджених тіл. У таблиці наведено формули для визначення напруженості електричного поля у деяких практично цікавих випадках.

Рівномірно заряджена нескінченна площа	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}$ тут σ – поверхнева густина електричного заряду
Диск радіусом R	Напруженість поля в точці, що лежить на перпендикулярі, проведеному із центра диска, на відстані r від нього $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon} \left(1 - \frac{r}{\sqrt{R^2 + r^2}} \right)$
Дві рівномірно різнойменно заряджені нескінченні пластини	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}$ Електричне поле зосереджене між пластинами, в просторі поза пластинами $E = 0$.
Нескінченно довга заряджена нитка	$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}$ тут τ – лінійна густина заряду, r – відстань від нитки.
Заряджена нитка визначеної довжини	Напруженість поля в точці, що лежить на перпендикулярі, проведеному із середини, нитки на відстані r від нитки $E = \frac{\tau \sin \theta}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}$



Однорідно заряджена куля радіусом R

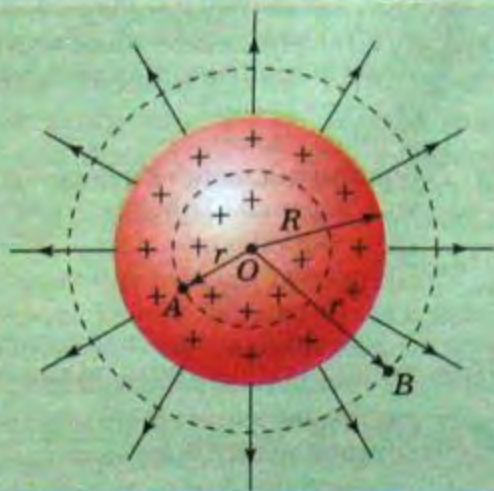
тут θ – кут між напрямком нормалі до нитки та радіус-вектором, проведеним із точки до кінця нитки.

Для $r \leq R$ напруженість

$$E = \frac{\rho r}{3\epsilon_0 \epsilon}$$

де ρ – об'ємна густина заряду.

Для $r > R$ напруженість E визначається формулою напруженості точкового заряду



? Дайте відповіді на запитання

1. Що називають потоком напруженості електричного поля?
2. У чому суть теореми Остроградського–Гаусса?
3. За якою формулою визначається напруженість рівномірно зарядженої нескінченної площини?
4. Чим відрізняють картини силових ліній полів між двома парами точкових зарядів q і $-q$ та $2q$ і $-q$? Намалуйте їх.

Приклади розв'язування задач

Задача. На суцільній металевій сфері радіусом $R = 20$ см рівномірно розподілений заряд з поверхневою густиною $\sigma = 10^{-9}$ Кл/м². Визначити напруженість електричного поля у точках: на відстані $r_1 = 16$ см від центра сфери, на поверхні сфери та на відстані $r_2 = 36$ см від центра сфери. Побудувати графіки залежності $E = E(r)$.

Дано:

$$R = 0,2 \text{ м}$$

$$\sigma = 10^{-9} \text{ Кл/м}^2$$

$$r_1 = 0,16 \text{ м}$$

$$r_2 = 0,36 \text{ м}$$

$$E_1; E_2; E_3 - ?$$

Розв'язання

Всередині сфери напруженість поля дорівнює нулю, отже, $E_1 = 0$ (для $r = r_1$).

Заряджена сфера створює навколо себе поле, напруженість якого визначається за формулою точкового заряду.

Для $r = R$:

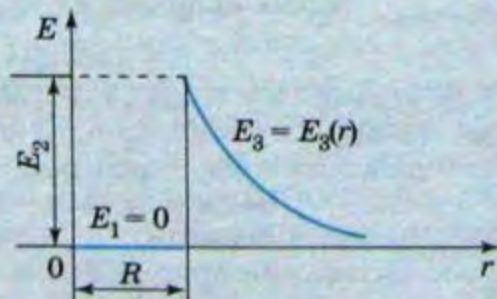
$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4\pi R^2 \sigma}{R^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}, E_2 = 113 \text{ В/м.}$$

$$\text{Для } r = r_2: E_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_2^2} = \frac{R^2 \sigma}{\epsilon_0 r_2^2},$$

$$E_3 = 34,5 \text{ В/м.}$$

Графік наведено на мал. 10.

Відповідь: 0; 113 В/м; 34,5 В/м.



Мал. 10



Вправа 3

1. Металевій кулі радіусом 24 см надано заряд 6,26 нКл. Визначити напруженість електричного поля в центрі кулі, на відстані від центра, що дорівнює половині радіуса, і на відстані 24 см від поверхні кулі.
2. Побудуйте графіки залежності напруженості електричного поля від відстані $E = f(r)$ для точкового заряду і для зарядженої провідної кулі радіусом R .
3. Чому дорівнює напруженість \vec{E} поля в центрі рівномірно зарядженого дріт'яного кільця?
4. З якою силою електричне поле зарядженої нескінченної площини діє на одиницю довжини зарядженої нескінченно довгої нитки, що розташована у цьому полі? Лінійна густина заряду на нитці 3 мкКл/м, а поверхнева густина заряду на площині 20 мкКл/м².
5. Показати, що електричне поле, яке створене ниткою скінченної довжини, в граничних випадках переходить в електричне поле: а) нескінченно довгої зарядженої нитки; б) точкового заряду.
6. Необхідно визначити напруженість електричного поля в точці А, що розташована на відстані $r = 5$ см від зарядженого диска вздовж нормалі, встановленої в його центрі. При якому граничному значенні радіуса R диска поле в точці А не буде відрізнитись більше, ніж на 2% від поля нескінченної площини? Яка напруженість поля в точці А, якщо радіус диска дорівнює $R = 10r$? У скільки разів напруженість, обчислена у цьому випадку, відрізняється від напруженості поля нескінченної площини?
7. Мильна бульбашка, що висить на кінці тонкої трубочки, стягується під дією сил поверхневого натягу. Чи можна утримати бульбашку від повного стягування, якщо надати їй великого електричного заряду? Якщо так, то бульбашка якого діаметра залишиться? (При цьому слід враховувати, що у полі напруженістю 3 МВ/м настає пробій повітря).

§ 4. Провідники та діелектрики в електричному полі

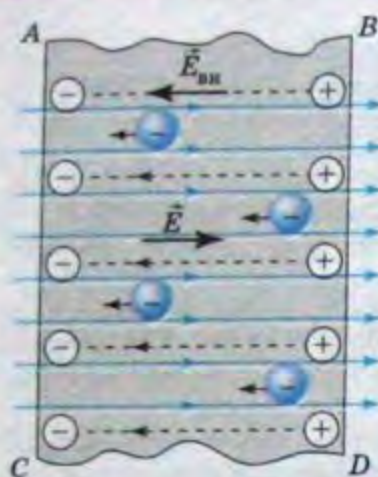
Електростатична індукція. Будь-яке тіло, розміщене в електричному полі, електризується. Проте процес електризації для різних речовин буде різним.

Електричні характеристики електронейтрального тіла залежать від рухливості заряджених частинок в ньому, яка, в свою чергу, визначається будовою атомів речовини та їх взаємним розміщенням.

За концентрацією вільних заряджених частинок у речовині всі речовини поділяють на три основні класи: *провідники, діелектрики і напівпровідники*. До провідників належать речовини, які містять заряджені частинки, що здатні рухатись впорядковано по всьому об'єму тіла під дією електричного поля, – так звані *вільні заряди*. Провідниками є всі метали, водні розчини солей, кислот, лугів, розплави солей, іонізовані гази.

Розглянемо поведінку в електричному полі тільки твердих металевих провідників. У металах носіями вільних зарядів є вільні електрони. Їх називають *електронами провідності*. Вільні електрони беруть участь у тепловому русі й можуть переміщуватися по шматку металу в будь-якому напрямку.

Помістимо незаряджений металевий провідник в однорідне електростатичне поле. Під дією поля в ньому виникне впорядкований рух вільних електронів у напрямку, протилежному напрямку напруженості \vec{E} цього поля



Мал. 11.

Провідник у зовнішньому
електричному полі

(мал. 11). Електрони накопичуватимуться на одному боці провідника й утворять там надлишковий негативний заряд, а їх недостача на іншому боці провідника приведе до утворення там надлишкового позитивного заряду, тобто в провіднику відбудеться розподіл зарядів. Ці некомпенсовані різнойменні заряди з'являються на провіднику лише під дією зовнішнього електричного поля, тобто такі заряди є індукованими, або наведеними. А в цілому провідник залишається незарядженим. У цьому переконуємося, виймаючи провідник з електричного поля.

Вид електризації, за якого під дією зовнішніх електричних полів відбувається перерозподіл зарядів між частинами певного тіла, називають *електростатичною індукцією*.

Некомпенсовані електричні заряди, що з'явилися на протилежних частинах провідника, створюють всередині провідника своє власне електричне поле напруженістю $\vec{E}_{\text{вн}}$. Напрямки зовнішнього і внутрішнього полів протилежні (мал. 11).

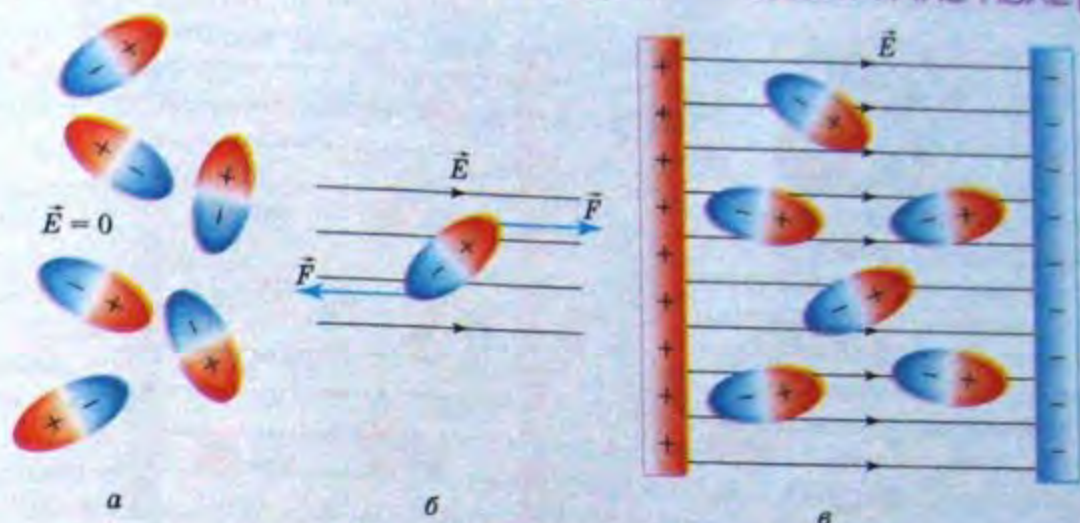
У результаті переміщення вільних носіїв заряду і накопичення їх на протилежних частинах провідника напруженість $\vec{E}_{\text{вн}}$ внутрішнього поля збільшується і, нарешті, зрівнюється за модулем з напруженістю \vec{E} зовнішнього поля. Це приводить до того, що напруженість результуючого поля всередині провідника дорівнює нулю. При цьому на провіднику встановлюється рівновага зарядів.

Електростатичний захист. За умови рівноваги зарядів на провіднику весь некомпенсований заряд розміщується тільки на його зовнішній поверхні, а всередині провідника електричного поля немає. Це явище використовують для створення *електростатичного захисту* – захисту від дії електричного поля. На відміну від гравітаційного поля від електричного поля можна захиститися, якщо оточити провідник, наприклад, мідними листами. На практиці це використовують для захисту від потужного електричного поля радіолокаторів та радіостанцій, випромінювання яких може зашкодити здоров'ю людини; для запобігання дії електричного поля на чутливі прилади.

Види діелектриків. Діелектриками, або ізоляторами називають такі тіла, крізь які електричні заряди не можуть переходити від зарядженого тіла до незарядженого. Ця властивість діелектриків зумовлена тим, що у них за певних умов відсутні вільні носії заряду. Якщо умови змінюються, наприклад під час нагрівання, в діелектрику можуть виникнути вільні носії заряду і він почне проводити електрику. Отже, поділ речовин на провідники і діелектрики є умовним.

До діелектриків належать усі гази за нормальних умов, рідини (гас, спирти, ацетон, дистильована вода та ін.), тверді речовини (скло, пластмаси, сухе дерево, папір, гума тощо).

У діелектриках електричні заряди не можуть переміщуватися під дією електричного поля по всьому об'єму тіла так, як вільні заряди провідника.



Мал. 12. Поляризація полярного діелектрика

Діелектрики поділяють на два види:

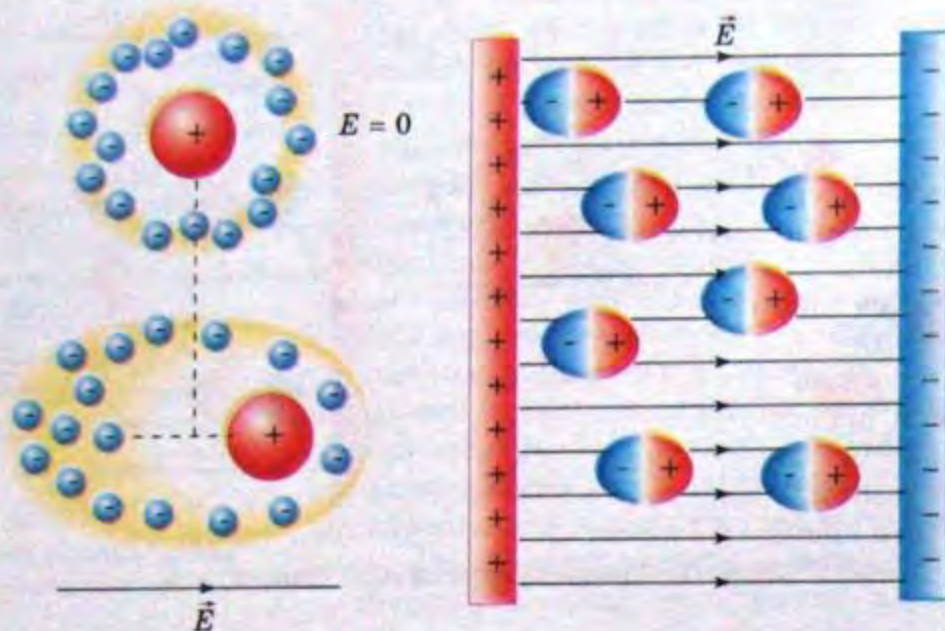
- ♦ **полярні**, які складаються з молекул, в яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів не збігаються (вода, спирти та ін.);
- ♦ **неполярні**, що складаються з атомів або молекул, в яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів збігаються (бензол, інертні гази, поліетилен та ін.).

Поляризація діелектриків. Усередині діелектрика електричне поле може існувати. Притягання незарядженого тіла (діелектрика) до зарядженого тіла пояснюється тим, що в електричному полі відбувається *поляризація діелектрика*, тобто зміщення в протилежні боки різнойменних зарядів, що входять до складу атомів і молекул таких речовин, але тут зміщення відбувається в межах кожного атома або молекули.

Молекули полярних діелектриків – це електричні диполі, що мають постійний дипольний момент внаслідок асиметрії центра мас позитивних і негативних зарядів (мал. 12, а).

Якщо полярний діелектрик помістити в електричне поле, то ці диполі починають повертатися своїми позитивно зарядженими кінцями до негативно зарядженої пластини, а негативно зарядженими – до позитивно зарядженої пластини (мал. 12, б). У результаті на поверхні діелектрика біля позитивної пластини виникає досить тонкий шар негативних зарядів, а біля негативно-позитивних, які й створюють зустрічне поле (мал. 12, в). (Всередині діелектрика позитивні й негативні заряди сусідніх диполів компенсують дію один одного.) Однак на відміну від провідників це поле вже не здатне повністю скомпенсувати зовнішнє, а лише послаблює його в ϵ разів.

Молекули неполярних діелектриків, якщо відсутнє зовнішнє електричне поле, дипольного моменту не мають (мал. 13). Якщо ж неполярний діелектрик помістити в електричне поле, його молекули деформуються, в результаті чого утворюються диполі, які поведуть себе, як і диполі полярного діелектрика. (В полярних діелектриках також відбувається поляризація молекул, внаслідок чого в електричному полі дипольний момент кожної молекули дещо збільшується.) Але поляризація неполярних діелектриків пояснюється



Мал. 13. Деформація та орієнтація молекул неполярного діелектрика в електричному полі

лише виникненням дипольного моменту в молекулі внаслідок її деформації у зовнішньому електричному полі. Залежно від хімічного зв'язку вона може бути результатом деформації електронних оболонок окремих атомів та йонів (електронна поляризація) або наслідком зміщення позитивних і негативних йонів у різні боки вздовж силових ліній зовнішнього електричного поля (йонна поляризація). Наведений дипольний момент зростає зі збільшенням напруженості електричного поля.

Таким чином, у діелектриках, як і в провідниках, спостерігається індукція електричних зарядів. Однак, якщо в електричному полі розділити діелектрик на дві частини, то ми не одержимо різнойменно заряджених тіл. У цьому полягає відмінність індукції в діелектриках від індукції в провідниках.

Діелектрична проникність речовини. Для характеристики електричних властивостей діелектриків уведено особливу величину, яку називають *діелектричною проникністю*. Це фізична стала, яка показує, у скільки разів модуль напруженості електричного поля всередині діелектрика $\vec{E}_{\text{вн}}$ менший від модуля напруженості \vec{E}_0 у вакуумі,

$$\epsilon = \frac{E_0}{E_{\text{вн}}}.$$

Діелектричну проникність визначено для всіх діелектриків і занесено до таблиць. Для дистильованої води $\epsilon = 81$, а для гасу $\epsilon = 2$.

? Дайте відповіді на запитання

1. Що відбувається при внесенні провідника в електричне поле?
2. Як зарядити два тіла різнойменно, не доторкуючись до них зарядженим тілом?
3. Вкажіть схожість та відмінності процесів електризації провідника та поляризації діелектрика.
4. У якому агрегатному стані – рідкому, твердому чи газоподібному – діелектрична проникність діелектрика буде найбільшою?



§ 5. Електрети і сегнетоелектрики. Рідкі кристали в електричному полі

Електрети. Серед твердих діелектриків існує група речовин, які можуть тривалий час зберігати наелектризований стан (бути поляризованими) і за відсутності зовнішнього електричного поля. Ці речовини дістали назву *електретів*. Подібні властивості мають ряд органічних (парафін, бджолиний віск, нейлон, ебоніт тощо) і неорганічних (сірка, борне скло та інші) речовин.

Така властивість електретів зумовлена тим, що виникає залишкова поляризація, оскільки на процеси поляризації та деполяризації потрібен різний час. Прискорити процес деполяризації можна шляхом підвищення температури діелектрика. Час збереження поляризації без помітного її зменшення у різних електретів різний. У деяких електретів він може сягати кількох десятків років.

Електрети знайшли застосування в техніці як джерела постійного електричного поля, зокрема в електрографії.

Сегнетоелектрики. Діелектрична проникність деяких діелектриків за певної температури набуває великих значень. Спочатку таку властивість було виявлено у кристалів сегнетової солі, і тому всі діелектрики цього типу дістали назву сегнетоелектриків. Термін «сегнетоелектрика» ввів у науку І. В. Курчатov у 30-х роках минулого століття.

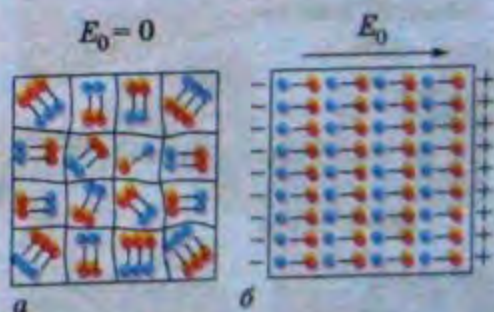
Діелектрична проникність сегнетової солі може перевищувати діелектричну проникність вакууму у декілька тисяч разів. Вона помітно змінюється зі зміною напруженості зовнішнього електричного поля.

Аномально велика діелектрична проникність сегнетоелектриків зумовлена виникненням у цих речовин у певному інтервалі температур вираженої спонтанної (самодовільної) поляризації. Навіть за відсутності зовнішнього електричного поля окремі ділянки кристала сегнетоелектрика (домени) виявляються поляризованими, але в різних напрямках (мал. 14, а). Тому в цілому весь кристал сегнетоелектрика поводить себе так, ніби він зовсім не поляризований. Під дією електричного поля відбувається зміна напрямку поляризації (зміна орієнтації) доменів – вони повернуться в напрямку цього поля (мал. 14, б). Сегнетоелектрик частково зберігає свою поляризацію і тоді, коли його видалити з поля.

Виявляється, що домени є в сегнетоелектриках лише в певному інтервалі температур, і саме за цих температур у них зберігаються сегнетоелектричні властивості. Наприклад, сегнетова сіль має ці властивості лише при температурах від -15 до $22,5$ °С.

Сегнетоелектрики використовуються для виготовлення генераторів і приймачів ультразвукових хвиль та інших радіотехнічних пристроїв.

П'єзоелектричний ефект. Вивчення властивостей твердих діелектриків показало, що деякі з них поляризуються не лише за допомогою електричного поля, а й у процесі деформації внаслідок механічної дії на них.



Мал. 14. Схема доменної структури сегнетоелектрика:
а – за відсутності електричного поля;
б – у сильному електричному полі

Прямий п'єзоелектричний ефект – явище поляризації діелектрика під час механічної дії на нього.

Цей ефект мають кристали кварцу і всі сегнетоелектрики. Щоб його спостерігати, з кристала вирізають прямокутний паралелепіпед, грані якого повинні бути орієнтовані певним чином відносно кристала. Дві протилежні грані покривають металевими пластинами з відводами для підключення до електричного кола. При здавлюванні паралелепіпеда одна його грань заряджається позитивно, а друга – негативно. Якщо стискання замінити розтягом паралелепіпеда, то знаки на його гранях зміняться на протилежні.

Прямий п'єзоелектричний ефект можна пояснити так. Усі п'єзокристали не мають центра симетрії і складаються із позитивних та негативних йонів, які утворюють ніби дві самостійні підґратки, вставлені одна в одну. Коли п'єзокристал стискають (розтягують), ці підґратки зсуваються одна відносно одної, і одна поверхня кристала заряджається позитивно, а друга – негативно.

У п'єзокристалів спостерігається і зворотне явище – деформація поляризованого кристала.

Зворотний п'єзоелектричний ефект – деформація кристалів внаслідок його поляризації у зовнішньому електричному полі.

Якщо пластинку, вирізану з п'єзокристала, помістити в електричне поле, що постійно змінюється, то вона пульсуватиме в такт змінам поля. Цей ефект використовується для добування ультразвуку у радіотехнічних пристроях.

Рідкокристалічні дисплеї. Рідкі кристали – це речовини, довгі молекули яких певним чином впорядковані, тобто в них існує певна симетрія. Як наслідок, існує й анізотропія механічних, електричних, магнітних та оптичних властивостей речовин цього класу. Поєднуючи властивості рідин та твердих тіл (текучість, анізотропія), рідкі кристали проявляють специфічні ефекти, багато з яких не спостерігаються у рідинах та твердих тілах.

Найпопулярнішими серед застосувань рідких кристалів є *рідкокристалічні дисплеї* (мал. 15). Рідкокристалічний дисплей (англ. *liquid crystal display*, LCD) – це електричний пристрій візуального відображення інформації,

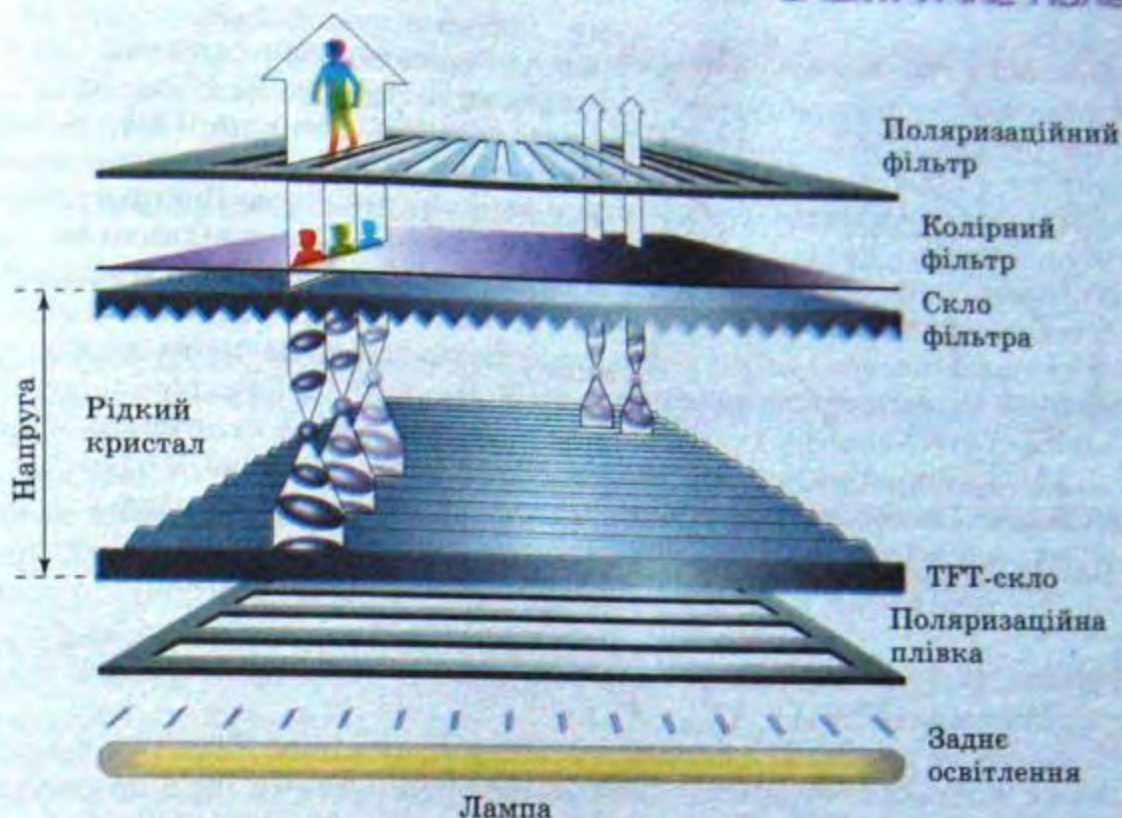
принцип дії якого ґрунтується на явищі поляризації світлового потоку. (З явищем поляризації ви детально ознайомитеся у розділі «Оптика».)

Рідкокристалічна панель освітлюється джерелом світла (залежно від того, де воно розташоване, рідкокристалічні панелі працюють на відбиванні або на проходженні світла).

Для отримання кольорового зображення використовують три фільтри (мал. 16), що виділяють з джерела білого світла три основних кольори (синій, зелений, червоний). Завдяки комбінуванню трьох основних кольорів для кожної точки (пікселя) екрана з'являється можливість відтворити будь-який колір.



Мал. 15. Рідкокристалічні дисплеї



Мал. 16. Схема отримання зображення у рідкокристалічному дисплеї

Рідкокристалічні дисплеї споживають невелику кількість енергії, тому вони знайшли широке застосування як у кишенькових пристроях (годинниках, мобільних телефонах, кишенькових комп'ютерах), так і в комп'ютерних моніторах, телевізорах тощо.

? Дайте відповіді на запитання

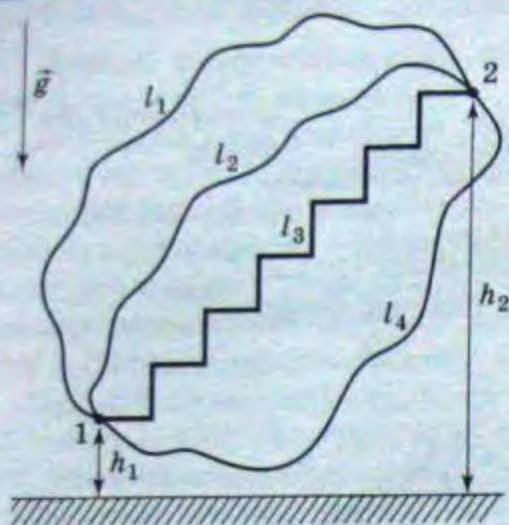
1. Які діелектрики називають електретами? Сегнетоелектриками?
2. У чому суть п'єзоелектричного ефекту?
3. Наведіть практичні приклади використання сегнетоелектриків, електретів, рідких кристалів.

§ 6. Робота по переміщенню заряду в електричному полі

Обчислення роботи електричного поля по переміщенню заряду. Ми вже вказували на подібність законів взаємодії електрично заряджених тіл (закон Кулона) та масивних тіл (закон всесвітнього тяжіння). В обох випадках $F \sim \frac{1}{r^2}$. Відповідно і наслідки із законів мають бути схожими.

У курсі механіки ми з'ясували таке:

- ♦ Сила всесвітнього тяжіння є *консервативною силою*, оскільки її робота по переміщенню тіла масою m у просторі не залежить від траєкторії руху тіла, а визначається лише його початковим і кінцевим положення-



Мал. 17. До визначення роботи сили тяжіння

ми. Робота по переміщенню тіла замкненою траєкторією дорівнює нулю. Робота сили земного тяжіння (біля поверхні землі) $A = mg(h_1 - h_2)$ (позначення див. на мал. 17); у всесвітньому масштабі робота гравітаційної сили

$$A = GM_{\text{зем}} m \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

якому робота не залежить від форми траєкторії, називається *потенціальним*.

♦ У кожній точці поля тіло має певну потенціальну енергію відносно вибраного нульового рівня. Значення потенціальної енергії тіла у даній точці простору визначається роботою поля по переміщенню тіла з цієї точки на нульовий рівень.

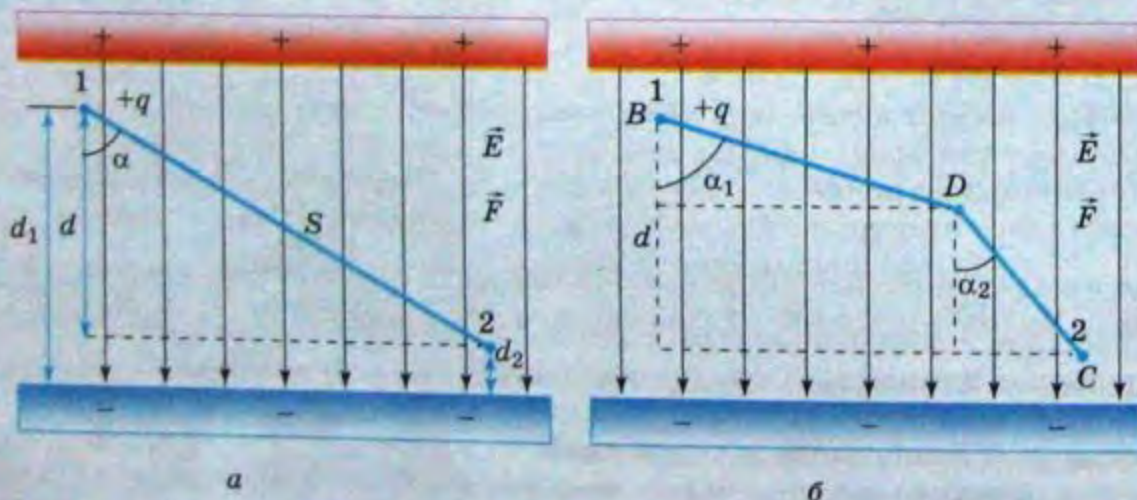
Робота сили тяжіння дорівнює зміні потенціальної енергії тіла з протилежним знаком, $A = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1})$.

Ці висновки отримано з закону всесвітнього тяжіння Ньютона, подібні висновки мають бути отримані і для електростатичних сил, що діють в електричному полі.

Розглянемо рух точкового заряду в однорідному електричному полі. Нехай однорідне поле створюють великі металеві пластини, що мають заряди протилежних знаків. Це поле діє на точкове тіло сталою силою $\vec{F} = q\vec{E}$, подібно до того, як поле тяжіння діє зі сталою силою $\vec{F} = m\vec{g}$ на тіло поблизу поверхні Землі.

Нехай пластини розміщені горизонтально. Обчислимо роботу, яку виконує електростатичне поле, переміщуючи позитивний заряд q із точки 1, розташованої на відстані d_1 від негативно зарядженої пластини, у точку 2, віддалену на відстань d_2 , по прямолінійній траєкторії (мал. 18, а).

Як відомо з курсу механіки, робота по переміщенню тіла визначається формулою $A = Fscos\alpha$, де α – кут між векторами сили та переміщення.



Мал. 18. Переміщення позитивного заряду в однорідному електричному полі: а – по прямолінійній траєкторії; б – по ламаній

Відповідно електричне поле на ділянці 1–2 виконує роботу $A = Fd$, де $d = scos\alpha$. З урахуванням того, що $F = qE$, отримуємо $A = qEd = qE(d_1 - d_2)$. Ця робота не залежить від форми траєкторії, подібно до того, як не залежить від форми траєкторії робота сили тяжіння. Доведемо це. Нехай тепер позитивний заряд q переміщується з точки 1 у точку 2 ламаною BDC (мал. 18, б). Тоді поле виконує роботу

$$A = qE(BD\cos\alpha_1 + DC\cos\alpha_2) = qE(BD_1 + D_1C_1) = qEd.$$

Такого ж висновку ми дійдемо за будь-якого вигляду траєкторії руху точкового заряду, адже будь-яку криву можна замінити переміщенням по ламаній траєкторії з достатньо малими сходинками (мал. 19).

Отже, ми довели, що в однорідному електричному полі робота електростатичних сил не залежить від форми траєкторії. Відповідно робота по переміщенню заряду замкненою траєкторією дорівнює нулю.

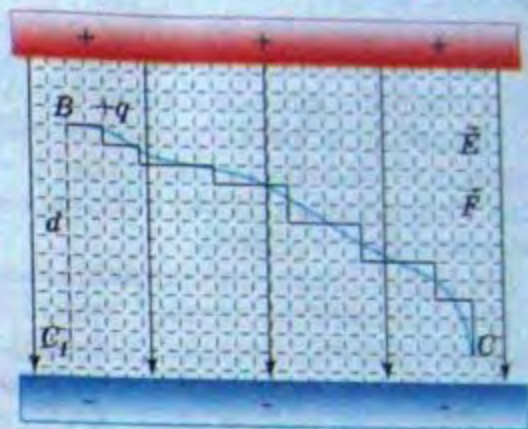
Можна довести, що цей висновок справджується і для неоднорідних полів, наприклад для поля точкового заряду (мал. 20). У цьому випадку роботу по переміщенню позитивного заряду q_0 із точки 1, що лежить на відстані r_1 від заряду q , що створює поле, у точку 2, що лежить на відстані r_2 , визначають за формулою

$$A = q_0 \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_2} \right)$$

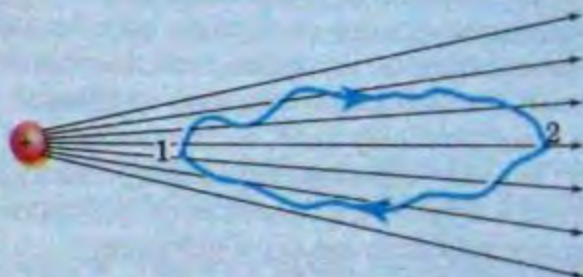
незалежно від форми траєкторії.

Отже, *електростатичні сили взаємодії між нерухомими точковими зарядами є консервативними*. А поле консервативних сил є потенціальним. Відповідно електричне поле так само, як і гравітаційне поле, – потенціальне. І робота сил електричного поля може бути визначена через зміну потенціальної енергії точкового заряду в цьому полі.

Потенціальна енергія взаємодії точкових зарядів. Подібно до того, як будь-яке тіло, що взаємодіє з Землею за законом всесвітнього тяжіння, на різних відстанях від її центра має різну потенціальну енергію, електричний заряд q на різній відстані від іншого заряду q_0 має різну потенціальну енергію¹ W . Якщо заряд q переміщується в електричному полі з точки 1, де його потенціальна енергія була W_1 , у точку 2, де його енергія стала W_2 ,



Мал. 19. Криволінійну траєкторію можна замінити траєкторією у вигляді ламаної лінії з якою завгодно точністю, якщо взяти достатньо малі сходинки



Мал. 20. Робота по переміщенню заряду в неоднорідному полі

¹ Оскільки літерою E позначається напруженість електричного поля, то енергію в електродинаміці прийнято позначати літерою W .

робота сил поля $A = W_1 - W_2 = -(W_2 - W_1) = -\Delta W$. Як видно з формули, A та ΔW мають протилежні знаки. Це пояснюється тим, що якщо заряд q переміщується під дією сил поля (тобто робота поля A додатна), то його потенціальна енергія зменшується, приріст енергії ΔW від'ємний. Якщо ж заряд переміщується проти сил поля (A – від'ємна), то потенціальна енергія заряду збільшується. (Таке ж співвідношення між потенціальною енергією та роботою сили тяжіння).

Як відомо, значення потенціальної енергії залежить від вибору нульового рівня. В електростатиці¹ домовились потенціальну енергію заряду, розміщеного в точці, нескінченно віддаленій від зарядженого тіла, що створює поле, вважати за нуль, $W_\infty = 0$. Тоді при переміщенні заряду q з точки 1 у нескінченність робота поля $A = W_1 - W_\infty = W_1$. Тобто, потенціальна енергія заряду q , розміщеного в якій-небудь точці поля, чисельно дорівнює роботі, яку виконують сили поля, переміщуючи цей заряд з вказаної точки у нескінченність. $W = qEd$, де d – відстань від джерела поля до точки, в якій перебуває заряд q .

Якщо поле створене позитивним зарядом, то значення потенціальної енергії іншого позитивного заряду, розміщеного в деякій точці цього поля, буде додатне, якщо ж поле створене негативним зарядом, то значення потенціальної енергії позитивного заряду – від'ємне. Для негативного заряду, розміщеного в електричному полі, все буде навпаки. (Подумайте чому.) Коли поле створено відразу кількома зарядами, потенціальна енергія заряду q , розміщеного в якій-небудь точці такого поля дорівнює алгебраїчній сумі енергій, зумовлених полем кожного заряду в цій точці.

? Дайте відповіді на запитання

1. Як обчислюється робота по переміщенню зарядженого тіла в однорідному електричному полі?
2. У тексті параграфа показано, що робота переміщення заряду із точки 1 у точку 2 дорівнює qEd . Якою буде робота, якщо цей самий заряд переміщується із точки 2 у точку 1?
3. Чи завжди робота сил електричного поля вздовж замкненої траєкторії дорівнює нулю? Наведіть приклад.

Приклади розв'язування задач

Задача. Точкове тіло масою 10^{-7} кг набуло заряду 1 мкКл і швидкості 3000 м/с. На яку мінімальну відстань воно може наблизитися до точкового зарядженого тіла із зарядом 10 мкКл?

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 10^{-7} \text{ кг} \\ q &= 10^{-6} \text{ Кл} \\ v &= 3000 \text{ м/с} \\ q_0 &= 10^{-5} \text{ Кл} \end{aligned}$$

$r = ?$

Розв'язання

Оскільки електростатичне поле, створене зарядом q_0 , є потенціальним, то під час руху в ньому заряду q виконується закон збереження повної механічної енергії:

$$W_1 + \frac{mv_1^2}{2} = W_2,$$

де W_1 і W_2 – потенціальні енергії заряду q в електростатичному полі заряду q_0 на початку і після максимального наближення до джерела поля.

¹ У електротехніці за нуль часто вважають потенціальну енергію заряду, розміщеного на Землі.

Можна вважати, що в початковий момент заряд q безмежно далеко віддалений від заряду q_0 , тому $W_1 = 0$, і формула набуває вигляду

$$\frac{mv_1^2}{2} = W_2, \text{ або } \frac{mv_1^2}{2} = k \frac{qq_0}{r}.$$

Звідси визначаємо $r = \frac{2kqq_0}{mv^2}$.

Підставляючи числові значення, дістаємо:

$$r = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 10^{-6} \text{Кл} \cdot 10^{-3} \text{Кл}}{10^{-7} \text{кг} \cdot 3000^2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = 0,2 \text{ м}.$$

Відповідь: 0,2 м.

Вправа 4

1. Електрон зі швидкістю $1,8 \cdot 10^4$ м/с влітає в однорідне електричне поле напруженістю 3 мН/Кл і рухається проти ліній поля. З яким прискоренням рухається електрон і якою буде його швидкість, коли він пройде відстань 7,1 см? Скільки часу необхідно для набуття цієї швидкості? Рух електрона відбувається у вакуумі.
2. Кулька масою 40 мг, що має позитивний заряд $q = 1$ нКл, рухається зі швидкістю 10 см/с. На яку відстань може наблизитись кулька до позитивного точкового заряду $q_0 = 1,33$ нКл?
3. Яка робота виконується при перенесенні точкового заряду 20 нКл із нескінченності в точку, що лежить на відстані 1 см від поверхні кулі радіусом 1 см з поверхневою густиною заряду 10 мкКл/м²?
4. Дві кульки з зарядами 6,66 нКл та 13,33 нКл перебувають на відстані 40 см одна від одної. Яку роботу необхідно виконати, щоб наблизити їх до відстані 25 см?
5. Точкові заряди $q_1 = -17$ нКл та $q_2 = 20$ нКл перебувають від точкового заряду $q_3 = 30$ нКл відповідно на відстанях $l_1 = 2$ см та $l_2 = 5$ см. Яку мінімальну роботу проти електричних сил необхідно виконати, щоб поміняти заряди q_1 та q_2 місцями?

§ 7. Потенціал електричного поля

Потенціал. Еквіпотенціальні поверхні. У механіці взаємодію тіл характеризують силою або потенціальною енергією. Електричне поле, що здійснює взаємодію між електрично зарядженими тілами, також характеризують двома величинами. Напруженість електричного поля – це *силова характеристика*. Тепер введемо *енергетичну* характеристику – **потенціал**. За допомогою цієї величини можна буде порівнювати між собою будь-які точки електричного поля. Отже, потенціал як характеристика поля не повинен залежати від значення заряду, що міститься в цих точках. Розділимо обидві частини формули $A = W_1 - W_2$ на заряд q . Отримаємо $\frac{A}{q} = \frac{W_1}{q} - \frac{W_2}{q}$. Відношення $\frac{W}{q}$ не залежить від значення заряду і приймається за енергетичну характеристику, яку називають **потенціалом** поля в даній точці. Позначають потенціал літерою ϕ .



Потенціал електричного поля φ – скалярна енергетична характеристика поля, що визначається відношенням потенціальної енергії W позитивного заряду q в даній точці поля до величини цього заряду, $\varphi = \frac{W}{q}$.

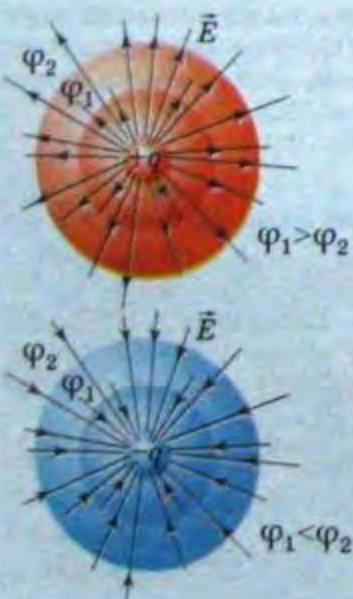
Одиниця потенціалу – вольт, $[\varphi] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В}$.

Подібно до потенціальної енергії значення потенціалу в даній точці залежить від вибору нульового рівня для відліку потенціалу. Найчастіше у електродинаміці за нульовий рівень беруть потенціал точки, що лежить у нескінченності, а у електротехніці – на поверхні Землі.

Із введенням потенціалу формулу для визначення роботи по переміщенню заряду між точками 1 і 2 можна записати у вигляді $\frac{A}{q} = \varphi_1 - \varphi_2$.

Оскільки під час переміщення позитивного заряду у напрямку вектора напруженості електричне поле виконує позитивну роботу $A = q(\varphi_1 - \varphi_2) > 0$, то потенціал φ_1 більший за потенціал φ_2 . Таким чином, напруженість електричного поля напрямлена у бік зменшення потенціалу.

Якщо заряд переміщати із певної точки поля у нескінченність, робота $A = q(\varphi - \varphi_\infty)$. Оскільки $\varphi_\infty = 0$, то $A = q\varphi$. Таким чином, величина потенціалу φ певної точки поля визначається роботою, яку виконує електричне поле, переміщуючи одиничний позитивний заряд із цієї точки на нескінченність, $\varphi = \frac{A}{q}$.



Мал. 21.

Еквіпотенціальні поверхні електричних полів, створених точковими зарядами різних знаків

Якщо електричне поле створюється точковим зарядом q , то у точці, що лежить на відстані r від нього, потенціал обчислюють за формулою

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$$

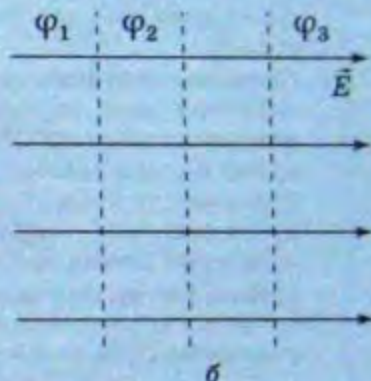
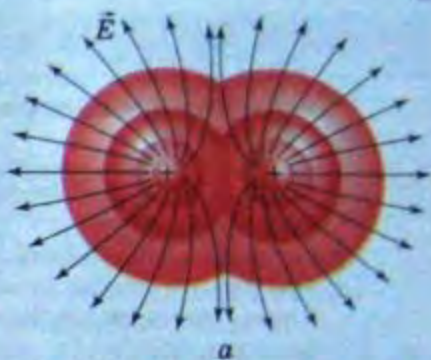
За цією формулою розраховують і потенціал поля, зарядженої кулі. У цьому разі r – це відстань від центра кулі до вибраної точки поля. Із формули також видно, що на однакових відстанях від точкового заряду, що створює поле, потенціал однаковий. Усі ці точки лежать на поверхні сфери, описаної радіусом r навколо точкового заряду. Таку сферу називають **еквіпотенціальною поверхнею**.

Еквіпотенціальні поверхні – геометричне місце точок в електричному полі, які мають однаковий потенціал (мал. 21). Еквіпотенціальні поверхні використовують для наочного зображення електричних полів.

Силкові лінії завжди перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь. Це означає, що робота сил поля з переміщення заряду по еквіпотенціальній поверхні дорівнює нулю.

У разі накладання електричних полів, створених кількома зарядами, потенціал електричного поля дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів, створених окремими зарядами, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots$. Еквіпотенціальні поверхні таких систем мають складну форму. Наприклад, для системи із двох однакових за значенням однакових зарядів еквіпотенціальні поверхні мають вигляд, зображений на мал. 22,а. Еквіпотенціальні поверхні однорідного поля є площинами (мал. 22,б).

Різниця потенціалів. Практичне значення має не сам потенціал у точці, а зміна (різниця) потенціалу $\varphi_1 - \varphi_2$, яка не залежить від вибору нульового рівня відліку потенціалу. Різницю потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ ще називають *напругою* і позначають латинською літерою U . Тоді формула для роботи по переміщенню заряду набуває вигляду $\frac{A}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 = U$.



Мал. 22. Еквіпотенціальні поверхні: а – поля двох однакових зарядів; б – однорідного поля



Напруга U – це фізична величина, яка визначається роботою електричного поля по переміщенню одиничного позитивного

заряду між двома точками поля, $U = \frac{A}{q}$.

Одиниця різниці потенціалів (напруги), як і потенціалу, – вольт, $[U] = 1\text{В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$.

Оскільки робота сил поля по переміщенню заряду залежить лише від різниці потенціалів, то в разі переміщення заряду з однієї еквіпотенціальної поверхні на другу (потенціали яких відповідно φ_1 та φ_2) виконана полем робота не залежить від траєкторії цього руху.

Зв'язок напруженості електричного поля з напругою. Із формул $A = Eqd$ та $A = qU$ можна встановити зв'язок між напруженістю та напругою електричного поля, а саме $Ed = U$. Із цієї формули випливає:

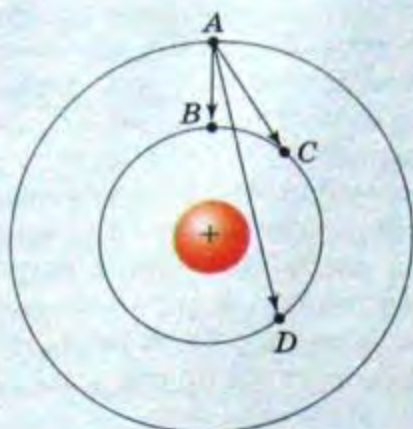
- ♦ чим менше змінюється потенціал на відстані d , тим меншою є напруженість електричного поля;
- ♦ якщо потенціал не змінюється, то напруженість дорівнює нулю;
- ♦ напруженість електричного поля напрямлена в бік зменшення потенціалу.

Оскільки $E = \frac{U}{d}$, то саме з цієї формули і виводиться ще одна одиниця напруженості – вольт на метр, $[E] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Одиниця напруженості – вольт на метр, $[E] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Дайте відповіді на запитання

1. Що називають потенціалом електричного поля? Яка формула відображає зміст цього поняття?
2. Що називають різницею потенціалів між двома точками поля? Яка формула відображає зміст цього поняття?
3. Які поверхні називають еквіпотенціальними?
4. Яка формула задає зв'язок між напруженістю і різницею потенціалів в однорідному електричному полі?
5. Порівняти роботи, виконані полем під час переміщення заряду з точки *A* в точки *B*, *C* і *D* (мал. 23).
6. Проаналізуйте формули законів всесвітнього тяжіння і Кулона, які подібні за формою, хоча й описують явища різної природи, та з'ясуйте:
 - а) Яка фізична величина в законі всесвітнього тяжіння є аналогом заряду в законі електростатики Кулона?
 - б) Яка величина у полі тяжіння відіграє роль, подібну до напруженості електричного поля? Запишіть формулу для обчислення цієї величини.
 - в) Який вигляд має формула потенціалу φ гравітаційного поля, якщо потенціал електричного поля $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$?



Мал. 23

Загальні рекомендації до розв'язування задач

Розв'язуючи задачі, треба враховувати, що негативно заряджені точкові тіла, залишені самі на себе, в електричному полі рухаються від точок з меншим потенціалом до точок, де потенціал більший. Позитивно заряджені тіла рухаються у зворотному напрямку. Особливо слід пам'ятати найважливішу властивість електричного поля – незалежність роботи сил від траєкторії руху. Робота сил, що діють на заряджене тіло з боку поля, виражається через різницю потенціальних енергій або різницю потенціалів.

В основі розв'язання задач на розрахунок складних електричних полів, тобто задач на визначення напруженості й потенціалу таких полів у деякій точці простору, лежить принцип накладання (суперпозиції) полів:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n \text{ та } \varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n.$$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Електричне поле створене точковим зарядом $5 \cdot 10^{-7}$ Кл, вміщеним у середовище з діелектричною проникністю $\epsilon = 2$. Визначити різницю електричних потенціалів точок, віддалених від заряду відповідно на 5 см і 0,2 м. Яка робота виконується по переміщенню електричного заряду $0,3 \cdot 10^{-7}$ Кл між цими точками?

Дано:

$$q = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$q_0 = 0,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$\epsilon = 2$$

$$r_1 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 0,2 \text{ м}$$

$$U = ? \text{ А} - ?$$

Розв'язання

Використовуючи формулу $\varphi = q / (4\pi\epsilon_0\epsilon r)$, визначимо різницю електричних потенціалів точок електричного поля

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Роботу по переміщенню заряду в електричному полі визначимо за формулою $A = q_0 U$.

Підставляючи числові значення, отримуємо

$$U = \frac{5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot 2} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} - \frac{1}{0,2 \text{ м}} \right) \approx 34 \text{ кВ}$$

$$A \approx 0,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot 34 \cdot 10^3 \text{ В} \approx 10^{-3} \text{ Дж} = 1 \text{ мДж}.$$

Відповідь: 34 кВ; 1 мДж.

Задача 2. З 60 маленьких сферичних крапель ртуті, радіуси яких 0,1 мм, 20 штук мають заряди $q_1 = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$, а 40 штук – $q_2 = -0,8 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$ кожна. Визначити потенціал великої краплі, яка утворюється після злиття в одну всіх маленьких крапель.

Дано:

$$q_1 = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -0,8 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$$

$$r = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$n_1 = 20$$

$$n_2 = 40$$

$$\varphi = ?$$

Розв'язання

Потенціал великої сферичної краплі

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R},$$

де Q – її заряд, R – радіус.

У процесі зливання крапель виконується закон збереження електричного заряду: $Q = n_1 q_1 + n_2 q_2$.

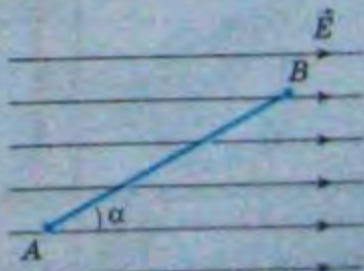
Об'єм утвореної краплини становить $\frac{4}{3}\pi R^3 = (n_1 + n_2) \frac{4}{3}\pi r^3$, звідки $R = r \sqrt[3]{n_1 + n_2}$.

Тоді $\varphi = \frac{n_1 q_1 + n_2 q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r \sqrt[3]{n_1 + n_2}}$. Після підстановки числових значень отримуємо $\varphi \approx 184 \text{ В}$.

Відповідь: 184 В.

Вправа 5

- На відстані 5 см від поверхні кулі потенціал електричного поля дорівнює 1,2 кВ, а на відстані 10 см він дорівнює 900 В. Визначити радіус кулі, її заряд і потенціал.
- Сто однакових заряджених крапельок, зливаючись, утворюють одну. Яким буде потенціал утвореної краплі, якщо потенціал кожної крапельки дорівнює 3 В?
- Точки A і B лежать на відстані 10 см одна від одної і розташовані в однорідному полі, напруженість якого 60 кВ/м. Визначити різницю потенціалів між цими точками. Розглянути випадки, коли точки A і B лежать: а) на одній лінії напруженості; б) на прямій, перпендикулярній до лінії напруженості; в) на прямій, напруженій під кутом 45° до лінії напруженості.
- Визначити напругу між точками A і B (мал. 24), якщо $|AB| = 8 \text{ см}$, $\alpha = 30^\circ$ і напруженість поля становить 50 кВ/м.
- Яку швидкість набуває електрон, прискорюючись у полі з різницею потенціалів 200 В?



Мал. 24

Для додаткового читання

Вимірювання елементарного електричного заряду

Дослід Йоффе–Міллікена. Перші точні досліди з метою вимірювання заряду електрона виконав у 1906–1916 рр. американський фізик Р. Міллікен (1863–1953). Незалежно від нього аналогічні досліди провів радянський вчений А. Ф. Йоффе (1880–1960).

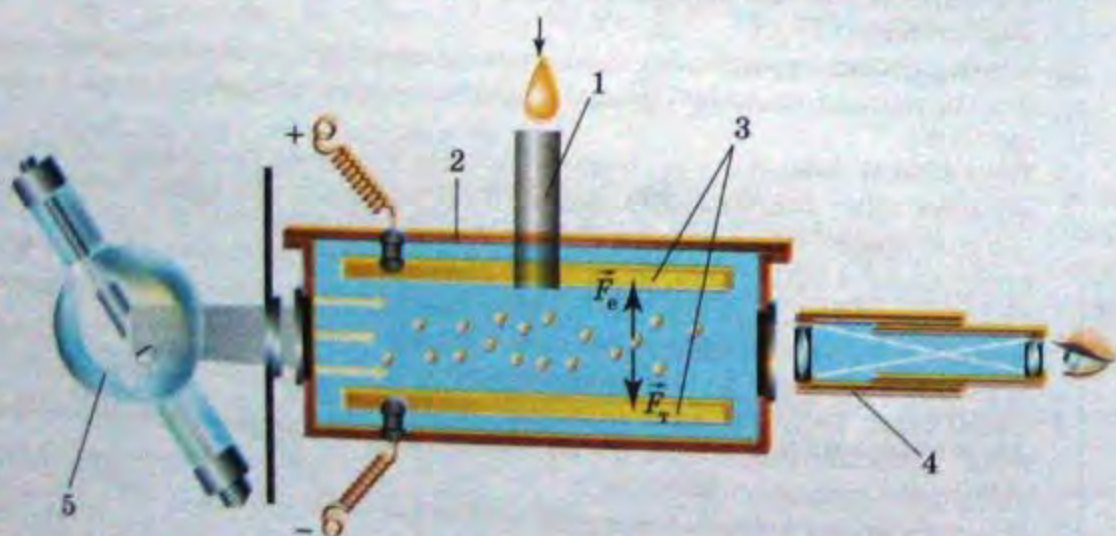
Міллікен вимірював електричний заряд окремих дрібних крапель олії, Йоффе – заряд маленьких порошинок цинку і крапельок ртуті. Дослідникам потрібно було виміряти силу приблизно у 10^{-13} Н, яка діє на частинку речовини масою близько 10^{-12} г.

Робоча зона установки Міллікена (мал. 25) – це дві паралельні пластини 3, між якими створювалось однорідне електричне поле. У це поле за допомогою розпилювача 1 впорскували крапельки олії (олія має низький тиск насиченої пари, тому випаровуванням крапельок під час досліду можна знехтувати). Робоча зона встановлена всередині захисного кожуха 2 – щоб температура і тиск повітря залишались сталими. Під час розпилювання олії крапельки електризувались і рухались під впливом сили тяжіння, електричного поля та інших сил. За рухом крапельок можна було спостерігати в мікроскоп 4 через спеціальне віконце.

Спочатку виміряли швидкість v_0 рівномірного падіння краплі під дією сили тяжіння ρVg , виштовхувальної сили $\rho_0 Vg$ і сили опору повітря $F_{\text{оп}} = bv_0$ (тут ρ – густина олії, ρ_0 – густина повітря, V – об'єм краплини, b – коефіцієнт опору, який залежить від радіуса краплі і в'язкості повітря). Рівняння руху у цьому випадку таке: $\rho Vg - \rho_0 Vg - bv_0 = 0$. Потім створювали електричне поле між пластинами, яке змушувало крапельку підніматись вгору, і вимірювати швидкість усталеного руху v у цьому випадку, $\rho Vg - \rho_0 Vg - bv - qE = 0$. Із системи рівнянь визначали

величину заряду крапельки $q = \frac{b(v_0 + v)}{E}$.

Коли на крапельки олії подіяли рентгенівським промінням 5, то спостерігали стрибкоподібну зміну швидкості руху крапельки в електричному



Мал. 25. Схема установки досліду Міллікена

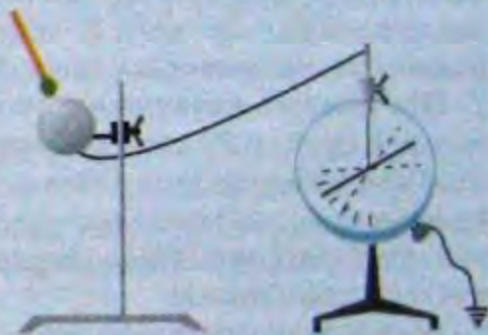
полі. Це свідчило про те, що заряд крапельки під впливом рентгенівського проміння змінювався стрибкоподібно. Рентгенівське проміння виривало з крапельки окремі електрони. Діставши ряд послідовних значень заряду крапельки q_0, q_1, q_2, \dots, P . Міллікен встановив, що і самі значення заряду крапельки, і їх послідовні різниці є цілими кратними деякого елементарного заряду e , тобто $q_i = n_i e$, де n_i – завжди ціле число.

У результаті численних дослідів Р. Міллікен визначив значення заряду електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

§ 8. Електроємність

Електроємність провідників різної форми. Ми вже дізнались, що в провіднику, вміщеному в електричне поле, відбувається перерозподіл зарядів доти, поки зовнішнє поле всередині провідника не скомпенсується власним полем розділених зарядів. Всі заряди розміщуються на зовнішній поверхні провідника, яка є еквіпотенціальною. Потенціал будь-якої точки цієї поверхні вважається потенціалом усього провідника.

З'ясуємо, як змінюватиметься потенціал провідника, якщо змінювати його заряд. Візьмемо провідник (наприклад, металеву кулю), ізолюваний від Землі та інших провідників, і, не змінюючи його положення відносно інших провідників, будемо його електризувати (збільшувати заряд) (мал. 26). За допомогою електрометра¹ вимірюватимемо відповідні значення потенціалу провідника. Побачимо, що у скільки разів збільшується заряд кулі, у стільки ж зростає її потенціал, тобто заряд провідника прямо пропорційний потенціалу, $q \sim \phi$. Уводячи коефіцієнт пропорційності, отримуємо $q = C\phi$, де C – коефіцієнт пропорційності, сталий для умов даного досліду. Якщо ми замінимо провідник іншим (наприклад, кулею більших розмірів) або змінимо зовнішні умови досліду, то значення коефіцієнта C буде іншим. Цей коефіцієнт пропорційності називають *ємністю* (або *електроємністю*)² провідника.



Мал. 26. Дослід із дослідження залежності потенціалу провідника від зміни його заряду

Електроємність C – скалярна фізична величина, що характеризує здатність провідників накопичувати і утримувати певний електричний заряд. Вона вимірюється відношенням заряду q , який надали відокремленому

провідникові, до його потенціалу ϕ , $C = \frac{q}{\phi}$.

¹ Електрометр (або електростатичний вольтметр) – прилад для вимірювання потенціалу зарядженого провідника відносно Землі або відносно іншого зарядженого провідника.

² Цей термін було введено у XVII ст., коли ще не було обґрунтовано сучасні положення електродинаміки, а здатність провідника накопичувати електричний заряд пояснювали тим, що заряд можна «вливати» і «випливати» з нього.

Одиниця електроємності – фарад, $[C] = 1 \text{ Ф}$.

Електроємність провідника правильної форми можна розрахувати. Наприклад, обчислимо ємність окремої провідної кулі радіусом r . Потенціал зарядженої кулі $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$, підставляючи цей вираз у форму-

лу для ємності, отримуємо $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r$.

Слід зазначити, що ємність 1 Ф є дуже великою. Так, за допомогою останньої формули можна показати, що у вакуумі електроємність в 1 Ф має куля радіусом $9 \cdot 10^9 \text{ м}$ (що у 23 рази більше за відстань від Землі до Місяця). Ємність Землі, радіус якої $6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$, дорівнює $7 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$.

Тому на практиці найчастіше використовують мікро- та піко- фаради: $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$, $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$.

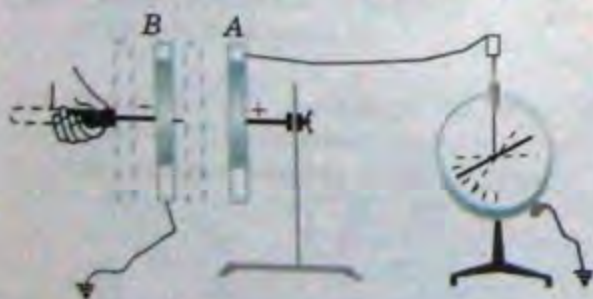
Досліди показують, що ємність провідника залежить від його розмірів і форми. Проте не залежить від матеріалу, агрегатного стану, форми і розмірів порожнини всередині провідника (пояснить самостійно чому). З'ясуємо умови, від яких залежить електроємність провідника.

Оскільки провідник електризується через вплив, електроємність провідника повинна залежати від розміщення поблизу нього інших провідників і від навколишнього середовища. Покажемо це на досліді. Візьмемо два металевих диски, закріплених на підставках з діелектрика (мал. 27). Диск A з'єднаємо з електрометром, корпус якого заземлений, а диск B відсунемо від диска A . Наелектризуємо диск A , надавши йому заряд, який надалі не змінюватиметься. Відмітивши значення потенціалу диска A за показами електрометра, почнемо наближати до нього диск B , одночасно спостерігаючи за стрілкою приладу. Виявляється, що потенціал диска A при цьому зменшується.

Ще різкіше зменшення потенціалу диска A можна спостерігати, якщо заземлити диск B , який наближається¹. Взявши до уваги, що заряд на диску A при цьому не змінюється, робимо висновок, що зменшення потенціалу зумовлене збільшенням електроємності системи дисків. Замінивши повітря між дисками іншим діелектриком, знову відмітимо збільшення електроємності системи дисків.

Результати дослідів можна пояснити так. Коли диск B потрапляє в поле диска A , він електризується через вплив і створює своє поле. Якщо

з'єднати диск B із землею, на ньому залишаться лише заряди протилежного знака порівняно із зарядами на диску A . Це підсилює поле диска B , яке ще більше зменшує потенціал диска A . Якщо внести між диски діелектрик, то він поляризується. Поляризаційні заряди, розміщені поблизу поверхні диска A , компенсують частину його заряду, отже, електроємність диска зростає.



Мал. 27. Дослід з визначення залежності електроємності провідників від відстані між ними

¹ Заземлення провідників – це з'єднання їх із землею (дуже довгим провідником) за допомогою металевих листів, закопаних у землю, водопровідних труб тощо.

Конденсатор. Електроємність плоского конденсатора. Розглянута система провідників слугує основою для пристроїв, які називаються *конденсаторами*. Конденсатори широко використовуються у радіотехніці як пристрої для накопичування і утримання електричного заряду.

Найпростіший конденсатор складається з двох або більше різнойменно заряджених і розділених діелектриком провідників, які називають *обкладками* конденсатора. Останні мають однакові за абсолютним значенням різнойменні заряди і розміщені одна відносно одної так, що поле в цій системі сконцентроване в обмеженому просторі між ними. Діелектрик між обкладками відіграє подвійну роль: по-перше, він збільшує електроємність, по-друге – не дає зарядам нейтралізуватись. Тому діелектрична проникність і електрична міцність на пробій (пробій діелектрика означає, що він стає провідним) повинні бути досить великими. Щоб захистити конденсатор від механічних зовнішніх дій, його вставляють у корпус.

Накопичення зарядів на обкладках конденсатора називається його зарядженням. Щоб зарядити конденсатор, його обкладки приєднують до полюсів джерела напруги, наприклад, до полюсів батареї акумуляторів. Можна також сполучити одну обкладку з полюсом батареї, другий полюс якої заземлено, а другу обкладку конденсатора теж заземлити. Тоді на заземленій обкладці залишиться заряд, протилежний за знаком, а за модулем він дорівнюватиме заряду другої обкладки. Такий самий за модулем заряд піде в землю.

Під зарядом конденсатора розуміють абсолютне значення заряду однієї з обкладок. Він прямо пропорційний різниці потенціалів (напругі) між обкладками конденсатора. У такому випадку ємність конденсатора (на відмінну від відокремленого провідника) визначається формулою

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}.$$

Залежно від форми обкладок конденсатори бувають плоскі, циліндричні й сферичні. Як діелектрик у них використовують парафіновий папір, скло, повітря, пластмасу, кераміку тощо. Типовий плоский конденсатор складається з двох металевих пластин площею S , простір між якими розділений діелектриком товщиною d .

Виведемо формулу для ємності плоского конденсатора. Враховуючи, що $C = \frac{q}{U}$, підставимо у цю формулу вираз $U = Ed$, де E – напруженість поля, створюваного двома пластинами, $E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon S}$. У результаті отримаємо $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$.

Таким чином, електроємність плоского конденсатора прямо пропорційна площі перекривання пластин і відносній діелектричній проникності діелектрика й обернено пропорційна відстані між пластинами. З формули випливає, що, зменшуючи товщину діелектрика між пластинами або збільшуючи площу перекривання пластин, можна дістати конденсатор більшої ємності.

Відповідно можна вивести формули для ємності конденсаторів інших форм. Так, ємність сферичного конденсатора обчислюється за формулою $C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon rR}{R-r}$, де r та R – радіуси внутрішньої та зовнішньої сфер (у випадку відокремленої кулі, коли $R = \infty$, маємо $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r$).

? Дайте відповіді на запитання

1. Дайте визначення електроємності. У яких одиницях її вимірюють?
2. Між якими величинами у визначенні електроємності двох провідників $C = \frac{q}{U}$ існує функціональна залежність? Яка саме? Що є функцією, а що – аргументом?
3. Що таке конденсатор?
4. Виведіть формулу електроємності плоского конденсатора.

§ 9. Використання конденсаторів у техніці

Види конденсаторів. Конденсатори широко використовуються в електро- і радіотехніці. Залежно від технічних вимог виготовляють конденсатори різного типу. За призначенням їх поділяють на чотири види: а) нерегульовані, або постійної ємності; б) регульовані, або змінної ємності; в) електролітичні; г) варіконди, в яких електроємність залежить від напруги.

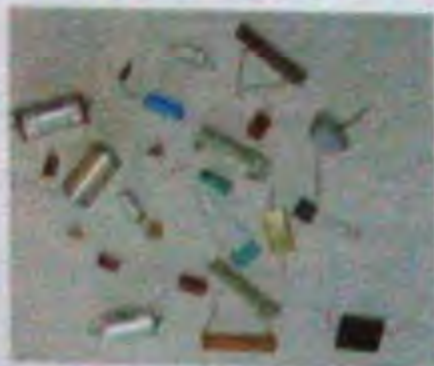
За будовою конденсатори бувають паперові, слюдяні, керамічні, електролітичні та ін. (мал. 28).

У *паперових* конденсаторах обкладками слугують дві довгі пластини тонкої металевої фольги, а діелектриком між ними є трохи ширша паперова стрічка, просочена парафіном. Їх туго згортають в рулон і вкладають у спеціальний корпус. За розміром паперові конденсатори приблизно такі, як сірникова коробка. Ємність паперових конденсаторів порядку 10 мкФ.

У *слюдяних* конденсаторах листи станіолу прокладають слюдою і сполучають так, що всі непарні листи, з'єднані разом, утворюють одну обкладку конденсатора, а парні – другу. Такі конденсатори можуть працювати під напругою від сотень до тисяч вольт. Їх ємність від 10 до 100 000 пФ.

У *керамічних* конденсаторах діелектриком є спеціальна кераміка. Обкладки керамічних конденсаторів виготовляють у вигляді шару срібла, нанесеного на поверхню кераміки і захищеного шаром лаку. Керамічні конденсатори виготовляються з електроємностями від одиниць до сотень пікофарад і розраховані на напруги від сотень до тисяч вольт.

В *електролітичних* конденсаторах діелектриком є дуже тонкий оксидний шар на поверхні алюмінію або танталу, що перебуває в контакті зі спеціальним електролітом. Ці конденсатори мають значну ємність (до кількох тисяч мікрофарад).



Мал. 28.
Конденсатори різних типів

У радіотехніці часто використовують конденсатори *змінної ємності*. За допомогою таких конденсаторів можна регулювати настройку радіоприймача на відповідну частоту.

З'єднання конденсаторів. У багатьох випадках, щоб отримати потрібну електроємність, конденсатори з'єднують у групу, яка називається *батареєю*.

Послідовним називається таке з'єднання конденсаторів, за якого негативно заряджена обкладка попереднього конденсатора з'єд-

нана з позитивно зарядженою обкладкою наступного (мал. 29). У разі послідовного з'єднання на всіх обкладках конденсаторів будуть однакові за модулем заряди, відповідно однаковими будуть і потенціали обкладок, з'єднаних між собою провідниками.

Урахувавши це, виведемо формулу для обчислення електроємності батареї послідовно з'єднаних конденсаторів. Напруга на батареї U_6 дорівнює сумі напруг на послідовно з'єднаних конденсаторах, дійсно $(\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + \dots + (\varphi_{n-1} - \varphi_n) = \varphi_1 - \varphi_n$ або $U_1 + U_2 + \dots + U_n = U_6$. Використавши співвідношення $q = CU$, дістанемо $\frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n} = \frac{q}{C_6}$. Скоротивши на q , матимемо $\frac{1}{C_6} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$.

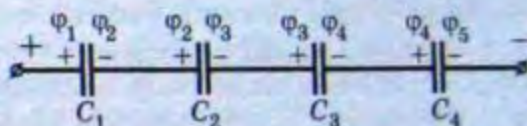
Отже, для послідовного з'єднання електроємність батареї менша за найменшу з електроємностей окремих конденсаторів.

Паралельним називається з'єднання конденсаторів, за якого всі позитивно заряджені обкладки приєднані до одного дроту, а негативно заряджені – до другого (мал. 30). У цьому разі напруги на всіх конденсаторах однакові і дорівнюють U , а заряд на батареї дорівнює сумі зарядів на окремих конденсаторах, $q_6 = q_1 + q_2 + \dots + q_n$, звідки $C_6 U = C_1 U + C_2 U + \dots + C_n U$. Після скорочення, отримуємо формулу для обчислення електроємності батареї паралельно з'єднаних конденсаторів: $C_6 = C_1 + C_2 + \dots + C_n$. Для паралельного з'єднання електроємність батареї більша, ніж найбільша з електроємностей окремих конденсаторів.

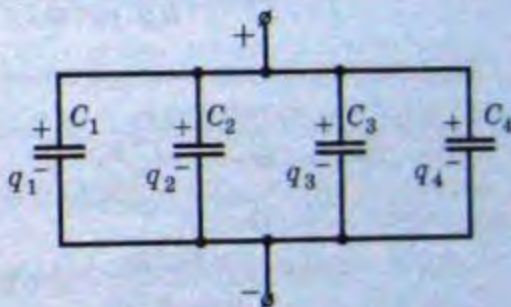
Виготовляючи конденсатори великої ємності, користуються паралельним з'єднанням, як це зображено на мал. 31. Такий спосіб з'єднання дає економію в матеріалі, оскільки заряди розміщуються з обох боків обкладок конденсаторів (крім двох крайніх обкладок). Кількість конденсаторів у такому з'єднанні на один менша, ніж пластин. Тому для розрахунку електроємності такого конденсатора користуються формулами

$$C_6 = (n-1)C, \quad C_6 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} (n-1),$$

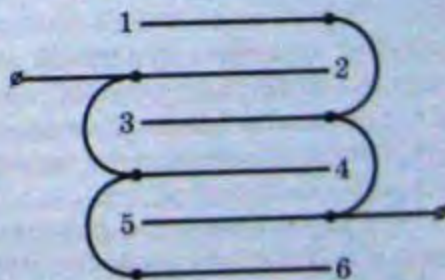
де C – електроємність конденсатора з двох пластин, n – загальна кількість пластин.



Мал. 29. Послідовне з'єднання конденсаторів



Мал. 30. Паралельне з'єднання конденсаторів



Мал. 31. Схема конденсатора великої ємності

Дайте відповіді на запитання

1. Які існують види конденсаторів?
2. Для чого конденсатори з'єднують у батареї?
3. Чого досягають, з'єднуючи конденсатори паралельно? послідовно?

Приклади розв'язування задач

Задача. Три конденсатори ємностями $C_1 = 0,2$ мкФ, $C_2 = C_3 = 0,4$ мкФ з'єднані між собою, як показано на мал. 32, і приєднані до джерела постійного струму $U_{AB} = 250$ В. Визначити загальний електричний заряд, заряд і різницю потенціалів на кожному з конденсаторів.

Дано:

$$C_1 = 0,2 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = C_3 = 0,4 \text{ мкФ}$$

$$U_{AB} = 250 \text{ В}$$

$$q - ? \quad q_1 - ?$$

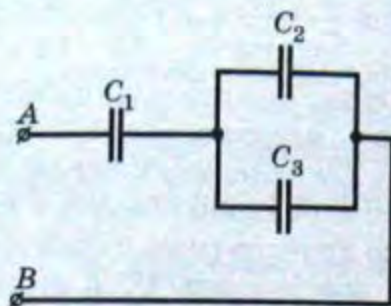
$$q_2 - ? \quad q_3 - ?$$

$$U_1 - ? \quad U_2 - ? \quad U_3 - ?$$

Розв'язання

Загальний заряд визначимо за формулою $q = CU_{AB}$, де C – ємність батареї конденсаторів, яку визначимо з формули змішаного з'єднання,

$$C = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3} = \frac{2C_1C_2}{C_1 + 2C_2}.$$



Мал. 32

Заряд, накопичений батареєю

$$q = \frac{2C_1C_2}{C_1 + C_2} U_{AB}.$$

Підставимо числові значення:

$$q = \frac{2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 250 \text{ В}}{0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} + 2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл.}$$

Заряд першого конденсатора такий же, як і загальний заряд, $q_1 = q$, а заряди на двох інших конденсаторах $q_2 = q_3 = q/2$. Отже, заряди на окремих конденсаторах: $q_1 = 4 \cdot 10^{-5}$ Кл, $q_2 = q_3 = 2 \cdot 10^{-5}$ Кл.

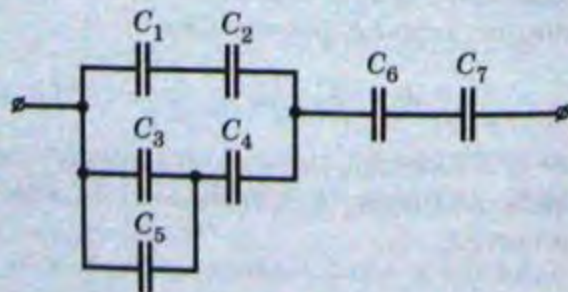
Знаючи ємність і заряд кожного конденсатора, можемо визначити різницю потенціалів на їх обкладках.

$$U_1 = \frac{4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}}{0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = 200 \text{ В}; \quad U_2 = U_3 = \frac{2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}}{0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = 50 \text{ В.}$$

Відповідь: $4 \cdot 10^{-5}$ Кл, $2 \cdot 10^{-5}$ Кл; 200 В, 50 В.

Вправа 6

1. Дві кулі, електроємності яких $C_1 = 2$ пФ і $C_2 = 3$ пФ, а відповідні заряди $q_1 = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл і $q_2 = 1 \cdot 10^{-7}$ Кл, з'єднали між собою. Визначити заряди на кулях після їх з'єднання.
2. Три конденсатори ємностями 1, 2 і 3 мкФ з'єднані послідовно і під'єднані до джерела струму напругою 220 В. Які заряди і напруги на кожному конденсаторі?
3. Визначити ємність системи конденсаторів (мал. 33).



Мал. 33

4. Конденсатор ємністю C_1 зарядили до напруги $U_1 = 500$ В. Коли цей конденсатор паралельно приєднали до незарядженого конденсатора ємністю $C_2 = 4$ мкФ, вольтметр показав $U_2 = 100$ В. Визначити ємність C_1 .
5. До повітряного конденсатора, зарядженого до напруги 210 В, приєднали паралельно такий самий незаряджений конденсатор, але із скляним діелектриком. Яку діелектричну проникність має скло, якщо на затискачах батареї встановилася напруга 30 В?
6. В яких межах може змінюватись ємність системи, що складається з двох конденсаторів, якщо ємність одного з них постійна і дорівнює 3,33 нФ, а ємність другого змінюється від 22,2 до 555,5 пФ?

§ 10. Енергія електричного поля

Енергія зарядженого конденсатора. Як і будь-яка система заряджених тіл, конденсатор має енергію. Для того щоб зарядити конденсатор, потрібно виконати роботу, що витрачається на розділення позитивних і негативних зарядів. Згідно із законом збереження енергії ця робота дорівнює енергії конденсатора $A = W_{\text{ел}}$.

Як відомо, робота сил електричного поля по переміщенню заряду на певну відстань дорівнює $A = qU$, якщо напруга постійна ($U = \text{const}$). У випадку заряджання конденсатора напруга на його обкладках зростає від нуля до U , і, обчислюючи роботу поля, у цьому разі слід використовувати її середнє значення $A = qU_{\text{ср}} = q \frac{U}{2}$. Відповідно енергія зарядженого конденсатора $W_{\text{ел}} = q \frac{U}{2}$.

Оскільки $q = CU$, то матимемо ще дві формули для обчислення енергії конденсатора: $W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$ та $W_{\text{ел}} = \frac{q^2}{2C}$.

Енергію зарядженого конденсатора можна змінювати і після його відключення від електричного кола. При цьому заряд конденсатора залишається сталим. Наприклад, якщо розсунути обкладки ізолюваного конденсатора, його електроємність зменшиться. Як видно з формули $W_{\text{ел}} = \frac{q^2}{2C}$,

коли $q = \text{const}$, а C зменшується, енергія конденсатора зростає. Такого висновку можна дійти й іншим шляхом. Розсуваючи різнойменно заряджені обкладки конденсатора, зовнішні сили виконують роботу проти сил електростатичного притягання. За законом збереження енергії, робота зовнішніх сил збільшує енергію системи. Якщо ж виймати пластинку діелектрика з простору між обкладками конденсатора, відключеного від джерела напруги, то зовнішні сили також виконуватимуть роботу проти сил притягання між вільними зарядами на обкладках конденсатора і поляризаційними зарядами на поверхні діелектрика. За законом збереження енергії, робота цих сил витрачається на збільшення енергії системи.

Довгий час питання про локалізацію енергії зарядженого тіла залишалось не з'ясованим. Зокрема, вважалось, що ця енергія зосереджена там, де й заряд, тобто на тілі. Після праць М. Фарадея і Дж. Максвелла, які ввели в науку поняття електричного поля як матеріального носія взаємодії між зарядами, енергію зарядженого тіла почали пов'язувати не з його зарядом, а з електричним полем цього заряду. Доведемо це.

Щоб виразити енергію однорідного електричного поля через його характеристики, скористаємось формулою $W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$. Для однорідного електричного поля між обкладками плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$, враховуючи, що $U = Ed$, отримуємо $W_{\text{ел}} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} E^2 d^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2 Sd$. Добуток $Sd = V$ ви-

значає об'єм простору між обкладками конденсатора. Саме в цьому об'ємі й локалізоване електричне поле.

Отже, електрична енергія зосереджена в електричному полі.

Густина енергії електричного поля. З формули $W_{\text{ел}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2 V$ можна знайти густину енергії – енергію, що припадає на одиницю об'єму простору, в якому створено електричне поле, $w_{\text{ел}} = \frac{W_{\text{ел}}}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2$.

? Дайте відповіді на запитання

1. Доведіть, що заряджений конденсатор містить електричну енергію.
2. За якими формулами визначають електричну енергію однорідного електричного поля?
3. Що вказує на те, що електрична енергія конденсатора зосереджена в полі між його обкладками?
4. Які фізичні величини визначають густину енергії електричного поля?

Приклади розв'язування задач

Задача. Два конденсатори ємністю $C_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ Ф і $C_2 = 3 \cdot 10^{-6}$ Ф зарядили зарядами $q_1 = 10^{-4}$ Кл і $q_2 = 10^{-5}$ Кл та з'єднали паралельно. Визначити, на скільки зміниться енергія системи конденсаторів.

Дано:

$$C_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$q_1 = 10^{-4} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 10^{-5} \text{ Кл}$$

$\Delta W = ?$

Розв'язання

Енергія, зосереджена у двох конденсаторах до з'єднання в батарею, становила

$$W_1 = \frac{q_1^2}{2C_1} + \frac{q_2^2}{2C_2}.$$

Після з'єднання заряд батареї конденсаторів $Q = q_1 \pm q_2$ залежно від того, які обкладки з'єднуються – однойменні чи різнойменні. Ємність батареї $C = C_1 + C_2$.

Тоді енергія батареї конденсаторів $W_2 = \frac{Q^2}{2(C_1 + C_2)} = \frac{(q_1 \pm q_2)^2}{2(C_1 + C_2)}$, а зміна енергії

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{(q_1 \pm q_2)^2}{2(C_1 + C_2)} - \frac{q_1^2}{2C_1} - \frac{q_2^2}{2C_2}.$$

Після підстановки числових значень отримаємо

$$\Delta W_1 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Дж або } \Delta W_2 = -7 \cdot 10^{-4} \text{ Дж.}$$

Відповідь: $4 \cdot 10^{-4}$ Дж або $-7 \cdot 10^{-4}$ Дж.

Вправа 7

1. Відстань між пластинами плоского конденсатора, діелектриком якого є пропарафінений папір, дорівнює 2 мм, а напруга між пластинами становить 200 В. Визначити густину енергії поля.
2. В імпульсному фотоспаляху лампа живиться від конденсатора ємністю 800 мкФ, зарядженого до напруги 300 В. Визначити енергію і середню потужність спалаху, якщо тривалість розряджання становить 2,4 мс.
3. Визначити роботу, яку необхідно виконати, щоб збільшити відстань між пластинами плоского повітряного конденсатора на 0,4 мм. Площа кожної пластини дорівнює $2\pi \cdot 10^4$ мм², заряд – 200 нКл.
4. Плоский конденсатор ємністю $C = 60 \cdot 10^{-12}$ Ф зарядили в повітрі до потенціалу $U = 400$ В. Після занурення конденсатора в рідкий діелектрик до половини висоти його пластин енергія конденсатора зменшилась на $\Delta W = 1,2 \cdot 10^{-6}$ Дж. Визначити діелектричну проникність діелектрика.
5. Відстань між пластинами плоского повітряного конденсатора, приєднаного до джерела струму напругою 180 В, збільшують від 5 до 12 мм. Площа пластин конденсатора 175 см². Визначити роботу по розсуванню пластин у двох випадках: 1) конденсатор перед розсуванням пластин відімкнений від джерела; 2) конденсатор у процесі розсування пластин весь час під'єднаний до джерела.

Найголовніше в розділі «Електричне поле»

Електростатикою називають розділ електродинаміки, в якому вивчають властивості і взаємодію нерухомих (відносно деякої інерціальної системи відліку) заряджених частинок і тіл.

Електричний заряд має властивість дискретності, певну величину, і обов'язково існує лише на матеріальному об'єкті. Під час набуття тілом заряду виконується закон збереження електричного заряду для замкненої системи тіл. Точкові заряджені тіла взаємодіють за законом Кулона.

Електростатичне поле має силову характеристику – напруженість \vec{E} – та енергетичну характеристику – потенціал ϕ . Розрахунок складних полів у вакуумі та у середовищі можна здійснити, використавши принцип суперпозиції полів та зв'язок між E і ϕ .

Провідники і діелектрики в електростатичному полі змінюють свої електричні властивості. У провіднику, вміщеному в зовнішнє електричне поле, відбувається перерозподіл його вільних зарядів, які при цьому створюють усередині провідника внутрішнє поле, рівне за величиною і протилежне за напрямком зовнішньому. Результуюча напруженість поля всередині провідника дорівнює нулю, тобто провідник екранує зовнішнє електричне поле.

У діелектриках в електричному полі виникають процеси, які приводять до зменшення напруженості цього поля. Зміщення зарядів у молекулах неполярних діелектриків і переважна орієнтація жорстких диполів полярних речовин у напрямку поля мають однаковий наслідок: на протилежних гранях діелектрика в зовнішньому електричному полі виникають (індукуються) різнойменні заряди.

Якщо між двома зарядженими провідними пластинами помістити діелектрик, то одержимо накопичувач електричної енергії – конденсатор, електричне поле якого локалізоване між його обкладками. Поле в конденсаторі можна вважати однорідним.

РОЗДІЛ 2

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ



У попередньому розділі 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. Цей розділ присвячено законам постійного струму в металевих провідниках та інших середовищах.

§ 11. Електричний струм

Електричний струм. Ми з'ясували, що в електричному полі рухомі носії зарядів у провіднику переміщуються під дією поля, поки не вирівняються потенціали усіх точок провідника. Проте, якщо у двох точках провідника якимось чином *штучно підтримувати різні потенціали, то всередині провідника поле існуватиме*. Це поле створюватиме безперервний рух зарядів. Позитивні заряди при цьому рухаються від точок з більшим потенціалом до точок з меншим потенціалом, а негативні – навпаки. Якщо ця різниця потенціалів не змінюється з часом, у провіднику встановлюється *постійний електричний струм*.



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

Короткочасний електричний струм у провіднику можна добути, просто з'єднавши провідником два заряджених тіла, які мають різні потенціали. Струм у провіднику зникне, коли потенціали тіл зрівняються. Для тривалого струму необхідно замкнути коло з провідників, щоб заряди могли циркулювати в ньому. Крім того, у провідниках треба весь час підтримувати електричне поле, для цього використовують спеціальні пристрої – *джерела струму*. В джерелах струму постійно відбувається розділення позитивних та негативних зарядів, які зосереджуються на його *полюсах*, у результаті чого й створюється електричне поле.

Стаціонарне електричне поле. З'ясуємо особливості електричного поля, яке існує в замкнутому електричному колі, коли по ньому тече постійний електричний струм. Чим воно відрізняється від електростатичного поля, створюваного нерухомими електричними зарядами?

Як ви вже знаєте, електричне поле нерухомих зарядів є потенціальним: робота поля по замкненому контуру дорівнює нулю, його лінії напруженості є не замкненими. *Електричне поле рухомих зарядів має замкнені лінії напруженості.* Дійсно, щоб у колі існував електричний струм, необхідно, щоб це коло складалось із провідників і було замкненим. *Робота* такого поля по переміщенню заряду вздовж замкненої лінії напруженості *не дорівнює нулю.* Таким чином, електричне поле у провідниках зі струмом *не є потенціальним.* Таке поле називають *вихровим.*

Для характеризування електричного струму введено відповідні фізичні величини, зокрема *силу струму*¹ та *густину електричного струму.*



Сила струму I – фізична величина, яка характеризує швидкість перерозподілу електричного заряду в провіднику і 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, $[I] = 1 \text{ Кл/с} = 1 \text{ А}.$



Густина електричного струму j – фізична величина, яка характеризує розподіл електричного струму в провіднику. У випадку постійного струму з рівномірним розподілом струму густина струму дорівнює

$$j = \frac{I}{S},$$

де I – сила струму, S – площа перерізу провідника, перпендикулярного до напрямку руху струму.

Одиниця густини електричного струму – ампер на квадратний метр, $[j] = 1 \text{ А/м}^2.$

Робота і потужність електричного струму. Електричне поле, створюючи впорядкований рух заряджених частинок у провіднику, виконує роботу, яку прийнято називати *роботою струму.* Коротко нагадаємо відомості з курсу фізики 9 класу про роботу і потужність електричного струму.



Робота електричного струму A – фізична величина, що характеризує зміну електричної енергії струму – перехід її у інші види. У загальному випадку повна робота електричного струму у зовнішній ділянці кола визначається як $A = qU = UIt$, де q – заряд, що пройшов через поперечний переріз провідника за час t , U – електрична напруга на ділянці кола, I – сила струму в ній.

Якщо вся електрична енергія перетворюється у внутрішню енергію, тобто йде на нагрівання провідника, робота електричного струму 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 $Q = I^2 Rt$.

Одиниця роботи електричного струму – джоуль, $[Q] = 1 \text{ Дж}.$

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

¹ Термін «сила струму» виник задовго до встановлення наукових положень електродинаміки і є дещо не вдалим, оскільки ніякого відношення до «сили» він не має.



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

Потужність, що виділяється на ділянці кола, можна також визначити за формулами $P = UI$, $P = I^2 R$, $P = \frac{U^2}{R}$, де U – електрична напруга, I – сила

струму, R – електричний опір ділянки кола.

Одиниця потужності – ват, $[P] = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}$.

? Дайте відповіді на запитання

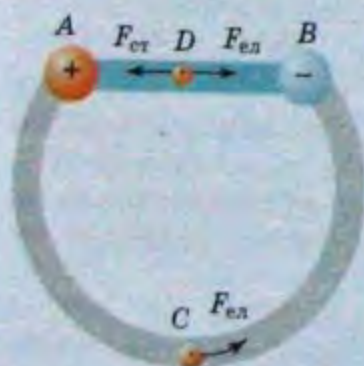
1. Що називають електричним струмом? силою струму?
2. Чим електричне поле провідника зі струмом відрізняється від електричного поля нерухомих зарядів?
3. Які умови необхідні для того, щоб існував постійний електричний струм?
4. У якій з двох ламп, потужністю 100 Вт чи 75 Вт, протікає струм більшої сили?

§ 12. Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола

Енергетична характеристика джерела струму. Як ми уже з'ясували, для тривалого існування електричного струму в колі потрібне джерело, в якому постійно відбувається розділення електричних зарядів, у результаті чого підтримується стала різниця потенціалів. Будь-яке джерело постійного струму має два полюси: полюс із високим потенціалом – позитивний – і з найнижчим потенціалом – негативний.

Під'єднаємо до полюсів джерела провідник (мал. 34). Під дією сил електричного поля позитивно заряджені частинки рухаються у напрямку від позитивного полюса джерела до негативного. Але замкнути коло, перемістивши електричні заряди із точки B у точку A , сили електричного поля не можуть, оскільки діють на них у протилежний бік. Тому всередині джерела крім електричних сил діють ще й сторонні сили, що переміщують позитивні заряди від негативного полюса батареї до позитивного і протидіють електричним силам, які прагнуть вирівняти потенціали на полюсах. Завдяки цьому заряди циркулюють по замкненому колу, створюючи струм.

На переміщення зарядів із точки B у точку A затрачається відповідна робота $A_{\text{ст}}$, яку виконують сторонні сили. Чим більший заряд переміщується, тим більша затрачається робота. Іншими словами, $A_{\text{ст}} \sim q$ або, переходячи до знака рівності, $A_{\text{ст}} = \varepsilon q$, де ε – постійний коефіцієнт пропор-



Мал. 34. Циркуляція заряджених частинок по замкненому колу з джерелом струму

ційності, що характеризує відповідне джерело і називається *електрорушійною силою джерела*¹ (скорочено ЕРС).



Електрорушійна сила \mathcal{E} – це фізична величина, що характеризує енергію сторонніх сил джерела струму й вимірюється роботою сторонніх сил (тобто сил неелектростатичного походження), виконаною при переміщенні одиничного позитивного електричного заряду, $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$.

Одиниця електрорушійної сили – вольт, $[\mathcal{E}] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В}$.

У результаті розділення всередині джерела позитивних і негативних зарядів джерело набуває запасу потенціальної енергії, яка витрачається на виконання роботи з переміщення зарядів по всьому колу. Тепер можемо сказати: ту частину замкненого кола, в якій заряди рухаються під дією електростатичної різниці потенціалів називають *зовнішньою*, а ту, в якій носії заряду рухаються під дією сторонніх сил, – *внутрішньою*. Полюси джерела струму розділяють внутрішню і зовнішню ділянки кола.

Сторонні сили забезпечують розділення різнойменно заряджених частинок в джерелі (у внутрішньому колі) і підтримують певну різницю, потенціалів на полюсах, тим самим зумовлюючи рух зарядів у зовнішньому колі. Отже, робота сторонніх сил дорівнює сумі робіт, що виконуються по переміщенню заряду на внутрішній і зовнішній ділянках кола, $A_{\text{ст}} = A_{\text{вн}} + A_{\text{зовн}}$.

Роботу, виконувану сторонніми силами по переміщенню заряду на зовнішній ділянці кола (так само, як і енергію, що виділяється в провіднику у вигляді тепла під час проходження струму), обчислюють за формулою $A_{\text{зовн}} = qU_{\text{зовн}}$, де $U_{\text{зовн}}$ – спад напруги на зовнішній ділянці кола.

Відповідно робота сторонніх сил по переміщенню заряду на внутрішній ділянці кола $A_{\text{вн}} = qU_{\text{вн}}$, де $U_{\text{вн}}$ – спад напруги на внутрішній ділянці кола.

$$\text{Таким чином, } \mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} = \frac{qU_{\text{вн}} + qU_{\text{зовн}}}{q} = U_{\text{вн}} + U_{\text{зовн}}.$$

Закон Ома для повного кола. Джерело струму, як і будь-який провідник, має певний опір, котрий називають *внутрішнім опором* джерела і позначають r на відміну від опору зовнішнього кола R . Як відомо з курсу 9 класу, згідно із законом Ома для ділянки кола сила струму I у ділянці кола, прямо пропорційна прикладеній напрузі U і обернено пропорційна опоріві R цієї ділянки, $I = \frac{U}{R}$. Формулу закону Ома записують і в такому вигляді:

$U = IR$, де добуток IR називають *спадом напруги* на даній ділянці кола. Якщо ділянка не містить джерела струму, то поняття напруги і спаду напруги збігаються.

Згідно із законом Ома для зовнішньої і внутрішньої ділянок кола, можна записати $U_{\text{вн}} = Ir$, $U_{\text{зовн}} = IR$. Тоді $\mathcal{E} = IR + Ir$, сума спадів напруг на зовнішній і внутрішній ділянках кола дорівнює ЕРС джерела.

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

Співвідношення записане у вигляді

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

називають **законом Ома для повного кола**: сила струму у замкненому електричному колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела струму і 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 користуватись певним джерелом електричної енергії, то \mathcal{E} і r можна вважати сталими величинами. Якщо змінювати опір зовнішнього кола, то відповідно змінюватиметься сила струму I в колі і спад напруги IR на зовнішній ділянці 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 при розімкненому зовнішньому колі. При цьому вольтметр показує спад напруги IR на самому собі. А оскільки опір вольтметра зазвичай дуже великий, тобто $R \gg r$, $U = IR \approx \mathcal{E}$. Чим більший опір вольтметра порівняно з внутрішнім опором джерела струму, тим точніше виміряне значення ЕРС.

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

Для джерел, де порівняно малий внутрішній опір (наприклад, у свинцевих акумуляторах $r \approx 0,1 + 0,001$ 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, які живляться від трансформаторних підстанцій, ЕРС яких вимірюється сотнями вольтів. Сила струму короткого замикання в них може досягти кількох тисяч амперів.

? Дайте відповіді на запитання

1. Чи може тривалий час існувати електричний струм у колі, якщо на рухливих носії заряду діють тільки кулонівські сили?
2. У чому полягає фізична суть поняття електрорушійної сили джерела струму? Що вона характеризує?
3. З яких частин складається замкнене коло?
4. Що таке струм короткого замикання?

Приклади розв'язування задач

Задача. До якої напруги зарядяться конденсатори C_1 та C_2 , підключені до джерела, якщо його ЕРС 2,2 В, внутрішній опір 0,4 Ом? Параметри резисторів та конденсаторів такі: $R_1 = 3$ Ом, $R_2 = 1$ Ом, $R_3 = 5$ Ом; $C_1 = 2$ мкФ, $C_2 = 3$ мкФ (мал. 35).

Дано:

$\mathcal{E} = 2,2 \text{ В}$

$r = 0,4 \text{ Ом}$

$R_1 = 3 \text{ Ом}$

$R_2 = 1 \text{ Ом}$

$R_3 = 5 \text{ Ом}$

$C_1 = 2 \text{ мкФ}$

$C_2 = 3 \text{ мкФ}$

$U_1 = ? \quad U_2 = ?$

Розв'язання

Оскільки ділянкою з конденсаторами постійний струм не проходить, то для обводу $KLNM$ можна записати

$$\mathcal{E} = Ir + IR_1 + IR_3, \text{ звідки } I = \frac{\mathcal{E}}{r + R_1 + R_3}.$$

Напруга на резисторі R_3 становить

$$U_3 = IR_3 = \frac{\mathcal{E}R_3}{r + R_1 + R_3} \quad (1).$$

Така ж напруга буде і між точками X та Y ділянки, що містить конденсатори. Оскільки конденсатори з'єднані послідовно, то обидва вони мають однаковий заряд q .

Напруги на цих конденсаторах $U_1 = \frac{q}{C_1}$ і $U_2 = \frac{q}{C_2}$ (2).

Для напруги між точками X та Y можна записати $U_3 = U_1 + U_2 = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$, звідки $q = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_3$ (3).

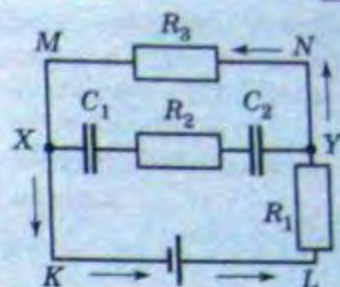
Підставивши у рівності (2) значення q та U_3 з рівностей (1) та (3), отримуємо

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_3}{R_1 + r + R_3} \mathcal{E}, \quad U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_3}{R_1 + r + R_3} \mathcal{E}.$$

Як видно, від величини опору R_2 значення U_1 та U_2 не залежать.

Після підстановки числових значень отримуємо $U_1 = 0,78 \text{ В}$; $U_2 = 0,52 \text{ В}$.

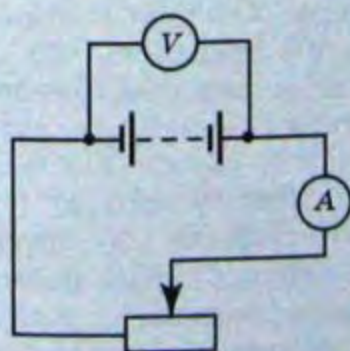
Відповідь: $0,78 \text{ В}$; $0,52 \text{ В}$.



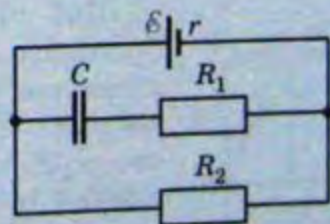
Мал. 35

Вправа 8

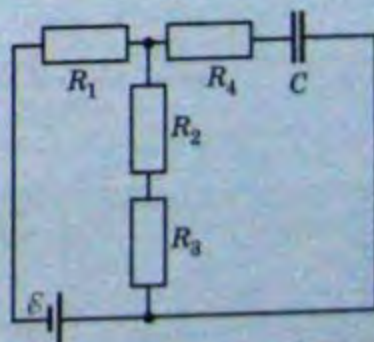
- Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму склали коло за схемою, зображеною на мал. 36. За деякого положення ковзного контакту реостата амперметр показав $0,5 \text{ А}$, а вольтметр – 4 В . Коли контакт перемістили трохи вліво, амперметр показав $0,9 \text{ А}$, а вольтметр – $3,6 \text{ В}$. Обчислити ЕРС і внутрішній опір джерела.
- Лампочки, опори яких дорівнюють 3 та 12 Ом , по черзі приєднували до деякого джерела струму, і вони споживали однакову потужність. Визначити внутрішній опір джерела і ККД кола в кожному випадку. (Вказівка: ККД кола дорівнює $\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R+r}$.)



Мал. 36



Мал. 37



Мал. 38

3. Визначити заряд на обкладках конденсатора (мал. 37), якщо ЕРС джерела \mathcal{E} , його внутрішній опір r . Опори резисторів R_1 та R_2 відомі. Ємність конденсатора C .
4. Вважаючи відомими величини, вказані на схемі (мал. 38), визначити заряд на конденсаторі. Як зміниться величина заряду, якщо R_1 та R_2 вимкнути?

§ 13. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа

Правила Кірхгофа. Розглянемо електричне коло постійного струму, в якому є точки з'єднання декількох провідників (наприклад точки a і d на мал. 39). Ці точки називають вузлами, або точками розгалуження. Відповідно електричні кола такого вигляду називають *розгалуженими*.

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

Перше правило випливає з закону збереження електричного заряду і 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.

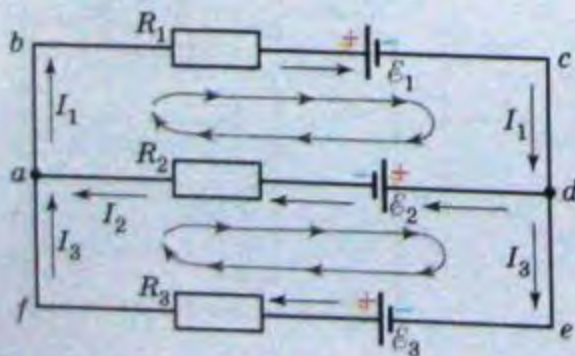
При цьому додатними вважаються струми, що прямують до точки розгалуження, від'ємними – струми, що виходять з неї.

Друге правило називають *правилом контурів*. Будь-яке складне розгалужене коло можна поділити на прості (що не мають розгалужень). Наприклад, у колі на мал. 39 є два простих 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 контуру (сума спадів напруги) дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС у цьому контурі,

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



Мал. 39. Схема розгалуженого кола

Щоб скласти рівняння, скориставшись другим правилом, треба, по-перше, у складному електричному колі виділити довільні замкнуті контури, по-друге, умовно вибрати певний напрям обходу контуру (за годинниковою стрілкою або проти годинникової стрілки). При цьому струм вважають додатним, якщо його напрям збігається з вибраним напрямом обходу контуру; додатни-

ми вважають також ті ЕРС, що підвищують потенціал, у напрямі обходу контуру, тобто коли напрям обходу збігається з переходом від від'ємного полюса джерела струму до додатного, в супротивному випадку ЕРС цього джерела буде від'ємною.

Наприклад, для кола, зображеного на мал. 39, система рівнянь для визначення трьох невідомих струмів I_1 , I_2 і I_3 має такий вигляд:

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

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

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3.$$

Послідовне і паралельне з'єднання провідників. З курсу фізики 9 класу нам відомі співвідношення між струмами і напругами на ділянках кола з послідовним (мал. 40) і паралельним (мал. 41) з'єднанням провідників. Пригадаємо їх.

Для послідовного з'єднання провідників виконуються такі співвідношення:

1) сила струму в усіх провідниках однакова, $I = I_1 = I_2$;

2) напруга на всьому з'єднанні дорівнює сумі спадів напруг на кожному провіднику, $U = U_1 + U_2$;

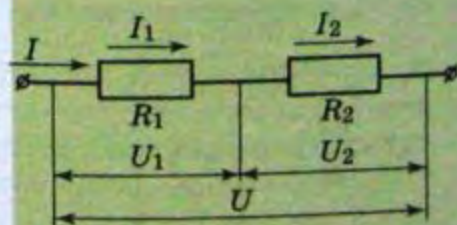
3) напруга на кожному провіднику прямо пропорційна його опорі,

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

4) загальний опір з'єднання дорівнює сумі опорів кожного провідника, $R = R_1 + R_2$.

У випадку з'єднання N провідників їх загальний опір

$$R = \sum_{i=1}^N R_i.$$



Мал. 40. Послідовне з'єднання провідників

Для паралельного з'єднання провідників виконуються такі співвідношення:

1) спади напруг на окремих провідниках і на всьому з'єднанні однакові, $U = U_1 = U_2$;

2) сила струму до розгалуження дорівнює сумі струмів у кожному провіднику, $I = I_1 + I_2$;

3) сила струму в окремому провіднику обернено пропорційна його опорі,

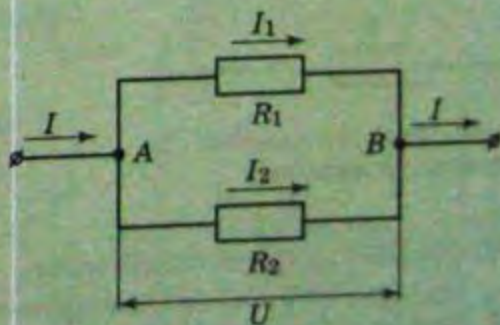
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1};$$

4) величина, обернена до загального опорі з'єднання, дорівнює сумі обернених величин опорів кожного провідника,

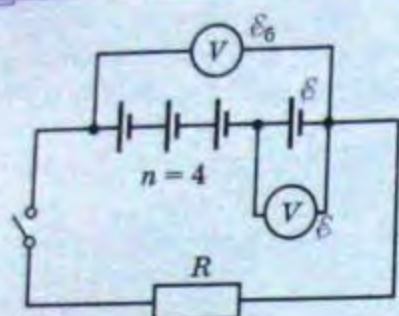
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

У випадку з'єднання N провідників

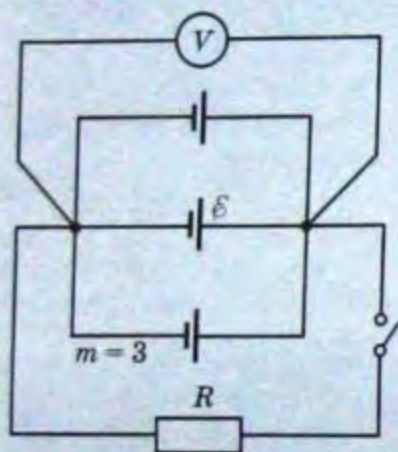
$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}.$$



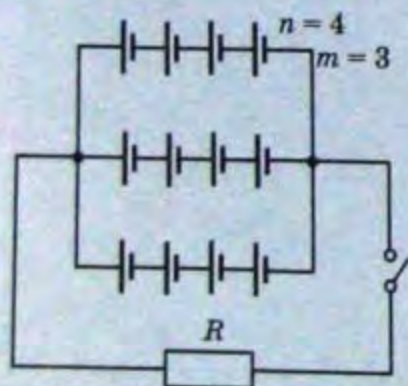
Мал. 41. Паралельне з'єднання провідників



Мал. 42. Електричне коло з послідовним з'єднанням джерел струму у батарею



Мал. 43. Паралельне з'єднання джерел струму у батарею



Мал. 44. Мішане з'єднання елементів живлення

Дані співвідношення легко отримуються із правил Кірхгофа. Можете самостійно їх довести.

Послідовне і паралельне з'єднання джерел струму. На практиці однакові джерела струму з'єднують у батарею.

У разі *послідовного з'єднання джерел струму у батарею* позитивний полюс попереднього джерела з'єднують з негативним полюсом наступного (мал. 42). ЕРС батареї дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС елементів, $\varepsilon_6 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots$.

Закон Ома для всього кола з послідовним з'єднанням однакових елементів має вигляд

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

де n – кількість елементів, ε – ЕРС одного елемента, r – внутрішній опір одного елемента.

У разі *паралельного з'єднання джерел струму у батарею* всі їх позитивні полюси приєднують до однієї клеми, а негативні – до другої (мал. 43).

У цьому випадку заряди, які проходять через один елемент живлення, не потрапляють в інші, тобто ЕРС батареї дорівнює ЕРС одного елемента. Закон Ома для кола з однаковими паралельно з'єднаними елементами має вигляд

$$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{m}},$$

де m – кількість елементів, ε – ЕРС одного елемента, r – внутрішній опір одного елемента.

Мішане з'єднання елементів зображено на мал. 44.

Закон Ома для кола у цьому випадку має вигляд

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

? Дайте відповіді на запитання

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 значення ЕРС в контурах вважають додатними, а які – від'ємними?

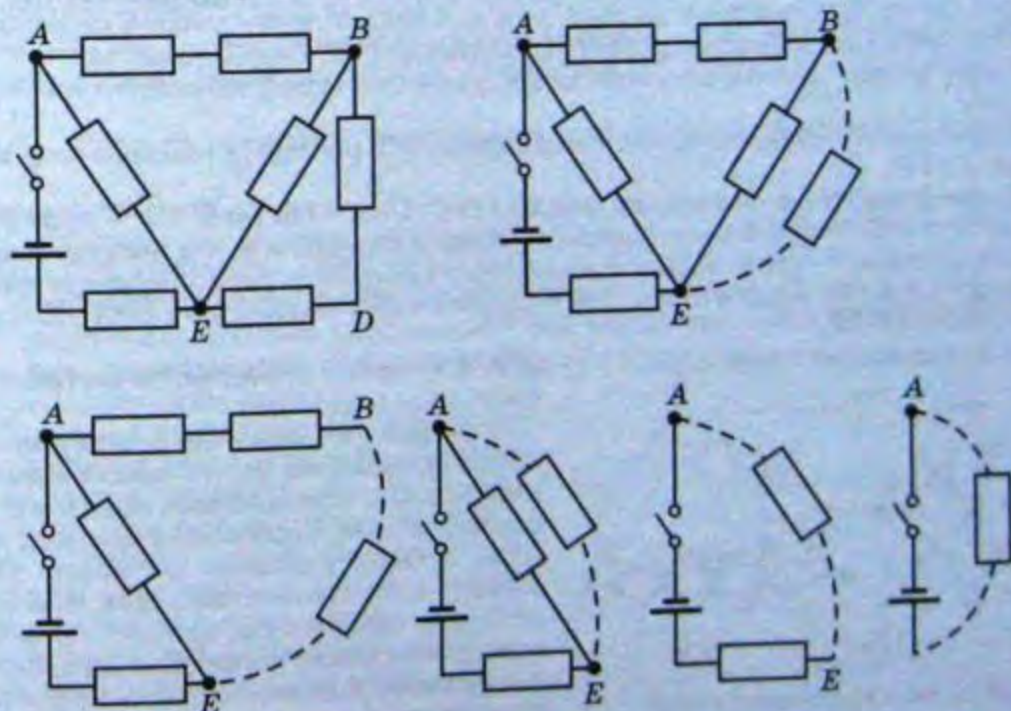
5. Якщо в ході розв'язування задачі отримано від'ємне значення сили струму, то що це означає?
6. Як визначається ЕРС батареї однакових послідовно з'єднаних джерел струму?

Загальні рекомендації до розв'язування задач

Розв'язування задач на обчислення опорів складних з'єднань провідників треба починати з аналізу схеми і відшукування в ній якихось двох або більше провідників, з'єднаних один з одним послідовно чи паралельно. Якщо в схемі вдалося відшукати ділянку з такими провідниками, то її замінюють одним провідником, опір якого еквівалентний цим кільком і може бути легко підрахований за простою формулою. У результаті дістають простішу схему. Повторюють цей прийом доти, поки не залишиться лише один провідник, опір якого еквівалентний опору всього кола. Хід такого спрощення показано на мал. 45. Після визначення еквівалентного опору можна визначити силу струму в нерозгалуженій частині кола, якщо задано напругу, підведену до схеми.

Часто в задачах треба визначити розподіл струмів в окремих вітках і напруг на ділянках кола. Для цього потрібно розгорнути найпростішу (останню) схему мал. 45 у вихідну і, переходячи в зворотному напрямі від однієї схеми до іншої, визначити за законами послідовного і паралельного з'єднань розподіл струмів між вітками і напруг на ділянках і окремих елементах кола.

Якщо у складній схемі не вдається виявити ні послідовно, ні паралельно з'єднаних провідників, для знаходження загального опору кола можна скористатися двома властивостями електричного кола: 1) У будь-якому колі точки, що мають однакові потенціали, можна сполучити у вузол або роз'єднати. Від цього не зміняться опір всього кола і сила струму в окремих ділянках, оскільки струм між точками з однаковими потенціалами не проходить, проте такі зміни схеми часто істотно спрощують розрахунки. 2) Робота по переміщенню одиничного заряду з однієї точки однорідного кола в іншу не залежить від опору провідників, по яких переміщуються 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 і кінцевою точками.



Мал. 45. Обчислення загального опору складного з'єднання шляхом послідовних спрощень

ми, $\varphi_1 - \varphi_2 = \sum U_i = \sum I_i R_i = U_0$, де I_i і R_i – сили струму і опори окремих ділянок кола. Але це твердження правильне лише тоді, коли на носії заряду діють тільки електричні сили і на ділянці немає джерел електрорушійної сили.

Відшукування точок з однаковими потенціалами полегшується встановленням 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 другої. В 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 (поздовжня площина симетрії), то точки з однаковими потенціалами лежать на кінцях симетричних провідників, оскільки через 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 всі точки, які лежать на перетині цієї осі (площини) з провідниками. Це впливає з того, що робота електричних сил по переміщенню заряджених частинок не залежить від траєкторії руху.

Відшукавши на схемі точки з однаковими потенціалами, треба сполучити їх (якщо вони були роз'єднані) або роз'єднати (якщо точки були сполучені), після чого дістаємо еквівалентну схему, яка складається з послідовно і паралельно з'єднаних провідників.

Наприклад, необхідно визначити опір ділянки кола між точками A і E на мал. 46, 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. Внаслідок 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, одержимо схему, еквівалентну вихідній (мал. 46, б).

Розв'язуючи задачі на закони постійного струму в складних електричних колах, важливо правильно враховувати співвідношення між знаками електрорушійних сил, що діють в колі, та напрямками струмів. Якщо ЕРС створює струм того ж напрямку, що й струм, який проходить по колу, то її беруть із знаком плюс. Якщо ж джерело ЕРС увімкнено так, що струм від цього джерела протилежний до напрямку струму у зовнішньому колі, то у формулі перед значенням цієї ЕРС треба ставити знак мінус.

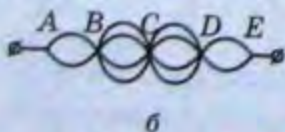
Слід розрізняти поняття напруги та спаду напруги. Напруга відрізняється від спаду напруги на тих ділянках кола, де діють сторонні сили. У цьому випадку до роботи сил електричного поля додається робота сторонніх сил з відповідним знаком.

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

а) Для ділянки кола, яка не містить джерела ЕРС, різниця потенціалів на кінцях ділянки $U = IR$.

б) Для ділянки кола, яка містить джерело ЕРС, $U = \mathcal{E} - IR$. 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 $U = \mathcal{E} + IR$.

в) Для замкненого кола $\mathcal{E} = I(R + r)$, де R та r – опори зовнішньої та внутрішньої ділянок замкненого кола.



Мал. 46. Симетрична схема з'єднання провідників (а) та її еквівалентна схема (б)

У процесі проведення розрахунку параметрів складних кіл, коли в колах немає точок з однаковими потенціалами, що дало б змогу спростити коло, і особливо у випадку, коли в колах є кілька з'єднаних між собою джерел струму, користуються законами 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 алгебра-

ічною сумою сил струмів, створюваних у цій вітці кожним джерелом окремо, так, ніби це джерело є єдиним у цьому колі. Розв'язання задачі зводиться до того, щоб визначити сили струму від кожного джерела окремо і потім визначити їх алгебраїчну суму.

Суть методу вузлових потенціалів полягає в тому, що 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 $(k - 1)$ рівняння за формулою закону Ома для ділянки кола (тобто виразити всі сили струмів у колі через вузлові потенціали). До одержаних рівнянь приписати рівняння першого закону Кірхгофа для вузлів і розв'язати отриману 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 вітці, яка входить до складу двох суміжних контурів, проходять два контурні струми, з яких один є струмом одного з суміжних контурів, а другий – другого. Справжній струм в розглядуваній вітці визначається як сума або різниця цих двох струмів залежно від їх відносного напрямку.

Якщо в складному колі опори R_1 , R_2 і R_3 утворюють замкнутий трикутник (мал. 47, а), то для визначення еквівалентного опору можна застосувати метод переходу від трикутника до еквівалентної зірки. Задача зводиться до заміни 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. 47, б), причому

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

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

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

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

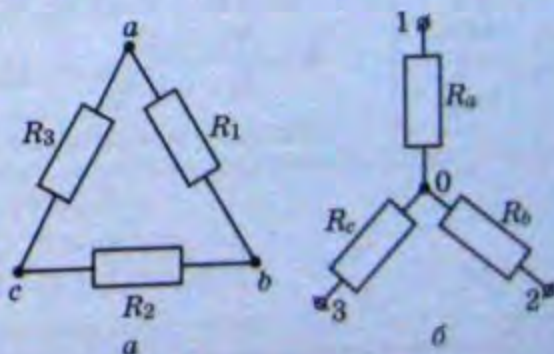
$$P = \frac{U^2}{R}. \text{ Нарешті, потужність, яку розвиває джерело електричної енергії, визначають}$$

за формулою $P = \mathcal{E}I$.

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

$$Q = IUt \text{ і } Q = \frac{U^2}{R} t. \text{ Формула ж } Q = I^2 R t$$



Мал. 47. Схеми з'єднання провідників трикутником (а) та зіркою (б)

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 у 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 $Q = I^2 R t$.

Приклади розв'язування задач

Задача 1. У схемі, наведеній на мал. 48, а, $R_1 = 3 \text{ Ом}$, $R_2 = 9 \text{ Ом}$, $R_3 = R_4 = 6 \text{ Ом}$, $R_5 = 4 \text{ Ом}$, $R_6 = 6 \text{ Ом}$. Визначити загальний 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. 48, б). Тепер обчислення опору кола зводиться до знаходження опору паралельного і послідовного з'єднання провідників і не становить труднощів:

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

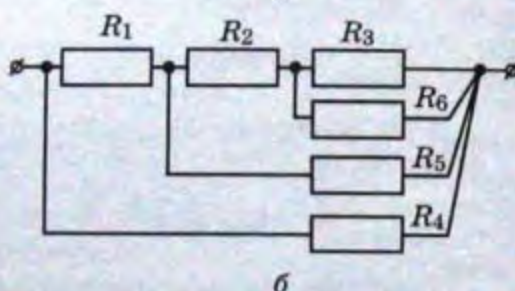
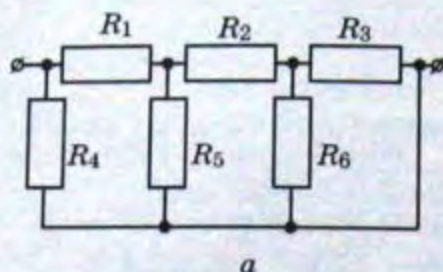
$$R_{2-3-6} = R_2 + R_{3-6}, \quad R_{2-3-6} = 12 \text{ Ом};$$

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

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

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

Відповідь: 3 Ом.



Мал. 48.

а – до умови задачі;
б – еквівалентна схема

Задача 2. Визначити сили струмів в резисторах R_1 , R_2 , R_3 (мал. 49, а), якщо $R_1 = 16 \text{ Ом}$, $R_2 = 12 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $\mathcal{E}_1 = 5 \text{ В}$, $r_1 = 4 \text{ Ом}$, $\mathcal{E}_2 = 6 \text{ В}$, $r_2 = 3 \text{ Ом}$.

Дано:

$$R_1 = 16 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 12 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 10 \text{ Ом}$$

$$\mathcal{E}_1 = 5 \text{ В}$$

$$r_1 = 4 \text{ Ом}$$

$$\mathcal{E}_2 = 6 \text{ В}$$

$$r_2 = 3 \text{ Ом}$$

Розв'язання

Скориставшись методом суперпозиції, вважатимемо, що ЕРС другої батареї дорівнює нулю, і визначимо розподіл струмів, зумовлений першою батареєю (мал. 49, б).

Замінімо опори R_2 , R_3 та r_2 еквівалентним опором

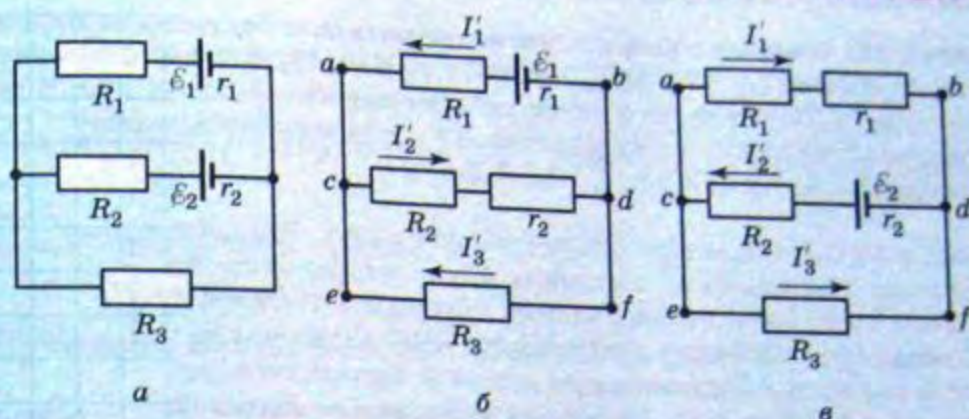
$$R' = \frac{(R_2 + r_2)R_3}{R_2 + r_2 + R_3}, \quad R' = 6 \text{ Ом}. \quad \text{Тоді } I'_1 = \frac{\mathcal{E}_1}{R' + R_1 + r_1}, \quad I'_1 \approx 0,192 \text{ А}.$$

Напруга між точками с і d дорівнює

$$U_{cd} = \mathcal{E}_1 - I'_1(r_1 + R_1), \quad U_{cd} = 1,15 \text{ В}.$$

$$\text{Тоді } I'_2 = \frac{U_{cd}}{R_2 + r_2}, \quad I'_2 = 0,077 \text{ А} \text{ і } I'_3 = I'_1 - I'_2, \quad I'_3 = 0,115 \text{ А}.$$

Тепер вважатимемо, що ЕРС першої батареї дорівнює нулю і аналогічно визначимо розподіл струмів, зумовлений другою батареєю (мал. 49, в).



Мал. 49

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

Результуючий розподіл струмів у колі: $I_1 = I_1' - I_1'' = 0,1 \text{ A}$, $I_2 = I_2' - I_2'' = 0,2 \text{ A}$, $I_3 = I_3' + I_3'' = 0,3 \text{ A}$.

Відповідь: 0,1 A, 0,2 A, 0,3 A.

Задача 3. В електричному колі (мал. 50) $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 3 \text{ Ом}$, $R_5 = 2 \text{ Ом}$ і $\varphi_1 - \varphi_4 = 15 \text{ В}$. Обчислити силу струму, що проходить у кожній вітці.

Дано:

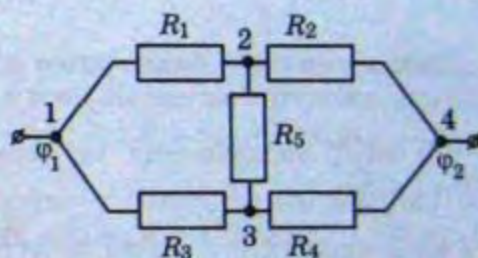
$$\begin{aligned} R_1 &= 4 \text{ Ом} \\ R_2 &= 1 \text{ Ом} \\ R_3 &= 2 \text{ Ом} \\ R_4 &= 3 \text{ Ом} \\ R_5 &= 2 \text{ Ом} \\ \varphi_1 - \varphi_4 &= 15 \text{ В} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{12} &= ? \quad I_{24} = ? \\ I_{13} &= ? \quad I_{34} = ? \\ I_{23} &= ? \end{aligned}$$

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 $\varphi_1 - \varphi_4 = 15 \text{ В}$, можна вважати, що $\varphi_1 = 15 \text{ В}$, а $\varphi_4 = 0$. Потенціали φ_2 та φ_3 не відомі.



Мал. 50

Виразимо всі сили струмів у колі через вузлові потенціали:

$$I_{12} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_1} = \frac{15 - \varphi_2}{4}, \quad I_{24} = \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R_2} = \frac{\varphi_2}{1}, \quad I_{13} = \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{R_3} = \frac{15 - \varphi_3}{2},$$

$$I_{34} = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{R_4} = \frac{\varphi_3}{3}, \quad I_{23} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_5} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}.$$

За законом Кірхгофа для сил струмів, можна записати

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

Підставивши у ці співвідношення числові значення відомих величин, отримуємо

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

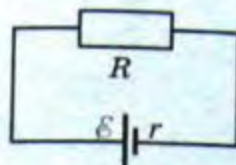
Розв'язавши цю систему з двох рівнянь, дістанемо значення невідомих потенціалів: $\varphi_2 = 4,2 \text{ В}$ та $\varphi_3 = 7,2 \text{ В}$.

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

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

Відповідь: 2,7 А; 4,2 А; 3,9 А; 2,4 А; -1,5 А.

Задача 4. ЕРС акумулятора \mathcal{E} , а внутрішній опір r . Визначити а) різницю потенціалів U на клеммах акумулятора, якщо на зовнішньому опорі (мал. 51) виділяється потужність P (пояснити неоднозначність відповіді); б) залежність ККД акумулятора і корисної потужності P від зовнішнього опору R . Накреслити графіки залежності $\eta(R)$ та $P(R)$. Визначити максимальне значення P_{\max} і встановити, для якого R воно досягається.



Мал. 51

Дано:
 \mathcal{E}, r, P, R

U - ?
 $\eta(R)$ - ?
 $P(R)$ - ?
 P_{\max} - ?
 R - ?

Розв'язання

а) На зовнішньому опорі R виділяється потужність

$$P = IU, \text{ де } U = \mathcal{E} - Ir, \text{ а } I = \frac{\mathcal{E} - U}{r}.$$

Тобто $P = \frac{\mathcal{E}U - U^2}{r}$. Розв'язавши квадратне рівняння, отримуємо

$$U_{1,2} = \frac{\mathcal{E}}{2} \pm \sqrt{\frac{\mathcal{E}^2}{4} - Pr}.$$

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 $\eta = \frac{U}{\mathcal{E}}$, де $U = \mathcal{E} - Ir$, $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, тобто

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

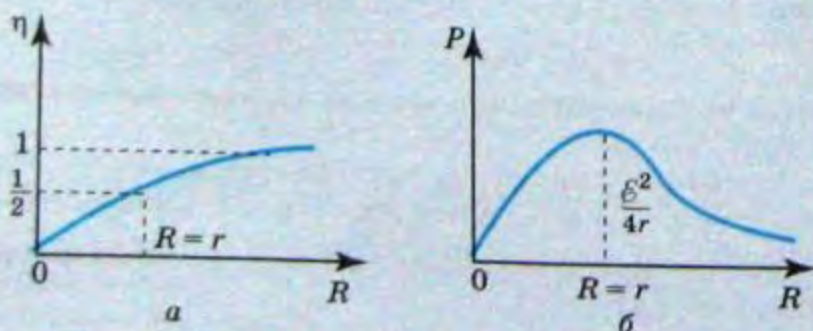
Графік залежності $\eta(R)$ наведено на мал. 52, а.

Корисна потужність $P = \frac{U^2}{R}$. Оскільки $U = \mathcal{E} - Ir$, а $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, тобто $U = \frac{\mathcal{E}R}{R+r}$,

формула для корисної потужності набуває вигляду $P = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}$.

Графік залежності $P(R)$ зображено на мал. 52, б.

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



Мал. 52. Графіки залежності $\eta(R)$ (а), $P(R)$ (б)

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

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, при $R = r$. Отже, $P_{\max} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$.

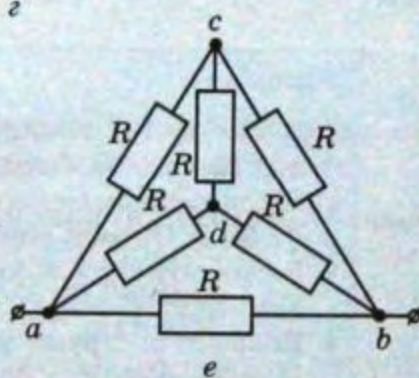
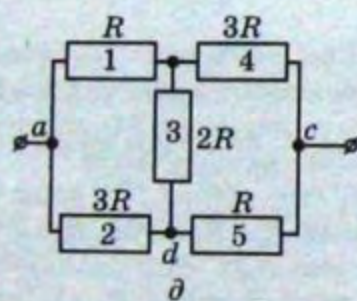
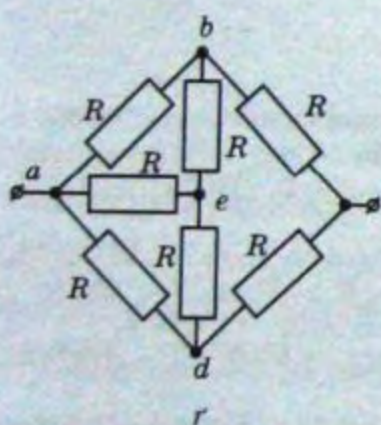
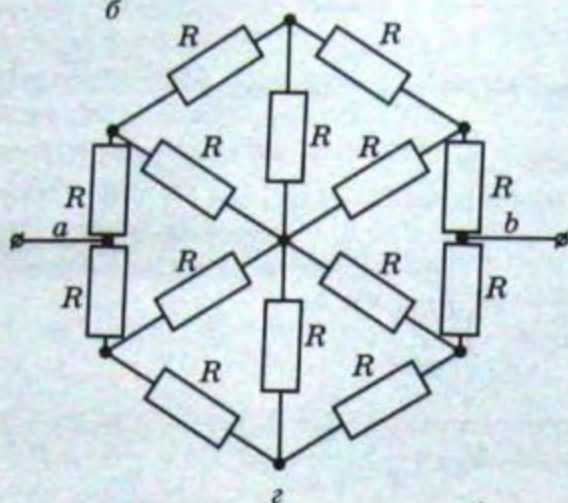
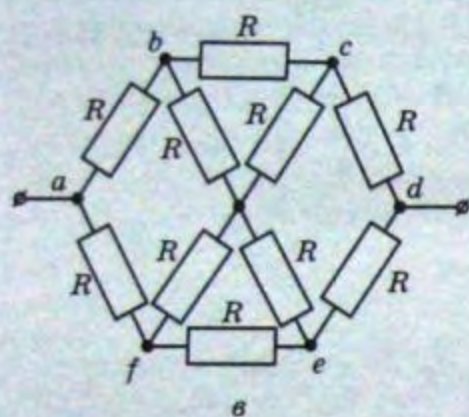
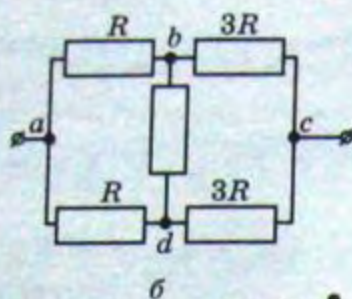
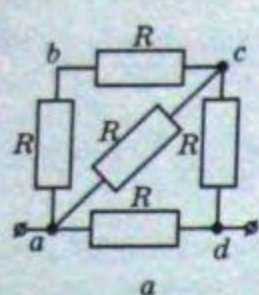
II спосіб. Корисна потужність $P = \frac{\varepsilon U - U^2}{r} = \frac{1}{r} \left[\frac{\varepsilon^2}{4} - \left(U - \frac{\varepsilon}{2} \right)^2 \right]$. З цього виразу видно, що P максимальне, коли $\left(U - \frac{\varepsilon}{2} \right)^2 = 0$, тобто коли $U = \frac{\varepsilon}{2}$. При цьому $P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$,

$$\text{а } R_{\max} = \frac{U^2}{P_{\max}} = \frac{\varepsilon^2}{4 \left(\frac{\varepsilon^2}{4r} \right)} = r.$$

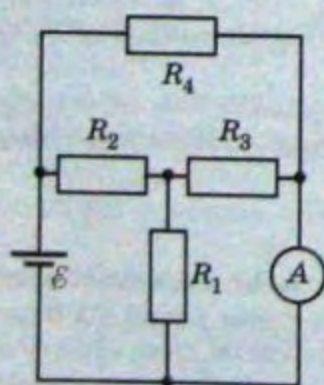
Відповідь: $U_{1,2} = \frac{\varepsilon}{2} \pm \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{4} - Pr}$; $\eta = \frac{R}{R+r}$; $P = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}$; $P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$; $R_{\max} = r$.

Вправа 9

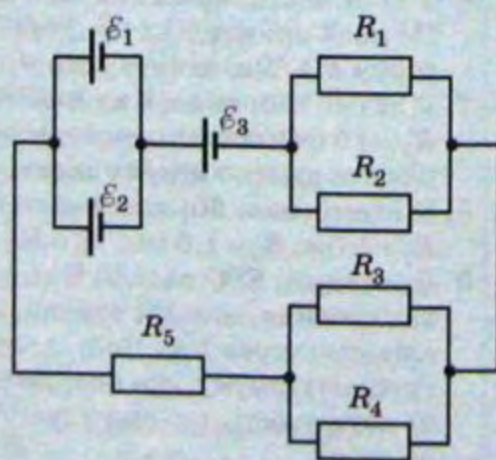
1. Визначити загальний опір ділянки кола, у кожному з випадків, зображених на мал. 53. Опір кожного провідника $R = 1$ Ом.
2. Що покаже амперметр у схемі (мал. 54), якщо $R_1 = R_2 = R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 15$ Ом, $\varepsilon = 30$ В. Опором амперметра знехтувати.
3. Визначити силу струму I в колі (мал. 55), якщо у кожного елемента ЕРС $2,2$ В, а внутрішній опір 20 мОм. $R_1 = R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 6$ Ом, $R_4 = 4$ Ом та $R_5 = 0,9$ Ом.
4. Визначити струми у ділянках кола (мал. 56), якщо $\varepsilon_1 = 27$ В, $\varepsilon_2 = 30$ В, $R_1 = 30$ мОм, $R_2 = 50$ мОм, $R_3 = R_4 = R_5 = 8$ Ом, $R_6 = 1,97$ Ом, $R_7 = 2,95$ Ом, $R_8 = 12$ Ом, $R_9 = 1,2$ Ом.
5. У колі, зображеному на мал. 57, $\varepsilon_1 = 2$ В, $\varepsilon_2 = 1$ В, $r_1 = 1$ Ом, $r_2 = 0,5$ Ом, $R = 0,5$ Ом. Визначити розподіл струмів.
6. У колі, зображеному на мал. 58, $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 40$ Ом, $R_4 = 20$ Ом. До кола прикладена напруга $U = 60$ В. Через ділянку опором R_2 проходить струм 4 А. Визначити опір R_3 .
7. У схемі, зображеній на мал. 59, $\varepsilon_1 = 2$ В, $\varepsilon_2 = 2,4$ В, $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 15$ Ом. Визначити силу струму для кожної ділянки кола. Внутрішнім опором джерел струму знехтувати.
8. У схемі (мал. 60) визначити всі сили струмів, якщо $\varepsilon = 1,5$ В, $r = 0,1$ Ом, $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 1,6$ Ом, $R_3 = R_4 = 2$ Ом, $R_5 = 1,2$ Ом.
9. До батареї, ЕРС якої 50 В та внутрішній опір 5 Ом, під'єднано зовнішнє навантаження, яке дає можливість змінювати струм у колі від 0 до 10 А поспідовно через 1 А. Побудувати 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.



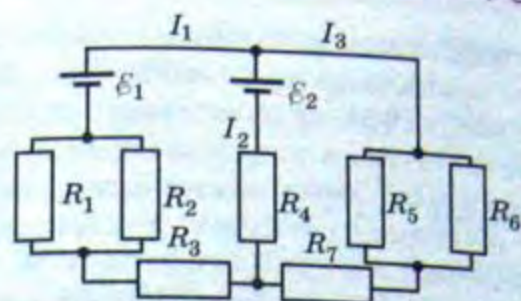
Мал. 53



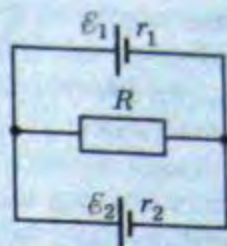
Мал. 54



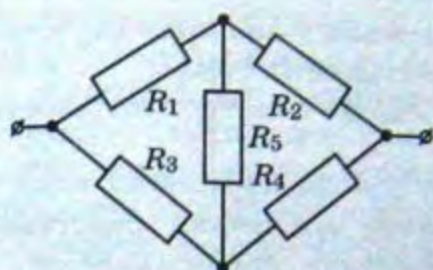
Мал. 55



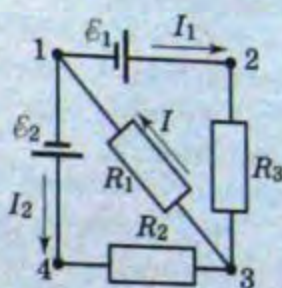
Мал. 56



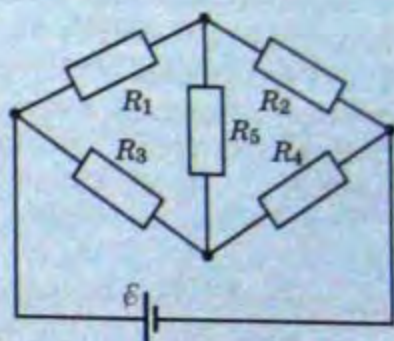
Мал. 57



Мал. 58



Мал. 59



Мал. 60

§ 14. Електричний струм у металах

Класична та квантова теорії провідності металів. Численні експерименти з електрики, виконані різними вченими у XIX–XX ст., дали багатий матеріал для створення науково обґрунтованої теорії електричної провідності металів. Вона дістала назву *класичної електронної теорії електропровідності металів*. Її основи були закладені німецьким фізиком Паулем Друде і розвинуті нідерландським фізиком Гендріком Лоренцем, тому цю теорію інколи називають теорією Друде–Лоренца.

Класична електронна теорія спирається на кілька фундаментальних припущень, а саме:

- ♦ Усі метали мають кристалічну будову.
- ♦ Простір між вузлами кристалічної ґратки заповнений електронним газом. Так називають сукупність вільних електронів (електронів провідності), що втратили зв'язки з атомами, яким вони належали.
- ♦ У середньому кожен атом металу втрачає один електрон. Іншими словами, концентрація електронів провідності в металах дорівнює кількості атомів в одиниці об'єму металу, $n_e = n_a$.
- ♦ До електронного газу в металах застосовні всі закони молекулярно-кінетичної теорії, тобто електронний газ розглядається як ідеальний газ.
- ♦ Рух вільних електронів у металі підпорядковується класичним законами механіки.
- ♦ Під час зіткнень 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-таки вдалося пояснити основні закони проходження електричного струму у металах.

Утруднення класичної електронної теорії були подолані у квантовій теорії провідності твердих тіл. Багато працювали над створенням цієї теорії німецький фізик А. Зоммерфельд (1868–1951) та радянський учений Я. І. Френкель (1894–1952). Оскільки із поняттями квантової фізики ми детальніше ознайомимось у кінці нашого курсу, зараз обмежимося лише деякими положеннями квантової теорії провідності металів. У квантовій теорії, на відміну від класичної, вважають, що:

- ♦ енергія електронів змінюється певними порціями, тобто електрони можуть мати лише певні «дозволені» значення енергій;
- ♦ середня кінетична енергія електронного газу з наближенням до абсолютного нуля не залежить від температури;
- ♦ рух електронів у твердому тілі не є рухом частинок у звичайному, класичному розумінні, а являє собою поширення електронних хвиль.

Квантова теорія провідності точніше описує явище електропровідності твердих тіл, проте й вона є наближеною.

Пояснення електропровідності металів на основі класичної електронної теорії провідності. Спираючись на основні положення класичної електронної теорії розглянемо закономірності електричного струму у 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. В результаті таких зіткнень встановлюється термодинамічна рівновага між електронним газом та йонами ґратки. Згідно з класичною теорією Друде–Лоренца можна оцінити середню швидкість теплового руху електронів за формулами молекулярно-кінетичної теорії. При кімнатній температурі вона виявляється приблизно рівною 10^5 м/с. У зовнішньому електричному полі в металевому провіднику окрім теплового руху електронів виникає їх упорядкований рух. Оцінимо швидкість впорядкованого 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 всі електрони, які містяться в об'ємі $V = \bar{v} \Delta t S$, де \bar{v} – середня швидкість упорядкованого руху електронів.

Кількість електронів N у виділеному об'ємі можна визначити через їх 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, які вони переносять $q = eN = en \bar{v} \Delta t S$.

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

ки середня швидкість впорядкованого 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. Врахуємо, що $n_e = n_a$ і для міді концентрація атомів становить величину порядку 10^{29} м^{-3} .

Підставляючи значення вказаних величин, отримуємо

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

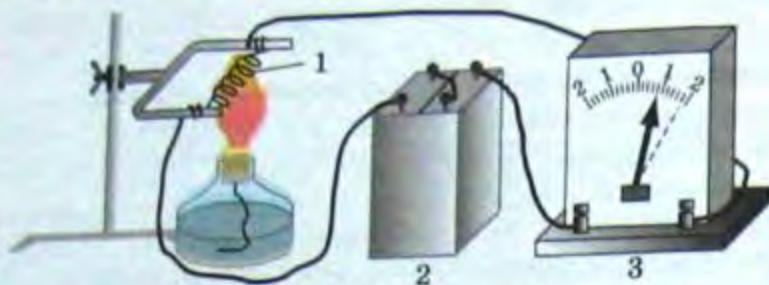
Як видно з розрахунків, швидкість упорядкованого руху електронів майже в 10^9 разів менша за швидкість їх теплового (хаотичного) руху. Але з практики відомо, що всі електроприлади, ввімкненні у коло, починають працювати одночасно відразу після замикання кола, на якій би далекій відстані від перемикача вони не перебували. Звідси випливає, що *швидкість поширення електричного струму в провіднику і швидкість впорядкованого руху електронів в ньому це не одне і те саме!*

Класична теорія провідності металів механізм проходження електричного струму у металевих провідниках пояснює таким чином. За відсутності електричного поля у провіднику електрони беруть участь у тепловому (хаотичному) русі. В 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 впорядкованого 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 фоні цього хаотичного руху відбувається повільний «дрейф» у напрямку електричного поля. Швидкість же поширення електричного поля в провіднику (як і швидкість поширення будь-якого електромагнітного випромінювання) становить близько 300 000 км/с. Отже, кожен 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. В процесі взаємодії електрони втрачають частину енергії, яку вони отримують в електричному полі. Ця енергія перетворюється у внутрішню енергію. Відповідно, під час проходження по металевому провіднику електричного струму він нагрівається. З підвищенням температури розмах коливань йонів зростає, і частішими стають співударі електронів з йонами. Тому можна стверджувати, що опір металів повинен 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 металевих провідників від його лінійних розмірів та роду металу. Ця залежність описується рівнянням $R = \rho \frac{l}{S}$, де l – довжина провідника (м), S – площа його поперечного перерізу (м^2), ρ – питомий опір металу ($\text{Ом} \cdot \text{м}^2 / \text{м}$).

З дослідів (мал. 61) відомо, що опір металів лінійно збільшується з підвищенням температури, а саме: $R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$, де R_0 – опір провідника при $T_0 = 273 \text{ К}$ (0° С), R – опір при температурі T , ΔT – різниця температур, α – температурний коефіцієнт опору.



Мал. 61. Дослід, що демонструє залежність опору провідника від температури (1 – металічна спіраль, 2 – батарея гальванічних елементів, 3 – амперметр)

У процесі нагрівання провідника ефекти від збільшення його довжини і площі перерізу взаємно компенсуються, тому опір в основному змінюється внаслідок зміни питомого опору. Залежність питомого опору металу від температури можна записати формулою $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$. Зміна питомого опору речовини характеризується сталою для цієї речовини величиною – температурним коефіцієнтом опору α . Він дорівнює відносній зміні питомого опору провідника при його нагріванні на 1 К, $\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T}$, тут ρ_0 – питомий

опір при температурі $T_0 = 273 \text{ К}$ (0° С), а ρ – питомий опір при температурі 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 із зміною температури. Такими сплавами є константан, манганін. Температурний коефіцієнт опору у манганіну майже в 400 разів менший, ніж у міді. Властивості цих матеріалів використовуються для виготовлення точних електровимірювальних приладів та еталонів опору.

У вимірювальних системах та системах автоматизації для вимірювання температури використовують термометри опору, що дозволяють вимірювати температуру з точністю до тисячних часток градуса. Термометр опору складається з платинової спіралі, намотаної на керамічний каркас. Спіраль вміщують у середовище, температуру якого треба виміряти. Знаючи опір спіралі при 0° С (R_0) та вимірюючи опір спіралі (R) у середовищі, за допомогою формули обчислюють температуру середовища. Термометрами опору можна вимірювати як дуже низькі, так і досить високі температури, які не можна виміряти, скориставшись рідинним термометром.

Надпровідність. У 1911 р. голландський фізик Гейке Камерлінг-Оннес вперше виявив зникнення електричного опору у ртуті після її охолодження до температури, нижчої за 4,12 К. У 1913 р. цей ефект було виявлено у білого олова (за температури 3,69 К) та свинцю (7,26 К). Так, наприклад, протягом трьох років зберігалось надпровідне свинцеве кільце зі струмом без джерела живлення в посудині Дьюара¹ з рідким гелієм. За цей час най-

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

чутливіші прилади не виявили будь-якого зменшення значення струму в кільці. Дане явище отримало назву **надпровідності**.

Надпровідність – властивість деяких провідників стрибкоподібно зменшувати свій електричний опір до нуля за умови охолодження нижче певної критичної температури.

Речовини у надпровідному стані мають надзвичайно цікаві властивості. Про одну з них ми вже сказали – у кільцевому провіднику у надпровідному стані сила струму може не змінюватись як завгодно довго без підтримки від джерела струму.

Другою важливою особливістю надпровідників є неможливість створення всередині речовини в надпровідному стані магнітного поля. Зовнішнє магнітне поле не проникає всередину надпровідників. І третя особливість надпровідників – надпровідний стан руйнується у магнітному полі.

За класичною теорією електропровідності надпровідний стан пояснити не вдається. Це змогла зробити лише квантова теорія надпровідності, яку розробили у 1957 р. американські вчені Джон Бардін, Леон Купер та Джон Роберт Шриффер, за що у 1972 р. одержали Нобелівську премію з фізики. Сприяло цьому і явище, відкрите у 1933 р. німецьким фізиком В. Мейсснером. Якщо циліндричний зразок помістити в поздовжнє магнітне поле і охолодити нижче за критичну температуру, то він повністю виштовхує з себе магнітний потік. Ефект Мейсснера (ефект левітації), як назвали це явище, був важливим відкриттям, оскільки завдяки цьому фізикам стало зрозуміло, що надпровідність – квантово-механічне явище. Якби надпровідність полягала лише в зникненні електричного опору, її можна було б намагатися пояснити законами класичної фізики.

Дослідження надпровідності триває і досі. У 2003 р. Нобелівська премія з фізики була присуджена В. Л. Гінсбургу, О. О. Абрикосову, Е. Дж. Леггету за роботи з теорії надпровідності і надтекучості.

Надпровідники знаходять широке практичне використання. Виділяють три великі області використання надпровідників:

- ♦ різні матеріали: плівкові провідники, надпровідні магніти та ін. (мал. 62);
- ♦ мікротехніка: мікрохвильові пристрої, надчутливі системи виявлення магнітних полів, цифрова електроніка, штучні біологічні системи;
- ♦ макротехніка: силові кабелі, електричні системи і мережі, генератори і двигуни, транспорт на магнітній подушці (мал. 63).



Мал. 62. Надпровідні матеріали



Мал. 63. Потяг на магнітній подушці

Дайте відповіді на запитання

1. Чим зумовлена провідність металів? Якими дослідями це доведено?
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 миттєво, незважаючи на малу швидкість дрейфу електронів?
4. Що таке температурний коефіцієнт опору?
5. Коли через спіраль електричної лампочки протікає більший електричний струм, в момент вмикання чи коли вона починає світитись?
6. В чому полягає явище надпровідності металів; які ефекти підтверджують його існування?

Приклади розв'язування задач

Задача. Опір виготовленої з мідної дротини обмотки електромагніту $R_1 = 200$ Ом при $t_1 = 20^\circ \text{C}$. Визначити силу струму, що проходить по обмотці при температурі $t_2 = 135^\circ \text{C}$, якщо електромагніт підключено до джерела постійного струму, ЕРС якого $\mathcal{E} = 200$ В, а внутрішній опір $r = 10$ Ом. Температурний коефіцієнт опору міді $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

Дано:

$$R_1 = 200 \text{ Ом}$$

$$t_1 = 20^\circ \text{C}$$

$$t_2 = 135^\circ \text{C}$$

$$\mathcal{E} = 200 \text{ В}$$

$$r = 10 \text{ Ом}$$

$$\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$$

$I = ?$

Розв'язання

Силу струму в обмотці визначаємо за законом Ома для повного кола, $I = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}$, де $R_2 = R_0(1 + \alpha(t_2 - t_0)) = R_0(1 + \alpha t_2)$.

Опір R_0 при $t_0 = 0^\circ \text{C}$ визначимо через відомий опір R_1 при t_1 ,

$$R_0 = \frac{R_1}{1 + \alpha t_1}.$$

$$\text{Тоді } R_2 = \frac{R_1(1 + \alpha t_2)}{1 + \alpha t_1}, \text{ а } I = \frac{\mathcal{E}(1 + \alpha t_1)}{R_1(1 + \alpha t_2) + r(1 + \alpha t_1)}.$$

Після підстановки числових значень знаходимо $I = 0,74 \text{ А}$.

Відповідь: 0,74 А.

Вправа 10

1. Опір 100-ватної електролампи, що працює під напругою 120 В, у розжареному стані у 10 разів більший, ніж у холодному. Визначити її опір у холодному стані (при $t_1 = 20^\circ \text{C}$) і середній температурний коефіцієнт опору, якщо температура розжарювання нитки $t_2 = 2000^\circ \text{C}$.
2. Якої довжини треба взяти нікеліновий провідник діаметром 0,5 мм, щоб виготовити нагрівальний прилад, який має опір 48 Ом при температурі 800°C . Температурний коефіцієнт опору нікеліну $\alpha = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$, а його питомий опір $\rho = 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
3. Мідний та графітовий стержні однакової товщини з'єднані послідовно. За якого співвідношення їх довжин опір цієї системи не буде залежати від температури?
4. На скільки відрізняється опір лінії електропередачі взимку і літом, якщо вона виготовлена із залізного дроту перерізом S . Температура змінюється від $-t$ до t . Довжина дроту при 0°C дорівнює l_0 . Як зміниться відповідь, якщо врахувати лінійне розширення дроту під час нагрівання?



§ 15. Термоелектричні явища

Робота виходу електронів з металу. У 1961 р. Я. І. 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, а розміщені глибше ядра атомів утворюють позитивно заряджений шар. Електричне поле цього подвійного шару, немов у плоскому конденсаторі, діє на вільні електрони з силою, напрямленою всередину металу.

Отже, біля поверхні металу існує «електронна хмарка», заряджена негативно (мал. 64, а). Товщина цієї хмарки є величиною одного порядку з розміром атома (10^{-10} м). При цьому метал, охоплений негативною електронною хмаркою, відносно вакууму заряджений позитивно (мал. 64, б). Позитивний потенціал внутрішньої частини металу відносно вакууму називають *внутрішнім потенціалом* ϕ_i .

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, $W = -e\phi_i$. Тому стверджують, що електрони провідності в металах перебувають у потенціальній ямі з плоским дном (мал. 65) (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 за глибину 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.

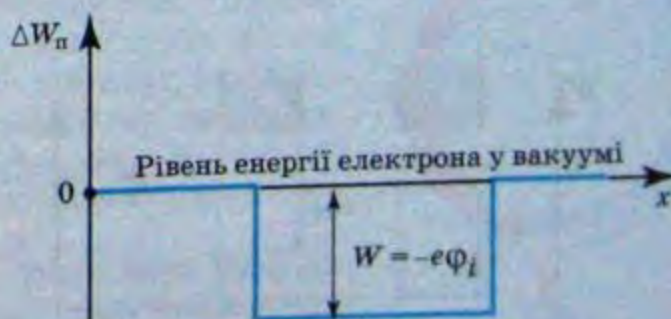


Найменша додаткова енергія, яку необхідно передати електрону провідності в металі для його виходу у вакуум, називається **роботою виходу**. Робота виходу дорівнює глибині потенціальної ями, $A_i = e\phi_i$.



Мал. 64.

а – «електронна хмарка»; б – подвійний поверхневий шар



Мал. 65. Потенціальна яма

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

Ще у 1797 р. італійський фізик Алессандро Вольта довів, що у місці контакту (дотику) двох різних металів виникає різниця потенціалів, яку тепер називають контактною. Досліджуючи різні метали, А. Вольта розмістив їх у ряд (ряд Вольти), в 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. У місці контакту двох провідників з різних металів між ними виникає контактна різниця потенціалів, величина якої залежить від хімічного складу речовини провідників та їх температури.

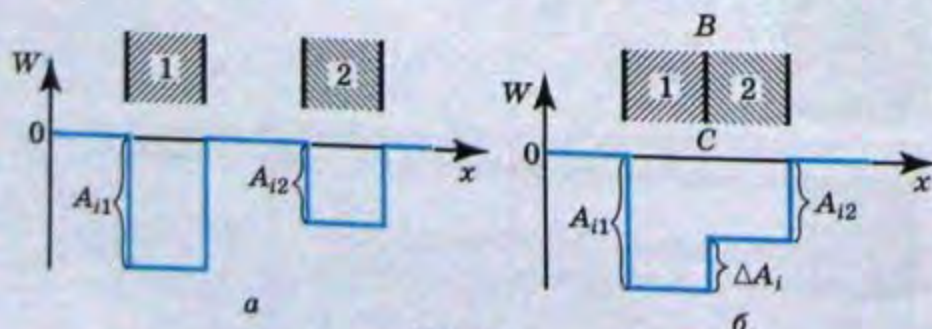
Другий. Контактна різниця потенціалів, що виникає на кінцях розімкненого кола, складеного з кількох послідовно з'єднаних металевих провідників, які перебувають при однаковій температурі, не залежить від хімічного складу проміжних провідників і дорівнює контактній різниці потенціалів крайніх провідників.

З другого закону випливає, що на кінцях розімкненого кола, складеного, наприклад, з перших п'яти металів ряду Вольти, контактна різниця потенціалів буде такою самою, як і при контакті свинцю з алюмінієм.

Причиною виникнення контактної різниці потенціалів є 1) різна робота виходу електронів з цих металів та 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 мал. 66, а).

Наблизимо ці пластинки так, щоб вони дотикались. Тоді потенціальна крива енергетичної діаграми матиме вигляд, зображений на мал. 66, б. З діаграми видно, що для переходу з металу 1 у метал 2 електрон має виконати роботу ΔA_i . Енергії теплового руху і при кімнатній температурі 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 сказаного випливає, що



Мал. 66.

а – енергетичні діаграми двох різних металів;
б – енергетична діаграма їх контакту


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 із металу 2 в метал 1. Тому потоки в обидва боки вирівнюються – встановлюється рухлива 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 Вольти випливає важливий висновок: у замкненому колі, що складається з довільного числа твердих провідників з електронним механізмом провідності й усі контакти яких перебувають при однаковій температурі, результуюча контактна різниця потенціалів дорівнює нулю. Якщо ж температури контактів будуть різні, в колі виникатиме електрорушійна сила. Вперше таке явище спостерігав у 1821 р. німецький фізик Томас Зеєбек (1770–1831).

Справді, розглянемо замкнене коло (мал. 67) з двох електронних провідників А і В з різними концентраціями електронів ($n_B > n_A$). Якщо підігріти контакт (спай) D, то в ньому додаткова кількість електронів перейде з металу В в метал А і контактна різниця потенціалів у з'єднанні D зросте. Оскільки в металі А на кінці D електронів стало більше, вони прямуватимуть до кінця С.

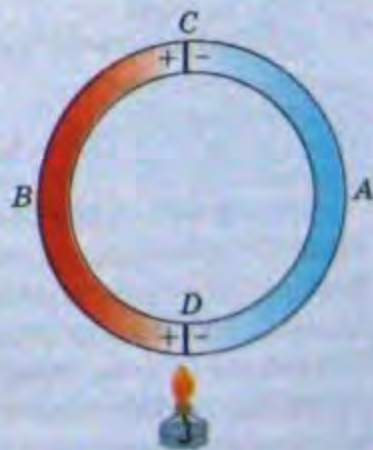
Збільшення концентрації електронів на кінці С спричинить їх перехід з металу А в метал В крізь контакт (спай) С. Звідси вони по металу В перейдуть до контакту D. Якщо температуру контакту D весь час підтримувати більшою, ніж контакту С, то по замкненому колу відбуватиметься напрямлений рух електронів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

 **Термоелектрорушійна сила (термо-ЕРС)** – це ЕРС, що виникає у 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 М. П. Авенаріус (1835–1895).

Зауважимо, що термо-ЕРС невелика і досягає для металів лише кількох сотисячних часток вольт на один градус різниці температур контактів у колі. Помітно 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



Мал. 67. Нагрівання спаю з двох провідників

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. В результаті один контакт охолоджується, інший – нагрівається.

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

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

Металеві термопари використовують для вимірювання температури.

Перші кроки щодо практичного використання явища Пельтьє було зроблено ще в 1838 р., коли російський фізик Е. Х. Ленц (1804–1865) на контакті вісмуту з 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 знаходять своє застосування у медицині, радіоелектроніці.

Піонером і лідером досліджень у галузі термоелектрики в Україні є академік НАН України Лук'ян Іванович Анатичук. Ним створено Інститут термоелектрики. 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. Л.І. Анатичук – президент цієї академії.

? Дайте відповіді на запитання

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?
6. Наведіть приклади практичного використання термоелектричних явищ.

§ 16. Струм у вакуумі та його застосування

Електричний струм у вакуумі. Найважливішими приладами в електротехніці першої половини ХХ ст. були прилади (мал. 68), в яких використовувався електричний струм у вакуумі (електронні лампи (вакуумні діоди та тріоди), електронно-променеві трубки та ін.).

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, при вакуумному плавленні та зварюванні, у вакуумних фотоелементах.

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* – пустота) – стан газу за тиску, меншого від атмосферного. Вакуум можна створити, відкачуючи газ (повітря) з посудини до тих пір, поки довжина вільного пробігу молекул (відстань, яку пролітає молекула між зіткненнями) не буде дорівнювати розмірам посудини. Таким чином, вакуум є ізолятором, оскільки не має вільних носіїв заряду.

Для створення електричного струму розмістимо у вакуумованій посудині дві металеві пластини (електроди), їх називають *K* – катод та *A* – анод. Один з цих електродів може стати джерелом вільних електронів, якщо його внутрішнім електронам надати додаткової енергії, достатньої для виконання роботи виходу з металу. Пригадаємо, таку енергію електрони провідності можуть дістати при освітленні металу (зовнішній фотоефект), нагріванні (термоелектронна емісія), під дією сильного електричного поля (автоелектронна емісія), при бомбардуванні поверхні металу потоком електронів у вакуумі (вторинна електронна емісія) тощо.

Проте електрони, вирвавшись за межі електрода, далеко від його поверхні піти не можуть, оскільки, втрачаючи електрони, електрод сам при цьому заряджається позитивно і 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 рухатись від катода до анода й у посудині виникне електричний струм.

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

Перший вакуумний діод (електронна лампа) було сконструйовано у 1904 р. англійським ученим Флемінгом (мал. 68, а). На мал. 69 наведено схему будови вакуумного діода та його умовне позначення на радіосхемах. У середині балона зі скла або металокераміки, з якого відкачано повітря, розміщено два циліндричні електроди: металевий анод (*A*) і металевий катод (*K*). Катод покривається шаром оксидів лужноземельних металів з низькою роботою виходу електронів і нагрівається тепловим випромінюванням до температури, за якої виникає термоелектронна емісія розжареної змінним струмом спіралі (*C*), розміщеної в його середині. Навколо нагрітого катода утворюється електронна хмара – хмара просторового заряду.

Якщо підключити катод до позитивного полюса батареї, а анод – до негативного, то поле усередині діода зміщуватиме електрони до катода, і струму



а



б



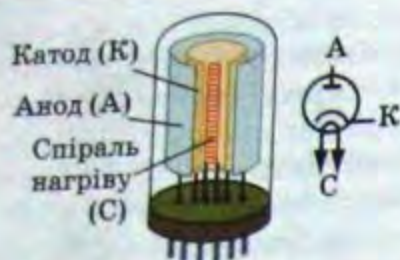
в

Мал. 68.

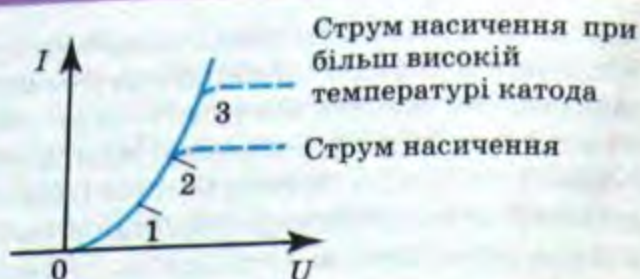
Прилади, де використовується електричний струм у вакуумі:

а – вакуумний діод Флемінга (1904 р.);
б – кінескоп телевізора (60-ті роки XX ст.);

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



Мал. 69. Будова та умовне позначення вакуумного діода



Мал. 70. Вольт-амперна характеристика вакуумного діода

не буде. Якщо ж навпаки – анод підключити до позитивного полюса, а катод до негативного – то електричне поле переміщуватиме електрони у напрямку від катода до анода (анодний струм). Таку залежність наявності струму від полярності, прикладеної до діода напруги, називають односторонньою провідністю.

Властивість односторонньої провідності використовують у випрямлячах змінного струму (коли треба перейти від змінного струму до постійного). У наш час у випрямлячах використовуються напівпровідникові діоди.

Властивості вакуумного діода, як і будь-якого приладу, відображає його вольт-амперна характеристика – залежність величини анодного струму I_a через діод від прикладеної напруги U між катодом і анодом.

Вольт-амперну характеристику вакуумного діода наведено на мал. 70. Основною причиною нелінійності вольт-амперної характеристики вакуумного діода є те, 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. Чим вища напруга між анодом і катодом, тим менший просторовий заряд електронної хмари і тим більша кількість електронів досягає анода – тим більша сила струму в колі. Якщо за деякої напруги всі електрони, що покинули катод, досягають анода, то з подальшим збільшенням напруги сила струму вже 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 досягнутий за більшої напруги між анодом і катодом, а сила струму насичення зросте.

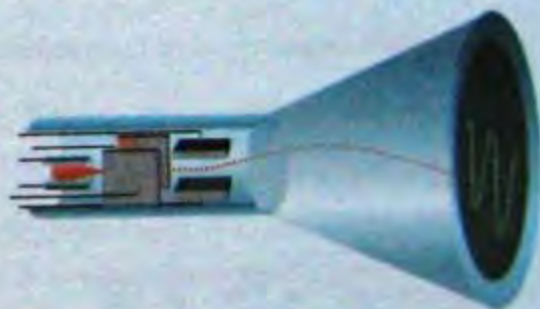
Електронні пучки та їх властивості. Рухаючись між катодом і анодом, електрони прискорюються електричним полем і набувають величезної швидкості. Робота сил поля витрачається на надання електронам кінетичної енергії, $A = \Delta W$, або $eU = \frac{mv^2}{2}$, де m – маса, e – заряд, v – швидкість руху електрона, U – прискорююча напруга (напруга між електродами). Швидкість, яку може набувати електрон, рухаючись у вакуумі, досягає 10^5 км/с і більше, наближаючись у спеціально побудованих прискорювачах до швидкості світла ($3 \cdot 10^8$ м/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, які використовуються на практиці. Наприклад:

- ◆ Електронний пучок, потрапляючи на тіла, спричинює їх нагрівання. Ця властивість використовується, зокрема, для електронного плавлення надчистих металів у вакуумі.
- ◆ Внаслідок гальмування швидких електронів, що наштовхнулися на речовину, виникає рентгенівське проміння, яке широко застосовується у медицині та техніці.
- ◆ Під дією електронних пучків деякі речовини (люмінофори) здатні світитися.
- ◆ Електронні пучки відхиляються електричним та магнітним полями.

Електронно-променева трубка. Властивості електронних пучків поширюватися прямолінійно, відхилятися в електричному або магнітному полі і викликати світіння люмінофорів використовують в *електронно-променевих трубках* (мал. 71). У вузькій частині трубки розміщено електронну гармату, що складається із катода і анода (частіше анодів декілька, розміщених один за одним). Між першим анодом і катодом створюється різниця потенціалів близько сотні вольт. Цей анод призначений для фокусування електронного пучка. На другий анод подається висока напруга (близько 1000 В) для прискорення електронів. Між анодом і екраном трубки, покритим шаром люмінофору, розміщено дві пари керувальних пластин, на які подається напруга, що відхиляє електронний промінь праворуч-ліворуч і вгору-вниз. Оскільки маса електронів пучка мала, вони майже безінерційно реагують на зміну напруги на керувальних пластинах. Тому електронно-променевої трубки широко використовують для вивчення швидкоплинних процесів. Вони є складовою частиною осцилографів, телевізорів, моніторів комп'ютерів та інших пристроїв. Електронним пучком у кінескопі телевізора керують також за допомогою магнітного поля котушок, надітих на трубку.



Мал. 71. Будова електронно-променевої трубки

? Дайте відповіді на запитання

1. Що називають вакуумом?
2. Що таке термоелектронна емісія?
3. Поясніть будову вакуумного діода. Які функції може виконувати діод?
4. Які закономірності вольт-амперної характеристики вакуумного діода?
5. Які властивості електронних променів (пучків)?
6. Що буде відбуватись з катодом електронної лампи, якщо в її балоні буде міститись незначна кількість повітря?



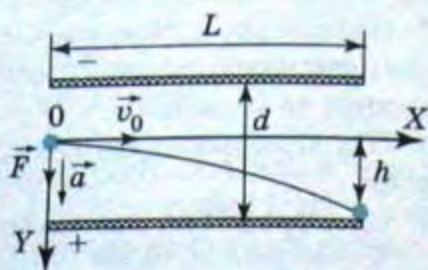
Приклади розв'язування задач

Задача. Пучок електронів з енергією¹ $W = 3000$ еВ рухається у вакуумі паралельно пластинам незарядженого конденсатора. Визначити 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:
 $W = 3000$ еВ
 $U = 600$ В
 $L = 6$ см
 $d = 3$ см
 $h = ?$

Розв'язання

На мал. 72 зображено траєкторію руху електрона у зарядженому конденсаторі.



Мал. 72

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

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

Що стосується руху вздовж осі 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 $y = \frac{at^2}{2}$.

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. Врахуємо також, що модуль напруженості $E = \frac{U}{d}$. В результаті зміщення електрона на виході з конденсатора буде дорівнювати $h = \frac{eUL^2}{4dW}$. Підставляючи 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 11

1. З нитки катода діаметром 0,16 мм і довжиною 5 см випромінюється за одиницю часу $1,5 \cdot 10^{17}$ електронів з квадратного сантиметра поверхні. Вважаючи, що до анода долітає кожен п'ятий електрон, визначити спад напруги на опорі 5 кОм, який включений в анодне коло лампи.

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

- У діоді електрон підлітає до анода, маючи швидкість 8 Мм/с. Визначити анодну напругу.
- У телевізійному кінескопі прискорююча анодна напруга дорівнює 16 кВ, а відстань від анода до екрана – 30 см. За який час електрони проходять цю відстань?
- Відстань між катодом та анодом діода дорівнює 1 мм. Скільки часу рухається електрон від катода до анода, якщо анодна напруга становить 40 В? Вважати, що рух рівноприскорений.

§ 17. Електропровідність напівпровідників

Власна і домішкова провідності напівпровідників. Як відомо з курсу фізики 9 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, Германий, Селен тощо) та деякі оксиди, сульфід, телуриди.

Питомий опір напівпровідників з підвищенням температури не зростає, як у металів, а навпаки, різко зменшується. На мал. 73 наведено залежності питомого опору від температури для напівпровідника (1) та для металу (2).

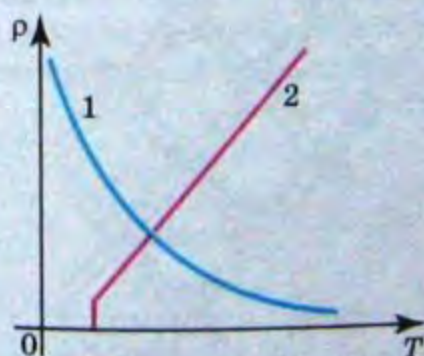
Як видно з малюнка, з наближенням до абсолютного нуля питомий опір напівпровідника різко зростає, тобто при низьких температурах T напівпровідник веде себе як діелектрик. Зі збільшенням температури питомий опір напівпровідників швидко зменшується за експоненціальним законом.

Відомі й інші властивості напівпровідників:

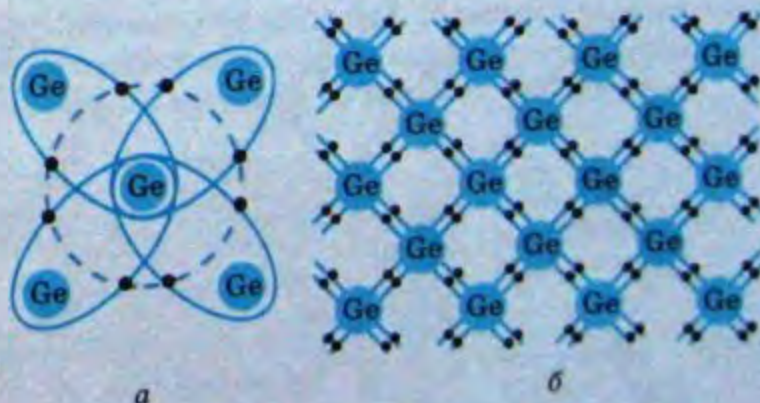
- Електропровідність напівпровідників залежить від освітленості, тобто напівпровідникам властива так звана *фотопровідність*. Напівпровідники можуть перетворювати енергію світла в електричний струм.
- Електропровідність напівпровідників можна значно збільшити введенням в них атомів деяких інших елементів (домішок).

Ці і деякі інші властивості напівпровідників були відомі досить давно, проте широко використовувати їх стали порівняно недавно.

Пояснимо властивості напівпровідників, розглянувши їхню будову на прикладі чотиривалентного елемента Германію (мал. 74, а).



Мал. 73. Залежності питомого опору від температури для напівпровідника (1) та провідника (2)



Мал. 74. Схеми будови атома Германію (а) та кристала германію (б)

На зовнішній оболонці атом Германію має 4 валентні електрони. Прагнучи заповнити зовнішню оболонку до 8 електронів, атоми вишиковуються в кристалі германію так, що кожен атом має чотирьох найближчих сусідів, які віддають йому по одному електрону (точніше, один електрон сусіднього атома стає колективним – належить обома атомам одночасно). Отже, взаємодія пари сусідніх атомів у кристалі германію здійснюється за допомогою ковалентного (парноелектронного) зв'язку (мал. 74, б).

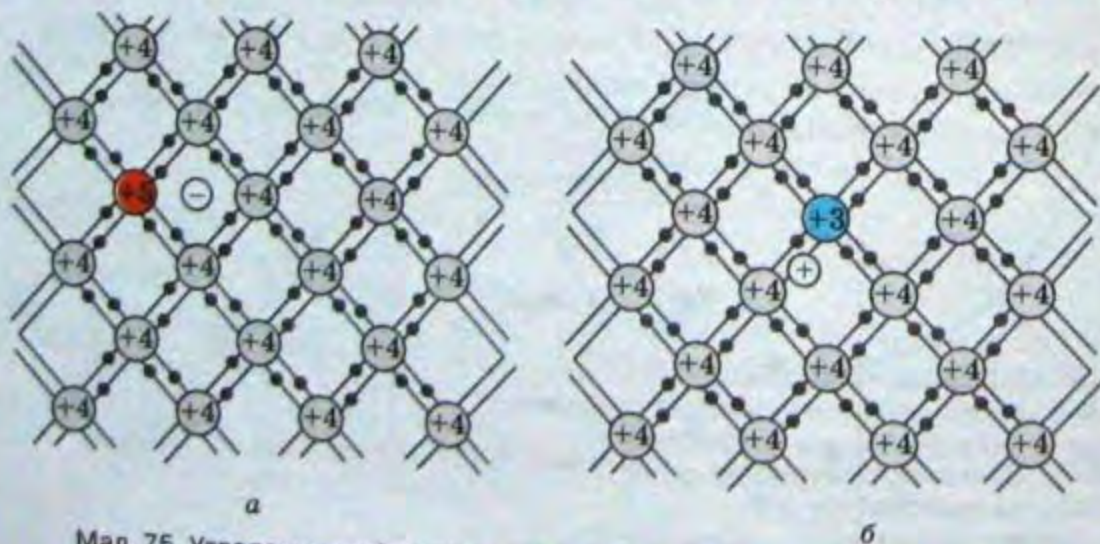
У темноті і за низьких температур усі електрони зайняті у ковалентних зв'язках. Вільних носіїв у кристалі напівпровідника немає, тому кристал не проводить струму і його опір великий. За цих умов кристал є ізолятором.

З підвищенням температури кристала (або під дією опромінення світлом, рентгенівськими променями або під впливом сильних електричних чи магнітних полів) деякі ковалентні зв'язки руйнуються. На місці кожного розірваного зв'язку утворюється вакантне місце з нестачею електрона. Така конфігурація називається *діркою*. Електрони і дірки рухаються хаотично. Електрони займають місця дірок (рекомбінують) або вивільняються, розриваючи парноелектронні зв'язки (генеруються вільні електрони і дірки). Процеси генерації та рекомбінації відбуваються безперервно.

Якщо до такого кристала прикласти напругу, то вільні електрони будуть рухатись до позитивного полюса поля. Поки діє електричне поле, розриваються одні міжатомні зв'язки – з них йдуть валентні електрони, залишаючи дірки, а розірвані міжатомні зв'язки заповнюються електронами, що звільнилися від інших міжатомних зв'язків. Створюється враження, що в напівпровіднику, крім електронів, ніби рухаються позитивно заряджені частинки – дірки, хоч насправді рух дірок зумовлюється стрибкоподібним переміщенням електронів від одного вільного місця до іншого.

Якщо діє зовнішнє електричне поле, в кристалі напівпровідника виникає *впорядковане* переміщення дірок, і до електричного струму вільних електронів (*n*-провідності) додається електричний струм, пов'язаний з переміщенням дірок (*p*-провідність).

Провідність чистих напівпровідників, що не мають ніяких домішок, називають *власною провідністю напівпровідників*. Власна провідність напів-



Мал. 75. Утворення напівпровідника *n*-типу (а) та *p*-типу провідності (б)

провідників невелика, оскільки малою є кількість вільних носіїв струму – електронів і дірок.

Дуже важлива особливість напівпровідників полягає в тому, що за наявності домішок в них поряд із власною провідністю виникає додаткова – *домішкова провідність*. Як домішки використовують атоми елементів сусідніх груп періодичної системи. Наприклад, внесемо у чотиривалентний Германій невелику кількість п'ятивалентного Арсену (мал. 75, а). Заміщуючи атом Германію у кристалі, атом Арсену віддає на утворення ковалентних зв'язків із сусідніми атомами Германію чотири електрони, а п'ятий стає вільним.

Домішки, що легко віддають електрони, а отже, збільшують кількість вільних електронів, називають *донорними домішками*. Напівпровідники з донорною провідністю мають більшу кількість електронів провідності порівняно з кількістю дірок. Їх називають *напівпровідниками n-типу*. У них електрони є основними носіями заряду, а дірки – неосновними.

Коли ж як домішку використовують Індій, атоми якого тривалентні, то характер провідності Германію теж зміниться. Але тепер для встановлення нормальних парно-електронних зв'язків із сусідами атому Індію не вистачає одного електрона. Внаслідок цього утворюється дірка. Кількість дірок у кристалі дорівнюватиме кількості атомів домішки (мал. 75, б). Домішки цього типу називають *акцепторними* (приймальними). Напівпровідники з переважанням діркової провідності над електронною називають *напівпровідниками p-типу*. Основними носіями заряду таких напівпровідників є дірки, а неосновними – електрони. Змінюючи концентрацію домішки, можна істотно змінити кількість носіїв заряду того або іншого знака, а отже, створити напівпровідники з переважачою концентрацією чи позитивно, чи негативно заряджених носіїв.

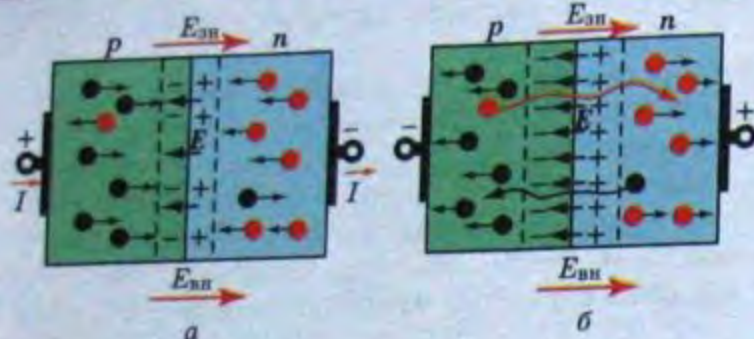
Електронно-дірковий перехід, його властивості і застосування. Цікаві явища спостерігаються в місці контакту напівпровідників *n*- і *p*-типів. Контакт таких двох напівпровідників називають *p-n-переходом*.

З'єднаємо два напівпровідники: один з донорною, а другий з акцепторною домішкою (мал. 76).

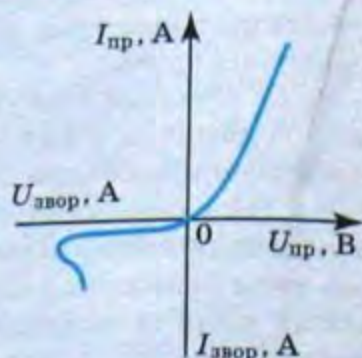
Відразу ж почнеться рух через контакт: електрони переходитимуть із напівпровідника *n*-типу (де їх багато) у напівпровідник *p*-типу, а дірки – навпаки (на мал. 76 це відображено суцільними стрілочками). Ця дифузія електронів і дірок відбувалася б до повного вирівнювання їхніх концентрацій в обох контактуючих напівпровідниках, якби ці частинки не переносили зарядів.



Мал. 76. Схема утворення *p-n*-переходу



Мал. 77. Механізм дії прямого (а) та зворотного (б) переходу.



Мал. 78. Вольт-амперна характеристика p - n -переходу

Дійсно, внаслідок 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 мал. 76). Крім того, оскільки частина електронів, що перейшли в p -область, рекомбінувала з дірками і відповідна рекомбінація відбулась у n -області, то утворився шар, збіднений носіями заряду, опір якого досить великий, – **запірний шар**.

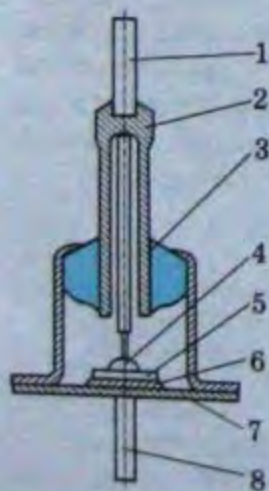
Тонкий шар речовини на межі двох приведених у контакт напівпровідників n - і p -типів провідності з властивостями, відмінними від властивостей основної маси напівпровідників, називають p - n -переходом. Однобічна провідність – основна властивість p - n -переходу.

Якщо подати напругу на напівпровідник з p - n -переходом так, щоб до напівпровідника p -типу під'єднувався позитивний полюс батареї, а до напівпровідника n -типу – негативний, то поле в переході буде ослаблене, запірний шар звужиться або й зникне, і дифузійні потоки основних носіїв (дірок з p -області і електронів з n -області) прямуватимуть через перехід.

Такий перехід називають **прямим** (мал. 77, а). Сила струму зі збільшенням напруги зростає дуже швидко, і закон Ома не виконується.

Під'єднаємо полюси батареї навпаки (мал. 77, 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**.

На вольт-амперній характеристиці залежність сили прямого струму від напруги зображено лінією, зростаючою в додатному напрямі осі напруг U (мал. 78). Після перемикання полюсів батареї, коли потенціал напівпровідника p -типу стає від'ємним, а потенціал напівпровідника n -типу – додатним, опір переходу зростає, а струм стає



Мал. 79. Схема будови індій-германієвого діода

незначним. Сила зворотного струму майже не змінюється зі зміною напруги. Різке збільшення зворотного струму на краю кривої пов'язане з пробоем напівпровідника.

Напівпровідниковий діод. Створюючи в одному кристалі напівпровідника p - n -перехід вплавленням в одну з його поверхонь домішки, можна виготовити напівпровідниковий діод. На мал. 79 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 корпусу 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 пункті. 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 односторонню провідність, завдяки чому широко використовуються в електроприладах, зокрема для випрямлення струму в радіосхемах. Різні типи напівпровідникових діодів зображено на мал. 80.



Мал. 80. Напівпровідникові діоди.

? Дайте відповіді на запитання

1. Як виникає електронна та діркова провідність напівпровідників?
2. Що називають власною провідністю напівпровідників?
3. Чому зменшується питомий опір напівпровідників з підвищенням температури?
4. Чому незначна кількість домішок п'ятивалентної або тривалентної речовини до Силіцію різко збільшує його провідність?
5. Чому в напівпровіднику з домішковою провідністю існують як основні, так і неосновні носії електричного струму?
6. Є напівпровідникова пластинка з домішковою провідністю. Як дослідним шляхом визначити, якого типу n - чи p - є цей напівпровідник?

§ 18. Напівпровідникові прилади та їх застосування

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

Терморезистор включається в електричне коло того чи іншого 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 і регулювання температури, пожежної сигналізації, контролю за температурним режимом механізмів тощо.

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

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 випрямний діод, а на зворотній вітці, де значні зміни зворотного струму через прилад супроводжуються незначними змінами зворотної напруги.

Транзистори та інтегральні мікросхеми. Термін «транзистор» утворений з двох англійських слів: *transfer* – перетворювач і *resistor* – опір. У спрощеному вигляді транзистор є пластиною напівпровідника з трьома ділянками з різною електропровідністю. Ці ділянки чергуються, утворюючи два $p-n$ -переходи. Дві крайні ділянки мають електропровідність одного типу, середня – іншого. У кожній області свій контактний вивід. Якщо крайні області з дірковою електропровідністю, а середня з електронною (мал. 81, 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. 81, б).



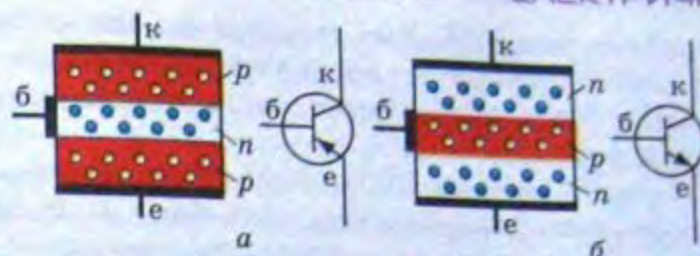
Транзистор – напівпровідниковий елемент електронних схем з трьома електродами, один з яких слугує для керування струмом між двома іншими.

Виводи транзистора називаються *емітер*, *база* і *колектор*. У транзисторі $p-n-p$ -типу емітер і колектор леговані¹ донорами, а база – акцепторами. У транзисторі $p-n-p$ -типу – навпаки.

Дія транзистора ґрунтується на використанні двох $p-n$ -переходів між базою та емітером і базою та колектором. В області $p-n$ -переходів виникають шари просторового заряду, між якими лежить тонка нейтральна база. Якщо між базою й емітером створити напругу в прямому напрямку, то носії заряду інжектуються в базу й дифундують до колектора. Оскільки вони є неосновними носіями в базі, то легко проникають через $p-n$ -перехід між базою й колектором. База виготовляється достатньо тонкою, щоб носії заряду не встигали прорекомбінувати, створивши значний струм бази. Якщо між базою й 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 та колекторний) і кожен із них може перебувати у двох станах (відкритому та закритому), розрізняють чотири режими роботи транзистора. Основним є *активний режим*, за якого емітерний перехід перебуває у

¹ Легування у напівпровідниковій технології – додавання домішки до напівпровідника з власною провідністю з метою модифікації типу його провідності.



Мал. 81. Схема будови та умовне позначення на схемах транзисторів $p-n-p$ -типу (а) та $n-p-n$ -типу (б)

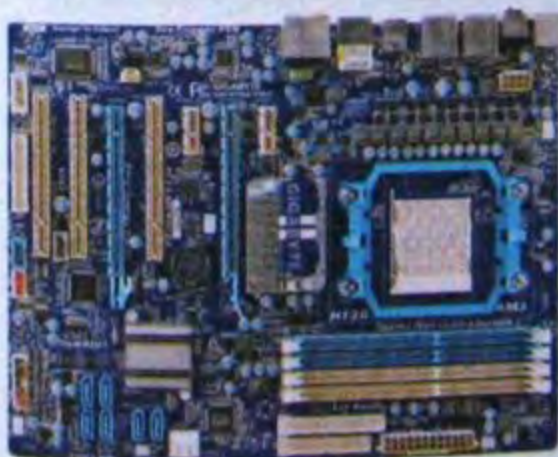
відкритому стані, а колекторний – у закритому. Транзистори, які працюють в активному режимі, використовуються в схемах підсилення. Окрім активного виділяють *інверсний режим*, за якого емітерний перехід закритий, а колекторний – відкритий, режим *насичення*, за якого обидва переходи відкриті, та режим *відсічки*, за якого переходи закриті.

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

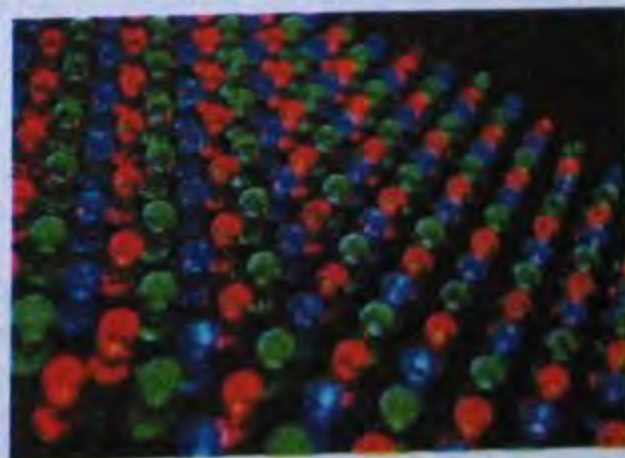
Поява інтегральних схем у 70-ті рр. XX ст. ознаменувала ще один великий етап в розвитку обчислювальної техніки, оскільки інтегральна схема здатна замінити тисячі транзисторів (мал. 82).

Інтегральна мікросхема – мініатюрний мікроелектронний виріб, елементи якого нерозривно пов'язані конструктивно, технологічно та електрично. Виконує певні функції перетворення і має високу щільність пакування електрично з'єднаних між собою елементів і компонентів, які є одним цілим з точки зору вимог до випробувань та експлуатації.

Розрізняють напівпровідникові, плівкові гібридні інтегральні схеми, які за видом оброблюваної інформації поділяються на цифрові та аналогові, за складністю і якістю оцінки – на малі, середні, великі та надвеликі.



Мал. 82. Комп'ютерна плата з інтегральними мікросхемами



Мал. 83. Світлодіоди

Надвелика інтегральна схема (НВІС) – інтегральна мікросхема зі ступенем інтеграції понад 1000 елементів в кристалі. Одна така інтегральна схема містить в собі десятки тисяч транзисторів, і всі вони розміщуються на кристалі кремнію, меншому за людський ніготь.

Світлодіоди. Світлодіод (англ. LED – light-emitting diode) – напівпровідниковий пристрій, що випромінює світло, коли через нього проходить електричний струм. Як і в звичайному напівпровідниковому діоді, в світлодіоді є p – n -перехід. В разі пропускання електричного струму у прямому напрямку носії заряду – електрони і дірки – рекомбінують з випромінюванням світлових частинок – фотонів. Колір випромінюваного світла світлодіодів залежить від хімічного складу використаного у світлодіоді напівпровідника.

Не всі напівпровідникові матеріали ефективно випромінюють світло під час рекомбінації. Добрими випромінювачами є, як правило, напівпровідники типу $A^{III}B^V$ (наприклад GaAs або InP) і $A^{II}B^{VI}$ (наприклад ZnSe або CdTe). Варіюючи склад напівпровідників, можна створювати світлодіоди, що випромінюють на різних довжинах хвиль – від ультрафіолету (GaN) до середнього інфрачервоного діапазону (PbS). Ефективність світлодіодів є найбільшою там, де потрібно генерувати потужні кольорові світлові потоки (світлові сигнали). Світло від лампи розжарювання доводиться пропускати через спеціальні оптичні фільтри, що виділяють певну частину спектра (червону, синю, зелену), при цьому 90% енергії світлового потоку втрачається під час проходження світла крізь світлофільтр. Усі ж 100% випромінювання світлодіода є забарвленим світлом, і у застосуванні світлофільтра немає потреби. Більше того, близько 80–90% споживаної потужності лампи розжарювання витрачається на її нагрівання задля досягнення потрібної колірної температури, на яку вони спроектовані. Світлодіодні лампи споживають від 3 до 60% потужності, необхідної для звичайних ламп розжарювання аналогічної яскравості. На відміну від ламп розжарювання, які випромінюють світловий потік широкого спектра рівномірно у всіх напрямках, сучасні світлодіоди випромінюють світло певної довжини хвилі і в певному напрямку. Існують методи розширення смуги випромінювання і створення світлодіодів, що випромінюють біле світло.

Світлодіоди застосовують у індикаційній техніці, у інформаційних табло, світлофорах, ліхтариках, гірляндах тощо (мал.83).

Світлодіоди були удосконалені до *лазерних діодів*, які працюють на тому ж принципі, але можуть напрямлено випромінювати сконцентрований пучок світла.

§ 19. Електричний струм в рідинах та його використання

Електролітична дисоціація. Електроліз. Із курсів хімії та фізики 9-го класу ми дізнались, що речовини поділяються на *електроліти* і *неелектроліти*. Електроліти характеризуються тим, що їхні розчини або розплави є провідниками електричного струму. Розчини або розплави неелектролітів не проводять електричного струму. На відміну від металевих провідників (або провідників першого роду), електричний струм в електролітах, або провідниках другого роду супроводжується перенесенням речовини.

Багато речовин уже в твердому стані мають йонну структуру (хлористий натрій та деякі солі). Але у твердому стані йони міцно зв'язані один з одним, оскільки мають протилежні електричні заряди, тому їх рухливість ускладнена. У розплаві рухливість йонів збільшується, а надто при переході речовини у розчин. У розчині під впливом полярних молекул води речовина-електроліт розпадається на позитивно та 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 заряджений електрод), а негативно заряджені йони – до анода (позитивно заряджений електрод). Відповідно позитивно заряджені йони назвали *катіонами*, а негативно заряджені – *аніонами*.

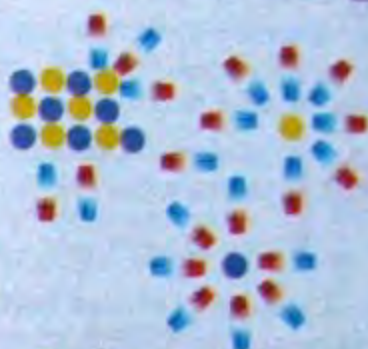
Мал. 84 ілюструє процес електролітичної дисоціації в розчині кухонної солі. Слід зазначити, що в разі зустрічі двох різнополярних йонів, наприклад хлору і натрію, можливий обернений процес – *рекомбінація* (утворення нейтральної молекули NaCl). Обидва процеси в розчині відбуваються одночасно.

Ступінь розпаду на йони не у всіх електролітах однаковий, він залежить від природи електроліту, його концентрації, характеру розчинника, температури. Електроліти поділяються на сильні і слабкі. Сильні електроліти у водних розчинах практично повністю дисоціюють на йони, а слабкі – тільки частково.

Процес електролітичної дисоціації є оборотним процесом.

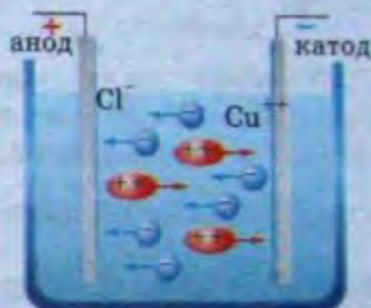
Якщо в розчині електроліту створити постійне за напрямком електричне поле, то катіони почнуть рухатись до катода, а аніони – до анода (мал. 85).

Катіони, стикаючись з катодом, приймають від нього відсутні електрони, тобто відновлюються. Наприклад, $\text{Cu}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Cu}$. На аноді відбувається процес передавання електронів аніона аноду, тобто відбувається процес окислення: $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2e$. (Окислювач – речовина, до складу якої входять атоми, що приєднують під час хімічної реакції електрони, іншими словами, окислювач – це акцептор електронів). Процеси, що відбуваються при проходженні електричного струму через розчини електролітів, називають *електролізом*. У процесі електролізу катод є відновником, оскільки він віддає електрони катіонам, а анод – окислювачем, оскільки він приймає електрони від аніонів. Ці процеси відбуваються під дією електричного струму, тому вони називаються процесами або реакціями електровідновлення і електроокислення.



● – йон хлору Cl^-
● – йон натрію Na^+

Мал. 84. Схема процесу електролітичної дисоціації хлористого натрію



Мал. 85. Рух електрично заряджених частинок у розчині електроліту

Закони електролізу. З курсу фізики 9-го 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 при електролізі, це маса 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 $m = \frac{Mq}{q_0 N_A}$.

Заряд будь-якого йона дорівнює заряду одновалентного йона, тобто заряду електрона e , помноженому на валентність n йона, $q_0 = en$. Отже $m = \frac{Mq}{en N_A}$.

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

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

Добуток $N_A e = F$ – стала Фарадея – фізична константа, що характеризує кількість електрики (електричний заряд), який треба пропустити крізь розчин електроліту, щоб на електродах виділилася маса речовини, що чисельно дорівнює його електрохімічному еквіваленту. $F = (96484,56 \pm 0,27)$ Кл/моль.

Для одновалентної речовини стала Фарадея дорівнює електричному заряду, в результаті проходження якого крізь розчин електроліту на електроді виділяється 1 моль речовини.

Закони Фарадея можна записати в об'єднаному вигляді так:

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

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. 86).

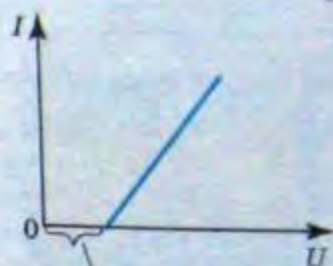
Залежність опору електроліту від температури нелінійна (мал. 87). Це пояснюється тим, що зі зростанням температури тепловий рух молекул стає інтенсивнішим, і тому кількість йонів у розчині та їх концентрація зростають. При цьому з підвищенням температури змінюється питомий опір електроліту. Його зміну можна розрахувати за рівнянням, яке використовували в аналогічних розрахунках для металів, $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$, де ρ_0 – питомий опір електроліту при 273 К (0 °C), α – термічний коефіцієнт опору. Для електролітів завжди термічний коефіцієнт опору є від'ємним.

Використання електролізу. Явище електролізу знаходить різні застосування у сучасній техніці. Розглянемо деякі з них.

Гальваностегія (від гальвано і грец. *stego* – покриваю) – нанесення покриттів на поверхню металевих та інших виробів методом електролітичного осадження.

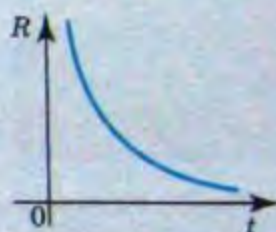
Деталі технічних пристроїв, деякі частини предметів побуту інколи покривають тонкою плівкою благородного металу (платини, золота, срібла) з декоративно-естетичною метою, з метою запобігання корозії. У техніці, аби уникнути корозії, окремі деталі різних пристроїв покривають нікелем, хромом, кадмієм. Деталь заздалегідь ретельно очищають і поміщають в електролітичну ванну, наповнену водним розчином солі відповідного металу, і сполучають з негативним полюсом джерела струму. Анодом слугує пластинка з того самого металу. У результаті електролізу на поверхні деталі осідає шар речовини, сіль якої міститься в розчині електроліту (мал. 88).

Гальванопластика. Використовуючи явище електролізу, можна отримувати абсолютно точні рельєфні копії предметів (наприклад, монет, медалей, ювелірних прикрас тощо). Для цього з предмета спочатку роблять зліпок з будь-якого пластичного матеріалу (наприклад з воску). Потім поверхню цього зліпка роблять електропровідною, покриваючи її тонким шаром елек-



Зміщення за рахунок поляризації

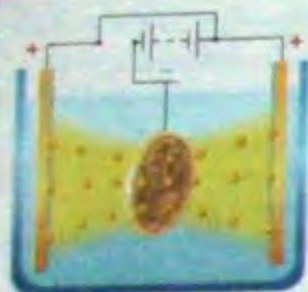
Мал. 86. Вольт-амперна характеристика проходження електричного струму крізь електроліт



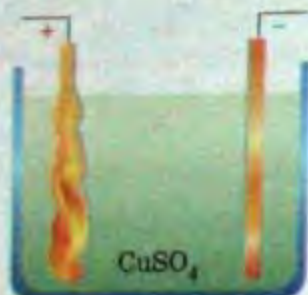
Мал. 87. Залежність опору електроліту від температури



Мал. 88. Схема процесу гальваностегії



Мал. 89. Схема процесу гальванопластики



Мал. 90. Схема процесу електролітичного рафінування

тропровідної речовини. Підготовлений у такий спосіб зліпок поміщають в електролітичну ванну як катод (мал. 89). Пропускаючи через ванну електричний струм, покривають зліпок товстим шаром металу. За допомогою гальванопластики виготовляють, наприклад, точні копії дорогі цінних прикрас, знайдених археологами, штампи для виробництва грамплатівок та ін.

Електролітичне рафінування є електролізом водних розчинів або солевих розплавів і дозволяє отримувати метали високої чистоти. Застосовується для глибокого очищення більшості кольорових металів, наприклад, для рафінування міді. Металургійна мідь, тобто мідь, отримана з руди в плавильній печі, містить, як правило, всілякі домішки. Для очищення (рафінування) міді від домішок інших речовин масивні листи металургійної міді опускають в розчин сульфату міді і сполучають з позитивним полюсом джерела струму. Як катод беруть тонкі листи чистої міді. Під час проходження електричного струму через електроліт чиста мідь виділяється на катоді, а анод поступово розчиняється. Домішки

випадають в осад. Концентрація мідного купоросу залишається постійною (мал. 90).

Електролітичне полірування. Маса речовини, що осідає на електроді пропорційна силі струму, але на випуклих ділянках, як ми знаємо, напруженість поля більша, ніж на плоских ділянках поверхні. Отже, у цих місцях щільність струму більша. Якщо виріб з шорсткою поверхнею занурити як анод в електролітичну ванну з відповідним чином підібраним електролітом, то метал з виступу переходитиме у розчин з більшою швидкістю, ніж із западин, і шорсткості згладжуватимуться. На цьому принципі ґрунтується електрополірування металів, а також електрозаточування інструментів.

? Дайте відповіді на запитання

1. Дистильована вода не проводить електричний струм. Чому вона стає провідником після 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. Якою є математична залежність між електрохімічним еквівалентом речовини та її валентністю?
5. Чому навколо електроліту, наприклад, навколо розчину кухонної солі, немає електричного поля і він здається нам незарядженим, хоч всередині нього є заряджені йони?
6. Чому опір розчинів електролітів залежить від температури?

Вправа 12

1. Скільки часу потрібно для того, щоб при нікелюванні виробу на його поверхні утворився шар двовалентного нікелю завтовшки 0,03 мм? Скільки енергії буде витрачено при цьому? Площа поверхні виробу дорівнює 120 см^2 . 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. Під час нікелювання виробу використовують струм густиною $0,4 \text{ А/дм}^2$. Якої товщини шар двовалентного нікелю можна одержати, пропускаючи через електроліт струм протягом 8,9 год?
4. Під час електролізу розчину сірчаної кислоти за 2 год 23 хв виділяється 5 л водню за нормальних умов. Визначити опір розчину, якщо потужність струму дорівнює 32,5 Вт.
5. За час електролізу води через ванну пройшов заряд 4 кКл, і при цьому виділилось 0,4 л водню при тиску 128 кПа. Визначити температуру водню.

§ 20. Електричний струм у газах

Механізм електропровідності газів. З курсу фізики 9-го 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 внаслідок відщеплення від атомів газу одного або декількох електронів. Як результат – замість нейтрального атома маємо 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 називається *йонізацією газів*.

Нагрівання газу до високої температури не є єдиним способом 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).

Кількісною характеристикою процесу йонізації є *інтенсивність йонізації*, вимірювана кількістю пар протилежних за знаком заряджених частинок, що утворюються в одиниці об'єму газу за одиницю часу.

Йонізація атома вимагає витрати певної енергії – енергії йонізації. Для йонізації атома (чи молекули) необхідно виконати роботу проти сил взаємодії між вирваним електроном та іншими частинками атома (чи молекули). Ця робота називається *роботою йонізації* (A_i). Величина роботи йонізації залежить від хімічної природи газу і енергетичного стану вирваного електрона в атомі або молекулі.

Після припинення дії йонізатора кількість йонів в газі з часом зменшується і, врешті-решт, йони зникають зовсім. Зникнення йонів пояснюється рекомбінацією. Йони й електрони беруть участь у тепловому русі, а тому стикаються один з одним. Зіткнувшись, позитивний йон й електрон можуть з'єднатися в нейтральний атом. Так само при зіткненні позитивного і негативного йонів негативний йон може віддати свій надлишковий електрон позитивному йону і обидва йони перетворяться на нейтральні атоми.

У процесі рекомбінації позитивного йона й електрона або двох йонів виділяється певна енергія, рівна енергії, затраченій на йонізацію. Частково

вона випромінюється у вигляді світла, саме тому рекомбінація йонів супроводжується свіченням (свічення рекомбінації).

Йонізований газ є провідником.



Електричний струм, що проходить через газ, називають **газовим розрядом**.

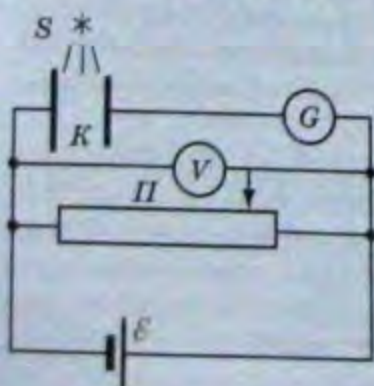
Електричним струмом у газі є спрямований рух позитивних йонів до катода, а негативних йонів і електронів – до анода. Повний струм у газі складається з двох потоків заряджених частинок: потоку, що йде до анода, і потоку, спрямованого до катода. На електродах відбувається нейтралізація заряджених частинок, як і у випадку проходження електричного струму через розчини і розплави електролітів. Проте у газах відсутнє виділення речовин на електродах, як це має місце в розчинах електролітів. Газові йони, підійшовши до електродів, віддають їм свої заряди, перетворюючись на нейтральні молекули, і дифундують назад у газ. Ще одна відмінність струму в йонізованих газах від струму в розчинах (розплавах) електролітів полягає в тому, що негативний заряд в газах переноситься переважно електронами, а не негативними йонами, хоча провідність за рахунок негативних йонів також може відігравати певну роль.

У газах поєднується електронна провідність, подібна до провідності металів, з йонною провідністю, подібною до провідності водних розчинів і розплавів електролітів.

Несамостійний та самостійний газові розряди. Розглянемо схему, зображену на мал. 91.

Між пластинами плоского конденсатора K міститься повітря під атмосферним тиском за кімнатної температури. Якщо до конденсатора прикладена напруга у декілька сотень вольт, а йонізатор S не працює, то гальванометр G струму не реєструє. Як тільки простір між пластинами конденсатора починає йонізуватися (наприклад, потоком ультрафіолетового випромінювання від джерела S), гальванометр починає реєструвати струм. Цей струм і є **несамостійним розрядом**.

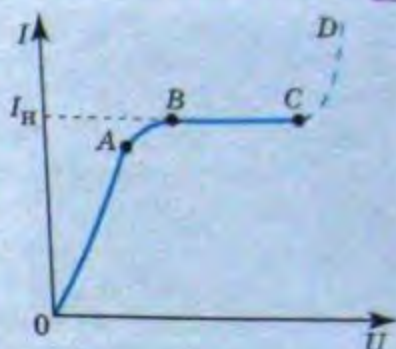
Отже, **несамостійний розряд** в газі є результатом перенесення заряду електронами, позитивними і негативними йонами, наявність і кількість яких зумовлені дією йонізатора (радіоактивного випромінювання, світла, космічних променів тощо), а також залежать від тиску газу і напруженості електричного поля в газовому проміжку.



Мал. 91. Схема установки для дослідження розряду в газі

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

На мал. 92 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 – тут залежність нелінійна і закон Ома не виконується. Ділянка BC характеризується струмом насичення I_n – максимальною силою струму, можливою за даних інтенсивності йонізації, тиску газу і напруженості електричного поля, коли всі утворені йони й електрони, не встигаючи рекомбінувати, досягають електродів. Якщо й далі підвищувати напругу, відбудеться пробій газового проміжку (ділянка CD) й несамотійний розряд перейде у *самостійний*, тобто такий газовий розряд, який відбувається й після припинення дії зовнішнього йонізатора.



Мал. 92. Вольт-амперна характеристика газового розряду

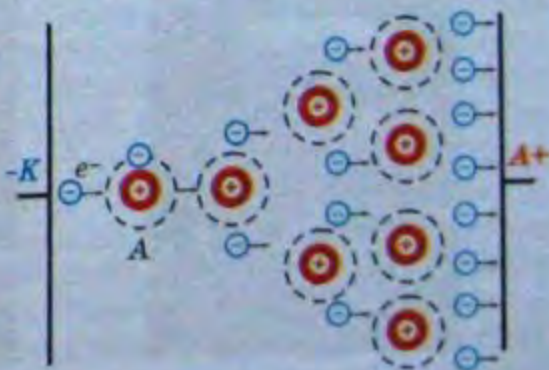


Електричний розряд у газі, що зберігається після припинення дії зовнішнього йонізатора, називається **самостійним газовим розрядом**.

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, що з'явився у такий спосіб починає рухатися до позитивного електрода – анода, а позитивний йон – до катода. На своєму шляху електрон зустрічає йони і нейтральні атоми. У проміжках між двома послідовними зіткненнями енергія електрона збільшується за рахунок роботи сил електричного поля.

Чим більша різниця потенціалів між електродами, тим більша напруженість електричного поля \vec{E} . Кінетична енергія електрона перед черговим зіткненням пропорційна напруженості поля і довжині вільного пробігу електрона λ , $\frac{mv^2}{2} = qE\lambda$.

Якщо кінетична енергія електрона перевищує потенціал йонізації A , то, зіткнувшись з атомом або молекулою, він їх йонізує. У результаті замість одного електрона матимемо два (другий – вибитий з атома). Уже два електрони прискорюються полем та йонізують зустрічні атоми і т. д. Внаслідок цього кількість заряджених частинок швидко зростає, виникає *електронна лавина* (мал. 93). 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 сумірну з масою атома. Під час зіткнення відбувається лише передавання частини кінетичної енергії (як між бильярдними шарами).



Мал. 93. Схема процесу ударної йонізації

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

? Дайте відповіді на запитання

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?

§ 21. Технічне використання самостійного газового розряду та плазми

Різні види самостійного розряду та їх використання. Залежно від властивостей і стану газу, характеру і розташування електродів, а також від прикладеної до електродів напруги виникають різні види самостійного розряду, а саме: тліючий, коронний, іскровий та дуговий розряди.

Тліючий розряд спостерігається в газах або парах за низького тиску (у межах декілька десятків міліметрів ртутного стовпа і меншого).

На мал. 94 зображена установка для отримання тліючого розряду в газорозрядній трубці. Електроди газорозрядної трубки під'єднують до джерела постійного струму з напругою в декілька тисяч вольт. Насосом відкачують повітря з трубки. (При атмосферному тиску газ усередині трубки йонізувати не вдається, оскільки даної напруги недостатньо.) Після зменшення тиску газу приблизно до 40–50 мм рт. ст. в трубці спостерігається вузький шнур, що світиться. Починається самостійний газовий розряд. За тиску близько 0,5 мм рт. ст. розряд заповнює всю трубку, причому стовп біля анода розбивається на ряд шарів, довжина яких із зниженням тиску зростає. Частини світлого стовпа, поділені темними проміжками називають *стратами*. За тиску близько 0,02 мм рт. ст. свічення в трубці слабшає, страти пропадають, але яскраво починає світитися скло навпроти катода.



Мал. 94. Установка для отримання тліючого розряду



Мал. 95. Газоосвітні трубки неонові реклами



Мал. 97. Іскровий розряд



Мал. 98. Електрична дуга

Іскровий розряд (мал. 97) виникає в газі при нормальному тиску за наявності електричного поля напруженістю, не меншою за напруженість пробою (для повітря це 3 МВ/м). Отже, якщо поступово збільшувати напругу між вміщеними в атмосферне повітря електродами, то при напрузі пробою між ними пролітає іскровий розряд, який з величезною швидкістю пронизує проміжок між електродами, гасне і знову виникає, так що око бачить одну суцільну іскру.

Красиве і небезпечне явище природи – *блискавка* – є іскровим розрядом в атмосфері.

Напруженість поля, за якої настає іскровий пробій газу, має різне значення у різних газів і залежить від їх стану (тиску, температури). Чим більша відстань між електродами, тим потрібна більша пробивна напруга для настання іскрового пробою газу. Знаючи, як залежить напруга пробою

від відстані між електродами будь-якої певної форми, можна виміряти невідому напругу за максимальною довжиною іскри. На цьому оснований пристрій – іскровий вольтметр – для грубої оцінки великих напруг.

Іскровий заряд, який виникає між електродами «свічки запалення» використовується для запалювання робочої суміші в двигуні внутрішнього згорання.

Якщо запалити іскровий розряд, а потім поступово зменшувати електричний опір кола, зменшуючи відстань між електродами, то розряд перейде з переривчастого у безперервний – виникне новий вид газового розряду – *дуговий*. При цьому сила струму різко зростає, досягаючи десятків і сотень ампер, а напруга на розрядному проміжку падає до кількох десятків вольт.

Дуговий розряд можна отримати, обминувши стадію іскри. У 1802 р. російський фізик В. В. Петров (1761–1834) винайшов електричну дугу (мал. 98).

Основною причиною дугового розряду є інтенсивне випускання електронів розжареним електродом. Електрони прискорюються електричним полем і здійснюють ударну йонізацію молекул газу. Немалу роль відіграє при цьому і термічна йонізація молекул навколишнього середовища.

Особливо широко використовується електрична дуга для зварювання та різання металів.

У 1888 р. російський учений і винахідник М. Г. Славянов уперше в світі провів електрозварювання. Великий внесок у технологію електрозварювання зробив наш вітчизняний учений Є. О. Патон. Сьогодні електрозварювання застосовується в автомобільній галузі, авіабудуванні, суднобудуванні, будівництві та інших високотехнологічних галузях.

Внаслідок високої температури електроди дуги випускають сліпуче світло, і тому електрична дуга є одним з кращих джерел світла. Вона споживає всього близько 3 Вт на канделу і є значно економічнішою, ніж найкращі лампи розжарювання. Електрична дуга вперше була використана для освітлення у 1875 р. російським інженером-винахідником П. Н. Яблочковим (1847–1894).

Одним з прикладів використання дугового розряду для освітлення можуть бути ксенонові лампи. У них світло створюється дуговим розрядом між двома електродами, які вміщені в колбу, заповнену інертним газом ксеноном (мал. 99).

Усі ви мабуть чули про сучасні енергозберігаючі лампи (мал. 100). Це люмінесцентні лампи (ртутні лампи низького тиску), в яких також використовується газовий розряд. Така лампа має колбу у вигляді трубки, виготовленої зі скла, на кінцях якої впаяні електроди 1. Колба лампи наповнена дозованою кількістю інертного газу і ртуті. У цих парах і відбувається дуговий розряд. Електрони 2 співударяються з атомами ртуті, внаслідок чого випромінюється ультрафіолетове світло, яке поглинається люмінофором 3, яким покрита внутрішня поверхня скляної колби. Люмінофор випромінює видиме світло.

Мал. 99. Ксенонова лампа



Мал. 100. Енергозберігаючі лампи

Потужне джерело ультрафіолетового випромінювання, яке застосовується в медицині, біології, техніці, сільському господарстві, медтехніці, є дуговою розрядною ртутною лампою високого тиску.

Плазма та її властивості. Практичне застосування плазми. Плазму називають четвертим станом речовини. Майже всі речовини за поступового підвищення їх температури від абсолютного нуля проходять послідовно такі стани: твердий, рідкий, газоподібний, плазма (від грецького *plasma* – оформлене).



Плазмою називають частково або повністю йонізований газ, в якому концентрація позитивних і негативних зарядів практично однакова, тобто в цілому плазма є електрично нейтральною системою.

Плазма оточує нашу Землю у вигляді йоносфери, забезпечуючи стійкий радіозв'язок. Плазма заповнює увесь Всесвіт у вигляді дуже розрідженого міжпланетного газу. У стані плазми перебуває переважна частина речовини Всесвіту – зорі, зоряні атмосфери, туманності, галактичне і міжзоряне середовище. Нарешті з плазми складається наше Сонце.

Біля Землі плазма існує у вигляді *сонячного вітру* (мал. 101, а), що заповнює магнітосферу Землі (утворюючи радіаційні пояси Землі) та йоносферу. Сонячний вітер впливає на всю Сонячну систему, починаючи з геліосфери.



а



б

Мал. 101. Сонячний вітер (а) та полярне сяйво (б)

Геліосфера – це сонячне магнітне поле, роздUTE сонячним вітром на всю Сонячну систему.

Через зіткнення частинок сонячного вітру з верхніми шарами атмосфери відбувається йонізація і збудження її атомів і молекул. Випромінювання збуджених атомів спостерігається як *полярне сяйво*. Процесами у навколоземній плазмі зумовлені магнітні бурі, полярні сяйва (мал. 101, б).

Фізиків плазма спочатку цікавила як своєрідний провідник електричного струму, а також як джерело світла. Нині фізичні властивості плазми ретельно досліджують заради багатьох інших застосувань.

Будь-яка плазма характеризується *ступенем йонізації* α – відношенням кількості йонізованих частинок до повної їх кількості в одиниці об'єму плазми. Залежно від значення α говорять про слабо (α становить частки відсотка), помірно (α – декілька відсотків) і повністю (α близький до 100%) йонізовану плазму.

Плазма є сумішшю декількох компонент, неоднаково нагрітих. Однією з цих компонент є електрони, другою – позитивні йони і третьою – нейтральні атоми. Вони рівномірно перемішані між собою. Проте у електронів, йонів і нейтральних атомів плазми (на відміну від суміші газів) середня кінетична енергія різна. Електрони, як правило, мають набагато більшу енергію, ніж йони, а кінетична енергія йонів може перевищувати енергію нейтральних атомів і молекул. Тому можна говорити, що плазма є сумішшю компонент з різними температурами.

Слід розрізнити три різні температури: електронну T_e , йонну T_n і атомну T_a . Зазвичай $T_e \gg T_n > T_a$. Дуже велика відмінність між T_e і T_n зумовлена величезною різницею у масі електронів та йонів. Зовнішні джерела електричної енергії, за допомогою яких створюється і підтримується газовий розряд, передають енергію безпосередньо електронам плазми, оскільки саме легкі електрони є носіями електричного струму.

Плазму з йонною температурою $T_n < 10^5$ К називають *низькотемпературною*, а з $T_n > 10^6$ К – *високотемпературною*. Високотемпературна плазма є основним об'єктом дослідження в ядерній фізиці (для створення керованих термоядерних реакцій синтезу). У природних умовах термоядерні реакції відбуваються на Сонці: ядра Гідрогену з'єднуються один з одним, утворюючи ядра Гелію, при цьому виділяється значна кількість енергії. Штучна реакція термоядерного синтезу була здійснена у водневій бомбі.

Низькотемпературна плазма знаходить застосування в газорозрядних джерелах світла, газових лазерах.

Найширше застосування плазма знайшла в світлотехніці – в газорозрядних лампах, що освітлюють вулиці світиться неонова або аргонна плазма. Дуга електричної зварки теж плазма. Звичайне полум'я має деяку теплопровідність. Воно, хоч і слабо йонізоване, але є плазмою. Причина цієї му світінню полум'я.

Плазма застосовується у багатьох різних газорозрядних приладах: засобах відображення інформації, випрямлячах електричного струму, стабілізаторах напруги, плазмових підсилювачах і генераторах надвисоких частот. Всі так звані газові лазери (гелій-неоновий, криптоновий, на діоксиді вуглецю та ін.) насправді плазмові: газові суміші в них йонізовані електричним розрядом.

Властивості, характерні для плазми, мають електрони провідності в металі (йони, жорстко закріплені у кристалічній ґратці, нейтралізують їх заряди), а також сукупність вільних електронів і рухомих «дірок» (вакансій) у напівпровідниках. Тому такі системи називають плазмою твердих тіл.

Існують генератори низькотемпературної плазми – плазмотрони, – в яких використовується електрична дуга. За допомогою плазмотрона можна нагрівати майже будь-який газ до 7000–10000 К за соті і тисячні частки секунди. Із створенням плазмотрона виникла нова галузь науки – плазмова хімія: багато хімічних реакцій прискорюються або відбуваються лише в плазмовому струмені. Плазмотрони застосовуються і в гірничо-рудній промисловості, і для різки металів. Створені також плазмові двигуни, магнітогідродинамічні електростанції. Енергетична установка, в якій енергія робочого тіла (рідкого або газоподібного електропровідного середовища, що рухається в магнітному полі) перетворюється безпосередньо в електричну енергію, називається магнітогідродинамічним генератором. Розробляються різні схеми плазмового прискорення заряджених частинок.

? Дайте відповіді на запитання

1. Наведіть приклади самостійних розрядів і поясніть умови їх виникнення.
2. Що називають плазмою? Які властивості відрізняють плазму від газу?
3. Чим відрізняється високотемпературна плазма від низькотемпературної?
4. Де і з якою метою використовують властивості високотемпературної і низькотемпературної плазми?

Найголовніше в розділі «Електричний струм»

Напрявлений (упорядкований) рух заряджених частинок називають електричним струмом. Для виникнення та існування електричного струму потрібні: вільні носії заряду (позитивно і негативно заряджені частинки – йони, електрони) і сили, які створюють і підтримують їх упорядкований рух (такою силою, як правило, є сила електричного поля в провіднику).

Сила струму I – фізична величина, яка характеризує швидкість перерозподілу електричного заряду в провіднику і визначається відношенням заряду q , що пройшов через поперечний переріз провідника протягом деякого часу, до величини цього інтервалу часу t , $I = \frac{q}{t}$.

Електричне коло – це сукупність з'єднаних між собою провідниками джерел струму та споживачів електричної енергії, в яких струм виконує роботу.

Закон Ома – залежність сили струму від різниці потенціалів (електричної напруги) між двома фіксованими точками електричного кола. Відкритий у 1826 р. Г. Омом. Закон Ома має два формулювання:

Для однорідної ділянки кола сила струму I в ній прямо пропорційна напрузі U , прикладеній до даної ділянки, і обернено пропорційна її опору

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

Для повного кола з джерелом струму, ЕРС якого \mathcal{E} , закон Ома має вигляд

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}, \text{ де } R - \text{опір зовнішньої ділянки електричного кола, } r - \text{внутрішній}$$

опір джерела струму.

Основною характеристикою джерела струму є *електрорушійна сила* (ЕРС) – фізична величина, що характеризує енергію сторонніх сил джерела струму й визначається відношенням роботи сторонніх сил (тобто сил неелектростатичного походження) до позитивного електричного заряду, що

$$\text{переноситься ними по замкнутому колу, } \mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

На ділянці кола з послідовно з'єднаними провідниками виконуються такі співвідношення:

- 1) сила струму в усіх провідниках однакова, $I = I_1 = I_2$;
- 2) напруга на ділянці дорівнює сумі напруг на кожному провіднику, $U = U_1 + U_2$;
- 3) загальний опір з'єднання дорівнює сумі опорів кожного провідника, $R = R_1 + R_2$.

Для паралельного з'єднання виконуються такі співвідношення:

- 1) напруга на окремих провідниках і на всій ділянці однакова, $U = U_1 = U_2$;
- 2) сила струму до розгалуження дорівнює сумі сил струмів у кожному провіднику, $I = I_1 + I_2$;
- 3) величина, обернена до загального опору ділянки, дорівнює сумі обернених величин опорів кожного провідника, $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

Для розрахунку складних розгалужених кіл застосовують також правила Кірхгофа. Перше правило випливає з закону збереження електричного заряду і називається *правилом вузлів*: алгебраїчна сума струмів I_k , що сходяться в будь-якій точці розгалуження, дорівнює нулю, $\sum_{k=1}^n I_k = 0$, де

n – кількість провідників, що сходяться в точці розгалуження. При цьому додатними вважаються струми, що прямують до точки розгалуження, від'ємними – струми, що виходять з неї.

Друге правило називають *правилом контурів*: у будь-якому довільно вибраному замкнутому контурі алгебраїчна сума добутків сил струмів I_k

на опори R_k відповідних ділянок контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС у цьому контурі, $\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i$.

Електричний струм в металах утворюють вільні електрони, в електролітах різноіменні йони, що рухаються у протилежних напрямках, в газах – електрони та йони, у напівпровідниках – електрони й дірки.

Маса речовини, що виділяється під час електролізу за час Δt , дорівнює $m = \frac{M}{enN_A} I \Delta t$, де M – молярна маса речовини, n – її валентність, N_A – стала Авогадро, e – заряд електрона.

Гази при температурах, близьких до кімнатної, складаються з нейтральних молекул і є діелектриками. Внаслідок нагрівання, а також під дією випромінювання та інших факторів відбувається йонізація газів, які стають провідниками (виникає газовий розряд). Розряд, який припиняється після вимкнення йонізатора, називають несамоостійним, а розряд, який існує і після припинення дії йонізатора – самоостійним. У самоостійному розряді йони й електрони утворюються шляхом йонізації електронним ударом, термоелектронної емісії тощо.

Щоб створити струм у вакуумі, у вакуумну трубку вводять джерело електронів. Найчастіше таким джерелом є нагрітий катод.

Напівпровідники – речовини, які за своєю електропровідністю займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Напівпровідники мають специфічні, характерні лише для них властивості, які чітко виражені вже при кімнатній температурі (300 К, а саме: 1) концентрація носіїв струму, а отже, і електропровідність напівпровідників сильно залежить від зовнішніх впливів – наявності домішок, температури, опромінювання, зовнішнього електричного поля; 2) з підвищенням температури електропровідність напівпровідників різко зростає за експоненціальним законом.

Хімічно чисті напівпровідники характеризуються власною провідністю, яка зумовлена рухом електронів проти силових ліній поля (провідність n -типу або електронна провідність) і так званих «дірок» у напрямі силових ліній (провідність p -типу або діркова провідність).

На місці контакту двох напівпровідників з різною провідністю (наприклад, p - і n -типу) виникає так званий електронно-дірковий напівпровідниковий p - n -перехід, який використовують у напівпровідникових приладах (напівпровідниковий діод, транзистор).

Розділ 3

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ

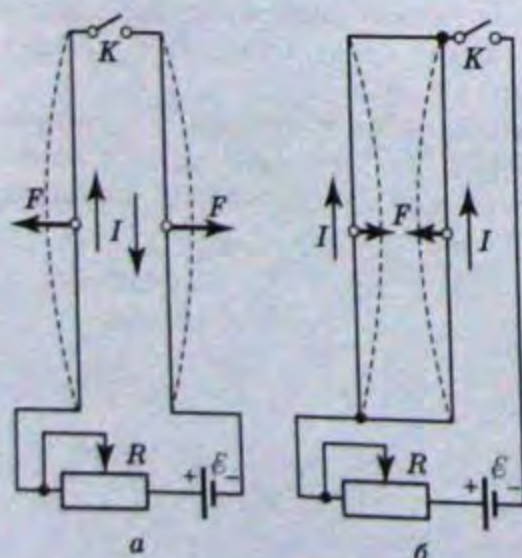


Між електричним та магнітним полями існує тісний зв'язок: змінне в часі електричне поле породжує магнітне, а змінне магнітне поле породжує електричне. Цей зв'язок встановлено завдяки відкриттю у 1831 р. англійським вченим М. Фарадеєм явища електромагнітної індукції. Згодом це явище стало основою всієї електротехніки і радіотехніки, а також основним принципом виробництва електроенергії.

§ 22. Магнітна взаємодія провідників зі струмом. Закон Ампера

Електрична і магнітна взаємодії. Як ми знаємо, нерухомі електричні заряди взаємодіють між собою через електричне поле. Дослідимо характер взаємодії провідників, по яких тече струм.

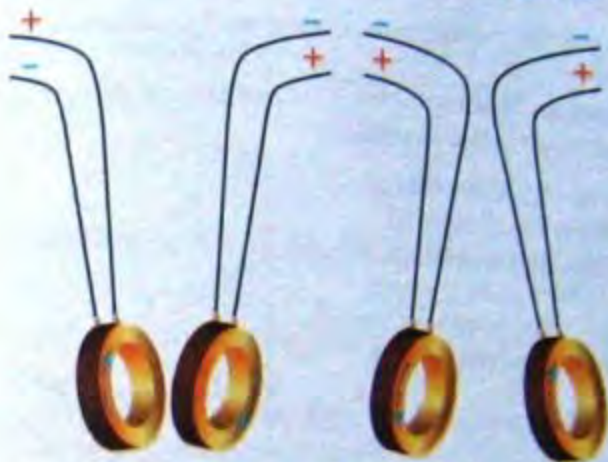
Якщо два паралельних гнучких провідники під'єднати до джерела струму так, щоб у провідниках виникли струми протилежного напрямку (мал. 102, а),



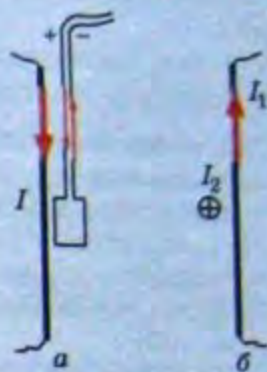
Мал. 102. Взаємодія провідників зі струмом

то провідники почнуть відштовхуватися один від одного. Якщо струми одного напрямку, провідники притягатимуться (мал. 102, 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 ж взаємодія відбувається і між котушками зі струмом (мал. 103).

Взаємодія провідників зі струмом не завжди зводиться до притягання або відштовхування. Якщо, наприклад, маленьку прямокутну рамку, по якій тече електричний струм, розташувати поблизу прямолінійного провідника зі струмом, то рамка повернеться і розташується так,



Мал. 103. Взаємодія котушок зі струмом



Мал. 104. а – взаємодія провідника та рамки, по яким протікають струми; б – у взаємно перпендикулярних провідниках зі струмом взаємодія не спостерігається

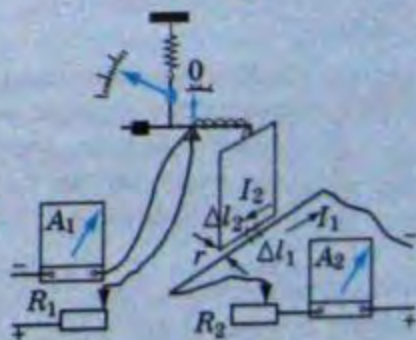
щоб провідник опинився у її площині (мал. 104, а). Ще один приклад. Два прямолінійні провідники зі струмом, розташовані так, як показано на мал. 104, б (у провіднику 2 струм напрямлений від нас), взагалі не взаємодіють.

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

Магнітні сили. Закон Ампера. Магнітне поле діє на всі частини провідника зі струмом. Щоб кількісно дослідити магнітну взаємодію провідників зі струмом, використовують метод моделювання. Розглядають не весь провідник, а лише незначну його ділянку, малою довжиною Δl , весь провідник складається з подібних ділянок, так, як і будь-яке заряджене тіло – із точкових зарядів. Добуток $I\Delta l$, тобто добуток сили струму I , що проходить по малій ділянці провідника, на її довжину Δl , називають *елементом струму*. Елемент струму $I\Delta l$ – модель для дослідження магнітної взаємодії.

Взаємодію електричних струмів вперше виявив і дослідив у 1820 р. французький фізик А. Ампер (1775–1836). Тому закон, що описує взаємодію провідників зі струмом, називають *законом Ампера*.

Оскільки створити відокремлений елемент струму не можна, Ампер проводив досліди із замкнутими провідниками. Схему установки для дослідження сили взаємодії між прямолінійними провідниками зі струмом зображено на мал. 105. За її допомогою можна вимірювати



Мал. 105. Схема установки для дослідження магнітної взаємодії провідників зі струмом

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

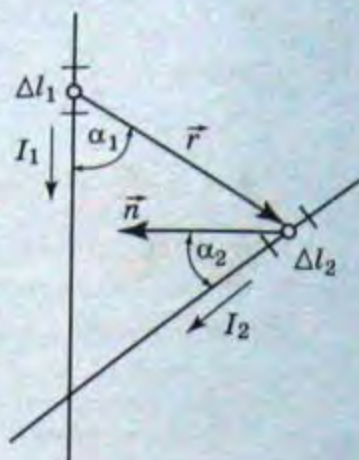
ти силу взаємодії, змінюючи силу струму у провідниках та їх взаємне розташування.

У результаті проведених досліджень Ампер зумів встановити вираз для сили взаємодії, що діє між двома елементами струму:

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. 106),

$$\Delta F = \mu \mu_0 \frac{I_1 \Delta l_1 \cdot I_2 \Delta l_2}{r^2} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2.$$

Тут α_1 – кут між елементом струму $I_1 \Delta l_1$ та радіус-вектором \vec{r} ; α_2 – кут між елементом струму $I_2 \Delta l_2$ і нормаллю \vec{n} до площини, в якій лежать елементи $I_1 \Delta l_1$ та r (див. мал. 106); μ_0 – магнітна стала, μ – відносна магнітна проникність середовища – скалярна фізична величина, що характеризує вплив однорідного середовища на магнітне поле.



Мал. 106

Закон Ампера відіграє таку ж роль у магнітостатиці, як і закон Кулона в електростатиці. За допомогою закону Ампера можна обчислити силу взаємодії провідників зі струмом довільної довжини і форми. Обчисливши силу взаємодії між елементами струму, визначають інтегральну суму. Наприклад, формула для обчислення сили взаємодії (сили Ампера) між двома прямими паралельними провідниками скінченної довжини l зі струмами I_1 і I_2 , відстань між якими r , набуває вигляду $F = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$. Якщо струми

течуть в один бік, сила взаємодії намагається зблизити провідники, якщо ж струми течуть у різні боки – віддалити.

У СІ дану формулу було використано для означення одиниці сили струму – ампера.

1 А – одиниця сили струму, яка дорівнює силі постійного струму, що, проходячи по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини з дуже малою площею поперечного перерізу, які розміщені у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричинює силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожній ділянці провідників довжиною 1 м.

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

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

Цікавий результат отримаємо, коли обчислимо добуток двох сталих – електричної та магнітної. Для зручності значення електричної сталої запи-

шемо у вигляді $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$. Отримаємо

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

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

? Дайте відповіді на запитання

1. Як взаємодіють між собою паралельні струми? Що спричинює їх взаємодію?
2. Що встановлює закон Ампера?
3. Чому дорівнює магнітна стала?
4. Дайте визначення одиниці сили струму в СІ.

§ 23. Магнітне поле струму

Індукція магнітного поля. З'ясовуючи природу взаємодії провідників зі струмом, ми повинні, як і у випадку вивчення взаємодії заряджених тіл, дати відповідь на питання, яким чином передається взаємодія на відстані?

Сучасна наука вважає, що у просторі навколо струмів виникає крім електричного поля ще й магнітне. І тому, розглядаючи взаємодію струмів, слід 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 кожен елемент струму у другому провіднику.



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

Досліди зі взаємодії струмів доводять, що магнітні поля різних струмів відрізняються силою своєї дії. До того ж поле одного і того ж струму на різних відстанях від нього різне. Це приводить до необхідності введення фізичної величини, яка б кількісно описувала магнітне поле. Пригадаймо, вивчаючи електростатичне поле, ми ввели силову характеристику – *напруженість* \vec{E} – цього поля, яка визначається відношенням сили, з якою поле діє на позитивний пробний заряд у певній точці поля, до значення цього заряду, $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. На основі аналогічних досліджень магнітного

поля було введено силову характеристику, яка називається *індукцією магнітного поля*. Позначають вектор магнітної індукції літерою \vec{B} .

Оскільки сила F магнітного поля діє на елемент струму $I \Delta l$, модуль вектора магнітної індукції визначається відношенням $B = \frac{F}{I \Delta l}$.

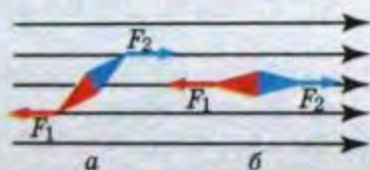


Магнітна індукція \vec{B} – це фізична величина, яка характеризує силову дію магнітного поля і вимірюється відношенням сили, з якою магнітне поле діє на елемент струму, розташований у деякій точці простору, до величини цього елемента струму.

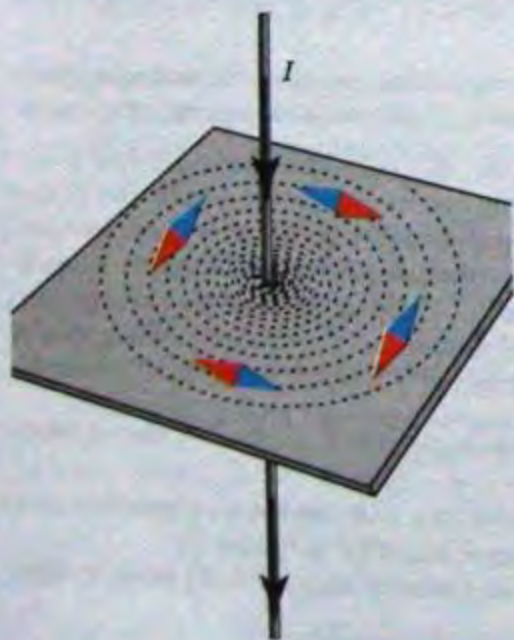
Одиниця магнітної індукції – тесла (Тл), її названо на честь сербського вченого електротехніка Нікола Тесла, $[B] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2} = 1 \text{ Тл}$.

Індукція магнітного поля, як і напруженість електричного поля, векторна величина. Але на відміну від вектора напруженості електричного поля, який напрямлений так само, як і сила, що діє на позитивний заряд, розміщений у цьому полі, напрям вектора індукції магнітного поля не збігається з напрямком вектора сили, що діє на елемент струму в магнітному полі. Для визначення напрямку вектора \vec{B} існують певні правила.

Силкові лінії магнітного поля прямого і колового струмів та соленоїда. Наочну картину магнітного поля можна отримати, якщо побудувати *силкові лінії поля*. Це лінії, дотичні до яких в 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 називають *вихровими*.



Мал. 107. Орієнтуюча дія магнітного поля на стрілку



Мал. 108. Магнітне поле прямого струму

Щоб визначити напрям вектора індукції магнітного поля, користуються кількома способами. Оскільки магнітне поле електричного струму діє на магнітну стрілку, орієнтуючи її в певному напрямі (мал. 107), то домовились, що напрям вектора магнітної індукції збігається з віссю магнітної стрілки в напрямку її північного полюса. Продовжуючи аналогію між методами дослідження електростатичного та магнітного полів, зауважимо, що магнітна стрілка відіграє таку ж роль, як і пробний заряд, тобто її поле не повинно спотворювати досліджуваного поля.

Проведемо такий дослід. Прямий провідник довільної довжини, в якому тече струм I , наприклад згори вниз, пропустимо крізь отвір у центрі аркуша картону, розміщеного горизонтально. На аркуш насипемо тонкий шар металевих ошурків і злегка постукаємо по картону. Ошурки повинні розміститися вздовж силових ліній поля і виявити їх форму. Побачимо, що ошурки вишикуються по колах (мал. 108). Замість ошурків можна

скористатись магнітними стрілочками на підставках з вістрями.

Ці досліди показують, що силові лінії магнітного поля прямолінійного струму мають форму замкнених концентричних кіл, розміщених у площині, перпендикулярній до провідника.

За відсутності стрілочок для визначення напрямку вектора магнітної індукції є кілька правил, зокрема правило свердлика (правого гвинта) та правило правої руки.

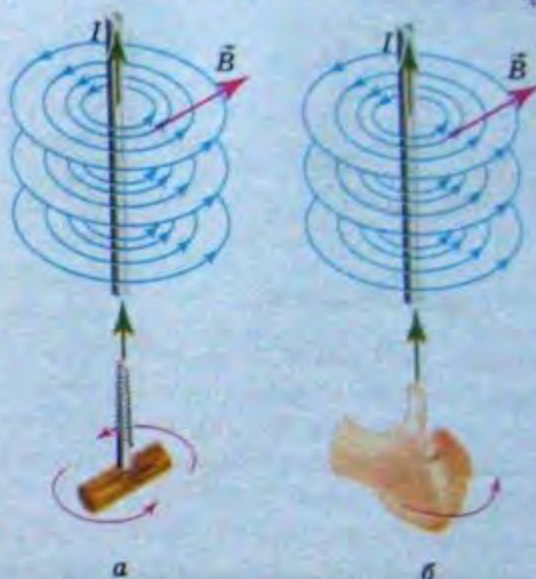
Правило свердлика. Якщо поступальний рух свердлика збігається з напрямком струму, то обертання його ручки показує напрям вектора магнітної індукції (мал. 109, а).

Правило правої руки. Якщо прямий провідник охопити чотирма пальцями правої руки так, щоб великий палець, розміщений вздовж провідника, вказував напрям струму, то напрям загину чотирьох пальців відповідатиме напрямку вектора індукції (мал. 109, б).

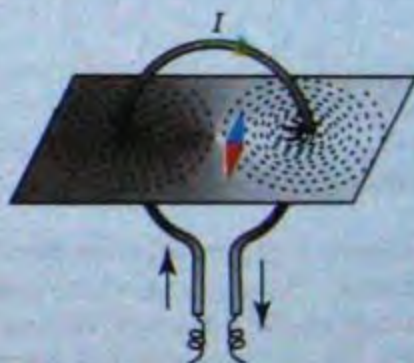
Уявімо тепер, що з прямого провідника з «нанизаними на нього кільцями – силовими лініями» утворено коловий виток. Магнітне поле візуально можна побачити, як і раніше, за допомогою дрібних залізних ошурків (мал. 110). Для визначення напрямку вектора індукції в центрі колового струму користуються одним із трьох правил: *свердлика*, *правої руки* і *букв*. Правило свердлика і правої руки треба дещо змінити згідно з геометрією провідника. Спробуйте самостійно це зробити за мал. 111, а і б.

Правило букв. У виток слід вписати одну з букв *N* або *S*, якими позначають північний та південний полюси магнітної стрілки, так, щоб стрілочка на їхніх кінцях збігалася з напрямком струму у витку (мал. 112). Якщо, наприклад, у виток вписалась буква *N*, то це означає, що вміщена в центр витка магнітна стрілка повернеться до читача північним полюсом, який і вказує напрям вектора індукції. На мал. 112, а вектор індукції в центрі колового витка напрямлений до читача, а на мал. 112, б – від читача.

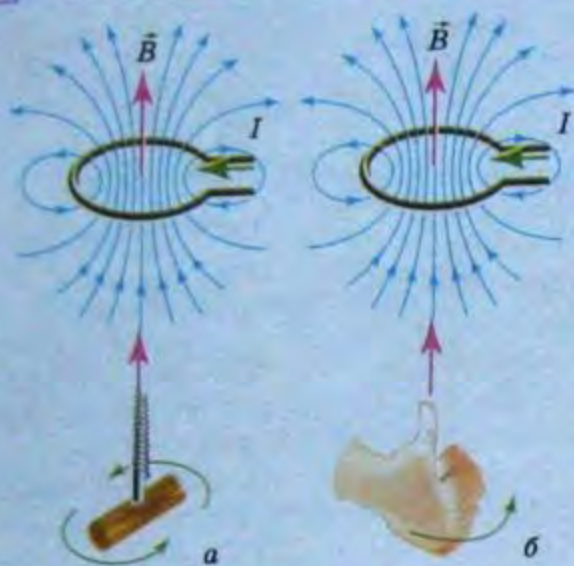
Соленоїдом називають довгу пряму котушку з *N* однакових витків, що не лежать в одній площині. Як правило, витки соленоїда намотують в один шар рівномірно, так, щоб вони щільно прилягали один до одного. При цьому кіль-



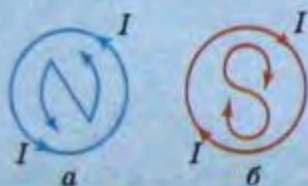
Мал. 109. Визначення напрямку вектора магнітної індукції прямого струму: а – за правилом свердлика; б – за правилом правої руки



Мал. 110. Магнітне поле колового струму

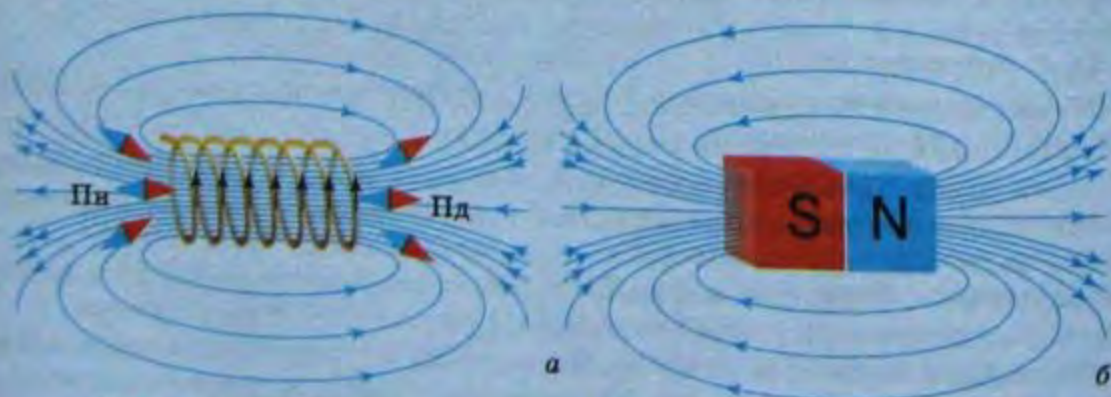


Мал. 111. Визначення напрямку вектора індукції колового струму: а – за правилом свердлика; б – за правилом правої руки



Мал. 112. Визначення напрямку вектора індукції колового струму за правилом букв

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



Мал. 113. Магнітні поля: а – котушки зі струмом; б – постійного магніту

кість витків n на одиницю довжини соленоїда визначається із співвідношення $n = \frac{1}{d}$, де d – діаметр дроту,

яким намотано соленоїд. Взагалі $n = \frac{N}{L}$, де L – довжина соленоїда.

Якщо довжина L котушки більша як у 10 разів перевищує її діаметр D , соленоїд називають *нормальним* або *нескінченно довгим*. Всередині (на осі) такого соленоїда магнітне поле *однорідне*, його силові лінії паралельні між собою і напрямлені вздовж осі (мал. 113, а). Напрямок вектора магнітної індукції соленоїда визначається за тими самими правилами, що й для колового струму. Якщо порівнювати магнітне поле соленоїда, зображеного на мал. 113, а з магнітним полем постійного магніту (мал. 113, б), можна побачити, що ці поля за зовнішнім виглядом однакові. Відмінність між ними є лише всередині соленоїда та магніту (розміщення ліній індукції всередині магніту побачити не можна).

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

Закон Біо–Савара–Лапласа. Ми з'ясували, як напрямлений вектор індукції магнітного поля. А від чого залежить його модуль? Величину індукції магнітного поля, створюваного елементом струму, у певній точці визначають за законом Біо–Савара–Лапласа. Французькі вчені Жан-Батіст Біо (1774–1862) та Фелікс Савар (1791–1841) у 1820 р. провели ряд експериментальних досліджень, щоб з'ясувати, від чого залежить величина індукції магнітного поля. Загальну математичну обробку експериментальних результатів виконав видатний французький математик П'єр-Сімон Лаплас (1749–1827).



Мал. 114. До закону Біо–Савара–Лапласа

Закон Біо–Савара–Лапласа: Індукція магнітного поля $\Delta \vec{B}$ в точці A, що створюється струмом I, який протікає крізь елемент провідника довжиною Δl (мал.114), визначається формулою $\Delta B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi r^2} I \Delta l \sin \alpha$, де \vec{r} – радіус-вектор, що сполучає елемент провідника Δl з точкою A, α – кут між напрямком струму в елементі та радіус-вектором.

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.

Так, магнітна індукція *прямолінійного провідника зі струмом* визначається формулою $B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}$.

Магнітна індукція в центрі *колового витка* радіусом r , по якому тече струм I , дорівнює $B = \mu\mu_0 \frac{I}{2r}$.

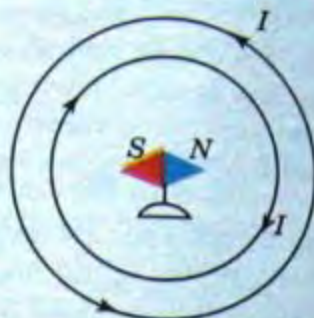
Магнітна індукція всередині *катушки* дорівнює $B = \mu\mu_0 \frac{IN}{l}$, тут N – кількість витків катушки, а l – її довжина.

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 з цих струмів окремо, $\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$.

? Дайте відповіді на запитання

1. Джеймс Максвелл стверджував, що електричний струм – це те, що створює магнітне поле. Як це твердження слід розуміти?
2. Для вивчення електричного поля користуються пробним електричним зарядом. Чим за аналогією користуються, вивчаючи магнітне поле?
3. Яка з величин, що характеризують магнітне поле, є аналогом напруженості електричного поля E ? В чому найхарактерніша відмінність цих величин?
4. У якому напрямку повернеться північний полюс стрілки, якщо її обтікають струми, напрямки яких позначено на мал. 115?



Мал. 115

Приклади розв'язування задач

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

Дано:

$$I_1 = 20 \text{ А}$$

$$I_2 = 24 \text{ А}$$

$$a = 0,5 \text{ м}$$

$$r_1 = 0,4 \text{ м}$$

$$r_2 = 0,3 \text{ м}$$

$$\mu = 1$$

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

$B = ?$

Розв'язання

Зробимо малюнок до задачі (мал. 116). 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 $\vec{B}_1 \perp O_1A$, $\vec{B}_2 \perp O_2A$.

Згідно з принципом суперпозиції індукція \vec{B} магнітного поля в точці А є векторною сумою індукцій \vec{B}_1 і \vec{B}_2 , утворених у цій точці струмами I_1 і I_2 . Модуль індукції поля, утвореного кожним струмом окремо, визначається формулою $B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$.

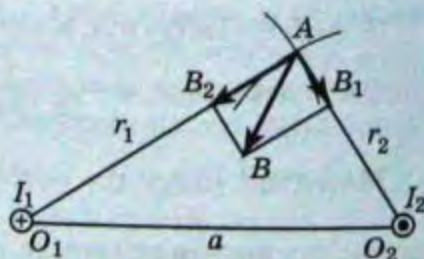
Модуль сумарного вектора \vec{B} визначимо за теоре-

мою Піфагора $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$, оскільки трикутник AO_1O_2 прямокутний. Підставимо у цю формулу вирази для B_1 і B_2 та обчислимо числове значення B :

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

$$B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{20^2 \text{ А}^2}{0,16 \text{ м}^2} + \frac{24^2 \text{ А}^2}{0,09 \text{ м}^2}} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

Відповідь: $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$



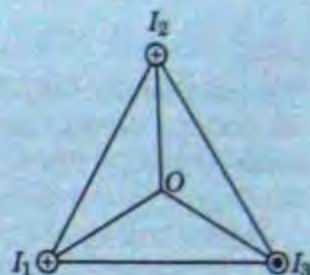
Мал. 116.

Вправа 13

1. По двох нескінченно довгих паралельних провідниках, відстань між якими l , в одному напрямі течуть струми I_1 і I_2 . Визначити індукцію магнітного поля в точці А, що лежить на продовженні прямої, що сполучає провідни-

ки, на відстані s від другого провідника. Вважати, що провідники розташовані у вакуумі.

2. Два паралельні провідники з однаковою силою струму в них розташовані на відстані 8,7 см один від одного і притягуються із силою $2,5 \cdot 10^{-2}$ Н. Визначити силу струму в провідниках, якщо довжина кожного з них 320 см, струми напрямлені в один бік. Вважати, 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. Визначити індукцію магнітного поля у точці, що лежить на відстані 3 см від кожного провідника. Вважати, 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 мал. 117. Визначити 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. Струм у першому і середньому провідниках має однаковий напрямок. Яка сила діє на одиницю довжини першого, другого (середнього) і третього провідників? Вважати, що провідники розташовані у вакуумі.



Мал. 117

§ 24. Дія магнітного поля на провідник зі струмом

Сила Ампера. Як ми вже з'ясували, провідники зі струмом взаємодіють через магнітне поле. Закон, який визначає силу взаємодії між елементами струму, називають законом Ампера. За традицією та вшановуючи пам'ять про заслуги вченого, вираз для магнітної сили, що діє на провідник зі струмом з боку магнітного поля, також називають законом Ампера, а силу – силою Ампера.

У 9 класі ми вже дослідили, від чого залежить сила Ампера, що діє на провідник зі струмом в однорідному магнітному полі. Схема установки, зображена на мал. 118, допоможе вам пригадати цю залежність.

Сила Ампера F_A – сила, що діє з боку магнітного поля індукцією \vec{B} на прямолінійний провідник довжиною Δl зі струмом I . У випадку однорідного магнітного поля сила Ампера $F_A = BI\Delta l \sin \alpha$, тут α – кут між напрямком струму I в провіднику та індукцією магнітного поля \vec{B} .

Максимальне значення сила Ампера має тоді, коли провідник розташований перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля, $F_{A \max} = BI\Delta l$.

Напрямок сили Ампера визначають за правилом лівої руки (мал. 119).

Якщо розмістити ліву руку вздовж провідника так, щоб чотири пальці вказували напрям струму в ньому, а лінії магнітної індукції входили в долоню, то відігнутий великий палець покаже напрям сили, яка діє на провідник зі струмом.



Мал. 118. Схема установки для дослідження дії магнітного поля на провідник зі струмом



Мал. 119. До правила лівої руки

Момент сил, що діє на прямокутну рамку зі струмом у магнітному полі. В однорідному магнітному полі замкнений контур зі струмом магнітні сили можуть лише повернути. Якщо поле неоднорідне, то контур зі струмом може рухатись ще й поступально під дією незрівноважених сил поля у бік, де індукція поля більша за модулем.

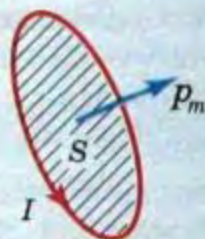
Поведінку замкненого контуру в магнітному полі описують за допомогою обертового моменту¹ \vec{M} . Обертальний момент, який діє на контур зі струмом I в однорідному полі, прямо пропорційний площі S контуру, силі струму I та індукції магнітного поля B . Крім того, обертальний момент M залежить від положення контуру відносно поля. Максимальним обертальний момент буде тоді, коли площина контуру паралельна лініям магнітної індукції, $M_{\max} = BIS$. (Доведіть це, використавши формулу $F_{A\max} = BIl$ та мал. 119.)

Щоб врахувати залежність величини обертового моменту від положення контуру, вводять поняття **магнітного моменту струму**, який вважають векторною величиною.

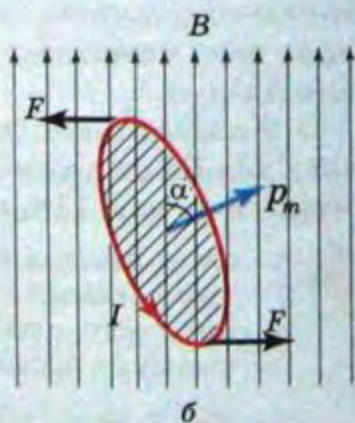


Магнітний момент струму p_m – це векторна фізична величина, що описує магнітні властивості контуру зі струмом і визначає його поведінку у зовнішньому магнітному полі. Величина p_m дорівнює добутку сили струму I в контурі на площу S цього контуру, $p_m = IS$. (Якщо контур має N витків, то магнітний момент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

Напрямок вектора магнітного моменту струму визначається за правилом свердлика (правого гвинта): якщо гвинт обертати у напрямку струму в контурі, то поступальний рух гвинта покаже напрям вектора p_m (мал. 120, а).



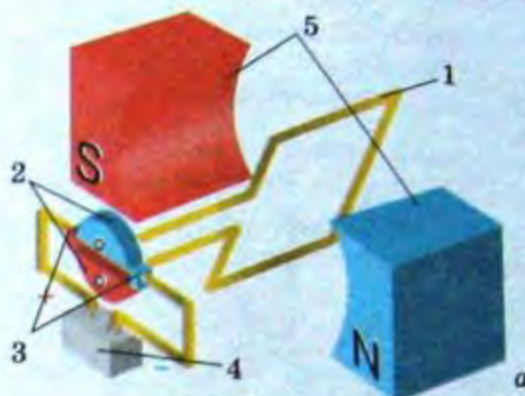
а



б

Мал. 120. До введення поняття вектора магнітного моменту контуру зі струмом

¹ Обертальний момент, або момент сили \vec{M} відносно нерухомої точки O , визначається векторним добутком радіуса-вектора \vec{r} , проведеного з точки O у точку прикладання сили, та вектора сили \vec{F} , $M = [\vec{r} \times \vec{F}]$, або $M = Fr \sin \alpha$, де α – кут між векторами \vec{r} і \vec{F} .



Мал. 121. а – модель електродвигуна; б – промисловий електродвигун

Тепер вираз для обертового моменту можна записати так: $\vec{M} = [\vec{B} \times \vec{p}_m]$, або $M = Bp_m \sin \alpha$, де α – кут між векторами \vec{p}_m та \vec{B} . З мал. 120, б видно, що рівновага контуру в магнітному полі можлива тоді, коли вектори \vec{p}_m та \vec{B} напрямлені по одній прямій. (Подумайте, коли ця рівновага буде стійкою.)

Принцип дії електродвигуна та електровимірювальних приладів. В основі дії цих пристроїв лежить обертова дія магнітного поля на контур із струмом.

Електродвигун – це пристрій для перетворення електричної енергії у механічну. Електродвигуни використовуються повсюди. У побуті електродвигуни можна зустріти в годинниках, вентиляторах мікрохвильових печей та комп'ютерів, пральних машинах, автомобілях тощо. А щодо промислового використання електродвигунів, то цей перелік може бути нескінченним. Не дивно, що існує велика кількість їх видів та конструкцій.

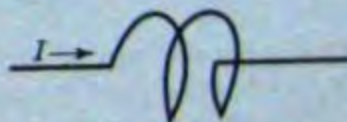
На мал. 121, а показано модель електродвигуна постійного струму. На рамку намотана обмотка 1, кінці якої приєднані до металевих півкілець 2, ізольованих одне від одного. До півкілець притиснуті пружні щітки 3, через які до рамки подається струм від джерела 4. Рамка розташована між полюсами магніту 5.

Спробуйте самостійно пояснити принцип дії такого електродвигуна.

З принципом дії електровимірювальних приладів (амперметра та вольтметра) ми детальніше ознайомимось під час виконання лабораторних робіт.

? Дайте відповіді на запитання

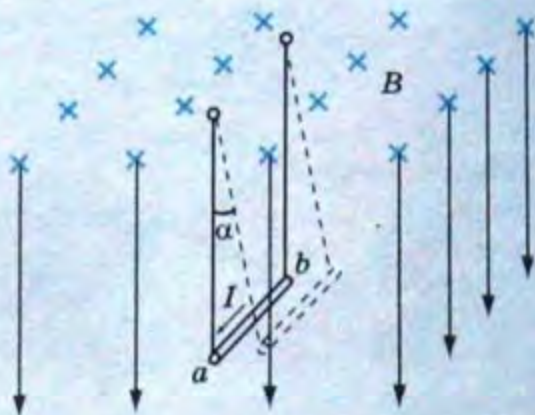
- Від чого залежить модуль сили Ампера? Як визначити її напрям?
- На мал. 122 зображено два витки котушки, по якій тече електричний струм. Які сили діють на кожний виток? Які деформації вони викликають? Зобразьте вектори сил. З'ясуйте походження цих сил.
- За правилом лівої руки поясніть взаємодію (притягання, відштовхування) двох паралельних лінійних провідників зі струмом.
- Наведіть приклади практичного використання сили Ампера.



Мал. 122

Вправа 14

1. По горизонтально розташованому провіднику завдовжки 20 см і масою 4 г проходить струм силою 10 А. Визначити індукцію (модуль і напрям) магнітного поля, в якому треба розмістити провідник, щоб сила тяжіння зрівноважилася силою Ампера.
2. Провідник ab , що має довжину l і масу m , відвісили на тонких дротинках. Під час проходження по ньому струму I він відхилився в однорідному магнітному полі (мал. 123) так, що дротини утворили кут α з вертикаллю. Яка індукція магнітного поля? Якщо є можливість, визначіть таким способом середню індукцію магнітного поля підковоподібного магніту.
3. 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 $0,5 \text{ А}$. Визначити індукцію магнітного поля.
4. 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 ?
5. Визначити магнітний момент електрона атома Гідрогену, що рухається по коловій орбіті радіусом $0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ навколо ядра.



Мал. 123

§ 25. Дія магнітного поля на рухомі заряджені частинки

Рух зарядженої частинки в однорідному магнітному полі. Голландський учений Г. А. Лоренц пояснив існування сили Ампера тим, що магнітне поле діє на рухомі заряди в провіднику зі струмом. Оскільки ці заряди вирватись із провідника не можуть, загальна сила, яка діє на них, прикладена до 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*.

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

$$F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{BIl}{N} \sin \alpha = \frac{BvneSl}{N} \sin \alpha = \frac{BvneV}{N} \sin \alpha.$$

Враховуючи, що $nV = N$, отримаємо вираз для обчислення сили Лоренца $F_L = eBv \sin \alpha$, 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 $F_L = qBv \sin \alpha$, де q – електричний заряд частинки.



Сила Лоренца F_L – сила, що діє з боку магнітного поля на рухому заряджену частинку. $F_L = qBv \sin \alpha$, де q – заряд частинки; v – її швидкість; B – індукція магнітного поля; α – кут між напрямками \vec{B} і \vec{v} .

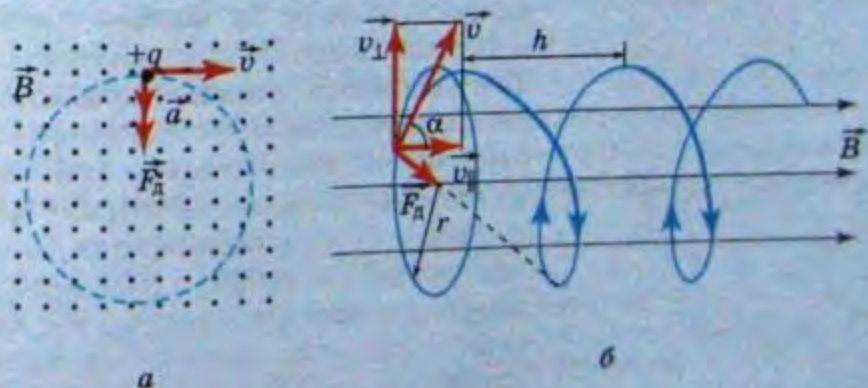
Напрямок сили Лоренца визначають за правилом *лівої руки* (мал. 124). Застосовуючи його, слід пам'ятати, що коли в магнітному полі рухається *позитивно* заряджена частинка, то чотири пальці треба спрямувати в бік її руху, якщо ж рухається *негативно* заряджена частинка, то витягнуті чотири пальці треба спрямувати проти вектора її швидкості.

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна векторам \vec{v} та \vec{B} , а отже напрямку переміщення частинки, вона не виконує роботи і 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 індукцією \vec{B} ($\vec{v} \perp \vec{B}$)

(мал. 125, а). (Крапки на малюнку вказують на те, що лінії магнітної індукції перпендикулярні до площини сторінки і напрямлені до читача.)

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

Якщо швидкість частинки напрямлена під кутом α до ліній індукції, то заряд рухатиметься по гвинтовій траєкторії навколо ліній індукції поля (мал. 125, б). Дійсно, вектор \vec{v} можна розкласти на складові v_{\parallel} (вздовж ліній індукції) та v_{\perp} (перпендикулярно до ліній індукції). v_{\perp} визначає радіус витка r , а v_{\parallel} з часом не змінюється (в 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).



Мал. 125. Траєкторія руху зарядженої частинки в магнітному полі: а – за умови $\vec{v} \perp \vec{B}$; б – за умови, що напрям швидкості утворює кут α з лініями індукції

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

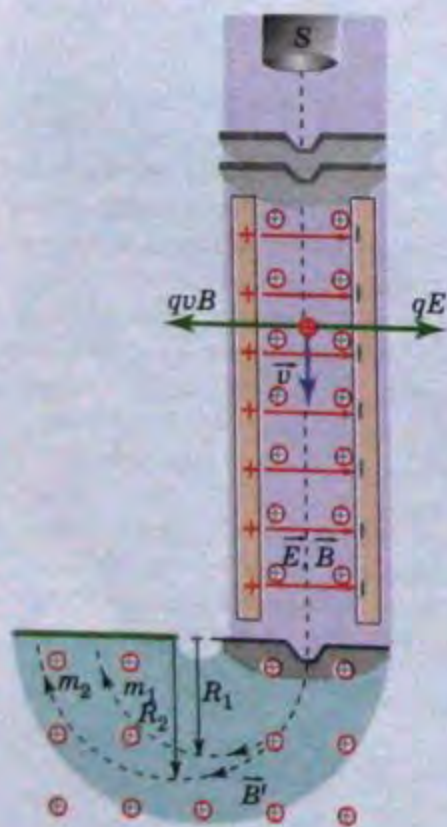
Використання сили Лоренца в техніці. Рух заряджених частинок в однорідних магнітних полях використовують у багатьох пристроях, зокрема в *мас-спектрометрах* – пристроях для визначення мас заряджених частинок (йонів, ядер різних атомів та ін.).

Принципову схему мас-спектрометра наведено на мал. 126. Проходячи крізь спеціальні отвори, йони, що вилітають із джерела S , формуються у вузький пучок. Далі вони потрапляють у селектор швидкостей, в якому рухаються в 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, 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 рухатись рівномірно та прямолінійно зі швидкістю $v = \frac{E}{B}$. Далі частинки

з однаковими за значенням швидкостями влітають у камеру мас-спектрометра, в якому створене однорідне магнітне поле індукцією \vec{B}' . У цьому полі частинки рухаються під дією сили Лоренца, траєкторією їх руху

є дуга кола радіусом $R = \frac{mv}{qB'}$. Вимірю-

ючи радіуси кривизни траєкторії руху і знаючи значення v та B' , можна визначити відношення $\frac{q}{m}$.



Мал. 126. Схема мас-спектрометра

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 наближуються за своїм значенням до швидкості світла (а отже, і до великих енергій). Пучки заряджених частинок великих енергій потрібні для бомбардування атомних ядер з метою дослідження їх структури, розкриття природи ядерних сил, виявлення нових частинок, що народжуються в реакціях під час взаємодії частинок високих енергій.

Є кілька типів прискорювачів, які умовно можна поділити на дві групи: I – прискорювачі, в яких заряджені частинки рухаються тільки в електричному полі; II – прискорювачі, в яких заряджені частинки рухаються в електричному і магнітному полях.

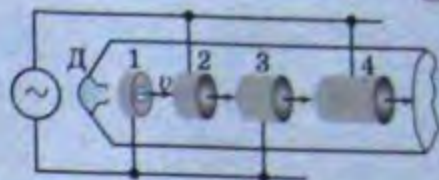
У прискорювачах I групи на заряджені частинки діє або стала різниця потенціалів (електростатичний прискорювач), або змінна, яка по черзі прикладається до двох сусідніх циліндричних електродів, осі яких розміщені вздовж однієї прямої лінії (лінійний прискорювач із синхронізованою змінною напругою). Схему лінійного прискорювача наведено на мал. 127.

Зростання енергії частинок, що вилітають з інжектора Д (пристрою, в якому утворюються прискорювані частинки), відбувається в момент проходження ними прискорюючих щілин – проміжків між циліндричними електродами. Такі прискорювачі розганяють частинки до енергії у десятки ГеВ. Довжина такого прискорювача порядку 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 у 1932 р. Е. О. 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, в якій відбувається прискорення частинок, у кілька десятків разів менші, ніж у лінійного прискорювача, на таку саму енергію.

На мал. 128 показано загальний вигляд циклотрона.

У кінці 60-х років XX ст. у Радянському Союзі було розроблено новий тип прискорювачів, а саме прискорювач на зустрічних пучках – *колайдер* (від англ. *collide* – зіткнути) – це система з двох прискорювачів заряджених частинок, в якій два пучки прискорюються назустріч один одному.



Мал. 127. Схема лінійного прискорювача



Мал. 128. Загальний вигляд циклотрона

? Дайте відповіді на запитання

1. Прискорена заряджена частинка влітає одного разу в поперечне електричне поле, іншого разу – в поперечне магнітне поле. Якими будуть траєкторії частинки у кожному випадку? (Поле протягне і частинка не вилітає за його межі.)
2. Поясніть, чому світіння у верхніх шарах атмосфери, зумовлене корпускулярним випромінюванням Сонця (полярне сяйво), спостерігається переважно у приполярних широтах.

Приклади розв'язування задач

Задача. Електрон влітає в однорідне магнітне поле зі швидкістю \vec{v} під кутом α до вектора індукції \vec{B} . Визначити 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 (див. мал. 125, б, с. 111). Швидкість розкладається на складові: паралельну вектору індукції $v_{\parallel} = v \cos \alpha$ та перпендикулярну до індукції $v_{\perp} = v \sin \alpha$. Сила Лоренца F_L діє на електрон у площині, перпендикулярній до вектора \vec{B} , надаючи йому доцентрового прискорення:

$$F_L = \frac{mv_{\perp}^2}{R}, \quad evB \sin \alpha = \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{R}. \quad \text{Звідси } R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}.$$

Вздовж поля електрон рухається за інерцією з постійною швидкістю, оскільки у цьому напрямку не діють ніякі сили. В 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, $h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha$. Враховуючи, що

$$T v_{\perp} = 2\pi R, \quad \text{отримуємо } T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}.$$

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

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

Вправа 15

1. В однорідне магнітне поле індукцією 0,085 Тл влітає електрон зі швидкістю $4,6 \cdot 10^7$ м/с, напрямленою перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначити силу, яка діє на електрон в магнітному полі, і радіус дуги кола, по якій він рухається. Рух відбувається у вакуумі.
2. Протон і електрон влітають у однорідне магнітне поле з однаковою швидкістю, перпендикулярною до ліній індукції. У скільки разів радіус кривизни траєкторії протона більший за радіус кривизни траєкторії електрона?
3. Електрон, влітаючи в однорідне магнітне поле під кутом 60° до ліній магнітної індукції, рухається по спіралі діаметром 10 см з періодом обертання $6 \cdot 10^{-6}$ с. Визначити швидкість руху електрона, магнітну індукцію поля і крок спіралі.
4. Електрон рухається у магнітному полі індукцією 2 мТл, по гвинтовій лінії радіусом 2 см, крок якої 5 см. Визначити швидкість руху електрона.
5. Однорідні електричне і магнітне поле розташовані взаємно перпендикулярно. Напруженість електричного поля становить 1 кВ/м, а індукція магнітного поля – 1 мТл. Якими мають бути напрям і значення швидкості електрона, щоб траєкторія цього руху була прямолінійною?

§ 26. 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 не обґрунтованою.

За сучасними поглядами на будову речовини кожен електрон в атомі має *спіновий та орбітальний магнітні моменти*. Так, під час обертання одного електрона навколо ядра створюється струм, середнє значення якого можна записати формулою $I_{\text{сер}} = \frac{e}{T}$, де T – період обертання електрона навколо

ядра. З цим струмом пов'язаний орбітальний магнітний момент електрона $p_m = I_{\text{сер}} S$, де S – площа, охоплювана орбітою електрона.

Електрони мають і власне магнітне поле, що характеризується спіновим магнітним моментом. Термін «спін» (англ. *spin* – *вертено*) 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 квантово-механічною 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 вздовж ліній магнітного поля і може збігатися з напрямком вектора \vec{B} або бути йому протилежним.

Отже, атом (чи молекула) будь-якої речовини – це складна мікроскопічна (елементарна) магнітна система. Результуючий магнітний момент атома дорівнює векторній сумі спінових та орбітальних магнітних моментів окремих електронів. Оскільки власні магнітні моменти протонів та ядра значно менші за магнітні моменти електронів, то вважають, що магнітні властивості атома визначаються магнітними властивостями його електронної оболонки.

Залежно від кількості електронів у 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 момента, тобто в 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). Всередині діамагнетика, внесеного в зовнішнє магнітне поле, відбувається так званий діамагнітний ефект, що полягає у виникненні у атомів речовини індукованого (наведеного) магнітного моменту, який завжди напрямлений проти вектора індукції магнітного поля, тому відносна магнітна проникність діамагнетиків менша за одиницю ($\mu < 1$).



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

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

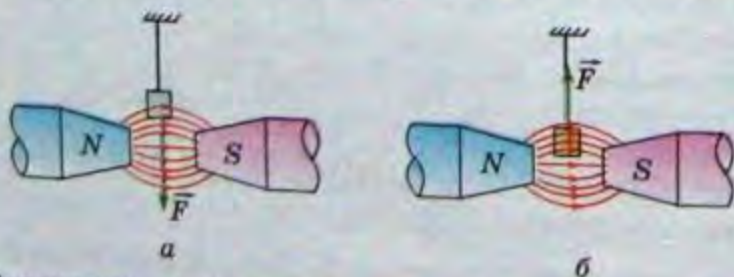
Після внесення парамагнітної речовини у зовнішнє магнітне поле в ній, поряд із слабким діамагнітним ефектом, відбувається переважна орієнтація елементарних магнітних моментів атомів у напрямку цього поля. Тому парамагнетики намагнічуються вздовж зовнішнього поля і, отже, підсилюють його, їх магнітна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

Зразки, виготовлені з пара- чи діамагнетика, по-різному себе поведуть, будучи внесені 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 – втягується (мал. 129).

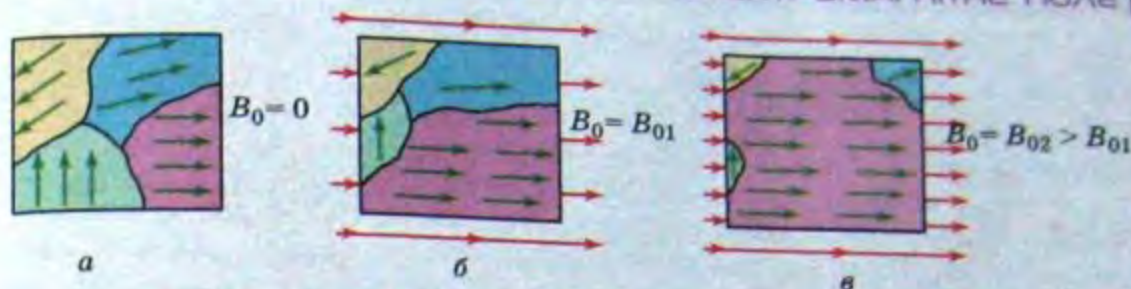
Механізм намагнічування парамагнетиків дуже схожий на механізм поляризації полярних діелектриків. Діамагнетизм не має аналога серед електричних властивостей речовини.

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

Досліджуючи природу феромагнетизму, французький фізик П'єр Вейсс (1865–1933) у 1907 р. висунув гіпотезу про існування в них внутрішньої взаємодії, що приводить до самодовільного (спонтанного) намагнічування окремих ділянок феромагнетика за відсутності зовнішнього магнітного поля. Вивчення будови феромагнетиків за допомогою мікроскопа показало, що дійсно, 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, в яких напрям намагнічування змінюється монотонно.



Мал. 129. Парамагнетик (а) та діамагнетик (б) в неоднорідному магнітному полі




Мал. 130. Намагнічування феромагнетика

Якщо відсутнє зовнішнє магнітне поле ($B_0 = 0$), то домени феромагнетика розміщені хаотично (мал. 130, а). Тому він не виявляє макроскопічної намагніченості. Коли феромагнетик вміщують у зовнішнє магнітне поле, його домени перемагнічуються так, щоб їхні магнітні моменти мали напрям ліній індукції зовнішнього поля (мал. 130, б) (орієнтуються у напрямку поля). При цьому змінюються межі доменів, і домени, орієнтація яких відповідала зовнішньому магнітному полю, збільшують свої розміри за рахунок доменів з іншою орієнтацією (мал. 130, в).

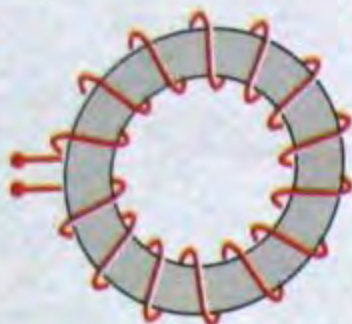
Після вимикання зовнішнього магнітного поля єдиним фактором, який впливає на орієнтацію доменів, залишається тепловий рух, який руйнує орієнтацію доменів. За низьких температур інтенсивність теплового руху виявляється недостатньою для повного руйнування орієнтації доменів і феромагнетик зберігає певне залишкове намагнічування.

В експериментах із залізом П. Кюрі встановив, що у процесі нагрівання залізо при певній температурі 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 – $360\text{ }^{\circ}\text{C}$.

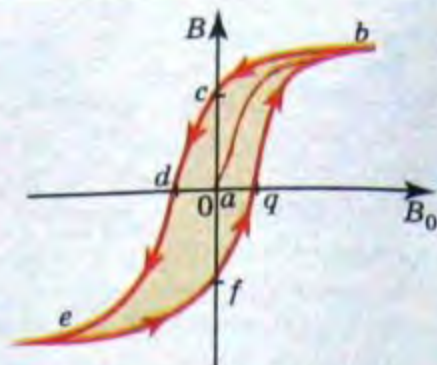
Отже, уявлення про доменну структуру феромагнетиків дає можливість пояснити особливості процесу їх намагнічування. Однак залишається нез'ясованим питання, чому існують домени, які сили змушують атоми в доменах шикуватися так, щоб їх власні магнітні поля були строго орієнтовані. Відповідь на це питання була дана у 1928 р. російським фізиком Я.І. Френкелем та німецьким фізиком В. 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.

Кількісні дослідження залежності $B = f(B_0)$ проводять, як правило, за допомогою залізного кільця, на яке намотана обмотка, якою пропускають електричний струм (мал. 131). Зразок такої форми називають *торойдом*.



Мал. 131. Тороїдальна котушка



Мал. 132. Петля гістерезису

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 мал. 132. Спочатку (точка a) домени неупорядковані. По мірі зростання B_0 орієнтація доменів впорядковується, і в точці b практично 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 напрям струму в обмотці, і знову будемо його монотонно збільшувати. Магнітне поле ($-B_0$), напрямлене протилежно до залишкового намагнічування осердя, почне переорієнтовувати домени, і в точці d внутрішнє поле зникає, $B = 0$. Подальше зростання сили струму приводить до нової повної орієнтації доменів (точка e). Зверніть увагу на те, що крива розмагнічування (bd) спадає повільніше, ніж зростала ab у процесі намагнічування феромагнетика. Описане явище називається *магнітним гістерезисом* (від грецького «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 при цьому замкнена крива дістала назву *петлі гістерезису*.

У такому циклі велика кількість енергії переходить у 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.

Застосування магнітних матеріалів. Магнітом'які феромагнітні матеріали (хімічно чисте залізо, електротехнічна сталь та ін.), які майже втрачають намагніченість після видалення із зовнішнього поля, використовують в тих електротехнічних пристроях, в яких відбувається безперервне перемагнічування осердь, магнітопроводів та інших частин трансформаторів, генераторів змінного струму, електродвигунів. Магнітожорсткі матеріали (вуглецева сталь, хромиста сталь і спеціальні сплави) використовують здебільшого для виготовлення постійних магнітів.

Великого застосування набули в сучасній радіотехніці *ферити* – феромагнітні матеріали, які погано проводять електричний струм. До них належать речовини, що є хімічними сполуками оксиду заліза з оксидами інших металів. Ферити використовують для виготовлення осердь котушок індуктивності, внутрішніх антен малогабаритних приймачів тощо.

Завдяки явищу гістерезису, яке полягає у властивості магніту зберігати «пам'ять» про минуле, став можливим запис звуку в магнітофонах і довільної інформації у довготривалій пам'яті комп'ютера.

Для звукозапису в магнітофонах і відеозапису у відеоманітофонах використовують магнітні стрічки, що являють собою гнучку основу з поліхлорвінілу чи інших речовин, на яку нанесено робочий шар у вигляді магнітного лаку, що складається з дуже дрібних голчастих частинок заліза чи іншого феромагнетика і зв'язувальних речовин. Звук записується на стрічці за допомогою електромагніту. Магнітне поле електромагніту змінюється в такт зі звуковими коливаннями. Під час відтворення звуку спостерігається зворотний процес. Намагнічена стрічка збуджує в магнітній головці електричні сигнали, які після підсилення надходять у динамік магнітофона.

Магнітострикція – відкрите Дж. Джоулем у 1842 р. явище зміни розмірів і форми тіла внаслідок його намагнічування. У феромагнетиків магнітострикція спричинює відносне видовження $\frac{\Delta l}{l} \sim 10^{-5} \div 10^{-2}$, у діаманетиків і

парамагнетиків вона мала, $\frac{\Delta l}{l} \sim 10^{-6} \div 10^{-7}$.

На явищі магнітострикції ґрунтується дія випромінювачів ультразвуку. Якщо феромагнетик помістити в змінне магнітне поле, в ньому виникатимуть механічні коливання, частота яких залежить від частоти змінного поля.

Магнітострикцію використовують також у радіотехнічних пристроях для стабілізації частоти, в роботі магнітострикційних перетворювачів, датчиків і реле.

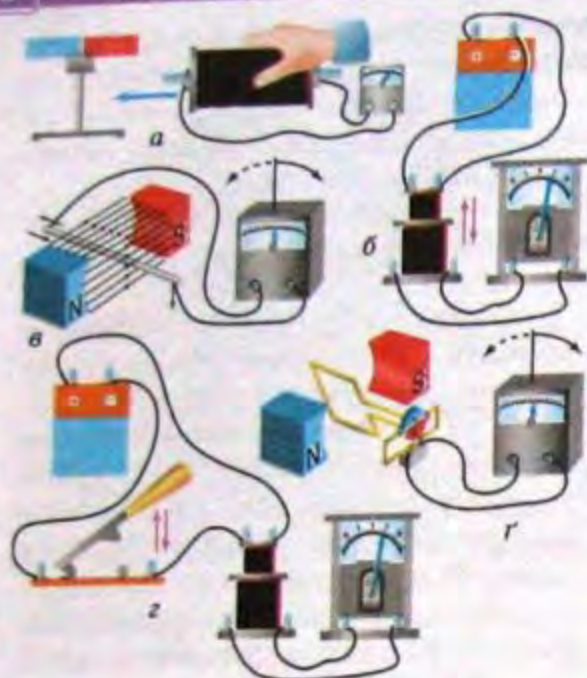
? Дайте відповіді на запитання

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

§ 27. Виникнення індукційного струму

Досліди М. Фарадея. Після відкриття Ерстеда, який довів, що навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле, природно було поставити питання про можливість утворення електричного струму в провідниках за допомогою магнітного поля. Над розв'язанням цієї проблеми працював англійський фізик М. Фарадей. Наведемо деякі з його дослідів.

1. Гальванометр показує появу струму під час переміщення (наближення чи віддалення) постійного магніту відносно нерухомого замкненого провідника (катушки). Можна і, навпаки, рухати катушку, залишаючи нерухомим магніт (мал. 133, а). Кожного разу, зближуючи або віддаляючи катушку



Мал. 133. Досліди з електромагнітної індукції

і магніт, ми отримуємо струм протилежних напрямків.

2. Походження магнітного поля і форма провідника не мають значення. На мал. 133, б постійний магніт замінено на електромагніт, а на мал. 133, в котушку – на прямолінійний провідник.

3. Можна обійтися зовсім без руху, досить замикати або розмикаючи струм в обмотці однієї нерухомої котушки (електромагніту), – в іншій, розміщеній поблизу, виникатиме струм (мал. 133, г).

4. Можна обертати рамку в однорідному магнітному полі (мал. 133, д).

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 \vec{n} до поверхні (мал. 134).

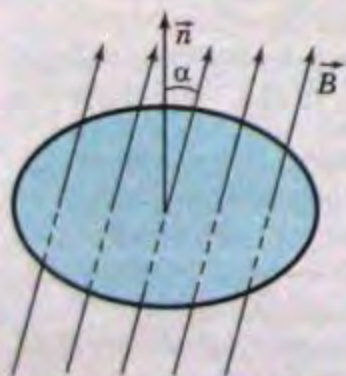
Одиниця магнітного потоку – вебер, $[\Phi] = 1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{А}}$.

Спільним у всіх розглянутих дослідах є те, що кожного разу змінюється магнітний потік, що пронизує замкнений контур. Впевнитись у цьому можна ще й так. Якщо в котушку, сполучену з гальванометром, вставити магніт, а потім рухати їх разом, так, щоб вони відносно один одного залишались у спокої, то індукційний струм не виникатиме (магнітний потік, що пронизує контур котушки, залишається сталим). Не виникає індукційний струм і у разі поступального руху замкненого провідника в однорідному полі вздовж силових ліній.

Відкрите М. Фарадеєм явище виникнення в замкненому провіднику електричного струму внаслідок зміни магнітного потоку, що пронизує контур провідника, називається *електромагнітною індукцією*. Струм, що виникає в провіднику при електромагнітній індукції, називають *індукційним*.

Напрямок індукційного струму. Правило Ленца.

М. Фарадей, аналізуючи проведені досліди, встановив, що напрям індукційного струму в провіднику залежить від того, збільшується ($\Delta\Phi > 0$) чи зменшується ($\Delta\Phi < 0$) магнітний потік через замкнений контур. Загальне правило, за допомогою якого можна



Мал. 134. До визначення магнітного потоку

визначити напрям індукційного струму в замкненому провіднику, сформулював у 1833 р. російський фізик Е. Х. Ленц (1804–1865).

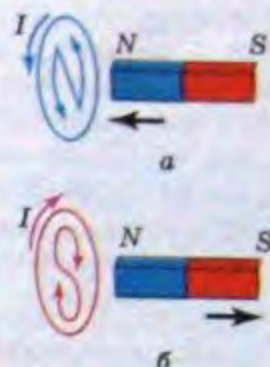
Індукційний струм у замкненому провіднику завжди має такий напрям, що створюваний цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм.

Правило Ленца впливає із закону збереження енергії.

Поеднуючи правило Ленца з правилом свердлика (букв), за допомогою якого визначають напрям вектора індукції магнітного поля у центрі колового струму, легко визначити напрям індукційного струму в замкненому провіднику. Припустимо, що до замкненого витка (чи котушки) наближається зі швидкістю v постійний магніт північним полюсом N (мал. 135, а). При цьому магнітний потік через контур витка зростає, $\Delta\Phi > 0$. Отже, за правилом Ленца у витку повинен 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 одноіменний полюс N (якби до витка наближався магніт південним полюсом S , то з 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 щоб 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 напрям індукційного струму. (Замість правила свердлика можна також скористатись правилом букв, вписаних у виток (мал. 112).)

З віддаленням постійного магніту від витка (мал. 135, 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 із зовнішнім напрямку, тобто з боку магніту матиме південний полюс S . За правилом свердлика (чи букв) з'ясовуємо, що індукційний струм у витку має проходити за стрілкою годинника.

В окремому 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, напрям індукційного струму можна визначити за правилом правої руки.



Мал. 135. Визначення напрямку індукційного струму за правилом Ленца



Мал. 136. Визначення напрямку індукційного струму 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 напрям індукційного струму в цьому провіднику (мал. 136).



Дайте відповіді на запитання

1. Щоб одержати індукційний струм у кільці за допомогою магніту, їх рухали з відносною швидкістю, що дорівнювала нулю. Чи виникав за таких умов індукційний струм у кільці?
2. Чи завжди утворюється індукційний струм у металевому кільці зі зміною у його площині: а) магнітного потоку; б) індукції магнітного поля?
3. Магніт у вакуумі вільно падає південним полюсом у центр дротяного кільця. Яким буде напрям індукційного струму при наближенні магніту до кільця?
4. Крізь провідне кільце, розташоване горизонтально, падають з однакової висоти алюмінієвий брусок і магніт. Що впаде першим?

§ 28. Електрорушійна сила 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 \mathcal{E}_i , яку можна виразити за законом Ома як $\mathcal{E}_i = I_i R$. Оскільки та сама ЕРС у провідниках з різними опорами створює неоднакові струми, то для кількісної характеристики явища електромагнітної індукції зручніше користуватись величиною ЕРС індукції \mathcal{E}_i , а не силою індукційного струму I_i .

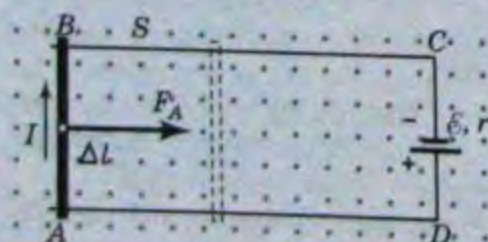
М. Фарадей у ході досліджень встановив, що ЕРС індукції, що виникає в разі зміни магнітного потоку через контур провідника, прямо пропорційна швидкості зміни цього потоку з протилежним знаком, $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ (знак «мінус»

відображає дію правила Ленца). Якщо ЕРС індукції спостерігається в котушці з N витків, то її величина буде відповідно в N разів більшою, ніж для одного витка, тобто $\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

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

Видатний німецький дослідник Г. Гельмгольц (1821–1894) теоретично вивів формулу для обчислення ЕРС індукції із закону збереження енергії. Спробуємо і ми. Вмістимо в однорідне магнітне поле індукцією B провідник довжиною Δl та опором R , який є ділянкою замкненого кола $ABCD$ (мал. 137). Опором з'єднувальних провідників BC , CD і AD нехтуємо.

Джерело постійного струму, що має ЕРС \mathcal{E} та внутрішній опір r створює в замкненому колі струм $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, який у



Мал. 137. Рух провідника у магнітному полі

провіднику проходить перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля. При цьому 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 замкненому 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 повинні дорівнювати повній роботі джерела струму $A' = \mathcal{E}I\Delta t$,

тобто $\mathcal{E}I\Delta t = I^2(R+r)\Delta t + I\Delta\Phi$. Після спрощень отримуємо вираз $I = \frac{\mathcal{E} - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{R+r}$.

Ця формула виражає закон Ома для замкнутого кола, вміщеного в магнітне поле. Роль діючої електрорушійної сили в такому колі відіграє вираз $\mathcal{E} - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$,

або $\mathcal{E} + \left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$. 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 $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. (Якщо

контур складається з N витків, то $\mathcal{E}_i = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.)

Цей вираз називають основним законом електромагнітної індукції, або законом Фарадея–Маквелла.



ЕРС індукції \mathcal{E}_i у замкнутому контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур, з протилежним знаком, $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

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

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

У разі зміни орієнтації поля (якщо $|\vec{B}| = \text{const}$) або зміни орієнтації контура в стаціонарному полі ($S = \text{const}$), $\mathcal{E}_i = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = -\frac{BS(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)}{\Delta t}$, де α_1 і α_2 – кути між нормаллю до контуру і вектором індукції в початковий і кінцевий моменти часу.

Коли магнітне поле стаціонарне ($\vec{B} = \text{const}$), а орієнтація контуру змінна ($\alpha = \text{const}$), то ЕРС індукції може виникати внаслідок зміни площі контуру. Її розраховують за формулою $\mathcal{E}_i = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = -\frac{B(S_2 - S_1)}{\Delta t} \cos\alpha$, де

S_1 і S_2 – площі контуру, на початку і наприкінці, наприклад, руху ділянки контуру.

Ці формули можна використовувати для розв'язування багатьох задач.

Дайте відповіді на запитання

1. Що називають ЕРС індукції?
2. Яка формула виражає основний закон електромагнітної індукції?
3. Виведіть формулу, за якою визначають значення ЕРС індукції в прямолінійному провіднику, що рухається, перетинаючи лінії індукції однорідного магнітного поля.

Приклади розв'язування задач

Задача. Прямолінійний провідник довжиною 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. 138). Опір всього зовнішнього кола дорівнює 2,5 Ом. Визначити силу струму в провіднику, коли він рухається перпендикулярно до ліній індукції поля зі швидкістю 12,5 м/с. У скільки разів зміниться сила струму, якщо провідник зупиниться?



Мал. 138

Дано:

$$l = 1,2 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 24 \text{ В}$$

$$r = 0,5 \text{ Ом}$$

$$B = 0,8 \text{ Тл}$$

$$v = 12,5 \text{ м/с}$$

$$R = 2,5 \text{ Ом}$$

$$I_1 = ? \quad I_2 = ?$$

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 , в колі діє ЕРС індукції ε_1 . Обчислимо її. Нехай у початковий момент часу площа контуру, що перетинає магнітне поле, S_1 . Через час Δt площа $S_2 = S_1 + v l \Delta t$. Тоді $\Delta S = v l \Delta t$, а

$$\varepsilon_1 = - \frac{B \Delta S}{\Delta t} = - B v l.$$

Таким чином, $\varepsilon_0 = \varepsilon + \varepsilon_1$, а $I_1 = \frac{\varepsilon + \varepsilon_1}{r + R}$.

При зупинці провідника ε_1 зникає, тому ε_0 буде дорівнювати ε . Обчислимо ε_1 : $\varepsilon_1 = -0,8 \text{ Тл} \cdot 12,5 \text{ м/с} \cdot 1,2 \text{ м} = -12 \text{ В}$.

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

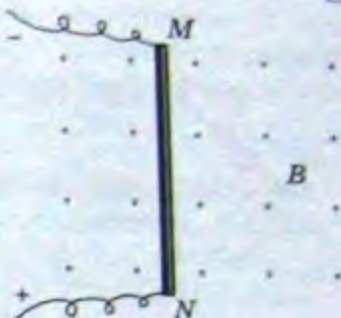
Сила струму в нерухомому провіднику $I_2 = \frac{24 \text{ В}}{0,5 \text{ Ом} + 2,5 \text{ Ом}} = 8 \text{ А}$.

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

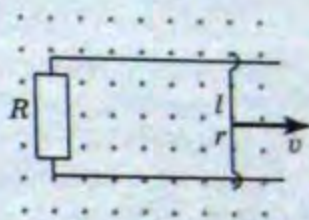
Відповідь: 4 А; у 2 рази.

Вправа 16

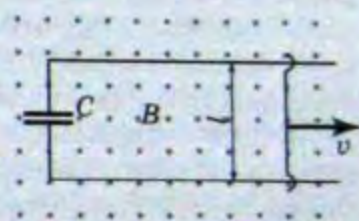
1. Провідник MN (мал. 139), довжина активної частини якого 1 м , а опір 2 Ом , міститься в однорідному магнітному полі індукцією $0,1\text{ Тл}$. Провідник приєднали до джерела, ЕРС якого дорівнює 1 В (внутрішнім опором джерела та опором підвідних проводів знехтувати). Яка сила струму в провіднику, якщо він: а) перебуває в стані спокою; б) рухається вправо зі швидкістю 4 м/с ; в) рухається вліво з тією самою швидкістю? В якому напрямку і з якою швидкістю треба переміщувати провідник, щоб у ньому не проходив струм?
2. В однорідному вертикальному магнітному полі з індукцією $B = 0,4\text{ Тл}$ по двох горизонтальних паралельних стержнях, розміщених на відстані $l = 0,5\text{ м}$ один від одного і замкнутих на резистор опором $R = 1,5\text{ Ом}$, рухається без тертя провідник опором $r = 0,5\text{ Ом}$ зі швидкістю $v = 1\text{ м/с}$, перпендикулярною до ліній індукції поля (мал. 140). Визначити: а) силу струму в колі; б) силу, направлену в напрямку руху, яку необхідно прикласти до провідника, щоб він рівномірно рухався з даною швидкістю; в) теплову потужність, яка виділяється в колі. Опором стержнів знехтувати.
3. По двох паралельних рейках, які розміщені на відстані $l = 0,2\text{ м}$ одна від одної, перпендикулярно до однорідного магнітного поля індукцією $B = 0,1\text{ Тл}$ рухається провідник зі швидкістю $v = 0,5\text{ м/с}$ (мал. 141). Визначити заряд і енергію електричного поля конденсатора ємністю $C = 20\text{ мкФ}$, який включено в коло.



Мал. 139



Мал. 140

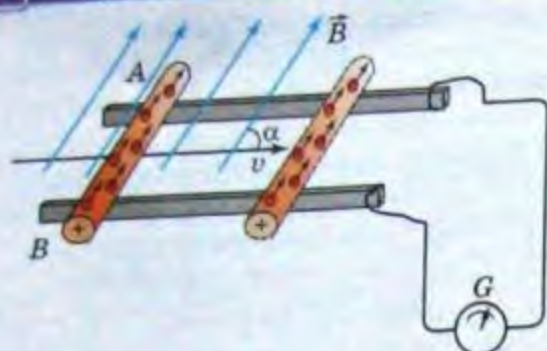


Мал. 141

§ 29. Механізми виникнення індукційного струму в провідниках

Виникнення ЕРС під час руху провідника в магнітному полі. Звернімося 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 \vec{B} розміщено прямолінійний металевий провідник довжиною l , який може ковзати по паралельних стержнях (мал. 142). При цьому швидкість руху провідника v направлена 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 кожен 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 все-



Мал. 142. До пояснення механізму виникнення ЕРС у рухомому провіднику

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 $\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha$.

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 та утворює з вектором індукції магнітного поля кут α (іншими словами, коли він перетинає лінії індукції магнітного поля). Провідник стає джерелом ЕРС. Цю властивість використовують у генераторах електроенергії.

Пояснення діамagnetизму на основі правила Ленца. У § 26 ми зазначили, що в діамagnetику, внесеному в зовнішнє магнітне поле, відбувається так званий діамagnetний ефект, котрий полягає у виникненні в атомів речовини індукованого (наведеного) магнітного моменту, який завжди напрямлений проти вектора індукції магнітного поля, тому відносна магнітна проникність діамagnetиків менша за одиницю ($\mu < 1$). Оскільки зовнішнє магнітне поле діє не тільки на вільні носії заряду в провіднику, а й взагалі на всі заряджені частинки речовини, що рухаються, в тому числі і на зв'язані електрони, котрі рухаються на певних відстанях навколо атомних ядер, то при цьому виникають зміни в орбітальних рухах електронів, що є причиною виникнення діамagnetного ефекту в усіх без винятку речовинах.

Діамagnetизм 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) в ньому виникає індукційний струм, напрям якого, за правилом Ленца, має бути таким, щоб власним магнітним полем протидіяти зміні зовнішнього магнітного поля, яка породжує цей індукційний струм. З цього випливає, що у кожного атома речовини в момент внесення в зовнішнє магнітне поле індукцією \vec{B} виникає власний магнітний момент, напрямлений проти цього поля.

Індукційне електричне поле. Розглянемо випадок утворення індукційного струму в замкненому провіднику, коли змінюється магнітний потік через площину, обмежену цим провідником, але ніякого відносного руху

редині провідника таке електростатичне поле (направлене від B до A), в якому на електричні заряди провідника діятиме сила, рівна за значенням і протилежна за напрямком силі Лоренца. Отже, зміщення електронів до кінця A припиниться за умови

$$F_e = F_L. \quad \text{Оскільки} \quad F_e = eE = e \frac{U}{l}, \quad \text{а}$$

$$F_L = evB \sin \alpha, \quad \text{маємо} \quad e \frac{U}{l} = evB \sin \alpha,$$

$$\text{звідки} \quad U = Blv \sin \alpha.$$

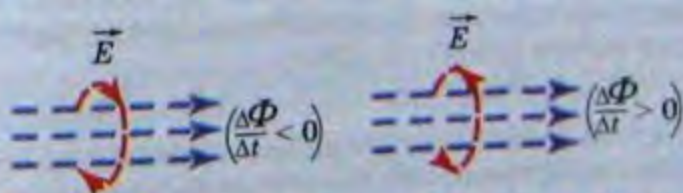
немає. Магнітне поле, що пронизує контур, в цьому випадку привести заряди у рух не може, оскільки воно діє лише на рухомі заряди (зрозуміло, хаотичний тепловий рух не враховуємо). Проте на нерухомі заряди може діяти електричне поле. Якщо це так, то звідки це поле береться? Можливо саме змінне магнітне поле може створювати (індукувати) електричне поле, яке вже й збуджує в замкненому провіднику індукційний струм?

Таке припущення вперше висловив Дж. Максвелл. Розвиваючи цю ідею, він створив теорію електромагнітного поля, яка була підтверджена багатьма дослідженнями. За теорією Максвелла, у просторі, в якому існує змінне магнітне поле, обов'язково виникає так зване *індукційне електричне поле*. При цьому 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 ним індукційним електричним струмом.

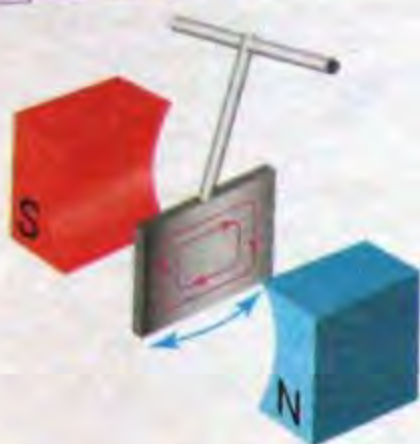
Тепер явище електромагнітної індукції постає перед нами у новому світлі. Головне в ньому – це *процес утворення змінним магнітним полем індукційного електричного поля*. Суть явища електромагнітної індукції в нерухомому провіднику полягає, в першу чергу, у виникненні електричного поля, яке приводить у рух електричні заряди.

Електричне поле, що виникає в результаті зміни магнітного поля, має зовсім іншу структуру і властивості, ніж вивчене нами електростатичне (стаціонарне). Нагадаємо, що електростатичне поле зв'язане з електричними зарядами, і його лінії напруженості починаються і закінчуються на цих зарядах. Внаслідок цього воно не може підтримувати замкнутий рух вільних електронів або інших носіїв заряду, тобто забезпечити виникнення ЕРС. Індукційне електричне поле створює ЕРС в замкненому контурі, отже, воно безпосередньо не пов'язане з електричними зарядами, його лінії напруженості не мають ні початку, ні кінця – вони замкнені, як і лінії індукції магнітного поля. Таке поле називають *вихровим*. Крім того, лінії напруженості електричного і індукції магнітного полів розміщені у взаємно перпендикулярних площинах (мал. 143). Чим швидше змінюється магнітна індукція, тим більша напруженість електричного поля. Згідно з правилом Ленца із зменшенням магнітної індукції напрям вектора напруженості визначається за правилом свердлика (правого гвинта). У випадку збільшення магнітної індукції напрям вектора індукції утворює лівий гвинт з напрямом вектора \vec{B} .

Ще раз звернімо увагу на принципову відмінність між індукційним електричним і електростатичним полями нерухомих зарядів. При переміщенні зарядів в електростатичному полі робота вздовж замкнутої траєкторії дорівнює нулю. Однак це не стосується індукційного поля. Дійсно, досліди з електромагнітної індукції показали, що в замкнутому провіднику, який міститься в змінному магнітному полі, виникає індукційний електричний струм. Отже, в ньому переміщуються заряди. І якщо провідник має опір, то



Мал. 143. До визначення напрямку вектора напруженості вихрового електричного поля



Мал. 144. Дослід, що демонструє гальмування коливань пластини-маятника у магнітному полі внаслідок виникнення струмів Фуко

він нагрівається, і при цьому виконується робота. Однак у замкнутому контурі зі струмом відсутнє джерело струму, яке б могло виконувати цю роботу. Значить, роботу виконує індукційне поле, а отже, робота індукційного поля вздовж замкненої траєкторії не дорівнює нулю.

Вихрові струми. До цього часу ми говорили лише про лінійні провідники, в 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 називаються вихровими струмами.

Вперше вихрові струми виявив французький учений Франсуа Араго Фуко (1786–1853) у 1824 р., тому їх ще називають струмами Фуко.

Фуко відкрив явище нагрівання металевих тіл, які обертаються у магнітному полі, вихровими струмами. Струми Фуко виникають під дією змінного електромагнітного поля і за своєю фізичною природою нічим не відрізняються від індукційних струмів, що виникають у лінійних провідниках.

Оскільки електричний опір провідників малий, то сила струмів Фуко може досягати великих значень. Згідно з правилом Ленца вони вибирають у провіднику такий напрямок, щоб протидіяти причині, яка їх викликає. Наприклад, суцільний провідник (пластина), рухаючись у сильному магнітному полі, зазнає сильного гальмування, яке пояснюється взаємодією струмів Фуко з магнітним полем (мал. 144). (Цей ефект використовують для демпфірування 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. Останні мають вигляд котушки, яка живиться від високочастотної батареї великої сили. В середину поміщають тіло-провідник, в якому виникають вихрові струми, які й розігрівають його до плавлення.

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

? Дайте відповіді на запитання

1. Яка природа сили, що збуджує індукційний струм у провіднику, який рухається у постійному магнітному полі?
2. Яка природа сили, що збуджує індукційний струм у нерухомому контурі, який пронизується змінним магнітним полем?
3. Чим відрізняється вихрове електричне поле від електростатичного, чи стаціонарного?
4. Вектор індукції магнітного поля Землі напрямлений з півдня на північ, а автомобіль має швидкість із заходу на схід. Чи буде відбуватись дія магнітного поля на заряди кузова автомобіля?


5. Заряджені частинки у радіаційних поясах Землі рухаються по гвинтових лініях уздовж ліній магнітної індукції Землі, але поблизу магнітних полюсів вони гальмуються і розпочинають рухатися у протилежному напрямі. Яка причина гальмування?
6. Що таке вихрові струми? У чому проявляється їх негативний вплив?

§ 30. Самоіндукція

ЕРС самоіндукції. За законом Фарадея–Максвелла $\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, елек-

трорушійна сила індукції виникає за будь-яких змін магнітного потоку через контур провідника незалежно від природи цього потоку. *Будь-які зміни власного магнітного потоку, створюваного струмом у провіднику, також приводять до виникнення в ньому індукційного струму.*

Розглянемо котушку, що має N витків, в якій тече струм I від зовнішнього джерела. Цей струм створює в котушці магнітне поле, і тому її витки пронизує власний магнітний потік Φ . Якщо якимось способом змінювати струм у котушці (наприклад, за допомогою реостата або замиканням і розмиканням кола), то змінюватиметься і власний магнітний потік котушки. Як показують досліди, при цьому 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, зумовленої зміною струму в цьому провіднику, називається **самоіндукцією**.

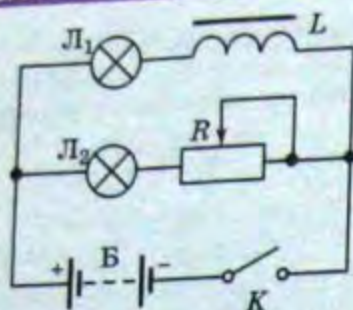
Самоіндукція – це окремий випадок явища електромагнітної індукції. Електрорушійну силу в цьому випадку називають ЕРС самоіндукції \mathcal{E}_{ci} . Оскільки власний магнітний потік котушки пропорційний струму I в ній, то \mathcal{E}_{ci} зручніше пов'язати зі швидкістю зміни струму в котушці. Очевидно,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

Визначимо одиницю індуктивності провідника в СІ: $L = -\frac{\mathcal{E}_{ci} \Delta t}{\Delta I}$;

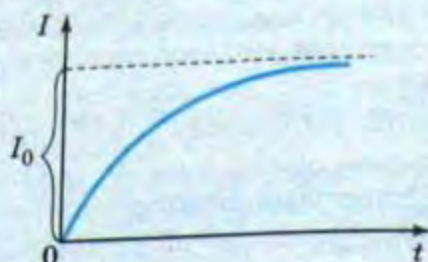
$[L] = \frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Гн}$. Одиницю індуктивності названо на честь американсько-

го фізика Джозефа Генрі (1799–1878).

Явище самоіндукції найбільш яскраво проявляється у виникненні так званих струмів замикання та струмів розмикання в колах, які містять котушки великої індуктивності. Струми замикання можна спостерігати в колі, складеному за схемою мал. 145, а. Дві однакові лампочки L_1 і L_2 від кишенькового ліхтарика увімкнено в дві паралельні вітки, одна з яких містить котушку індуктивністю L , а друга повзунковий реостат R , за допомогою якого активні опори обох віток роблять однаковими. Замкнувши коло вимикачем K , ми побачимо, що лампочка L_1 загоряється дещо пізніше. Дій-



а



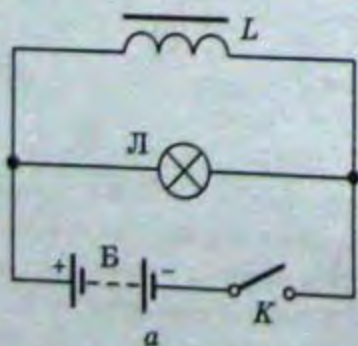
б

Мал. 145. а – схема для спостереження струмів замикання;
б – графік залежності сили струму замикання від часу

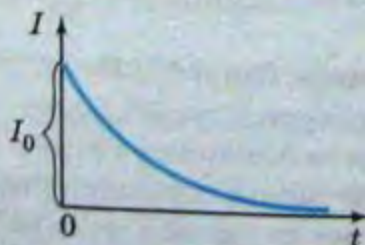
сно, у початковий момент часу сила струму зростає від нуля до деякого значення I_0 (мал. 145, б). Але зі зростанням струму у вітці, що містить котушку індуктивності, зростатиме і власний магнітний потік котушки. При цьому в результаті явища самоіндукції у вітці з котушкою виникатиме індукційний струм, який за правилом Ленца буде напрямлений проти струму, створюваного зовнішнім джерелом ЕРС. Отже, результуючий струм у вітці, що містить котушку індуктивністю L та опором R , в початковий момент часу буде меншим, ніж у вітці з таким самим за величиною опором R , але без індуктивності. Тому максимальне світіння лампочки $Л_1$ 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 (мал. 146, а). Замкнувши ключ $К$, почекаємо рівномірного світіння лампочки $Л$ і розімкнемо коло. Якщо котушка L має достатньо велику індуктивність, ми побачимо, що лампочка згасла лише через деякий час після розмикання кола. І в цьому разі зміна (спадання) струму в момент вимикання приводить до виникнення змінного магнітного потоку в котушці, а отже, до виникнення струму самоіндукції. При цьому 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



а



б

Мал. 146. а – схема для демонстрації струмів розмикання;
б – графік залежності сили струму розмикання від часу

загальна сила струму значно перевищить робочу силу струму. Як наслідок, включені в таке коло прилади вийдуть з ладу. Тому електричні кола з великими індуктивностями вимикають поступово за допомогою реостата, і з тієї ж причини електролампочки у вас вдома перегорають найчастіше в момент вимикання або вмикання струму в них.

Явище самоіндукції подібне до явища інерції в механіці. Внаслідок 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» контуру відносно змін сили струму в ньому (аналогічно масі тіла в механіці) в електродинаміці є *індуктивність*, або коефіцієнт самоіндукції контуру L .

Індуктивність. Щоб розкрити фізичний зміст поняття індуктивності, вважатимемо, що струм у котушці змінюється зі швидкістю $1 \frac{\text{A}}{\text{с}}$. Тоді $|\mathcal{E}_{\text{cl}}| = L$, отже, індуктивність котушки дорівнює тій електрорушійній силі самоіндукції, яка виникає в котушці, якщо струм змінюється в ній зі швидкістю $1 \frac{\text{A}}{\text{с}}$.

Враховуючи 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 для випадку само-

індукції можна записати так: $\mathcal{E}_{\text{cl}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$. Порівнюючи цей

вираз із формулою $\mathcal{E}_{\text{cl}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, дістаємо формулу для обчислення індуктив-

ності нормального соленоїда $L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$. Цю формулу можна виразити че-

рез об'єму 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 - кіль-

кість витків на одиницю довжини, $n = \frac{N}{l}$.

З двох виразів для ЕРС самоіндукції, а саме $\mathcal{E}_{\text{cl}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ та $\mathcal{E}_{\text{cl}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$,

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.

? Дайте відповіді на запитання

1. Що називають явищем самоіндукції? Запишіть формулу, за якою визначають ЕРС самоіндукції.
2. Намалюйте схему досліду і поясніть явище самоіндукції під час замикання і розмикання кола.
3. Що називають індуктивністю провідника? Який фізичний зміст індуктивності?
4. Як зміниться індуктивність котушки, якщо, розтягуючи уздовж осі, збільшити її довжину?
5. Послідовно з котушкою індуктивності L_1 ввімкнули другу – індуктивності L_2 . У якому випадку індуктивність цієї ділянки буде сумою $L_1 + L_2$?
6. Котушка без осердя має один шар витків. Як зміниться її індуктивність, якщо зверху намотати другий шар витків?

§ 31. Енергія магнітного поля струму

Енергія магнітного поля. У попередньому параграфі ми розглянули дослід з виникнення у провідниках струму розмикання. Підкреслимо, що лампочка продовжувала горіти (струм текти) після вимкнення зовнішнього джерела. Це свідчить про те, що магнітне поле в котушці має енергію. Очевидно, після замикання електричного кола від джерела струму деяка додаткова енергія була затрачена на створення магнітного поля. Під час його зникнення енергія частково повертається в коло. Отже, магнітне поле, як і електричне, має енергію.

Енергію магнітного поля котушки індуктивності визначимо, виходячи з таких міркувань. Нехай після розмикання кола струм зменшується з часом лінійно. У цьому разі ЕРС самоіндукції має постійне значення, що дорівнює $\mathcal{E}_{cl} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$. Нехай t – час, за який сила струму в колі лінійно зменшується від

початкового значення I до 0. За цей час в колі проходить електричний заряд $q = I_{\text{ср}} t = \frac{I}{2} t$. Робота електричного струму при цьому $A = q \mathcal{E}_{cl} = \frac{I t}{2} \cdot \frac{L I}{t} = \frac{L I^2}{2}$.

Ця робота виконується за рахунок енергії магнітного поля котушки індуктивності.



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

Пригадаємо, що електрична енергія виражається формулами: $W_{\text{ел}} = q \frac{U}{2}$,

$W_{\text{ел}} = \frac{C U^2}{2}$ 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. Встановимо зв'язок між енергією, яка міститься в одиниці об'єму поля, і індукцією магнітного поля. Цей

зв'язок можна встановити, розглянувши будь-який провідник зі струмом, для якого можна обчислити індуктивність та індукцію поля. Найзручніше це зробити для соленоїда, в якого магнітне поле, а отже, і 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 рівною $B = \mu_0 \frac{IN}{l}$. Індук-

тивність такого соленоїда $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$. Підставивши у формулу $W_m = \frac{LI^2}{2}$

вирази для індуктивності $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$ та сили струму $I = \frac{Bl}{\mu_0 N}$, отримаємо

$$W_m = \frac{B^2 Sl}{2\mu_0}. \text{ Оскільки } Sl = V, \text{ то густина енергії } \omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}.$$

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

Взаємозв'язок електричного і магнітного полів як прояв єдиного електромагнітного поля. Сформульовані раніше закони електромагнетизму встановлено для електричного струму провідності, який створюється напрямленим рухом мікроскопічних частинок – носіїв заряду (електронів та йонів) у провідниках та вакуумі.

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

Перші досліди, поставлені, щоб відповісти на питання, чи створює наелектризоване тіло, що перебуває в русі, магнітне поле (поряд з електричним), в Берлінському університеті у 1878 р., провів американський фізик Генрі Роуланд (1848–1901). Ці дослідження продовжив російський фізик О. О. Ейхенвальд (1863–1944) у 1901–1904 рр. Особливо важко було під час цих експериментів 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 та 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 було доведено існування магнітного поля під час механічного руху наелектризованих тіл, а точними вимірюваннями підтверджено еквівалентність конвекційних струмів та струмів провідності. Досліди Роуланда і Ейхенвальда належать до серії перших експериментів, в яких було підтверджено теоретичні висновки про єдину природу електричних і магнітних явищ, які впливали із теоретичних праць Максвелла.

До Максвелла існували окремо вчення про електрику, вчення про магнетизм, вчення про світло. «Місток» між електричними та магнітними явищами було наведено експериментальними відкриттями Ерстеда, Ампера, Фарадея. Джеймс-Клерк 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 б 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 вийшла у 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 ознайомимось із ними лише якісно.

Перше рівняння Максвелла встановлює два джерела збудження магнітного поля. Оскільки у всіх експериментах магнітне поле було обов'язково пов'язане з електричним струмом, Дж. Максвелл у своїх теоретичних працях змінив електричне поле, яке породжувало вихрове магнітне поле, назвав струмом зміщення (на відміну від струму провідності та конвекційного струму). Тепер цю назву не можна визнати вдалою. Тільки при розгляді 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. Іншими словами, перше рівняння Максвелла стверджує, що магнітне поле може збуджуватись не тільки рухомими зарядами, а й змінами електричного поля.

Друге рівняння Максвелла є відображенням закону електромагнітної індукції.

Третє рівняння – закон про поле електричних зарядів, тобто є узагальненням закону Кулона.

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

Слід зазначити, що у рівняннях Максвелла середовище враховується феноменологічно, тобто без розкриття внутрішнього механізму взаємодії речовини з полем, і тому питання пояснення, узагальнення і 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 основних завдань *електронної теорії*, виникнення якої було наступним після теорії Максвелла етапом у розвитку електродинаміки.

Підведемо підсумки. *Електромагнітне поле* є формою матерії, завдяки якій здійснюється взаємодія між електрично зарядженими частинками. Це

поняття відбиває єдність електричного і магнітного полів, прояв 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. В системі відліку, відносно якої електричні заряди рухаються, взаємодія між ними відбувається за допомогою обох полів – електричного і 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 створюють вихрове магнітне поле. Взаємозв'язок між ними та їх взаємоперетворення відображають рівняння Максвелла.

? Дайте відповіді на запитання

1. Як змінилась індуктивність котушки, якщо збільшення у 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 і прилади для виявлення електромагнітного поля. Як можна виявити лише електричне поле? лише магнітне? електричне і магнітне одночасно?

Приклади розв'язування задач

Задача. 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:

$$L = 3 \text{ Гн}$$

$$\mathcal{E}_1 = 15 \text{ В}$$

$$I = 50 \text{ А}$$

$$t = ?$$

Розв'язання

За законом Ома для повного кола $\mathcal{E} = I(R + r)$, де \mathcal{E} – повна ЕРС у колі, що дорівнює для цього випадку сумі \mathcal{E}_1 (ЕРС джерела) і \mathcal{E}_2 (ЕРС самоіндукції), яка виникає після під'єднання котушки до джерела, $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$.

ЕРС самоіндукції можна визначити за формулою $\mathcal{E}_2 = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

$$\text{Тоді } \mathcal{E}_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = I(R + r).$$

За умовою задачі опори R і r дуже малі, тому $\mathcal{E}_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$, або $\mathcal{E}_1 = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$. Звідки

можна визначити швидкість зміни сили струму $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_1}{L}$. Тепер можна визначити

час, потрібний для наростання струму до значення $I = 50 \text{ А}$.

$$t = \frac{I}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} = \frac{I}{\frac{\mathcal{E}_1}{L}} = \frac{IL}{\mathcal{E}_1}, \quad t = \frac{50 \text{ А} \cdot 3 \text{ Гн}}{15 \text{ В}} = 10 \text{ с}.$$

Відповідь: 10 с .

Вправа 17

1. Крізь соленоїд, що має індуктивність $0,4 \text{ мГн}$ і площу поперечного перерізу 10 см^2 , проходить струм $0,5 \text{ А}$. Яка індукція поля всередині соленоїда, якщо він містить 100 витків? Вважати, що поле однорідне.
2. Котушка із залізним осердям перерізом 20 см^2 має індуктивність $0,02 \text{ Гн}$. Якою має бути сила струму, щоб індукція поля в осерді становила 1 мТл , якщо котушка містить 1000 витків?
3. У котушці, індуктивність якої становить $0,6 \text{ Гн}$, сила струму 20 А . Яку енергію має магнітне поле цієї котушки? Як зміниться енергія поля, коли сила струму зменшиться удвічі?
4. Визначити енергію соленоїда, в якому сила струму 10 А створює магнітний потік $0,5 \text{ Вб}$.
5. Визначити енергію магнітного поля котушки індуктивністю $0,8 \text{ Гн}$, якщо по ній проходить струм 4 А .
6. Індуктивність котушки із залізним осердям 25 Гн . Визначити ЕРС самоіндукції у момент розмикання кола, якщо швидкість зміни сили струму в ній 100 А/с .

§ 32. Змінний струм

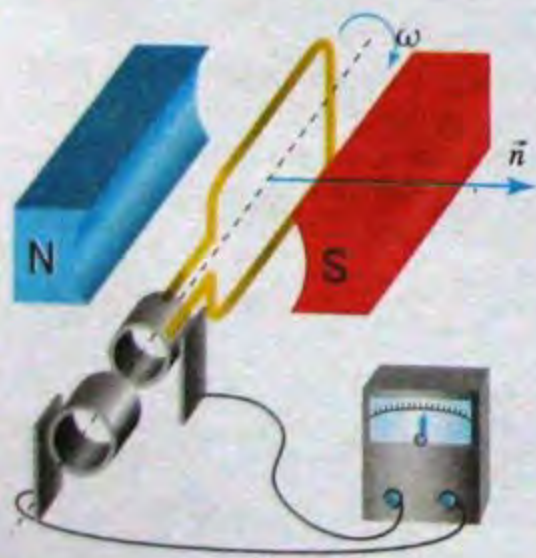
Обертання прямокутної рамки в однорідному магнітному полі. Розглянемо рамку, розміщену в однорідному магнітному полі. Досліджуючи явище електромагнітної індукції, ми з'ясували, що, у випадку обертання рамки в магнітному полі, в ній виникає індукційний струм. Дослідимо це явище детальніше.

Нехай у початковий момент часу рамка розташована так, що напрям нормалі \vec{n} до неї збігається з напрямом індукції магнітного поля \vec{B} , в якому рамка обертається (мал.147, а). Магнітний потік, який при цьому пронизує рамку, $\Phi_0 = BS$, має максимальне значення. Рамка обертається рівномірно з кутовою швидкістю ω за годинниковою стрілкою, отже у будь-який момент часу t кут повороту φ рамки $\varphi = \omega t$. Відповідно значення магнітного потоку, який про-

низує рамку, змінюється за законом $\Phi = BS \cos \omega t = \Phi_0 \cos \omega t$. 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 $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$.

Для швидкозмінних процесів слід брати $\Delta t \rightarrow 0$, тоді за означенням похідної: $\mathcal{E}_i = -\Phi'$. Формула для обчислення ЕРС індукції, що виникає в рамці, у будь-який момент часу t набуває вигляду $\mathcal{E}_i = -\Phi' = BS\omega \sin \omega t$.



Мал. 147. Обертання рамки в магнітному полі

Отже, за умови рівномірного обертання рамки в однорідному магнітному полі в ній виникає ЕРС індукції, яка з часом змінюється за синусоїдальним законом. Якщо рамка має N витків, то ЕРС індукції на її клеммах буде відповідно в N разів більшою, $\mathcal{E}_1 = BSN\omega \sin \omega t$. Зрозуміло, що максимальних значень \mathcal{E}_1 досягає в ті моменти, коли $\sin \omega t = \pm 1$. Тоді максимальне значення ЕРС індукції $\mathcal{E}_m = BSN\omega$. За один оберт рамки електрорушійна сила змінює своє значення і знак двічі, тобто здійснює одне повне коливання.

У 10 класі ми вивчали закони механічних коливань. Математичний опис електромагнітних коливань здійснюється аналогічно. Пригадаймо, у випадку коливальних рухів максимальні значення величин ще називають *амплітудними*, а значення, що вимірюються у будь-який момент часу – *миттєвими*. Зазвичай амплітудні значення величин записують великими літерами, миттєві – малими. Тоді закон зміни ЕРС можна записати так: $e = \mathcal{E}_m \sin \omega t$, де колова (циклічна) частота ω збігається з кутовою швидкістю обертання рамки у магнітному полі. Для кутової частоти справджуються формули: $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$, де ν – частота коливань, T – період коливань.

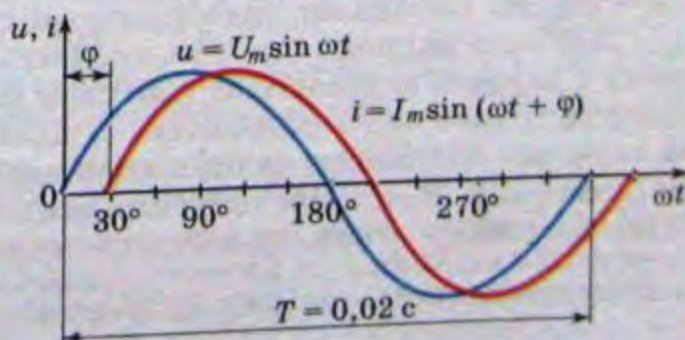
Змінний струм. Якщо рамку замкнути яким-небудь провідником, то в цьому провіднику виникне змінний струм.



Змінними вважають струми, які змінюються як за значенням, так і за напрямком.

Такими, наприклад, є промислові струми (частота яких $\nu = 50$ Гц, тому їх ще називають низькочастотними), високочастотні струми, які використовуються в радіозв'язку тощо. Змінними, взагалі, називають будь-які струми, що змінюються з часом. Найпоширенішими і найважливішими в техніці є змінні струми, сила струму і напруга яких змінюються за законами синуса або косинуса. Найпростішим способом одержання низькочастотних змінних струмів є обертання рамки з провідників в однорідному магнітному полі (або навпаки – обертання магнітного поля, яке перетинає нерухомі провідники). Цей принцип закладено у 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.і.), по колу проходитиме змінний струм $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, де φ – *зсув фаз* між коливаннями сили струму та напруги (мал. 148). Причиною виникнен-



Мал. 148. Графіки зміни напруги та сили змінного струму

ня зсуву фаз між струмом та напругою у загальному випадку є різний опір кола змінного струму (про це детальніше в наступних параграфах).

Діючі значення сили струму та напруги. У колі змінного струму напруга й сила струму весь час змінюються. Виникає запитання: якими значеннями сили струму чи напруги характеризувати цей струм? Середні значення сили струму й напруги за період дорівнюють нулю і не можуть бути їх характеристиками. Проте середнє значення квадрата сили струму за період відмінне від нуля. Пригадаємо, що кількість виділеного у провіднику тепла під час проходження по ньому постійного струму змінюється пропорційно квадрату сили струму, $Q = I^2$. Якщо сконструювати вимірювальний прилад (тепловий амперметр), відхилення стрілки якого буде пропорційним квадрату сили струму, то будучи включеним у коло змінного струму, 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 стрілка приладу. 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 й змінний струм за той самий час.

Усі амперметри, призначені для змінного струму, показують ефективне значення сили струму.

Оскільки середнє за період значення квадрата сили струму становить $\frac{I_m^2}{2}$, то корінь квадратний з цього виразу і буде визначати діюче значення сили струму $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$. Так само визначаються і діючі значення напруги та ЕРС

змінного струму: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, $\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}$.

У США та 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 у цьому випадку? У колі постійного струму потужність визначається за формулою $P = UI$. Для кола змінного струму ця формула не застосовна, оскільки сила струму і напруга змінюються. Але сила струму і напруга мають постійні амплітудні значення і змінюються за однаковими законами, отже і середнє значення потужності за будь-який період і за будь-яке число періодів буде однаковим. Внаслідок чого і 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 і напругу можна вважати постійними і середнє значення потужності струму буде визначатись миттєвими значеннями сили струму і 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

$$\Delta A = \frac{1}{2} I_m U_m \left[\cos \varphi - \cos 2\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right) \right] \Delta t.$$

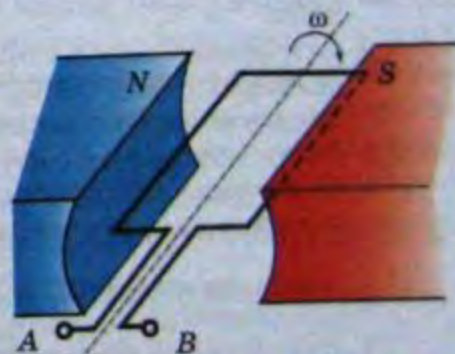
Робота струму за весь період дорівнює сумі робіт ΔA .

$$\begin{aligned} A &= \sum \frac{1}{2} I_m U_m \left[\cos \varphi - \cos 2\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right) \right] \Delta t = \\ &= \sum \frac{1}{2} I_m U_m \Delta t \cos \varphi - \sum \frac{1}{2} I_m U_m \Delta t \cos 2\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right). \end{aligned}$$

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 $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$.

? Дайте відповіді на запитання

1. Як можна отримати ЕРС, яка б змінювалась за законом синуса?
2. На мал. 149 зображено миттєве положення рамки, що обертається в магнітному полі. Визначити знаки потенціалів на виводах A і B рамки. Чи можна сказати, що чим більший миттєвий магнітний потік проходить через площу рамки, тим більша ЕРС індукується в ній?
3. Який струм називають змінним? Що таке діючі значення сили струму та напруги?



Мал. 149

Приклади розв'язування задач

Задача. В однорідному магнітному полі з індукцією $0,1$ Тл розміщено виток із провідника, площа контуру якого $0,1 \text{ м}^2$, 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?

Розв'язання

Дано:

$B = 0,1 \text{ Тл}$

$S = 0,1 \text{ м}^2$

$R = 0,1 \text{ Ом}$

$\Delta q = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$

 $\alpha = ?$

де $\Phi_1 = BS$ – потік магнітної індукції через площу контуру, що охоплює виток, на початку повороту; $\Phi_2 = BS \cos \alpha$ – кінцевий потік. Для індукційного заряду маємо вираз

$$\Delta q = \frac{(BS - BS \cos \alpha) \Delta t}{R \Delta t} = \frac{BS(1 - \cos \alpha)}{R},$$

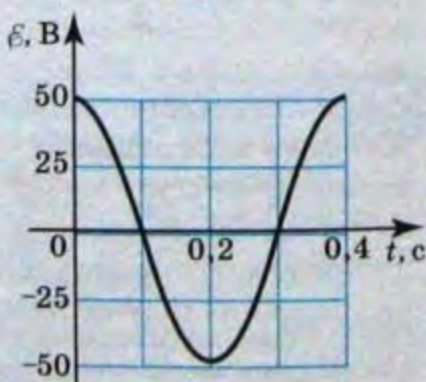
$$\cos \alpha = 1 - \frac{R \Delta q}{BS},$$

$$\cos \alpha = 1 - \frac{2 \text{ Ом} \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}}{0,1 \text{ Тл} \cdot 0,1 \text{ м}^2} = -0,5, \quad \alpha = 120^\circ.$$

Відповідь: 120° .

Вправа 18

- Під час обертання дротяної рамки в однорідному магнітному полі потік магнітної індукції, який пронизує її, змінюється залежно від часу за законом $\Phi = 0,01 \cos 10\pi t$ (усі величини задано в одиницях СІ). Обчислити похідну (Φ') і написати формулу залежності ЕРС від часу $e = e(t)$. В 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 см^2 , обертається з кутовою швидкістю 50 рад/с в однорідному магнітному полі, індукція якого $0,4 \text{ Тл}$. Написати формули залежності магнітного потоку та ЕРС від часу, якщо при $t = 0$ нормаль до площини рамки перпендикулярна до ліній індукції поля.
- За графіком (мал. 150) визначити амплітудне значення змінної ЕРС, її період та частоту. Записати формулу зміни ЕРС з часом.
- Зміну сили струму залежно від часу задано рівнянням $i = 5 \cos 200\pi t$. Визначити частоту та період коливань, амплітуду сили струму, а також значення сили струму при фазі $\frac{\pi}{3}$ рад.
- Яке значення напруги через 10 , 15 та 30 мс , якщо амплітуда напруги становить 200 В , а період 60 мс ?
- Неонова лампа починає світити, коли напруга на її електродах досягне строго визначеного значення. Яку частину періоду світитиме лампа, якщо її включити в мережу, діюче значення напруги в якій дорівнює цій напрузі?



Мал. 150



§ 33. Активний опір у колі змінного струму

Активні та реактивні навантаження. У колах змінного струму існують два принципово різних види навантажень – активні і реактивні.



Навантаження, в якому вся підведена електрична енергія перетворюється в інший вид енергії, називається **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 при звмкненому рубильнику 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 три опори: активний, індуктивний і ємнісний.



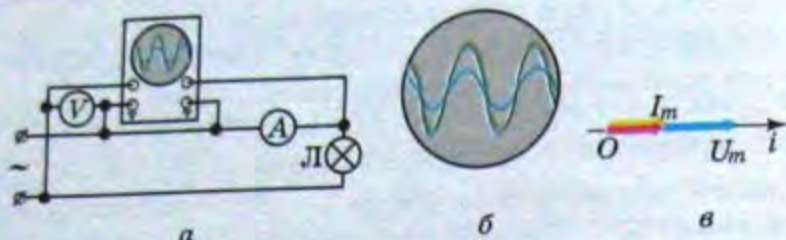
Індуктивний і ємнісний опори мають спільну назву **реактивних опорів**.

Природа реактивних опорів польова, тобто їх походження пов'язане зі змінами електричного поля (наприклад конденсатора) або магнітного (наприклад котушки зі струмом). Реактивні опори не спричиняють необоротних перетворень енергії. В колах з тільки реактивними опорами відбуваються тільки оборотні процеси: протягом однієї чверті періоду енергія струму перетворюється в енергію електричного поля конденсатора (чи магнітного поля котушки), а протягом другої чверті періоду енергія поля знову перетворюється в енергію струму. Тому в таких колах середня потужність за період дорівнює нулю, незважаючи на протікання струму у колі. Це легко продемонструвати, увімкнувши в коло з конденсатором ваттметр. Стрілка цього приладу не відхиляється, хоча в колі діє напруга і тече струм, які реєструються відповідно вольтметром і амперметром.

Розглянемо спочатку найпростіші ідеальні кола змінного струму, які мають лише один з 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 в теплову.

Один і той самий провідник чинить різний опір постійному і змінному струму. Опір провідника постійному струму називається **омічним опором**; він залежить від матеріалу, розмірів і температури провідника.



Мал. 151. а – осцилограф у колі змінного струму з активним навантаженням; б – осцилограма; в – векторна діаграма

Активний опір провідника завжди більший від омичного. Із збільшенням частоти змінного струму різниця між активним і омичним опорами провідника збільшується. Для частот до 100 Гц цією різницею можна знехтувати і вважати, що активний опір дорівнює омичному, 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 30000 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 і амперметра додати двопроменевий осцилограф, підключений так, як показано на мал. 151, а, то на його екрані буде спостерігатись збіг осцилограм сили струму і напруги за фазою (мал. 151, б).

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. Проведемо довільну вісь Oi , що називається віссю струму, і від точки O відкладемо вектор сили струму довжиною I_m . Оскільки у колі з активним опором коливання сили струму і напруги збігаються за фазою, вектор напруги буде напрямлений так само, як і вектор сили струму (мал. 151, в).

Значення активного опору R в колі змінного струму можна визначити як відношення миттєвих значень напруги і 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, $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$, або через діючі значення, $P = IU \cos \varphi$.

У 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 і напруги. Вся ця потужність витрачається на нагрівання – $P = UI = I^2 R$.

Обчислена у такий спосіб потужність вимірюється у ватах і називається *активною потужністю*.



Дайте відповіді на запитання

1. Які види опору розрізняють в 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. Напишіть рівняння зміни миттєвого значення напруги і струму на активному опорі та побудуйте їх графіки.
4. Який зв'язок між діючими значеннями струму і напруги на активному опорі в колі змінного струму?
5. Через резистор проходить постійний струм силою 1А, а через лампочку – змінний, частота якого 50 Гц, діюче значення 1А. Який заряд переноситься кожним із струмів через поперечний переріз провідників за 1 хв?



§ 34. Конденсатор у колі змінного струму

Конденсатор у колах постійного та змінного струму. Підключимо до джерела постійного струму конденсатор великої ємності і амперметр. У момент замикання кола стрілка амперметра відхиляється на декілька поділок, а потім повертається у нульове положення. Це відбувається тому, що після замикання кола проходить короткочасний струм зарядки конденсатора до напруги джерела. Як тільки 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 припиняється.

На перший погляд, це здається дивним: у колі, розімкнутому 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 з протилежною полярністю, а протягом четвертої чверті – розряджається. У колі тече струм перезарядки конденсатора.

Ємнісний опір. Якщо до генератора змінного струму приєднати лампу розжарювання, вона горить яскраво. Якщо у 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'ясуємо, від чого залежить ємнісний опір. Для цього складемо коло з джерела струму, частоту якого можна змінювати, батареї конденсаторів,

ємність якої також можна змінювати, і амперметра змінного струму. Не змінюючи напруги у 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 випливає, що *ємнісний опір обернено пропорційний частоті струму і ємності конденсатора*.

Формулу для визначення ємнісного опору можна вивести і математичним шляхом. Напруга на конденсаторі $u = \frac{q}{C}$ дорівнюватиме напрузі

на кінцях кола $u = U_m \sin \omega t$. Звідки $q = U_m C \sin \omega t$. Враховуючи, 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

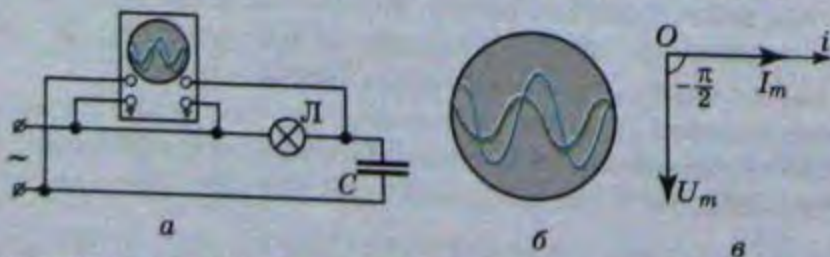
ру, який чинить конденсатор змінному струму. Остаточнo $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Ємнісний опір можна визначати і через відповідні діючі значення сили струму і 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 двопроменевого осцилографа (мал. 152, а) подати напругу з конденсатора, а на інший – напругу, миттєве значення якої пропорційне силі струму в колі (цю напругу знімають з електролампочки), то на екрані можна побачити одночасно осцилограми обох коливань – напруги і сили струму. Уважний аналіз осцилограм показує, що коливання сили струму і коливання напруги у колі з конденсатором зсунуті за фазою на $\frac{\pi}{2}$. При цьому коливання

сили струму випереджають за фазою коливання напруги (мал. 152, б). На перший погляд, це здається дивним. Проте результати досліду мають простий фізичний зміст: напруга на конденсаторі у довільний момент часу визначається наявним на пластинах електричним зарядом, який утворюється у результаті проходження струму, необхідного для зарядки конденсатора. Тому коливання напруги відстають від коливань сили струму.



Мал. 152. Спостереження за фазовими співвідношеннями у колі змінного струму з конденсатором (а, б); в – векторна діаграма



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 $i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$.

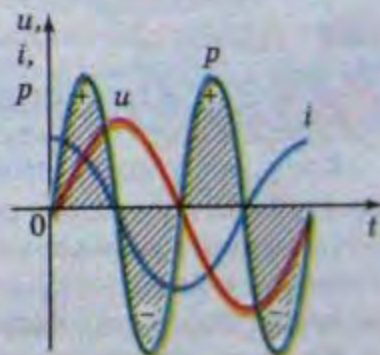
Фазові співвідношення між силою струму і напругою на ділянці кола з конденсатором зображені за допомогою векторних діаграм на мал. 152, в. Оскільки коливання напруги відстають за фазою на чверть періоду від коливань сили струму, то вектор напруги повернуто по відношенню до вектора сили струму на $-\frac{\pi}{2}$.

Потужність у колі з ємнісним навантаженням. З'ясуємо, яка потужність виділяється у 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 і напруги у колі з ємнісним навантаженням становить $\frac{\pi}{2}$, а $\cos \frac{\pi}{2} = 0$ і $P = 0$. Такий результат покаже і

ватметр, включений в електричне коло змінного струму з ємнісним опором. Зрозуміти ситуацію легко, якщо розглянути в такому колі графіки зміни напруги, сили струму і потужності від часу (мал. 153).

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 у 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 у колі і повністю та необоротно перетворює енергію електромагнітного поля в інші види. Ємнісний опір лише обмежує силу струму в колі, але не перетворює енергію електромагнітного поля у інші види енергії. Цю властивість ємнісного опору використовують для обмеження сили струму, що проходить через прилади незначної потужності (наприклад, в електробритвах).



Мал. 153. Часові залежності напруги, сили струму і потужності в колі змінного струму з ємнісним опором

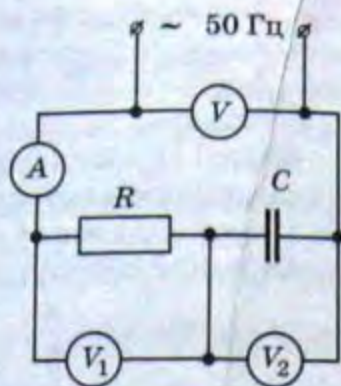


Дайте відповіді на запитання

1. Запишіть рівняння зміни миттєвого значення напруги і струму на конденсаторі та побудуйте їх графіки.
2. За якою формулою визначають ємнісний опір?
3. Який зв'язок між діючими значеннями струму і напруги на конденсаторі в колі змінного струму?
4. Послідовно з конденсатором в коло змінного струму включили лампочку. Як змінюється яскравість лампочки, якщо даний конденсатор замінити конденсатором більшої ємності? Як зміниться світіння лампочки, якщо обидва конденсатори підключити послідовно; паралельно?

Вправа 19

1. У колі, наведеному на мал. 154, прилади показують $I = 1$ А, $U_1 = 50$ В, $U_2 = 120$ В. Визначити ємність C конденсатора і напругу U у мережі.
2. Два конденсатори, ємності яких 0,2 і 0,1 мкФ, включені послідовно в коло змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Визначити струм у колі та спади напруг на першому та другому конденсаторах.
3. Конденсатор ємністю 20 мкФ та резистор, опір якого 150 Ом, включені послідовно у коло змінного струму частотою 50 Гц. Яку частину напруги, прикладеної до кола, становить напруга на конденсаторі і яку на резисторі?
4. Конденсатор та електролампочка з'єднані послідовно і включені в коло змінного струму частотою 50 Гц. Яку ємність повинен мати конденсатор для того, щоб через лампочку проходив струм 0,5 А, а спад напруги дорівнював 110 В?
5. Сила струму у колі змінюється за законом $i = 0,2 \sin 314t$. На яку напругу має бути розрахований конденсатор ємністю 2 мкФ, включений в дане коло, щоб не відбулось його пробіою?
6. Напруга на конденсаторі змінюється за законом $u = 220 \sin \left(314t - \frac{\pi}{2} \right)$. За-



Мал. 154

писати рівняння для миттєвого значення струму через конденсатор, якщо ємність конденсатора 20 мкФ. Визначити зсув фаз між струмом та напругою на конденсаторі. За яким законом змінюється заряд конденсатора?



§ 35. Котушка індуктивності в колі змінного струму

Котушка у колах постійного та змінного струму. Якщо підключити до джерела постійного струму котушку, яка має велику кількість витків з мідного дроту великого перерізу, і виміряти значення сили струму і напруги у колі, то можна побачити, що сила струму в колі досить значна за невеликої напруги. Тобто опір котушки постійному струму незначний.

Якщо ж цю котушку під'єднати до джерела змінного струму з такою ж напругою і замінити амперметр і вольтметр на прилади для вимірювання змінного струму, то помітимо, що сила струму значно зменшиться. Тобто змінному струму котушка¹ чинить більший опір, ніж постійному.

Активний та індуктивний опори котушки. Опір, який чинить котушка індуктивності змінному струму, називають *індуктивним опором* і позначають X_L .

З'ясуємо природу індуктивного опору. Для цього розглянемо процеси, що відбуваються у 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 про-

¹ Котушку в колі змінного струму інколи називають котушкою індуктивності, або індуктивною котушкою.

тидіє змінам сили струму у колі. Першої чверті періоду індукційне електричне поле, яке виникає у котушці індуктивності, протидіє наростанню сили струму у колі; протягом другої чверті – спаданню сили струму; протягом третьої і четвертої – наростанню і спаданню сили струму відповідно (але вже у протилежному напрямку).

Таким чином, під час 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 і амперметр. У будь-який момент часу напруга на котушці дорівнює за модулем ЕРС самоіндукції, $u = e_{ci}$. Змінюючи частоту змінного струму, спостерігаємо за змінами сили струму. Зі збільшенням частоти сила струму зменшується, тобто сила струму обернено пропорційна частоті струму. Відповідно індуктивний опір прямо пропорційний частоті струму. Збільшимо індуктивність котушки, для цього внесемо в котушку залізне осердя. Сила струму у колі різко зменшиться. Повільно висовуючи осердя з котушки, спостерігаємо поступове зростання сили струму у колі. Отже, індуктивний опір прямо пропорційний індуктивності. Таким чином, *індуктивний опір прямо пропорційний частоті струму та індуктивності.*

Формулу для визначення індуктивного опору можна отримати і математичним шляхом. Якщо сила струму у колі змінюється за гармонічним законом $i = I_m \sin \omega t$, то ЕРС самоіндукції $e_{ci} = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t$, враховуючи, що $u = -e_{ci}$, напруга на кінцях котушки становитиме

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \text{ Звідки } U_m = L\omega I_m, \text{ тоді}$$

$$\frac{U_m}{I_m} = \omega L, \text{ або } \frac{U_m}{I_m} = X_L. \text{ Індуктивний опір можна визначати і через відповід-}$$

$$\text{ні діючі значення сили струму і напруги: } X_L = \frac{U}{I}.$$

Формула для визначення індуктивного опору $X_L = \omega L$.

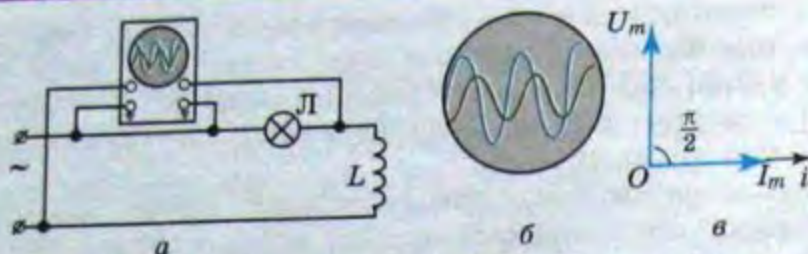
Закон Ома для кола з індуктивним опором має вигляд $I = \frac{U}{X_L}$.

Котушка індуктивності має також і власний активний опір R .

Фазові співвідношення між напругою та струмом. Зберемо коло, що містить електролампку та котушку індуктивності, так, як вказано на мал. 155. Підключимо двопробеневий осцилограф до клем генератора і паралельно активному навантаженню (електролампі). Бачимо, що осцилограми сили струму і напруги у колі з котушкою індуктивності не збігаються за фазою.

Вивчення осцилограм (мал. 155, б) показує, що у колі з котушкою сила струму і напруга зсунуті за фазою на $\frac{\pi}{2}$. При цьому коливання напруги випе-

реджають коливання сили струму. Якщо $u = U_m \sin \omega t$, то $i = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$.



Мал. 155. Спостереження за фазовими співвідношеннями у колі змінного струму з котушкою індуктивності (а, б); в – векторна діаграма



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 $i = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$.

Фазові співвідношення між струмом і напругою в колі з котушкою зображено за допомогою векторних діаграм на мал. 155, 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 враховують, 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 формулою $P = IU \cos \phi$. Оскільки зсув фаз між коливаннями струму і напруги у колі з ємнісним навантаженням становить $\frac{\pi}{2}$, $\cos \frac{\pi}{2} = 0$ і $P = 0$. Як і у випадку

з конденсатором, коло, що містить тільки котушку індуктивності не перетворює енергію, що надходить від джерела у інші види. У цьому можна переконатись і на досліді, включивши у коло змінного струму з котушкою ватметр. Прилад покаже нуль.

Щоб це зрозуміти, розглянемо мал. 156, на якому наведено графік зміни миттєвої потужності. Протягом першої і третьої чверті періоду миттєва потужність додатна, і у колі з котушкою індуктивності за рахунок енергії генератора створюється магнітне поле, енергія якого збільшується від нуля до деякого найбільшого значення. Протягом другої і четвертої чвертей періоду миттєва потужність від'ємна. Це означає, що накопичена в магнітному полі енергія повертається назад генератору. Таким чином, енергія у колі змінного струму з котушкою індуктивності за кожен період дорівнює нулю, а отже, дорівнює нулю і середня потужність змінного струму у даному колі.

Іншими словами, у колі змінного струму, що містить котушку індуктивності не відбувається необоротних перетворень енергії, а лише обмін енергією між генератором і котушкою. У цьому основна відмінність між активним й індуктивним опорами. Активний опір обмежує силу струму у колі і повністю та необоротно перетворює енергію електромагнітного поля в інші види. Індуктивний опір лише обмежує силу струму в колі, але не перетворює енергію електромагнітного поля у інші види енергії.

Цю властивість індуктивного опору широко використовують у техніці, наприклад, для плавного регулювання сили струму в колі.



Мал. 156. Часові залежності напруги, сили струму і потужності в колі змінного струму з індуктивним опором

? Дайте відповіді на запитання

1. Запишіть рівняння зміни миттєвого значення напруги і струму на котушці індуктивності та побудуйте їх графіки.
2. Що називають індуктивним опором? Яка формула відображає 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 лампочкою і котушкою індуктивності. Як зміниться яскравість лампочки, якщо у котушку ввести осердя; приєднати ще одну котушку послідовно; паралельно?

Вправа 20

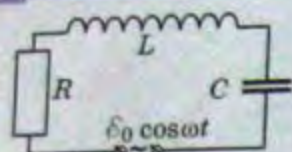
1. Якщо подати на котушку постійну напругу 30 В, сила струму в котушці дорівнюватиме 1 А. Якщо на цю саму котушку подати змінну напругу 30 В із частотою 50 Гц, сила струму становитиме лише 0,6 А. Яка індуктивність котушки? Яка потужність виділяється в котушці під час проходження постійного струму? А змінного?
2. 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.
3. Котушка довжиною 25 см і радіусом 2 см має обмотку з 1000 витків мідного дроту, площа поперечного перерізу якого 1 мм^2 . Котушка включена в коло змінного струму частотою 50 Гц. Яку частину повного опору становить її активний опір і яку індуктивний?



§ 36. Електричне коло змінного струму із активним та 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. 157) (таке коло ще називають *послідовним колом змінного струму*).



Мал. 157. Схема електричного кола змінного струму з послідовним з'єднанням активного та реактивного навантажень

Якщо до такого кола під'єднати двопроменевий осцилограф, то ми будемо спостерігати осцилограми коливань сили струму і напруги, які не збігаються за фазою. Змінюючи індуктивність котушки (вносячи залізне осердя) або ємність батареї конденсаторів, будемо спостерігати, що змінюється і різниця фаз. Отже, різниця фаз φ між коливаннями сили струму і напруги залежить від співвідношення між ємнісним та індуктивним опором. Якщо $u = U_m \sin \omega t$, то $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Враховавши 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 проходитиме 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: $u_R = I_m R \cos \omega t$;

$u_L = I_m X_L \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$; $u_C = I_m X_C \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$. Оскільки у випадку послідов-

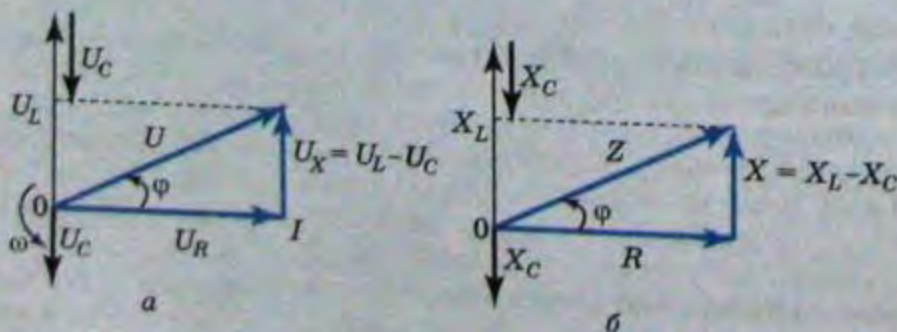
ного з'єднання елементів миттєве значення прикладеної напруги дорівнює сумі миттєвих значень її на окремих ділянках, то $u = u_R + u_L + u_C$ або

$I_m Z \cos(\omega t + \varphi) = I_m R \cos \omega t + I_m X_L \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) + I_m X_C \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$. Після простих

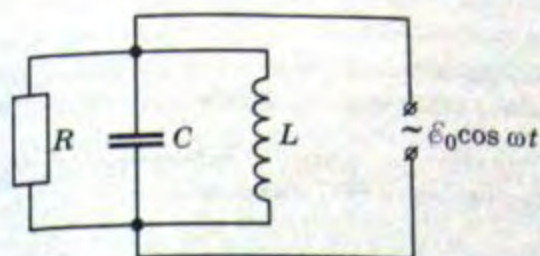
перетворень дістанемо $Z \cos \omega t \cos \varphi - Z \sin \omega t \sin \varphi = R \cos \omega t - (X_C - X_L) \sin \omega t$. Прирівнявши коефіцієнти при $\sin \omega t$ і $\cos \omega t$, матимемо, $Z \cos \varphi = R$, $Z \sin \varphi = X_C - X_L$.

Піднісши до квадрата й додавши ці вирази, дістанемо вираз для обчислення повного опору у колі змінного струму з активним та реактивним навантаженнями, $Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$.

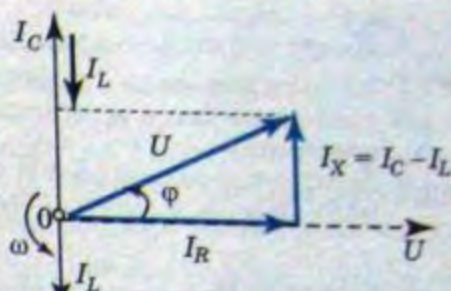
Формулу для опору повного кола можна вивести і за допомогою векторних діаграм (мал. 158). Оскільки коливання напруги на активному навантаженні збігається з коливаннями сили струму, то спад напруги на активному опорі U_R відкладаємо вздовж осі струму. Коливання напруги на котушці U_L випереджають коливання сили струму на $\frac{\pi}{2}$, тому вектор U_L поверну-



Мал. 158. Векторні діаграми: а – напруг; б – опорів (для послідовного кола)



Мал. 159. Схема паралельного кола змінного струму



Мал. 160. Векторна діаграма сил струмів для випадку паралельного з'єднання активного та реактивного навантажень

тий 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 мал. 158, а видно, що $U_Z^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$, де спади напруг на відповідних опорах можна виразити як $(IZ)^2 = (IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2$. Тоді повний опір кола обчислюється за формулою $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

За діаграмою опорів (мал. 158, б) легко визначити зсув фаз між напругою джерела струму і струмом у колі: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$ або $\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U}$.

Паралельне коло змінного струму з активним, ємнісним та індуктивним опорами. При паралельному з'єднанні резистора, котушки та конденсатора (мал. 159) 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 та реактивні елементи відповідно.

На мал. 160 показано векторну діаграму сил струмів у колі з паралельним з'єднанням активного та реактивного 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 $I = \frac{U}{Z}$.

? Дайте відповіді на запитання

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 складене із батареї, резистора і котушки індуктивності. Чи може напруга на котушці індуктивності перевищити ЕРС джерела?



§ 37. Робота і потужність змінного струму

Активна і реактивна потужності. Якщо в коло змінного струму послідовно з лампами підключити котушку індуктивності, то спричинений індуктивністю котушки зсув фаз між коливаннями струму і напруги зумовить менші показання ватметра, ніж добуток показань вольтметра й амперметра. Активна потужність витрачається на виконання корисної роботи, а потужність, яка поглинається котушкою індуктивності, в 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 називається *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 і напругою, $Q = IU \sin \varphi$ або $Q = I^2(X_L - X_C)$.

Одиниця реактивної потужності – вар, $[Q] = 1 \text{ вар}$.

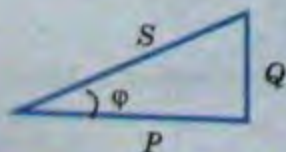
Помноживши сторони трикутника напруг (мал. 158, а) на величину струму I , дістанемо трикутник потужностей (мал. 161). Повна потужність S визначається формулою $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

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 $P = UI \cos \varphi$.

$\cos \varphi$ називається *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. При цьому частина цієї енергії перетворюється у теплову (внутрішню енергію обмоток генератора, ліній електропередачі і споживача). Потужність теплових втрат $P = I^2 R$. Енергія, яка витрачається на нагрівання проводів, обернено пропорційна квадрату коефіцієнта потужності. Наприклад, якщо $\cos \varphi = 0,8$, то втрати майже в 1,5 рази більші, ніж при $\cos \varphi = 1$.



Мал. 161. Трикутник потужностей

Підвищення коефіцієнта потужності одне з головних завдань будь-якого виробництва. Однією з важливих умов збільшення $\cos\varphi$ є правильна експлуатація електродвигунів, включених 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.

Особливо ефективним способом підвищення $\cos\varphi$ є підключення паралельно двигуну, що працює, спеціальних компенсуючих конденсаторів. Цим способом коефіцієнт потужності установки можна довести до одиниці. У випадку паралельного з'єднання індуктивності і ємності в колі змінного струму енергія нагромаджується в магнітному полі котушки індуктивності й електричному полі конденсатора і повертається до джерела від цих елементів кола в різні моменти часу. Тому при паралельному з'єднанні котушки індуктивності й конденсатора частина реактивної енергії циркулює між ємністю й індуктивністю, минаючи джерело (генератор) і проводи лінії. Саме тому одним із способів збільшення $\cos\varphi$ є підключення конденсатора паралельно індуктивно-активному навантаженню.

? Дайте відповіді на запитання

1. За яких умов ділянка кола змінного струму зі з'єднаними послідовно резистором, котушкою і конденсатором споживатиме найбільшу потужність? Чому вона дорівнює?
2. У чому відмінність одиниць активної і реактивної потужностей?
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 перерізи дротів у колах змінного струму?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Котушка, активний опір якої $R_k = 6$ Ом, а індуктивний $X_L = 10$ Ом, з'єднана послідовно з активним навантаженням опором $R = 2$ Ом та конденсатором, ємнісний опір якого $X_C = 4$ Ом. В коло подається напруга 50 В. Визначити: а) повний опір кола; б) струм у колі; в) коефіцієнт потужності; г) активну, реактивну та повну потужність кола; ґ) напругу на кожному навантаженні.

Дано:

$R_k = 6$ Ом
 $X_L = 10$ Ом
 $R = 2$ Ом
 $X_C = 4$ Ом
 $U = 50$ В

а) Z – ?
 б) I – ?
 в) $\cos\varphi$ – ?
 г) P, Q, S – ?
 ґ) 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

$$\cos\varphi = \frac{R_k + R}{Z}, \quad \cos\varphi = \frac{6 \text{ Ом} + 2 \text{ Ом}}{10 \text{ Ом}} = 0,8.$$

Активна потужність $P = I^2(R_k + R)$, $P = 5^2 \text{ A}^2 \cdot (6 \text{ Ом} + 2 \text{ Ом}) = 200 \text{ Вт}$.

Реактивна потужність $Q = I^2(X_L - X_C)$, $Q = 5^2 \text{ A}^2 \cdot (10 \text{ Ом} - 4 \text{ Ом}) = 150 \text{ вар}$.

Повна потужність $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, $S = \sqrt{200^2 \text{ Вт}^2 + 150^2 \text{ вар}^2} = 250 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Спади напруги на опорах кола:

$U_{R_k} = IR_k$, $U_{R_k} = 5 \text{ А} \cdot 6 \text{ Ом} = 30 \text{ В}$; $U_L = IX_L$, $U_L = 5 \text{ А} \cdot 10 \text{ Ом} = 50 \text{ В}$;

$U_C = IX_C$, $U_C = 5 \text{ А} \cdot 4 \text{ Ом} = 20 \text{ В}$; $U_R = IR$, $U_R = 5 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом} = 10 \text{ В}$.

Відповідь: $Z = 10 \text{ Ом}$; $I = 5 \text{ А}$; $\cos \varphi = 0,8$; $P = 200 \text{ Вт}$; $Q = 150 \text{ вар}$; $S = 250 \text{ В} \cdot \text{А}$;

$U_R = 30 \text{ В}$; $U_L = 50 \text{ В}$; $U_C = 20 \text{ В}$.

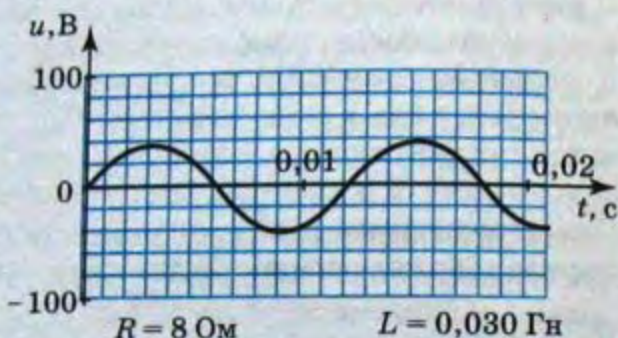
Задача 2. На мал. 162 зображено графік зміни напруги для синусоїдального змінного струму.

Визначити:

а) Циклічну частоту струму, амплітудне значення напруги, діюче значення напруги.

б) В коло включено тільки резистор, активний опір якого вказано на малюнку. Обчислити амплітудне і діюче значення струму, середню потужність струму в цьому випадку. Записати закон зміни сили струму в колі. Побудувати графіки зміни сили струму та середньої потужності.

в) В коло включено послідовно активний опір R і котушку з індуктивністю L (відповідні значення вказані на малюнку). Обчислити реактивний і повний опір, амплітудне значення струму в цьому колі, коефіцієнт потужності та кут зсуву фаз струму відносно напруги; середню потужність. Побудувати графіки зміни сили струму та середньої потужності.



Мал. 162

Розв'язання

а) За даними графіка визначаємо $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega = \frac{2 \cdot 3,14}{0,012 \text{ с}} = 523 \text{ с}^{-1}$; $U_m = 40 \text{ В}$,

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 28 \text{ В}.$$

б) Якщо в колі є лише активне навантаження опором $R = 8 \text{ Ом}$, то амплітудне значення сили струму $I_m = \frac{U_m}{R}$, $I_m = \frac{40 \text{ В}}{8 \text{ Ом}} = 5 \text{ А}$, діюче значення сили струму

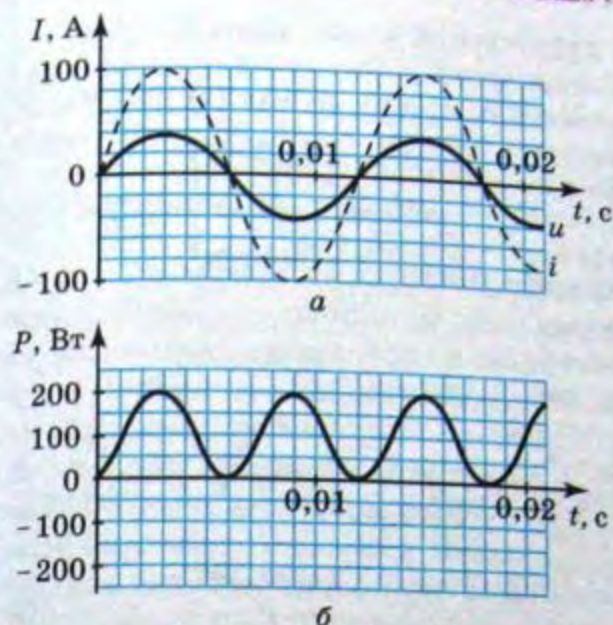
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, I = \frac{5 \text{ А}}{\sqrt{2}} = 3,5 \text{ А}.$$

Оскільки на активному навантаженні струм збігається за фазою з напругою, то середня потужність $P = IU = \frac{I_m U_m}{2} = 100 \text{ Вт}$.

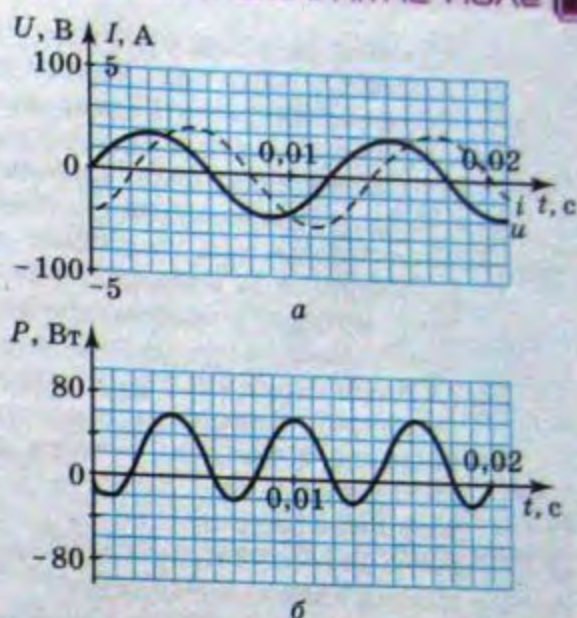
Закон зміни сили струму в колі: $i = 5 \sin 166,7 \pi t$.

Графіки зміни сили струму та потужності наведено на мал. 163, а, б.

в) Якщо коло складається з послідовно з'єднаних активного навантаження та котушки індуктивності, реактивний та повний опори становлять



Мал. 163. Графіки зміни сили струму (а), потужності (б) у випадку лише активного навантаження у колі



Мал. 164. Графіки зміни сили струму (а) та потужності (б) у випадку послідовного з'єднання активного навантаження та котушки

$$X_L = \omega L = 523 \text{ с}^{-1} \cdot 0,03 \text{ Гн} = 16 \text{ Ом.}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad Z = \sqrt{8^2 \text{ Ом}^2 + 16^2 \text{ Ом}^2} = 18 \text{ Ом.}$$

Амплітудне значення сили струму $I_m = \frac{U_m}{Z}, \quad I_m = \frac{40 \text{ В}}{18 \text{ Ом}} = 2,2 \text{ А.}$

Коефіцієнт потужності та кут зсуву фаз: $\cos \varphi = \frac{R}{Z}, \quad \cos \varphi = \frac{8 \text{ Ом}}{18 \text{ Ом}} = 0,44, \quad \varphi = 64^\circ.$

Середня активна потужність

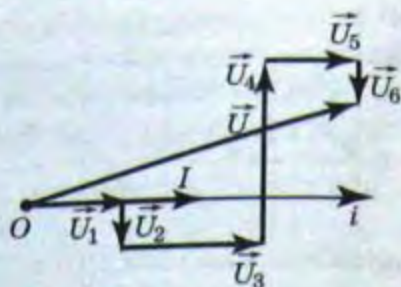
$$P = IU \cos \varphi = \frac{I_m U_m \cos \varphi}{2}, \quad P = \frac{2,2 \text{ А} \cdot 40 \text{ В} \cdot 0,44}{2} = 20 \text{ Вт.}$$

Графіки зміни сили струму та потужності у випадку послідовного з'єднання активного опору та котушки індуктивності наведено на мал. 164, а, б. Слід зазначити, що у цьому випадку середня потужність набуває від'ємних значень, на відміну від попереднього випадку, коли коло містить лише активний опір.

Вправа 21

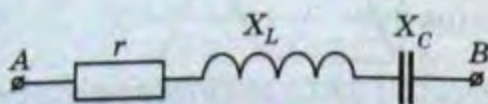
1. У коло змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц під'єднано послідовно конденсатор ємністю 35,4 мкФ, котушку, індуктивність якої 0,7 Гн, та резистор, активний опір якого 100 Ом. Визначити струм у колі і спад напруг на кожному елементі.
2. У коло змінного струму напругою 220 В включено послідовно конденсатор, котушку та активний опір. Визначити 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 мал. 165 наведено векторну діаграму напруг у колі змінного струму. Напруги на ділянках кола відповідно дорівнюють $U_1 = 70 \text{ В}$, $U_2 = 15 \text{ В}$.

$U_3 = 30 \text{ В}$, $U_4 = 75 \text{ В}$, $U_5 = 20 \text{ В}$, $U_6 = 10 \text{ В}$. Активний опір на п'ятій ділянці $R_5 = 4 \text{ Ом}$. Накреслити схему електричного кола, визначити повну напругу в колі, повний опір кола, коефіцієнт потужності і споживану потужність.



Мал. 165

4. У котушці в колі постійного струму під напругою 12 В тече струм 4 А. У тій самій котушці у колі змінного струму промислової частоти під напругою 12 В тече струм 2,4 А (за показами амперметра). Визначити індуктивність котушки. Якою буде активна потужність струму у колі, якщо послідовно з котушкою включити конденсатор ємністю 394 мкФ? Накреслити векторну діаграму для цього випадку.



Мал. 166

5. У нерозгалуженій ділянці кола змінного струму (мал. 166) $r = 3 \text{ Ом}$, $X_L = 6 \text{ Ом}$, $X_C = 2 \text{ Ом}$. Побудувати векторну діаграму. Визначити повний опір та коефіцієнт потужності.
6. У нерозгалуженій ділянці кола змінного струму (мал. 166) напруги на ділянках кола відповідно дорівнюють: $U_r = 40 \text{ В}$, $U_L = 80 \text{ В}$, $U_C = 50 \text{ В}$. Визначити повну напругу у колі та коефіцієнт потужності. Побудувати векторну діаграму.

§ 38. Резонанс у колі змінного струму

Резонанс напруг. З аналізу формули закону Ома для кола змінного струму із послідовним з'єднанням активних та реактивних елементів,

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}, \text{ видно, що максимального значення сила струму у колі}$$

набуває за умови рівних індуктивного і ємнісного опорів, $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$.

У цьому випадку немає зсуву фаз між коливаннями напруги і 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 весь час відбувається лише її обмін – коли енергія електричного поля конденсатора зменшується, енергія магнітного поля котушки зростає і навпаки.

З умови $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ можна визначити резонансну циклічну частоту

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ кількість коливань за секунду } \nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ і період цих коливань}$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

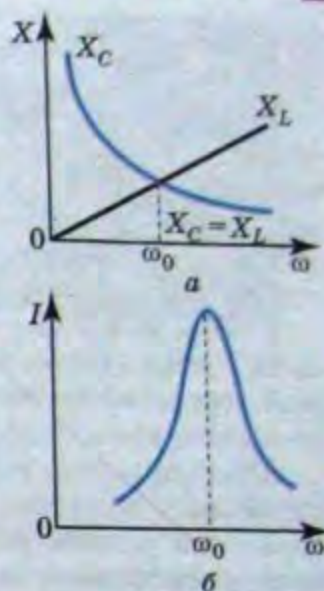
Якщо ділянку кола з послідовним з'єднанням активного, індуктивного та ємнісного навантажень під'єднати до генератора змінного струму, який виробляє струм змінної частоти, можна досягти *резонансу напруг*. З формули $X_L = \omega L$ і $X_C = \frac{1}{\omega C}$ видно,

що зі зміною частоти змінюються значення індуктивного і ємнісного опорів. Зі збільшенням частоти ємнісний опір зменшується, а індуктивний – збільшується, відповідно зменшується повний опір (мал. 167, а). Для деякого значення частоти ємнісний опір дорівнює індуктивному, при цьому 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. 167, б). Отже, в умовах резонансу повне падіння напруги в колі дорівнює напрузі на активному опорі, а $U_L = -U_C$.

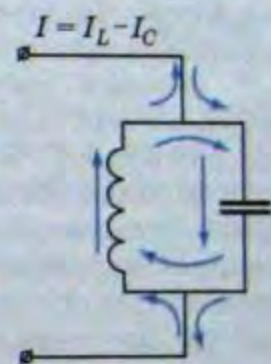
Резонанс струмів. У колі змінного струму з паралельним з'єднанням котушки та конденсатора настає *резонанс струмів*. Відомо, що у колі з конденсатором коливання сили струму випереджає коливання напруги на чверть періоду, а в колі з котушкою індуктивності коливання сили струму відстають від коливань напруги на чверть періоду, внаслідок чого в нерозгалуженій частині кола ці струми направлені в протилежних напрямках (мал. 168).

Якщо частота така, що індуктивний опір дорівнює ємнісному, то й $I_L = I_C$, але оскільки котушка крім індуктивного опору має ще й активний, то повної рівності струмів не настає і у 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, на резонансі ґрунтується техніка 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, проводи розплавляться надмірно великими струмами, ізоляція може бути пробита внаслідок виникнення високих резонансних напруг тощо.



Мал. 167. Резонансні криві



Мал. 168. Резонанс струмів

? Дайте відповіді на запитання

1. У чому суть електричного резонансу?
2. Побудуйте графік, який ілюструє явище резонансу в двох контурах з різним активним опором. В якому випадку резонансна крива буде крутішою?
3. Чому дорівнює різниця фаз між коливаннями струму і напруги під час резонансу?
4. Який з трьох елементів ділянки (активне навантаження, котушка чи конденсатор) першим пошкоджується в разі резонансу напруг?

§ 39. Генератори змінного струму

Принцип дії індукційного генератора. У даний час є багато різних типів індукційних генераторів, але всі вони складаються з одних і тих самих основних частин. Найпростіший індукційний генератор – рамка, яка рівномірно обертається у магнітному полі (мал. 169). Основні частини цієї установки такі: 1 – індуктор, який створює магнітне поле; 2 – якір (провідник, у якого наводиться ЕРС), 3 – металеві кільця і 4 – щітки.

У зображеній на малюнку моделі генератора обертається дрітjana рамка, яка є ротором (правда, без залізного осердя). Магнітне поле створює нерухомий постійний магніт. Зрозуміло, можна було б вчинити і навпаки: обернути магніт, а рамку залишити нерухомою.

Для отримання великого магнітного потоку в генераторах застосовують спеціальну магнітну систему (мал. 170), що складається з двох осердь, зроблених з електротехнічної сталі. Обмотки, що створюють магнітне поле, розміщені в пазах одного з осердь, а обмотки, в яких індукуються ЕРС, – в 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 і ротора роблять якомога меншим для збільшення потоку магнітної індукції.

У великих промислових генераторах (мал. 171) обертається саме електромагніт, який є ротором, тоді як обмотки, в яких наводиться ЕРС, укладені в пазах статора і залишаються нерухомими. Річ у тім, що підводити струм до ротора або відводити його з обмотки ротора у зовнішнє коло доводиться за допомогою ковзних 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 наш час постійний струм в обмотку ротора найчастіше подають з обмотки статора цього ж генератора через випрямляч).



Мал. 169. Найпростіша модель індукційного генератора

У малопотужних генераторах магнітне поле створюється постійним магнітом, що обертається. У такому разі кільця і щітки взагалі не потрібні. Поява ЕРС в нерухомих обмотках статора пояснюється виникненням в них вихрового електричного поля, породженого зміною магнітного потоку внаслідок обертання ротора. Сучасний генератор електричного струму – це значна споруда з мідних дротів, ізоляційних матеріалів і сталевих конструкцій. Маючи розміри в декілька метрів, найважливіші деталі генераторів вимагають виготовлення з точністю до міліметра. Більш ніде в техніці немає такого поєднання рухомих частин, які могли б породжувати електричну енергію настільки ж безперервно і економічно.



Мал. 170. Магнітна система генератора



Мал. 171. Промислові генератори

? Дайте відповіді на запитання

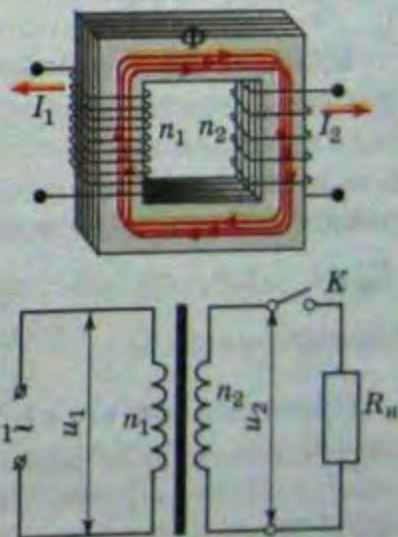
1. На якому принципі ґрунтується робота генератора змінного струму?
2. Генератор струму почав обертатись нерівномірно. Як це вплинуло на характеристики створюваного ним змінного струму?
3. Для компенсації небажаного зсуву фаз між струмом і напругою на ділянці кола з електродвигуном використовують конденсатори необхідної ємності. Як їх вмикають – паралельно чи послідовно?

§ 40. Трансформатор

Будова та принцип дії трансформатора. Змінний струм має ту перевагу перед постійним, що напругу і силу струму можна в дуже широких межах перетворювати (трансформувати) майже без втрат енергії. Як правило, електростанції, де виробляють електроенергію, розташовані на великих відстанях від її споживачів. Щоб звести до мінімуму втрати енергії, її треба передавати під високою напругою.

Пристрої, які дають можливість підвищувати напругу (у разі подачі енергії від генераторів до лінії електропередачі) і знижувати її (у разі подачі від лінії електропередачі до споживачів), називаються *трансформаторами*.

На мал. 172 зображено схему трансформатора та його умовне позначення. Він складається із двох індуктивно зв'язаних котушок (обмоток) з різною кількістю витків мідного дроту. Одну з обмоток, яку називають *первинною*, під'єднують до джерела 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 із листів спеціальної трансформаторної сталі, ізольованих один від одного тонким шаром лаку. Це роблять для того, щоб зменшити втрати на нагрівання. Нагадаємо, що у суцільних провідниках виникають значні вихрові струми (струми Фуко), які зумовлюють нагрівання провідника (§ 29).



Мал. 172. Схема та умовне позначення трансформатора

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

пропорційна кількості витків у цій обмотці, тобто $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}$.

Якщо вторинна обмотка буде розімкнута, то напруга на її затискачах U_2 дорівнюватиме ЕРС \mathcal{E}_2 , яка в ній наводиться. У первинній обмотці ЕРС \mathcal{E}_1 за числовим значенням мало відрізняється від напруги U_1 , яка підводиться до цієї обмотки. Практично їх можна вважати однаковими, тому $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = k$,

де k – коефіцієнт трансформації. Коли вторинних обмоток декілька, коефіцієнт трансформації для кожної з них визначають аналогічно.

Якщо у вторинне коло трансформатора увімкнути навантаження, у вторинній обмотці з'явиться струм. Цей струм створює магнітний потік, який, за правилом Ленца, повинен зменшити зміну магнітного потоку в осерді, що, у свою чергу, призведе до 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. При цьому збільшується потужність, яку споживає трансформатор від мережі.

Оскільки при роботі трансформатора відбуваються втрати енергії, то потужність, яка споживається первинною обмоткою, більша від потужності у вторинній обмотці. ККД трансформатора η буде визначатись 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 джоулевого тепла у дратах обмоток і перемагнічуванням осердя. Для навантаженого трансформатора на первинній обмотці $\mathcal{E}_1 \approx U_1$, напруга на затискачах вторинної обмотки становить $U_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 R_2$, де $I_2 R_2$ – спад напруги на вторинній обмотці, тоді коефіцієнт трансформації $k = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{U_1}{U_2 + U_n}$, де U_n – 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 можливості. Її треба використовувати відразу після вироблення. Тому виникає потреба передавати електроенергію на великі відстані. Але таке передавання пов'язане із значними втратами. Адже електричний струм нагріває проводи

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. При великій довжині лінії передавання енергії взагалі може бути економічно не вигідним. Істотно зменшити опір лінії практично дуже важко. Тому доводиться зменшувати силу струму.

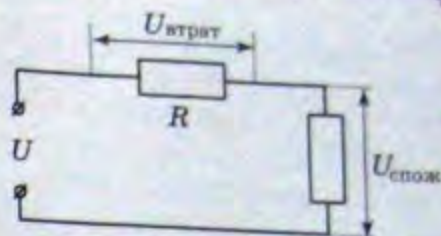
Оскільки потужність струму пропорційна добутку сили струму на напругу, то, щоб зберегти передавану потужність, треба підвищувати напругу в лінії передачі. Причому, чим довша лінія передачі, тим вигідніше використовувати вищу напругу. Так, у деяких високовольтних лініях передач використовують напругу 500 кВ. Але генератори змінного струму будують на напруги, що не перевищують 16–20 кВ, оскільки 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 проводами починається коронний розряд, що призводить до втрат енергії.

На мал. 173 показано електричну схему лінії електропередачі, на якій U – напруга на генераторі, $U_{\text{втр}}$ – напруга на проводах 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 і потужності втрат, $P_{\text{ген}} = P_{\text{спож}} + P_{\text{втр}} = (k+1) P_{\text{спож}}$, де $P_{\text{втр}} = I^2 R$.



Мал. 173. Електрична схема лінії електропередач

? Дайте відповіді на запитання

1. Чому гуде трансформатор, увімкнений в 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 і потужність, яку споживає трансформатор.
3. За яким законом треба збільшувати робочу напругу лінії, щоб зі збільшенням її довжини коефіцієнт корисної дії лінії залишався сталим?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Знижувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації $k = 5$ 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?

Розв'язання

Дано:

$k = 5$

$U_1 = 220 \text{ В}$

$U_n = 40 \text{ В}$

$R_n = 4 \text{ Ом}$

$R_{об} = ?$

$P_{втр} = ?$

$P = ? \quad \eta = ?$

Коефіцієнт трансформації $k = \frac{U_1}{U_2}$, звідки $U_2 = \frac{U_1}{k}$,

де $U_2 = U_{об} + U_n = IR_{об} + U_n$.

Сила струму у вторинній обмотці $I = \frac{U_n}{R_n}$, отже

$$R_{об} = \frac{\left(\frac{U_1}{k} - U_n\right) R_n}{U_n}, \quad R_{об} = \frac{\left(\frac{220 \text{ В}}{5} - 40 \text{ В}\right) \cdot 4 \text{ Ом}}{40 \text{ Ом}} = 0,4 \text{ Ом}.$$

Потужність вторинної обмотки $P_{втр} = I^2 R_{об} = \frac{U_n^2}{R_n^2} R_{об}$, $P_{втр} = 40 \text{ Вт}$.Потужність трансформатора $P = \frac{U_2^2}{R_{об} + R_n}$, $P = \frac{44^2 \text{ В}^2}{4,4 \text{ Ом}} = 440 \text{ Вт}$.ККД трансформатора $\eta = \frac{P_{кор}}{P} = \frac{P - P_{втр}}{P}$, $\eta = \frac{440 \text{ Вт} - 44 \text{ Вт}}{440 \text{ Вт}} = 0,9 = 90\%$.

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:

$R = 100 \text{ Ом}$

$P = 250 \text{ кВт}$

$k = 4\%$

$U = ?$

Розв'язання

Напруга генератора $U = \frac{P_{ген}}{I}$.Потужність генератора дорівнює сумі потужностей споживача P і потужності втрат $P_{втр}$. Потужність втрат можна виразити як $P_{втр} = kP$,тоді $P_{ген} = P + kP = (k+1)P$. З іншого боку $P_{втр} = I^2 R$, тоді $I = \sqrt{\frac{P_{втр}}{R}} = \sqrt{\frac{kP}{R}}$. Отже

$$U = (k+1) \sqrt{\frac{RP}{k}}; \quad U \approx 25 \text{ кВ}.$$

Відповідь: 25 кВ.

Вправа 22

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. Визначити ККД трансформатора.
2. Для визначення кількості витків у первинній і вторинній обмотках трансформатора поверх вторинної обмотки намотали $n_3 = 80$ витків дроту і, після підключення первинної обмотки до мережі з напругою 220 В, за допомогою вольтметра визначили напругу на кінцях додаткової обмотки $U_3 = 20 \text{ В}$

і на кінцях вторинної обмотки $U_2 = 36$ В. Визначити число витків у первинній і вторинній обмотках. Чому дорівнює коефіцієнт трансформації?

3. Електричний двигун працює від джерела електричного струму, напруга на клеммах якого дорівнює 120 В, а сила струму – 7,5 А. Визначити 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 повинні 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. Визначити силу струму в двигуні, печі і лампах, загальну силу струму і спожиту потужність.
6. Під якою напругою треба передавати електроенергію на відстань $l = 10$ км, щоб при густині струму $j = 0,5$ А/мм² у сталевому проводі двопровідної лінії електропередачі втрати енергії становили 1 %? Питомий опір сталі $\rho = 0,12$ мкОм·м.
7. Вторинна обмотка трансформатора, що має 100 витків, пронизується магнітним потоком, який змінюється з часом за законом $\Phi = 0,01 \cos 314t$. Написати формулу, що виражає залежність ЕРС вторинної обмотки від часу, і визначити діюче значення ЕРС.

Найголовніше в розділі «Електромагнітне поле»

Взаємодія між електричними струмами, яку називають магнітною, відбувається через магнітне поле. Провідники зі струмами одного напрямку притягуються, а зі струмами протилежних напрямків – відштовхуються з силою, що визначається законом Ампера: сила взаємодії між двома паралельними провідниками довжиною l зі струмами I_1 і I_2 , відстань між якими r ($l \gg r$),

$$\text{дорівнює } F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}.$$

Основною характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції \vec{B} .

Магнітна індукція на відстані r від прямолінійного провідника зі струмом I дорівнює $B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}$.

Магнітна індукція в центрі колового витка радіусом r , по якому проходить струм I , $B = \mu\mu_0 \frac{I}{2r}$, всередині котушки з числом витків N і довжиною l –

$$B = \mu\mu_0 \frac{IN}{l}.$$

Індукція магнітного поля, створеного кількома струмами, дорівнює векторній сумі індукцій магнітних полів, створених кожним з цих струмів

окремо (принцип суперпозиції), $\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$.

Сила Ампера F_A – сила, що діє з боку магнітного поля на прямолінійний провідник зі струмом I довжиною Δl . У випадку однорідного магнітного поля $F_A = BI\Delta l \sin \alpha$, де α – кут між напрямком струму I в провіднику та індукцією магнітного поля \vec{B} . Напрямок сили визначають за правилом лівої руки.

Сила Лоренца F_L – сила, що діє з боку магнітного поля на рухому заряджену частинку. В однорідному полі з індукцією \vec{B} вона визначається як $F_L = qBv \sin \alpha$, де q – електричний заряд частинки, v – модуль швидкості її руху, α – кут між векторами швидкості \vec{v} та індукції \vec{B} . Напрямок сили Лоренца визначають за правилом лівої руки.

Електромагнітна індукція – явище, яке вперше спостерігав у 1832 р. М. Фарадей і яке полягає у виникненні вихрового електричного поля в результаті зміни з часом магнітного поля.

У контурі, який перетинається змінним магнітним потоком, вільні носії заряду переміщуються під дією вихрового електричного поля, здійснюючи при цьому роботу, що означає виникнення ЕРС індукції.

Закон електромагнітної індукції кількісно описує явище електромагнітної індукції: ЕРС індукції \mathcal{E}_i у замкнутому контурі, який міститься в змінному магнітному полі, дорівнює швидкості зміни магнітного потоку $\Delta\Phi$, що пронизує контур, з протилежним знаком, $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Якщо провідник замкнений, то відповідно до ЕРС індукції виникає індукційний струм $I_{\text{інд}} = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$.

Якщо провідник розімкнений, то на його кінцях виникає різниця потенціалів $\phi_1 - \phi_2 = \mathcal{E}_i$. Значення ЕРС індукції, що виникає на кінцях провідника довжиною l , який рухається в магнітному полі індукцією B зі швидкістю v , $\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha$. Напрямок ЕРС індукції визначають за правилом правої руки.

Правило Ленца, сформульоване Е. Х. Ленцом у 1833 р. – положення, яке визначає напрям індукційного струму: індукційний струм у замкнутому контурі направлений так, що створений ним магнітний потік через площу, обмежену контуром, протидіє зміні магнітного потоку, який збуджує даний струм.

Самоіндукція – окремий випадок електромагнітної індукції, що полягає у виникненні ЕРС індукції в електричному колі внаслідок зміни струму в самому колі. ЕРС самоіндукції $\mathcal{E}_{\text{сі}}$ визначається законом електромагнітної індукції:

$$\mathcal{E}_{\text{сі}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \text{ де } L - \text{індуктивність контуру, } I - \text{сила струму в ньому.}$$

Змінний струм – електричний струм, який періодично змінює значення і напрям. Змінний електричний струм одержують за допомогою індукційного генератора.

При обертанні рамки з постійною швидкістю в постійному магнітному полі магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за законом $\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t$, а в рамці виникає ЕРС індукції, яка змінюється в часі за синусоїдальним законом, $e = -\Phi' = BS\omega \sin \omega t$, де $\mathcal{E}_{\text{max}} = BS\omega$. Якщо у рамці N витків, то $\mathcal{E}_{\text{max}} = BS\omega N$.

Електромагнітне поле – форма матерії, завдяки якій здійснюється взаємодія між електрично зарядженими частинками. Електричне і магнітне поля є окремими проявами електромагнітного поля. Взаємозв'язок між ними та їх взаємоперетворення відображаються рівняннями Максвелла.

Розділ 4

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ
КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

Вивчаючи у 10 класі основи механіки, ми ознайомились з особливим видом руху – механічними коливаннями та хвилями. Серед різноманітних електромагнітних явищ особливе місце належить електромагнітним коливанням та хвилям. Адже тріумфом електромагнітної теорії у XIX ст. стало експериментальне відкриття електромагнітних хвиль. Це відкриття започаткувало розвиток принципово нових засобів зв'язку.

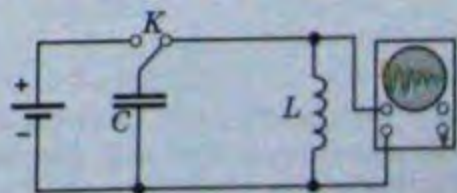
З одним із видів електромагнітних коливань – вимушеними коливаннями, якими є змінний струм, ми уже ознайомились. Надалі мова піде про електромагнітні коливання, які виникають у коливальному контурі.

§ 41. Отримання вільних електромагнітних коливань

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

Ми не можемо безпосередньо сприймати нашими органами відчуття електромагнітні коливання так, як ми бачимо коливання маятника або чуємо коливання струни. Тому, вивчаючи електромагнітні коливання, доводиться перетворювати їх у механічні. Як і у випадку вивчення змінного струму, будемо використовувати електронний осцилограф.

Проробимо дослід (мал. 174). Зарядивши конденсатор від джерела постійного струму, замкнемо його котушкою, до якої паралельно підключений осцилограф. На екрані осцилографа ми будемо спостерігати осци-



Мал. 174. Спостереження електромагнітних коливань

логіграму, яка свідчить про наявність електромагнітних коливань. Отже, найпростішою установкою, в якій можна спостерігати електромагнітні коливання, є *коливальний контур* — електричне коло, до складу якого входить котушка індуктивністю L та конденсатор ємністю C . Такий коливальний контур називають закритим, оскільки він майже не випромінює енергії в простір.

З осцилограми коливань в контурі видно, що коливання з часом затухають. Природно припустити, що причиною затухань є опір контура, який зумовлює необоротні перетворення енергії. Активний опір провідників, з яких складається коливальний контур, має бути досить малим, інакше в контурі електромагнітні коливання взагалі не виникнуть.



Коливання, які виникають після початкового виведення системи з положення стійкої рівноваги і здійснюються за рахунок внутрішніх сил системи, не зазнаючи впливу з боку змінних зовнішніх сил, називають **вільними**.

Перетворення енергії в колиальному контурі. З досліду (мал.174) можна зробити висновок, що в системі, виведеній зі стану рівноваги (конденсатор зарядили від стороннього джерела), після від'єднання джерела відбуваються коливання напруги U , а отже, і заряду (напруга і заряд пов'язані співвідношенням $q = CU$). Міркуємо далі. Напруга є енергетичною характеристикою електричного поля і енергія електричного поля конденсатора визначається формулою $W_e = \frac{CU^2}{2}$, отже, із зміною напруги відбуваються

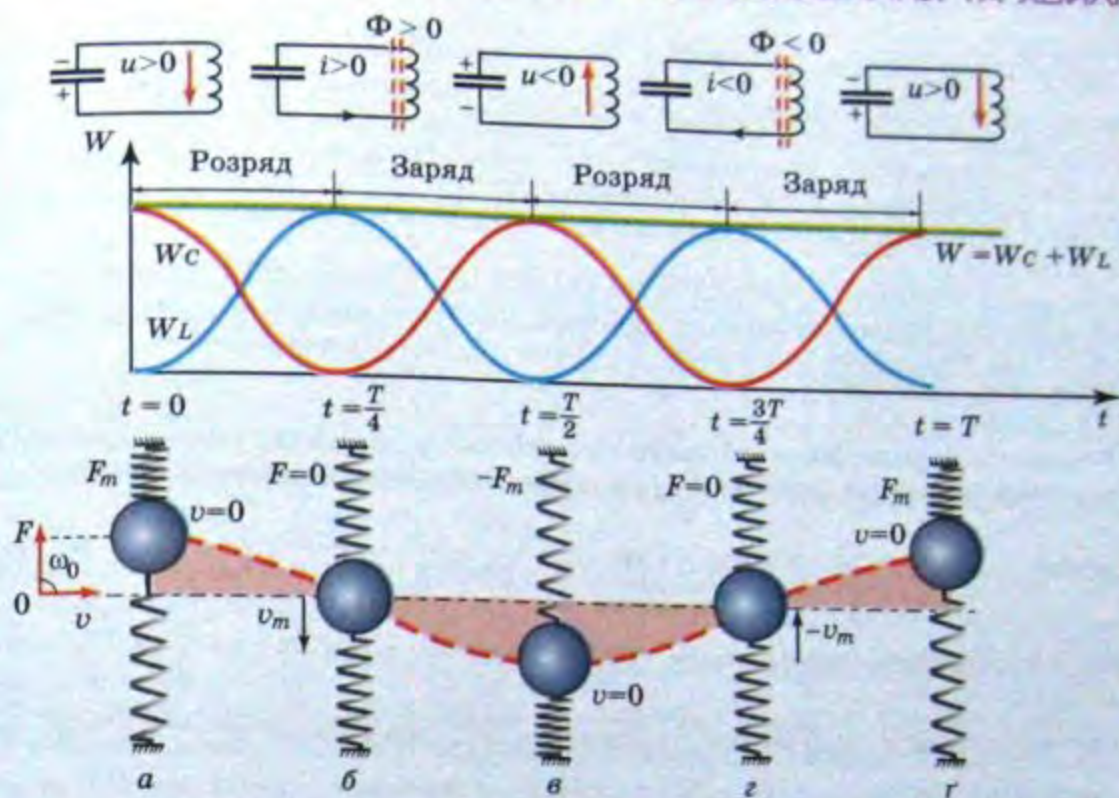
також періодичні зміни енергії електричного поля конденсатора. У процесі перезарядки обкладок конденсатора тече струм, сила якого визначає енергію магнітного поля $W_m = \frac{LI^2}{2}$. Отже, можна говорити, що електромагнітні

коливання зумовлені періодичними перетвореннями енергії електричного поля конденсатора в енергію магнітного поля котушки зі струмом і навпаки.

Розглянемо детальніше, як відбуваються електромагнітні коливання (мал. 175). (Для порівняння і для наочності на малюнку з кожним станом колиального контуру зіставлено певне положення тягарця, підвішеного на пружині, що здійснює механічні коливання.)

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. Струм зростає, поки вся енергія електричного поля конденсатора не перейде в енергію магнітного поля котушки ($t = T/4$). (Цей процес аналогічний до перетворення енергії деформованої пружини в кінетичну енергію руху тягарця.)

З моменту $t = T/4$ струм у колі продовжує протікати внаслідок процесу самоіндукції, при цьому 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 ($t = T/2$). (Подібно до того, як тягарець у положенні рівноваги, маючи максимальну швидкість, за інерцією продовжує рухатись



Мал. 175. Перетворення енергії під час електромагнітних коливань

вниз, стискаючи пружину. Кінетична енергія руху тягарця перетворюється в потенціальну енергію пружини.)

Потім процес повторюється у зворотному напрямі. З моменту $t = T/2$ конденсатор знову розряджається і в контурі виникає струм зворотного напрямку. Енергія електричного поля зарядженого конденсатора зменшується, а магнітного поля – зростає. Момент часу $t = (3/4)T$, 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 ($t = T$).

Відеальному випадку, якщо б в 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 при цьому зберігалася б і в будь-який момент часу дорівнювала б 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 веде до поступового перетворення енергії електромагнітного поля у внутрішню енергію провідника.

Дайте відповіді на запитання

1. У початковий момент часу конденсатор заряджений. Якою буде локалізація енергії у моменти $T/8$, $T/4$, $T/2$, $3T/4$ від початку коливань?
2. В які моменти – максимальної напруги на конденсаторі чи максимального струму – потужність втрат енергії найбільша?
3. Як можна одержати незатухаючі електромагнітні коливання?

§ 42. Рівняння, що описують процеси в ідеальному коливальному контурі

Рівняння гармонічних електромагнітних коливань. Вираз для зміни заряду і сили струму в ідеальному коливальному контурі (при $R = 0$) 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 почлено на $2C$, отримаємо $q^2 + i^2 LC = q_m^2$ 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 і $i\sqrt{LC}$ (мал. 176). Із малюнка видно, що $q = q_m \cos \varphi$,

$$i = \frac{q_m}{\sqrt{LC}} \sin \varphi.$$

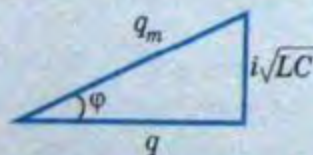
Отримані вирази свідчать, що заряд конденсатора і сила струму в котушці змінюються за гармонічним законом. При цьому між коливаннями заряду на обкладках конденсатора і сили струму в колі існує різниця фаз $\pi/2$. З

малюнка також видно, що $\cos \varphi = \frac{q}{q_m}$. Оскільки

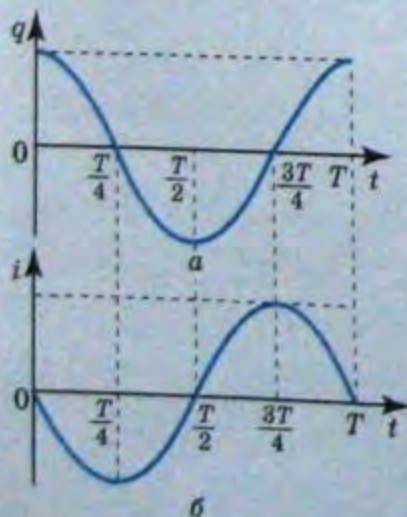
миттєве значення заряду q конденсатора – величина змінна, а амплітудне значення q_m – стала, то φ – також постійно змінюється.

Швидкість зміни фази коливань $\frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ є цю

кличною частотою ω . Тепер формулу для зміни заряду можна записати у вигляді $q = q_m \cos \omega t$. Враховуючи, 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. Остаточного маємо $i = -I_m \sin \omega t$.



Мал. 176. До виведення рівняння електромагнітних коливань



Мал. 177. Графіки коливань заряду (а) та сили струму (б)

Оскільки напруга на конденсаторі у будь-який момент часу визначається співвідношенням $U = \frac{q}{C}$, то рівняння зміни напруги у 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 мал. 177.

Формула періоду власних електромагнітних коливань. Знайдемо формулу для визначення періоду власних коливань, використавши те, що всі закономірності гармонічних коливань в механіці зберігають свій зміст і для електромагнітних коливань. Як відомо, період коливань зв'язаний з циклічною частотою співвідношенням $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Порівнявши 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 одержав у 1853 р. англійський фізик В.Томсон, тому її називають *формулою Томсона*. З формули видно, що період власних коливань зростає із збільшенням ємності й індуктивності контуру. Це пояснюється тим, що зі збільшенням індуктивності контуру сила струму повільніше зростає з часом і повільніше спадає до нуля. А чим більша ємність контуру, тим більше часу потрібно для перезарядження конденсатора.

Застосовуючи формулу зв'язку між періодом коливань T і частотою ν , визначимо *власну частоту коливань* у контурі $\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. З цієї формули видно, що для одержання в контурі коливань високої частоти ємність та індуктивність контура мають бути якомога меншими.



Дайте відповіді на запитання

1. Заряд q на пластинах конденсатора коливального контуру змінюється з часом t за законом $q = 10^{-6} \cos 10^4 \pi t$. Записати закон залежності сили струму від часу $i(t)$. Визначити період і частоту коливань у контурі, амплітуду коливань заряду і амплітуду коливань сили струму.
2. Як зміниться період власних коливань у контурі з плоским конденсатором і котушкою без осердя, якщо в n раз збільшити а) площу пластин, б) відстань між пластинами, в) діелектричну проникність середовища між пластинами, г) кількість витків у котушці без зміни її довжини, ґ) довжину котушки без зміни кількості витків?
3. Коливальний контур складається з котушки і двох однакових конденсаторів, з'єднаних паралельно. У скільки разів зміниться частота коливань, якщо конденсатори з'єднати послідовно?

§ 43. Затухаючі електромагнітні коливання

Рівняння затухаючих електромагнітних коливань. Уявімо собі коливальний контур, до складу якого входить конденсатор C , котушка L і активний опір R (мал. 178). 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 індуктивністю L , то електрорушійна сила самоіндукції, що виникає в котушці під час 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, втративши 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, повинна дорівнювати сумі діючих в цьому колі електрорушійних сил. Зрозуміло, що в цьому випадку 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 ці формули у вираз закону Ома і отримаємо

$$\text{рівняння } Lq'' = -\frac{1}{C}q - Rq', \text{ яке можна переписати у вигляді } q'' = -\frac{1}{LC}q - \frac{R}{L}q'.$$

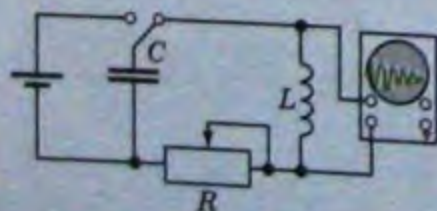
Якщо тепер ввести позначення $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$ і $\frac{R}{L} = 2\beta$, то рівняння матиме вигляд $q'' = -2\beta q' - \omega_0^2 q$, а його розв'язок $q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha)$, де β – коефіцієнт затухання.

Отримане рівняння описує затухаючі гармонічні коливання заряду в реальному колиальному контурі.

Формула періоду затухаючих коливань. Період затухаючих коливань визначається формулою $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$, або через параметри колиального

$$\text{контур } T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \text{ Ця формула дає}$$

можливість зробити важливий висновок про те, за яких умов коливання в досліджуваному колі можливі. Період коливань повинен



Мал. 178. Реальний коливальний контур

бути додатним числом і не може бути нескінченно великим. Отже, підкореневий вираз у знаменнику повинен бути більший від нуля, $\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2}$, 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 переходить у формулу Томсона

$T = 2\pi\sqrt{LC}$, якщо припустити, що $R = 0$ (ідеальний коливальний контур).

Відповідно із рівняння $q'' = -\frac{1}{LC}q - \frac{R}{L}q'$ також можна отримати формули для опису незатухаючих гармонічних коливань. Якщо $R = 0$, 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 з циклічною частотою $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

? Дайте відповіді на запитання

1. Які енергетичні перетворення відбуваються у процесі електромагнітних коливань в ідеальному і реальному коливальних контурах?
2. Якими рівняннями описуються затухаючі електромагнітні коливання? Запишіть рівняння для коливань напруги і 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?

Приклади розв'язування задач¹

Задача. На мал. 179 наведено графік залежності сили струму від часу для вільних електромагнітних коливань у контурі. Визначити ємність конденсатора, якщо індуктивність котушки дорівнює 0,1 Гн. Записати рівняння залежності сили струму в контурі і напруги від часу. Побудувати графік залежності $u(t)$.

Дано:

Графік $i(t)$
 $L = 0,1$ Гн

$C = ?$

$u(t) = ?$

$i(t) = ?$

Розв'язання

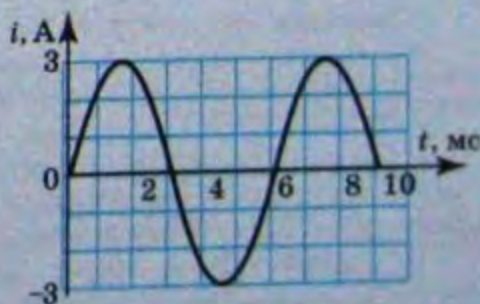
З графіка видно, що
 $T = 6$ мс $= 6 \cdot 10^{-3}$ с.

З формули Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

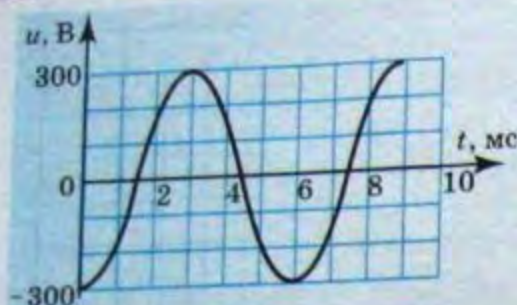
знаходимо

$$C = \frac{T^2}{4\pi^2 L}, C = 9,1 \text{ мкФ.}$$



Мал. 179

¹ Якщо в умові задачі немає ніяких застережень, то вважається, що коливальний процес відбувається в ідеальному коливальному контурі.



Мал. 180. Графік коливань напруги

З графіка видно, що $I_m = 3$ А. Тоді з рівності максимальних енергій в коливальному контурі, $\frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}$, обчислюємо

$$U_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}, U_m = 314 \text{ В.}$$

Оскільки $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega = \frac{\pi}{3} \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ і коливан-

ня сили струму, як видно з графіка, здійснюються за законом синуса з початковою

фазою, рівною нулю, а саме $i = 3 \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$, рівняння зміни напруги матиме вигляд

$$u = -314 \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right).$$

Графік залежності $u(t)$ зображено на мал. 180.

Відповідь: 9,1 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 23

1. Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 1 мкФ і котушки індуктивністю 4 Гн. Амплітуда коливань заряду на конденсаторі становить 100 мкКл. Написати залежності $q(t)$, $i(t)$, $u(t)$. Визначити амплітуди коливань сили струму та напруги.
2. Коливальний контур складається із котушки, індуктивність якої 0,2 мГн, та двох однакових конденсаторів ємністю 4 мкФ кожен, з'єднаних послідовно. Визначити період вільних коливань у контурі, максимальний заряд конденсатора та максимальну напругу на кожному конденсаторі. Максимальна сила струму в контурі 0,1 А.
3. У коливальному контурі індуктивністю L і ємністю C конденсатор заряджений до максимальної напруги U_m . Якою буде сила струму у момент, коли напруга на конденсаторі зменшиться у 2 рази? Коливання вважати незатухаючими.
4. Заряджений конденсатор ємністю 10 мкФ підключили до котушки індуктивністю 0,1 Гн. Через 5 періодів амплітуда коливань напруги в контурі становила 95 % від початкової напруги на конденсаторі. Чому дорівнює активний опір контуру?
5. 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?
6. У коливальному контурі індуктивність котушки становить 0,2 Гн, а амплітуда сили струму дорівнює 40 мА. Визначити енергію електричного поля конденсатора і магнітного поля котушки в той момент, коли миттєве значення сили струму буде у 2 рази менше, ніж амплітудне значення.

§ 44. Автоколивання

Отримання незатухаючих коливань. Ця не проста проблема знайшла оригінальне вирішення. В 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 і негативний на другій. У результаті 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. При цьому конденсатор має вмикатися у коло джерела лише в ті моменти 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 контуру, не може підтримувати в ньому незатухаючі коливання. Адже половину періоду енергія надходить у 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. Добре було б, якби контур сам керував надходженням енергії.

Автоколивальні системи. Генератор незатухаючих електромагнітних коливань. Якщо система сама регулює надходження енергії в коливальний контур для компенсації її втрат, то таку систему називають автоколивальною.

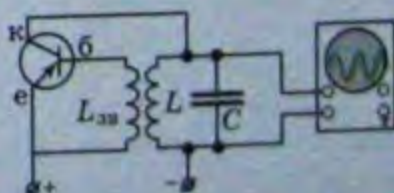
Вивчаючи у 10 класі механічні коливання, ми з'ясували, що до складу будь-якої автоколивальної системи (мал. 181), має входити: 1 – джерело енергії, 2 – передавальний пристрій (клапан), 3 – коливальна система.

Розглянемо принцип дії генератора на транзисторі. Його складовими частинами є коливальний контур (конденсатор ємністю C і котушка індуктивністю L), джерело енергії, транзистор та котушка зв'язку (мал. 182).

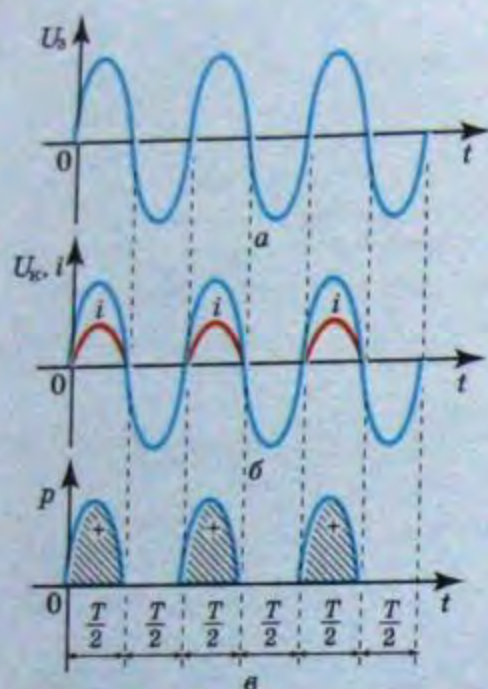
Із схеми видно, що коливальний контур з'єднаний послідовно з джерелом постійного струму і з транзистором так, що на емітер подається позитивний заряд, а на колектор – негативний. При цьому перехід емітер–база (емітерний перехід) прямий, а перехід база – колектор (колекторний перехід) виявляється оберненим і струм по колу не проходить.



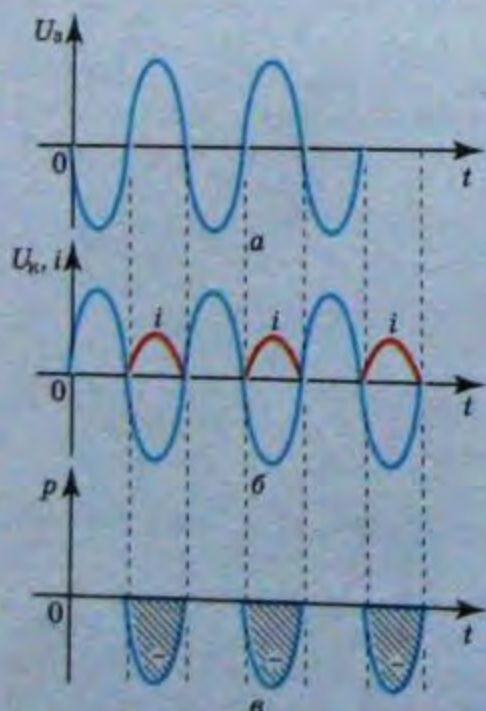
Мал. 181. Схема автоколивальної системи



Мал. 182. Схема генератора на транзисторі



Мал. 183. Графіки незатухаючих автоколивань



Мал. 184. Графіки коливань у генераторі з оберненим зворотним зв'язком

Щоб у колі контуру виник струм і підзарядив конденсатор під час коливань, потрібно надати базі негативного відносно емітера потенціалу, і саме в ті інтервали часу, в які верхня пластина конденсатора заряджена позитивно, а нижня – негативно. В інтервал часу, коли верхня пластина конденсатора заряджена негативно, а нижня позитивно, струму в колі контуру 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 узгоджено з коливаннями напруги на контурі. Потрібний, як кажуть, зворотний зв'язок.

Зворотний зв'язок у розглядуваному генераторі індуктивний. До емітерного переходу підведено котушку індуктивністю $L_{\text{ав}}$, яка індуктивно зв'язана з котушкою контуру, що має індуктивність L . Коливання в контурі внаслідок електромагнітної індукції збуджують коливання напруги на кінцях котушки зв'язку і тим самим на емітерному переході. Це приводить до того, що струм i , який проходить по контурній котушці, індуктує на кінцях котушки зворотного зв'язку змінну напругу U_3 (мал. 183, а). Під дією цієї напруги електричне поле емітерного переходу періодично то підсилюється, то послаблюється, а транзистор то відкривається, то замикається.

У ті інтервали часу, коли транзистор відкритий, через нього проходять імпульси струму, тривалість яких залежить від режиму роботи транзистора (мал. 183, б). Частота імпульсів струму, що проходить через транзистор, збігається з частотою коливань, які виникають в контурі, і приходять вони в контур у ті моменти, коли конденсатор контуру заряджається. Тому імпульси струму, що проходять через транзистор, підзаряджають конденсатор і поповнюють енергію контуру. На мал. 183, в заштриховані площі пропорційні енергії,

яка надходить в контур за кожен період коливань. Енергія, яка надходить від джерела струму, компенсує втрати енергії у контурі, і коливання не затухають.

Якщо в автогенераторі котушку зворотного зв'язку повернути на 180° , то з осцилограми буде видно, що генератор не працює. Це зумовлено тим, що поворот котушки зворотного зв'язку на 180° приводить до того, що фаза коливань змінної напруги U_z на емітерному переході змінилась на π (мал. 184, а). Отже, імпульси струму, що проходять через транзистор, припадають на від'ємні півперіоди коливань напруги U_k на контурі (мал. 184, б). У разі проходження такого імпульсу через контур робота електричного струму буде від'ємною. Це означає, що вони не лише не поповнюють енергію контуру, а, навпаки, зменшують її. Тому розрізняють прямий та обернений зворотний зв'язок.

Якщо у автогенераторі поступово збільшувати відстань між котушкою зворотного зв'язку і 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 кожен півперіод, менша за енергію, яка втрачається.

Отже, для зворотного зв'язку мають виконуватись певні умови.

По-перше, напруга на емітерному переході повинна змінюватись синфазно з напругою на контурі. Це фазова умова самозбудження генератора.

По-друге, зворотний зв'язок має забезпечити надходження у контур такої кількості енергії, яка повністю компенсує необоротні втрати енергії. Це амплітудна умова самозбудження.

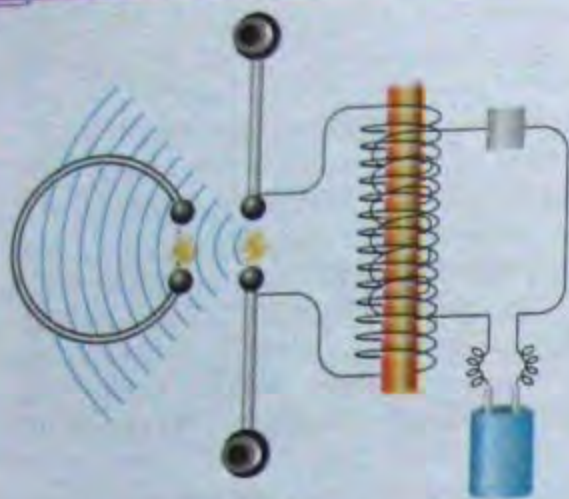
За допомогою автоколивальних систем можна одержувати незатухаючі електромагнітні коливання в широкому діапазоні частот. Низькочастотні коливання одержують при обертанні рамок з провідників в однорідних магнітних полях (змінний струм низької частоти), коливання високої частоти добувають за допомогою інших пристроїв, наприклад за допомогою генератора на транзисторі.

? Дайте відповіді на запитання

1. Чим відрізняються автоколивання від вимушених і вільних коливань?
2. Назвіть основні елементи автоколивальної системи.
3. Яка роль транзистора в генерації автоколивань?

§ 45. Утворення і поширення електромагнітних хвиль

Гіпотеза Максвелла і досліди Герца. Дж. Максвелл показав, що електромагнітне поле у вакуумі може існувати і за відсутності джерел струмів та зарядів. Згідно з теорією Максвелла будь-які зміни магнітного поля приводять до виникнення вихрового електричного поля. Будь-які зміни електричного поля супроводжуються виникненням вихрового магнітного поля. Отже, у всьому просторі, де змінюються поля, одночасно існують вихрові електричні і магнітні поля, які взаємно породжують і підтримують одне одного. У цьому випадку поле матиме вигляд хвилі, яка поширюється



Мал. 185. Установка Герца з отримання і реєстрації електромагнітних хвиль

зі швидкістю $3 \cdot 10^8$ м/с. При цьому вектор напруженості електричного поля та вектор індукції магнітного поля перпендикулярні один до одного та перпендикулярні до напрямку поширення хвилі. Таким чином, згідно з гіпотезою Максвелла мають існувати електромагнітні хвилі, які на відміну від механічних хвиль (поширення яких відбувається тільки у пружному середовищі), можуть поширюватись як у речовині, так і у вакуумі.

Але сам Дж. Максвелл не дожив до того часу, коли існування електромагнітних хвиль було підтверджено. Лише через 10 років після

його смерті німецький фізик Г. Герц (1857–1894) експериментально виявив електромагнітні хвилі. Згідно з гіпотезою Максвелла електромагнітні коливання завжди повинні створювати електромагнітні хвилі. Однак сам по собі коливальний контур не випромінює електромагнітні хвилі. У ньому відбуваються перетворення енергії електричного поля конденсатора в магнітне поле котушки і витрат енергії на утворення хвиль практично немає. Тому такий коливальний контур ще називають *закритим*.

Щоб здобути електромагнітні хвилі, Г. Герц запропонував використувати так званий *диполь* (мал. 185), який ще називають *відкритим коливальним контуром*. Диполь складався з двох мідних стержнів, які закінчувались маленькими латунними кульками. На протилежних кінцях їх були надіті цинкові сферичні ковпачки, переміщенням яких можна змінювати ємність та індуктивність контуру. Між маленькими кульками залишався незначний повітряний проміжок.

До мідних стержнів біля кульок було приєднано обмотки котушки, яка була з'єднана з джерелом живлення, у результаті чого на стержні подавалась висока напруга окремими імпульсами. При цьому між стержнями періодично виникав іскровий розряд. (На той час уже було доведено коливальний характер електричної іскри.)

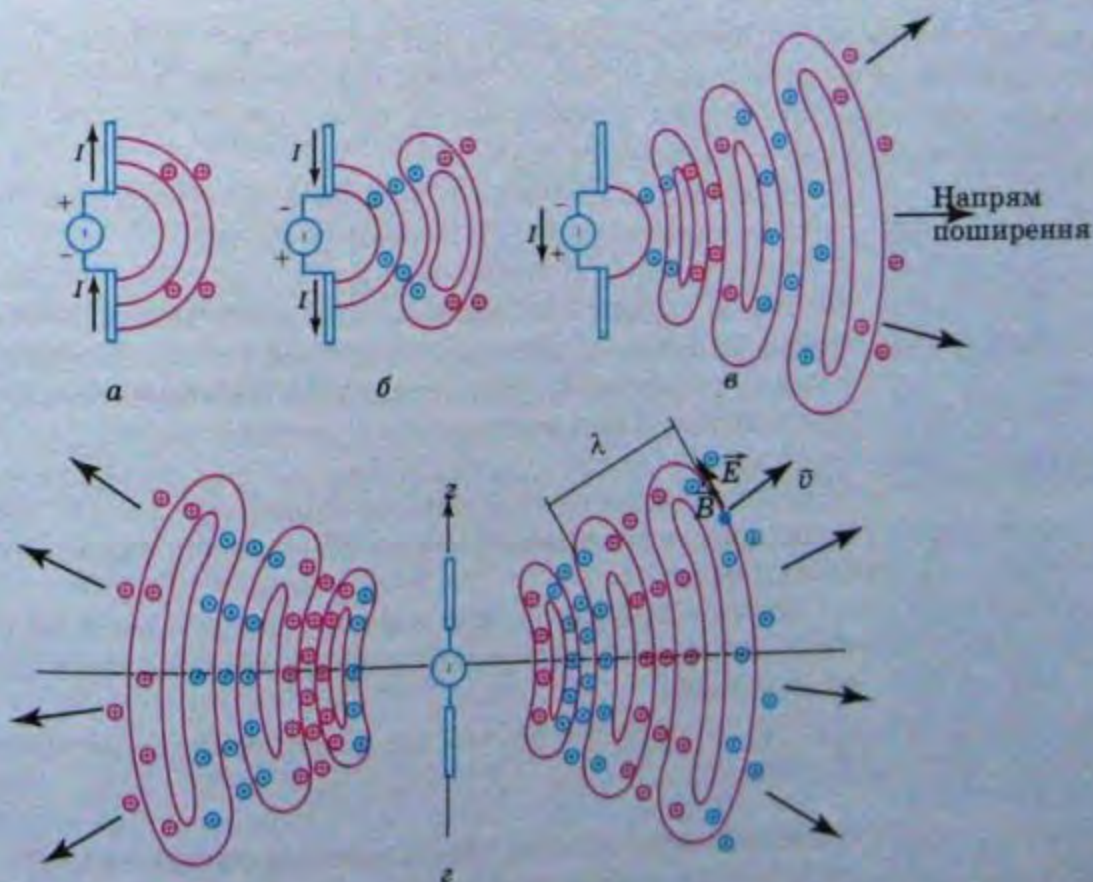
Щоб реєструвати випромінені хвилі, Герц використав *резонатор* – пристрій, подібний до випромінюючого диполя. Резонатор являє собою незамкнене кільце з латунними кульками на кінцях і незначним повітряним проміжком між ними. Назва «резонатор» відбиває той факт, що, змінюючи розміри та положення резонатора, можна налаштувати його на частоту коливань випромінюючого контуру. Іншими словами, коливальний контур та резонатор працюють у режимі резонансу: щоразу, коли у коливальному контурі відбувався іскровий розряд, між кульками резонатора також пробігала іскра.

Утворення іскри свідчить про те, що в просторі між двома системами відбувається процес, пов'язаний з передаванням енергії. У подальших експериментах Герц встановив, що цей процес має властивості хвильового руху.

Герц спостерігав відбиття й заломлення хвиль, явища інтерференції, дифракції та поляризації (з цими явищами ми детальніше ознайомимось під час вивчення світлових хвиль). Герц зумів виміряти довжину електромагнітної хвилі та, обчисливши власну частоту електромагнітних коливань контуру, визначив швидкість поширення хвилі за формулою $v = \lambda \nu$. Виявилось, що вона дорівнює $3 \cdot 10^8$ м/с (на той час було відомо, що з такою швидкістю поширюється світло).

Досліди Герца блискуче підтвердили теоретичні передбачення Максвелла, який був глибоко переконаний у тому, що електромагнітні хвилі існують реально.

Генерація електромагнітних хвиль. Спробуємо якісно охарактеризувати процес утворення електромагнітної хвилі. Розглянемо диполь, що складається з двох провідних стержнів (мал. 186) і підключений до джерела змінного струму. Мал. 186, а відповідає моменту, коли диполь щойно підключили до джерела. Електричний струм створює магнітне поле, силові лінії індукції магнітного поля замкнені і охоплюють стержні – справа від стержнів вектор індукції направлений від нас \otimes , а зліва від стержнів – на нас \odot (на малюнку не показано). ЕРС генератора проходить через максимум та починає зменшуватись; струм змінює напрям і його магнітне поле також змінює напрям. Оскільки напрям нових полів протилежний попередньому, то силові лінії полів замикаються, утворюючи замкнені контури мал. 186, б. Утворене раніше поле не зникає – воно поширюється в просторі. І згодом картина силових ліній матиме вигляд, зображений на мал. 186, в. Оскільки



Мал. 186. Процес утворення електромагнітної хвилі

диполь не є точковим джерелом, то поля поширюються у просторі в обидва боки, віддаляючись в напрямку, перпендикулярному до його осі, а вздовж осі диполя випромінювання немає (мал. 186, г).

З розглянутого прикладу можна зробити висновок, що *електромагнітні хвилі* – це явище поширення в просторі електромагнітних коливань, тобто взаємопов'язаних коливань електричного і магнітного полів, які являють собою єдине електромагнітне поле. У довільній точці вектори \vec{E} і \vec{B} взаємно перпендикулярні та перпендикулярні до напрямку поширення.

Оскільки електромагнітні хвилі генеруються електричним струмом, тобто зарядженими частинками, що рухаються з прискоренням, то правильним буде і загальне твердження: *електричний заряд під час прискореного руху є джерелом електромагнітних хвиль*.

? Дайте відповіді на запитання

1. У чому суть гіпотези Максвелла?
2. Чому звичайний (закритий) коливальний контур не можна використати для випромінювання і реєстрації електромагнітних хвиль?
3. Поясніть механізм утворення електромагнітної хвилі.

§ 46. Характеристики електромагнітних хвиль

Характеристики хвильового руху. У 10 класі, вивчаючи механічні хвилі, ми ознайомились з деякими характеристиками хвильового руху. Пригадаємо їх.

Геометричне місце точок, до яких на певний момент часу дійшли коливання, називають *фронтом хвилі*. Фронт хвилі, що створюється точковим джерелом, має сферичну форму, а фронт хвилі, що поширюється від плоского лінійного джерела – пряма лінія (мал. 187).



Мал. 187. Сферичний та плоский фронти хвиль

Напрямок поширення хвилі називають *променем*. Промінь перпендикулярний до фронту хвилі.

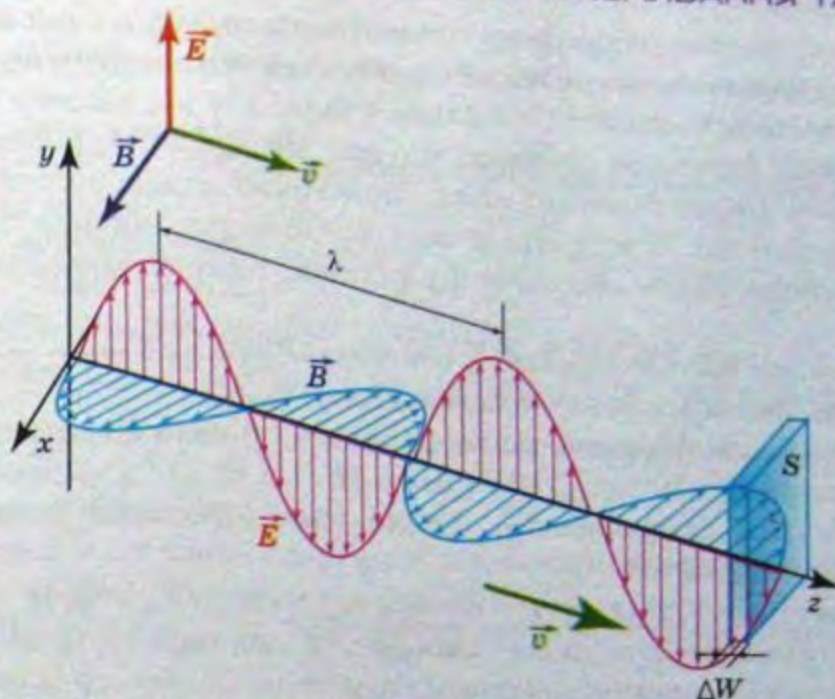
Пружна механічна хвиля може бути *поперечною*, якщо частинки середовища коливаються у площинах, перпендикулярних до напрямку поширення хвилі. *Поздовжня хвиля* утворюється, якщо коливання частинок середовища відбуваються у напрямку поширення хвилі.

Довжина хвилі – це відстань, на яку поширюється хвиля протягом одного періоду коливань, $\lambda = vT$, тут v – швидкість поширення хвилі, T – період коливань джерела хвилі.

Точки середовища, які лежать одна від одної на відстані, що дорівнює довжині хвилі, коливаються в однакових фазах.

Усі ці поняття застосовні і для електромагнітних хвиль.

Швидкість поширення електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі є *поперечними хвилями*, але на відміну від механічних хвиль у них відбуваються коливання полів, а не речовини. Коливання векторів \vec{E} і \vec{B}



Мал. 188. Схематичне зображення плоскополяризованої електромагнітної хвилі

у будь-якій точці збігаються за фазою. Оскільки відстань між двома найближчими точками, в яких коливання відбуваються в однакових фазах, — це довжина хвилі λ , то й у точках простору, які розташовані одна від одної на відстані, що дорівнює цілому числу довжин хвиль, вектори \vec{E} і \vec{B} коливаються в однакових фазах. Хвилю, вектори \vec{E} і \vec{B} якої тривалий час залишаються в одній площині, називають *плоскополяризованою*.

Швидкість поширення фази коливань називають *фазовою швидкістю* v .

Два взаємно перпендикулярні вектори \vec{E} і \vec{B} , у свою чергу, перпендикулярні до вектора швидкості \vec{v} (мал. 188).

У своїх теоретичних розрахунках Максвелл показав, що електромагнітна хвиля має поширюватись у середовищі зі швидкістю, яка визначається

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 і магнітна сталі.

Для вакууму $\epsilon = \mu = 1$, тому швидкість поширення електромагнітних

хвиль у вакуумі $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8$ м/с.

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, $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}$.

абсолютним показником заломлення цього середовища, $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}$.

Зазначимо, що діелектрична проникність середовища ϵ у 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, в яких можуть поширюватись електромагнітні хвилі, практично можна вважати таким, що дорівнює одиниці. Тому у будь-якому середовищі швидкість поширення електромагнітних хвиль менша, ніж у вакуумі, тобто n завжди більший за одиницю.

Нагадаємо, що під час переходу з одного середовища в інше частота коливань не змінюється, а довжина хвилі змінюється.

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 вміщує радіохвилі, інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське та гама-випромінювання.

 **Рівняння хвилі.** Виведемо рівняння хвилі. Нехай у деякій точці O напруженість електричного поля змінюється за гармонічним законом, $E = E_m \sin \omega t$. Оскільки електромагнітна хвиля поширюється із скінченною швидкістю, то у 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 $E = E_m \sin \omega(t - \Delta t) = E_m \sin \omega(t - \frac{x}{v})$. Це і є рівняння плоскої синусоїдальної електромагнітної хвилі.

Рівняння хвилі записують і так: $E = E_m \sin(\omega t - \omega \frac{x}{v})$, або, враховуючи, що $\omega = 2\pi\nu$ і $\lambda = \frac{v}{\nu}$, так: $E = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})$.

Оскільки максимуми напруженості електричного поля під час поширення електромагнітної хвилі збігаються з максимумами індукції магнітного поля, рівняння коливань індукції магнітного поля мають аналогічний вигляд, $B = B_m \sin \omega t$, а на відстані x від цієї точки $B = B_m \sin \omega(t - \frac{x}{v})$.

У випадку, коли хвиля поширюється у вакуумі, $E = E_m \sin \omega(t - \frac{x}{c})$ та $B = B_m \sin \omega(t - \frac{x}{c})$.

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 з 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 $L = \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{l}$

та виразивши силу струму через індукцію магнітного поля $I = \frac{Bl}{\mu \mu_0 N}$, отри-

маємо $W_m = \frac{B^2 Sl}{2\mu \mu_0}$. Оскільки $Sl = V$ – об'єм соленоїда, то густина енергії

$\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2\mu \mu_0}$. Цей вираз правильний 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 $\frac{\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0}$. З цієї формули випливає, що в електромагнітній хвилі напруженість та магнітна індукція пов'язані простим співвідношенням $\frac{E}{B} = c$, де c – швидкість поширення електромагніт-

них хвиль у вакуумі.

Порівняємо сили, з якими діють на електричний заряд q , який рухається зі швидкістю v , електрична $F_e = qE$ та магнітна $F_m = qvB$ складові хвилі: $\frac{F_e}{F_m} = \frac{qE}{qvB} = \frac{E}{Bv}$. Враховуючи, 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 від дії 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 площадку S , перпендикулярну до напрямку поширення хвилі (мал. 188). За час t через площадку пройде енергія W .



Відношення електромагнітної енергії ΔW , що проходить за час Δt через перпендикулярну до променів поверхню площею S , до добутку площі S на час Δt називають *густиною потоку електромагнітного випромінювання*

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}.$$

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, $[I] = 1 \text{ Вт/м}^2$.

Іноді цю величину називають *інтенсивністю* хвилі.

Спробуйте самостійно довести, що густина потоку випромінювання дорівнює добутку густини електромагнітної енергії на швидкість 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 $B \sim v^2$. У свою чергу, 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 у четвертому степені, $I \sim v^4$. З цього випливає таке. Якщо ми хочемо отримати поширення електромагнітних хвиль на велику відстань, ця хвиля повинна бути великої енергії (адже енергія хвилі поширюється у всі боки, розсіюючись). Серед усіх параметрів, від яких залежить енергія хвилі, найефективніше збільшувати її частоту. (Збільшивши частоту в 2 рази, збільшимо густину потоку випромінювання у 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.



Дайте відповіді на запитання

1. Наведіть приклади, що підтверджують наявність енергії в електромагнітному полі.
2. Від яких величин залежить густина енергії електромагнітної хвилі? Густина потоку випромінювання?
3. Прискорення руху заряду збільшилося в n раз. Як зміниться напруженість електричного поля випромінюваних хвиль?
4. За незмінної амплітуди коливань частота коливань електрона збільшилась в n раз. Як це змінить інтенсивність випромінювання хвиль і їх характеристики?

§ 47. Властивості електромагнітних хвиль

Досліди з електромагнітними хвилями. Принцип Гюйгенса. З'ясуємо, як хвильова теорія пояснює переміщення фронту хвилі в просторі. Припустимо, що в деякий момент часу фронт сферичної хвилі, яка поширюється з точки O , займає положення I (мал. 189). Через деякий інтервал часу фронт займе положення II . Переміщення фронту хвилі в просторі можна пояснити за принципом, сформульованим Х.Гюйгенсом у 1678 р.

Кожна точка фронту хвилі I є центром випромінювання вторинних елементарних хвиль $1, 2, 3, 4, \dots$, а поверхня II , яка є обвідною до них, через час Δt дає нове положення фронту хвилі (мал. 189).

Напрямок переміщення фронту хвилі (промінь) на малюнку показано стрілкою AB . Чим далі від точки O переміщується фронт хвилі, тим 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.

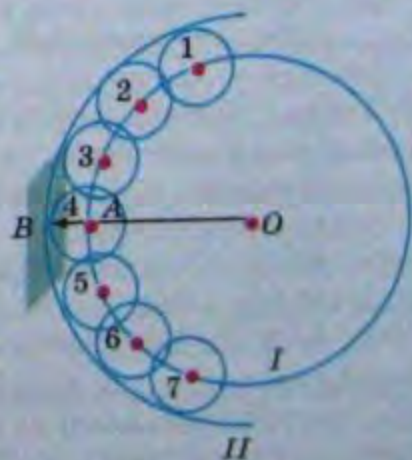
Ще Г. Герцем було проведено ряд дослідів з вивчення властивостей електромагнітних хвиль. Для проведення подібних досліджень, використовують генератор і приймач електромагнітних хвиль, що мають спеціальні рупорні антени для забезпечення напрямленого випромінювання і прийому хвиль (мал. 190). Індикатором прийому хвиль слугує вольтметр.

Якщо між рупорами генератора та приймача, які налаштовані на чітке передавання і прийом електромагнітного сигналу, помістити пластину з діелектрика, спостерігатиметься зменшення інтенсивності прийнятого сигналу. Якщо замінити діелектрик металевою пластинкою, то прийом хвиль взагалі припиниться. Це свідчить про те, що хвилі *відбиваються* провідником.

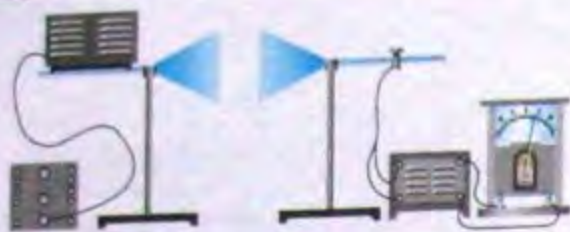
Кут відбивання електромагнітних хвиль, як і хвиль будь-якої іншої природи, дорівнює куту падіння. У цьому легко переконатись, розмістивши антени під однаковими кутами до металевої пластини (мал. 191). Прийнята хвиля зникає, якщо прибрати пластину або повернути її на інший кут. Досліджуючи напрям відбитої хвилі за допомогою рупорної антени-приймача, можна переконатись, що електромагнітні хвилі відбиваються за тим самим законом, що й світло (закони відбивання світла були встановлені набагато раніше до відкриття електромагнітних хвиль), а саме: *кут відбивання β дорівнює куту падіння α , причому напрям падаючої і відбитої хвиль та перпендикуляр до поверхні відбиття, поставлений в точці падіння, лежать в одній площині.*

Доведемо закон відбивання хвиль, використовуючи принцип Гюйгенса.

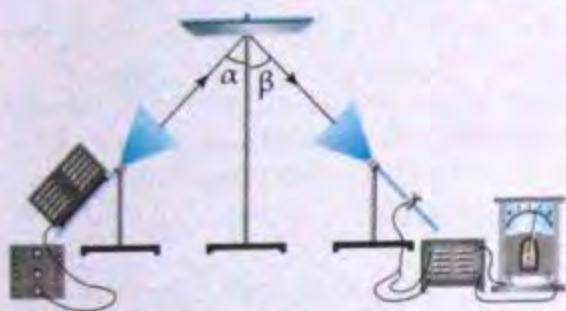
Нехай на поверхню MN падає плоска хвиля (мал. 192), A_1A та B_1B – два її паралельні



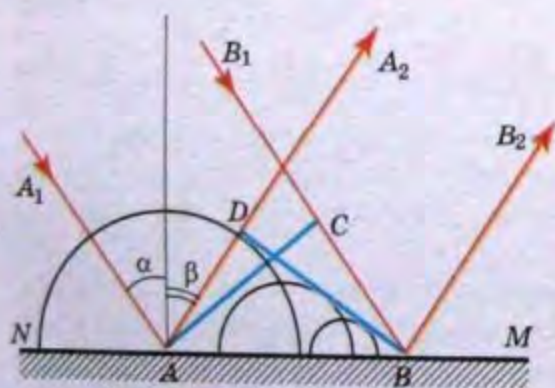
Мал. 189. Поширення електромагнітної хвилі за принципом Гюйгенса



Мал. 190. Установка для дослідження властивостей електромагнітних хвиль



Мал. 191. Відбивання електромагнітних хвиль



Мал. 192. Пояснення закону відбивання згідно з принципом Гюйгенса

промені, площина AC – хвильова поверхня цієї хвилі. Різні ділянки хвильової поверхні AC досягають відбивної межі не одночасно. Коливання в точці A збуджуються раніше, ніж у точці B , на час

$$\Delta t = \frac{CB}{v} \quad (\text{де } v - \text{швидкість хвилі у}$$

середовищі). У момент часу, коли падаюча хвиля досягне точки B і в цій точці почнуть збуджуватись коливання, вторинна хвиля з центром у точці A вже буде півсферою радіусом $r = AD = v\Delta t = CB$. Радіуси вторинних хвиль від джерел, розміщених між точками A і B , змінюються так, як показано на мал. 192. Обвідною вторинних хвиль є площина DB , дотична до сферичних поверхонь, центри яких лежать на відбивній поверхні. Площина DB є хвильовою поверхнею відбитої хвилі. Відбиті промені AA_2 і BB_2 перпендикулярні до хвильової поверхні DB . Оскільки $AD = CB$ і трикутники ADB й ACB прямокутні, то $\angle DBA = \angle CAB$. Але $\angle CAB = \angle \alpha$ і $\angle DBA = \angle \beta$ як кути із взаємно перпендикулярними сторонами. Отже, кут відбивання β дорівнює куту падіння α . Що і треба було довести.

Під час падіння електромагнітної хвилі на поверхню тіла частина енергії хвилі відбивається, частина проникає всередину тіла, причо-

му певна кількість енергії може пройти через тіло, якщо воно прозоре для електромагнітної хвилі, решта енергії поглинається в тілі, викликаючи його нагрівання чи інші процеси.

Діелектрик може бути майже прозорим для електромагнітної хвилі, якщо частота останньої сильно відрізняється від усіх власних частот коливань молекул, атомів і електронів діелектрика (відсутність резонансу).

Метали не прозорі для всіх електромагнітних хвиль, за винятком найкоротших – ультрафіолетових і рентгенівських. У разі падіння електромагнітної хвилі на метал у ньому виникають індукційні струми, які поглинають частину енергії хвилі. Решта енергії відбивається.

Отже, на межі двох середовищ електромагнітна хвиля поділяється на відбиту хвилю та хвилю, яка проходить в середовище, при цьому напрям 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. 193, а). Якщо ж розмістити між рупорами антен прямокутну призму із діелектрика (наприклад, з парафіну), то прийом сигналу відбувається (мал. 193, б). Дослід доводить, що електромагнітні хвилі заломлюються на межі двох середовищ.

Виведемо закон заломлення хвиль, виходячи із принципу Гюйгенса.

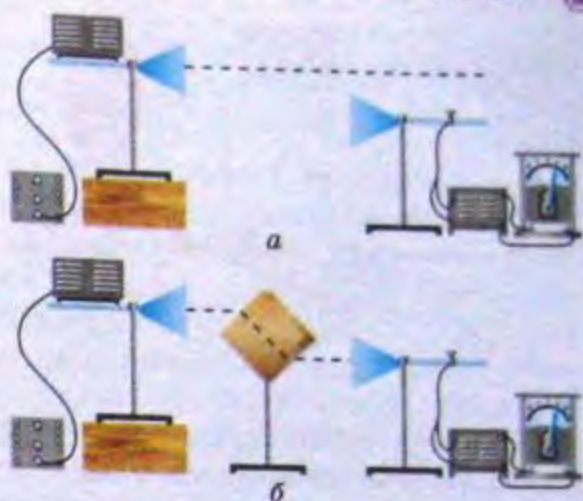
Нехай на плоску межу двох середовищ падає плоска електромагнітна хвиля, хвильова поверхня якої AC перпендикулярна до променів A_1A та B_1B (мал. 194). Позначимо швидкість хвилі у першому середовищі v_1 , а у другому — v_2 . Спочатку поверхні поділу MN досягає промінь A_1A . Промінь B_1B досягає поверхні через час $\Delta t = \frac{CB}{v_1}$. Тому в момент часу,

коли вторинна хвиля в точці B тільки збуджується, хвиля від точки A вже має вигляд півсфери радіусом $AD = v_2 \Delta t$.

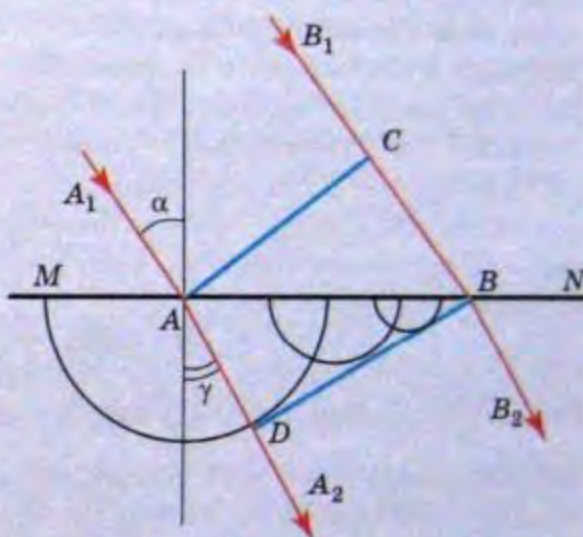
Хвильова поверхня заломленої хвилі є площиною BD (обвідна вторинних хвиль). Кут падіння α променя дорівнює куту CAB в трикутнику ABC (сторони одного з цих кутів перпендикулярні до сторін іншого). Отже, $CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha$. Кут заломлення γ дорівнює куту ABD . Тому $AD = v_2 \Delta t = AB \sin \gamma$.

Поділивши два вирази, отримуємо $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$.

Враховуючи, що швидкість поширення електромагнітної хвилі в будь-якому середовищі, менша, ніж у вакуумі, на величину n , яка є абсолютним показником заломлення цього середовища, отриманий вираз можна переписати у вигляді $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$, де n_1, n_2 — абсолютні показники заломлення відповідно першого та другого середовищ, n_{21} — відносний показник заломлення. Зрозуміло, що отримані закономірності заломлення хвиль будуть виконуватись і для світла.



Мал. 193. Заломлення електромагнітних хвиль




Мал. 194. Пояснення закону заломлення згідно з принципом Гюйгенса



Мал. 195. 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. 195). Повертаючи решітку, спостерігають підсилення приймання й послаблення аж до повної відсутності. Приймання відсутнє тоді, коли вектор напруженості електричного поля E падаючої електромагнітної хвилі паралельний стержням. У цьому випадку в стержнях збуджуються струми і решітка відбиває падаючі хвилі подібно до суцільної металевої пластини. Якщо вектор E перпендикулярний до стержнів, значні струми не збуджуються, і електромагнітна хвиля проходить крізь решітку. Отже, електромагнітна хвиля поляризована – вектор напруженості має фіксовану площину коливань. (Поясніть самостійно, чому у даному досліді розглядається положення саме вектора E , а не B).

 **Ефект Доплера.** Для електромагнітних хвиль, як і для механічних хвиль, 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 до спостерігача звук сприймається вищого тону, з віддаленням висота звуку стає нижчою. 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 використовується 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.

? Дайте відповіді на запитання

1. Сформулюйте принцип Гюйгенса.
2. Назвіть відомі вам властивості електромагнітних хвиль.
3. У чому суть ефекту Доплера? Наведіть приклади його практичного використання.

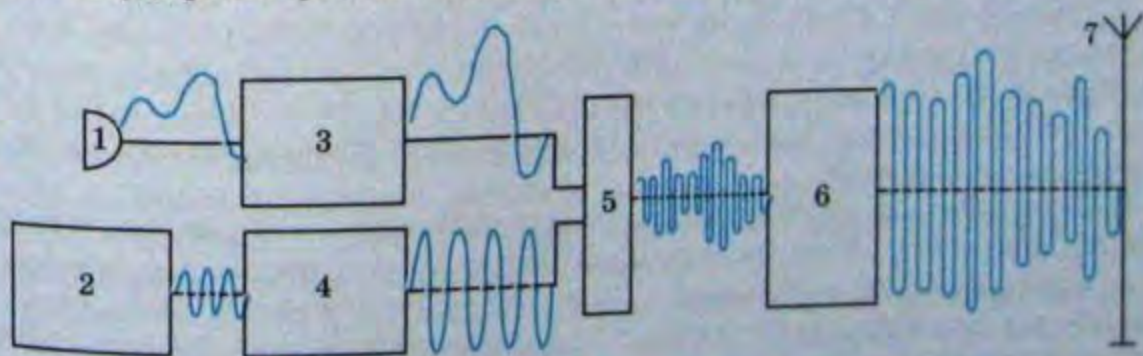
§ 48. Передавання інформації за допомогою електромагнітних хвиль

Властивість електромагнітних хвиль поширюватись на великі відстані як у повітрі, так і у вакуумі стала підґрунтям для створення засобів зв'язку, які ще називають *безпроводними засобами комунікацій*. Основною функцією засобів комунікацій є передавання інформації на відстань. 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.

Принцип радіозв'язку. Під час радіотелефонного зв'язку коливання тиску повітря у звуковій хвилі за допомогою мікрофона перетворюються в електричні коливання тієї самої форми. Отримані коливання є низькочастотними і практично не випромінюються, тому їх використовують для модулювання хвиль високої частоти. Будь-який із 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. 196).

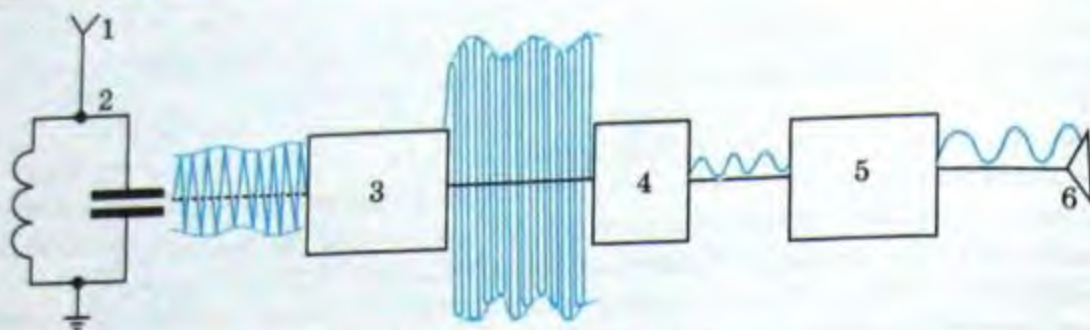
Отримані приймальною антеною хвилі збуджують у ній змінний струм тієї самої частоти, на якій працює передавач. Отриманий сигнал підсилюють, потім демодують – виділяють низькочастотні коливання з високочастотних (мал. 197). Цей процес здійснюють за допомогою детектора, тому його ще називають *детектуванням*.

Основною частиною кожного радіоприймача є антена, з'єднана з коливальним контуром. За умов, коли одночасно працює багато радіостанцій, на антенну діють хвилі різних довжин і частот. В антені і в зв'язаному з нею колиальному контурі збуджуються складні електромагнітні коливання. Якщо частота одного з них дорівнює частоті власних коливань контуру, то їх амплітуда різко зростає завдяки резонансу. У найпростішому радіоприй-



Мал. 196. Принцип дії радіопередавача

1 – мікрофон, 2 – генератор високої частоти, 3 – підсилювач звукової частоти, 4 – підсилювач високої частоти, 5 – модулятор, 6 – підсилювач модульованих коливань, 7 – передавальна антена



Мал. 197. Принцип дії радіоприймача

1 – антена, 2 – коливальний контур, 3 – підсилювач високої частоти, 4 – демодулятор, 5 – підсилювач звукової частоти, 6 – гучномовець

мачеві для настроювання на частоту потрібної станції його контур обладнують конденсатором змінної ємності або котушкою, індуктивність якої можна змінювати. У більш сучасних приймачів для настроювання коливального контуру застосовують спеціальні електронні пристрої.

Радіозв'язок має тривалу історію розвитку, що охоплює понад 100 років. Перші придатні для практичного застосування радіопередавачі і приймачі були побудовані майже одночасно російським інженером О. С. Поповим та італійським винахідником і промисловцем Г. Марконі (1895 р.).

Одним з найбільш успішних та дуже динамічних за розвитком типів радіозв'язку є мобільний телефонний зв'язок. Уперше мобільний телефонний радіозв'язок використала у 1921 р. поліція Детройта (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 Л. І. Куприянович розробив переносний радіотелефон та 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 та необхідний засіб комунікації. Основою для його здійснення слугує мобільний телефон та система базових станцій. Базові станції розташовуються так, що зона їх дії (покриття) ділиться на зони, які частково перекриваються і утворюють єдину мережу. Поверхня зон покриття станцій (на рівній поверхні) нагадує за формою бджолині комірки, тому телефонний зв'язок називають ще стільниковим (*рос.* сотовый).

Роблячи виклик, абонент за допомогою мобільного телефону через радіоканал з'єднується з базовою станцією. Якщо даному абонентові дозволено отримувати послуги мобільного зв'язку, то через мережу базових станцій встановлюється зв'язок з визначеним кінцевим абонентом. Робота мобільного зв'язку забезпечується розвинутою мережею 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, більш ніж 20 000 з них розташовані в Україні. З метою забезпечення підвищення якості мобільного зв'язку опе-

ратори збільшують кількість базових станцій та здійснюють їх постійне переоснащення відповідно до найновітніших технологічних розробок галузі. Дозвіл на установку базової станції дає Укрчастотнагляд.

Стільникові мережі різних операторів з'єднані між собою та із стаціонарною кабельною телефонною мережею.

Радіохвилі використовують не тільки для передавання звукового сигналу, а й для передавання зображень (телебачення). Принцип передавання зображення подібний до принципу радіозв'язку.

Особливо бурхливим став розвиток засобів телекомунікації із використанням супутникового зв'язку та цифрового формату запису інформації.

Супутниковий зв'язок. Вперше для передачі телевізійного зображення супутник було використано під час Олімпійських ігор у Токіо в 1964 р. Спершу супутники використовували для передавання телевізійного зображення та телефонії між материками. На сьогоднішній день супутники передають сигнал безпосередньо в наш дім через операторів кабельних мереж або наземні станції. Сьогодні супутниковий зв'язок є добре розвиненим, ефективним та надійним видом зв'язку.

Телекомунікаційний супутник складається із несучої платформи та корисного навантаження. Корисне навантаження включає в себе певну кількість транспондерів (радіоприймачі та передавачі), що приймають та ретранслюють сигнал. Супутники, що використовуються для ретрансляції телевізійних та 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 години. Це означає, що відносно поверхні Землі його положення є незмінним. Тому такі супутники називають геостаціонарними.

Інформація (наприклад, телепрограми) посиляється 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 спортивних 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 і отримання будь-якого виду інформації.

Одним із 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 і 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 за-

вантажувати карту місцевості безпосередньо в бортовий комп'ютер при введенні 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. Із збільшенням кількості мобільних користувачів виникає гостра необхідність в оперативному здійсненні комунікацій між ними, в обміні даними, у швидкому одержанні інформації. Тому природним чином відбувається інтенсивний розвиток технологій безпроводних комунікацій.

? Дайте відповіді на запитання

1. Радіоприймач можна налаштовувати на прийом радіохвиль від 25 до 2000 м. Що треба зробити для прийому довгих хвиль – зближувати чи розсувати пластини конденсатора коливального контуру?
2. Передавач випромінює електромагнітну хвилю ($\lambda = 300$ м). Скільки електромагнітних коливань відбувається протягом одного періоду звукових коливань з частотою 500 Гц?

§ 49. Властивості електромагнітних хвиль різних діапазонів частот

Шкала електромагнітних хвиль. За довжиною хвилі λ або частотою коливань (ν) діапазон електромагнітних хвиль простягається від 10^{11} м ($3 \cdot 10^{-3}$ Гц) до 10^{-11} м ($3 \cdot 10^{19}$ Гц). Шкалу електромагнітних хвиль наведено на мал. 198. Усю шкалу електромагнітних хвиль поділено на умовні діапазони: низькочастотні хвилі, радіохвилі, інфрачервоне випромінювання, видиме випромінювання (світло), ультрафіолетове випромінювання, рентгенівське випромінювання та γ -випромінювання. Такий поділ зумовлений тим, що прискорення заряджених частинок може відбуватись в різних системах фізичних тіл, що визначає їхню частоту. Отже, електромагнітні хвилі розподілено за типами відповідно до їх збудження. Так, радіохвилі породжуються електромагнітними коливаннями в коливальному контурі, який має цілком певні ємність та індуктивність, а γ -промені з'являються внаслідок певних змін в ядрах атомів.

Електромагнітні хвилі різних діапазонів мають різний механізм випромінювання і різні властивості (див. таблицю). (Зрозуміло, що фізичні властивості цих хвиль цілком однакові, бо вони визначаються довжиною хвилі, а не методом їх збудження.)



Мал. 198. Шкала електромагнітних хвиль

Властивості електромагнітних хвиль різних діапазонів

λ , м	Назва діапазону	Основні властивості та застосування	
Від 1 до 10 000	Наддовгі	10–100 Мм (декамегаметрові), 1–10 Мм (мегаметрові), 100–1000 км (гектокілометрові), 10–100 км (міріаметрові)	
	Довгі	Зазнають відчутної дифракції біля земної поверхні і притягуються до Землі наведеними ними індукційними струмами в земній корі; поширюються далеко за горизонт	
	Середні	Відбиваються від іоносфери і огинають опуклу земну поверхню. Забезпечують стійкий радіозв'язок	
	Короткі	Поширюються прямолінійно від випромінюючої антени і, відбиваючись від іоносфери Землі, повертаються до її поверхні; поширюються далеко за горизонт	
Менше 10^{-2}	радіохвилі	Ультракороткі (метрові, дециметрові, сантиметрові, міліметрові)	Пронизують іоносферу, а також поширюються вздовж поверхні Землі тільки у зоні прямої видимості. Використовують для космічного зв'язку; УКХ-радіостанцій, телебачення, мобільного зв'язку
10^{-3}		Субміліметрові	
		Інфрачервоні	Випромінювання нагрітих тіл. Застосовують для ІЧ-спектроскопії, у приладах нічного бачення
$7,4 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$		Видиме світло	Сприймається оком
$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$		Ультрафіолетові	Випромінювання Сонця, ртутних ламп. Мають бактерицидну дію
$10^{-9} - 10^{-11}$		Рентгенівські	Утворюються при гальмуванні пучка електронів, прискорених високою напругою або при переходах електронів на внутрішніх оболонках атомів. Проходять крізь непрозорі тіла. Використовуються в техніці, медицині
$<10^{-11}$		Гамма-промені	Виникають під час радіоактивного розпаду. Мають високу проникну й руйнівну здатність

З механізмом збудження і властивостями видимого світла, рентгенівських та γ -променів ми ознайомимось згодом.

Практичне використання інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювання. Інфрачервоні промені випромінюють усі тіла в природі, бо їх виникнення зумовлене хаотичним рухом молекул і атомів у будь-якій речовині. З підвищенням температури енергія інфрачервоного випромінювання тіла швидко зростає. Випромінювання Сонця, окрім видимого світла, містить багато інфрачервоних та ультрафіолетових променів. За рахунок інфрачервоної складової сонячного випромінювання між різними точками

земної поверхні створюються різниці температур. Інфрачервоне випромінювання Землі виносить енергію у світовий простір, що сприяє охолодженню поверхні Землі. Саме тому в пустелях, де атмосфера прозора, вночі холодно, хоч вдень була спека. Якщо є хмари, інфрачервоне випромінювання з поверхні Землі відбивається від них і втрачає енергію у світовий простір зменшуються. Забруднення атмосфери призводить до так званого «парникового ефекту», коли інфрачервоне випромінювання, відбившись від верхніх шарів атмосфери, знову повертається до поверхні Землі. Наслідком парникового ефекту є глобальне потепління, яке може мати катастрофічні екологічні наслідки.

У практичних цілях інфрачервоні промені використовують для сушіння (наприклад, харчових продуктів), у пристроях охоронної сигналізації, в медицині – для проведення топографічної діагностики, у науці – для визначення різниці температур окремих ділянок поверхні планет, особливості будови молекул речовини тощо.

Природні джерела *ультрафіолетового випромінювання* – Сонце, зорі, туманності та інші космічні об'єкти – випромінюють ультрафіолетові промені трьох типів: «А», «В», «С». Ультрафіолетові промені типу «А» мають довжину хвилі від 320 до 400 нм, типу «В» – від 290 до 320 нм, типу «С» – ще коротші. Озоновий шар не пропускає ультрафіолетові промені «С», які поглинаються киснем та іншими компонентами атмосфери на висоті 30–200 км від поверхні Землі. Це відіграє певну роль в атмосферних процесах.

Ультрафіолетове випромінювання має досить високу енергію і тому здатне впливати на хімічні зв'язки (у тому числі і в живій клітині). Це викликає пошкодження мікроорганізмів на клітинному рівні, опіки шкіри та очей. Сонячні опіки зумовлюють ультрафіолетові промені типу «В». Промені типу «А» можуть проникати глибше в шкіру, що може призвести до раку шкіри.

Ультрафіолет використовують для дезінфекції. Ультрафіолет діє на живі клітини – бактерії, віруси, при цьому не впливає на хімічний склад середовища. Це відрізняє його від всіх хімічних засобів дезінфекції. Бактерицидна дія ультрафіолету зумовлена фотохімічними реакціями, у результаті яких відбуваються необоротні пошкодження ДНК, клітинних мембран.

Найбільш широко ультрафіолетові промені використовують у медицині, харчовій промисловості, для очистки води.

? Дайте відповіді на запитання

1. На які діапазони поділяють шкалу електромагнітних хвиль?
2. Наведіть приклади практичного застосування інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювань.

Приклади розв'язування задач

Задача. Визначити довжину електромагнітної хвилі у вакуумі, на яку настроєний коливальний контур, якщо максимальний заряд конденсатора дорівнює $2 \cdot 10^{-6}$ Кл, а максимальна сила струму в контурі дорівнює 1 А. Чому дорівнює ємність конденсатора, якщо індуктивність контуру $2 \cdot 10^{-7}$ Гн? Чому дорівнює енергія електричного поля конденсатора в момент, коли енергія магнітного поля становить $3/4$ від її максимального значення? Визначити напругу на конденсаторі у цей момент. Активним опором контуру знехтувати.

Дано:

$q_{\text{макс}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$

$I_{\text{макс}} = 1 \text{ А}$

$L = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$

$R = 0$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

$\lambda - ? \text{ м}$

$W_{\text{ел}} - ?$

$U - ?$

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 і дорівнює повній енергії електромагнітних коливань в 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

$$\lambda = c \cdot 2\pi \frac{q_{\text{макс}}}{I_{\text{макс}}}, \lambda = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 2\pi \frac{2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{1 \text{ А}} = 38 \text{ м}.$$

Знаючи індуктивність контуру, знайдемо ємність конденсатора

$$C = \frac{q_{\text{макс}}^2}{LI_{\text{макс}}^2}, C = \frac{(2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл})^2}{2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot 1 \text{ А}^2} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Повна енергія електромагнітних коливань в контурі дорівнює сумі миттєвих значень енергії електричного і магнітного полів і, за відсутності затухання коливань, величина стала:

$$W = W_{\text{маг.макс}} = W_{\text{ел}} + W_{\text{маг}},$$

де $W_{\text{маг}} = (3/4) W_{\text{маг.макс}}$. Отже, $W_{\text{маг.макс}} = (3/4) W_{\text{маг.макс}} + W_{\text{ел}}$; звідси

$$W_{\text{ел}} = \frac{1}{4} W_{\text{маг.макс}} = \frac{1}{4} \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}.$$

Підставляючи числові значення, матимемо $W_{\text{ел}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot 1 \text{ А}^2}{2} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}.$

Враховуючи, що $W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$, 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: 38 м; $2 \cdot 10^{-9}$ Ф; $2,5 \cdot 10^{-8}$ Дж; 5 В.

Вправа 24

1. Коливальний контур радіоприймача настроєний на частоту 6 МГц. У скільки разів треба змінити ємність конденсатора контуру, щоб настроїтися на довжину хвилі 150 м?
2. Антена корабельного радіолокатора розташована на висоті 25 м над рівнем моря. На якій максимальній відстані радіолокатор може виявити рятувальний пліт? З якою частотою можуть при цьому випускатися імпульси?
3. Радіолокатор працює на хвилі 5 см і випускає імпульси тривалістю 1,5 мкс. Скільки коливань міститься в кожному імпульсі? Яка мінімальна дальність виявлення цілі?

Найголовніше в розділі «Електромагнітні коливання та хвилі»

До електромагнітних коливань належать коливання електричного заряду q , сили струму I , напруги U , зв'язані з ними коливання напруженості електричного поля \vec{E} та індукції магнітного поля \vec{B} , а також самостійні коливання напруженості електричного поля \vec{E} та індукції магнітного поля \vec{B} в електромагнітній хвилі.

Коливальний контур – коливальна система, що складається з конденсатора ємністю C і котушки індуктивністю L , в якій можуть збуджуватися електричні коливання. Такий контур називають закритим, оскільки він майже не випромінює енергії в простір. Електричні коливання в коливальному контурі виникають у результаті періодичного перетворення енергії електричного поля конденсатора в енергію магнітного поля котушки і потім енергії магнітного поля котушки в енергію електричного поля конденсатора.

Період власних коливань ідеального коливального контуру визначається формулою Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

У випадку вільних коливань без втрат ($R = 0$) заряд q та напруга на конденсаторі C і сила струму i в котушці індуктивності змінюється за законом гармонічних коливань: $q = q_{\max} \cos \omega t$, $u = U_{\max} \cos \omega t$; $i = q' = -I_{\max} \sin \omega t$ (q_{\max} , U_{\max} і I_{\max} – амплітудні значення заряду і напруги на конденсаторі та сили струму в котушці).

У реальному коливальному контурі вільні коливання є затухаючими.

Електромагнітні хвилі – явище поширення у просторі електромагнітних коливань, тобто взаємопов'язаних коливань електричного \vec{E} і магнітного \vec{B} полів, які становлять єдине електромагнітне поле. Існування електромагнітних хвиль уперше передбачив у 1832 р. М. Фарадей. Відкриття електромагнітних хвиль на досліді здійснив у 1888 р. Г. Герц.

Для отримання електромагнітних хвиль використовують **відкритий коливальний контур**, який випромінює електромагнітні хвилі, джерелом яких є електрони, що рухаються з прискоренням.

Електромагнітні хвилі – поперечні: в електромагнітній хвилі вектори \vec{E} і \vec{B} змінюються у взаємно перпендикулярних площинах, перпендикулярних до напрямку поширення, і їх коливання збігаються за фазою.

Для електромагнітних хвиль характерні загальні властивості хвильових процесів: відбивання, заломлення, дифракція, інтерференція, поляризація.

Довжина електромагнітної хвилі $\lambda = cT = 2\pi c\sqrt{LC}$.

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). Шкалу електромагнітних хвиль поділяють на ділянки за механізмом збудження. Електромагнітні хвилі різних діапазонів мають різний механізм випромінювання і різні властивості.

Радіозв'язок – передавання інформації за допомогою радіохвиль. Розрізняють радіомовлення (передавання музики, мовлення тощо); телеграфні сигнали, телебачення (передавання зображення) і власне радіозв'язок. Радіозв'язок здійснюють через випромінювальну та приймальну антени або через супутник зв'язку.

Розділ 5

Хвильова та
геометрична оптика

Частину фізики, яка вивчає світлові явища, називають **оптикою** (від грец. «оптикос» – зоровий), а самі світлові явища **оптичними**. Виокремлюють фізичну (хвильову) та геометричну оптики.

Фізична (або хвильова) оптика – розділ оптики, який вивчає властивості світла і його взаємодію з речовиною на основі уявлень про хвильову природу світла.

Геометрична (або променева) оптика – розділ оптики, в якому вивчаються закони поширення світлової енергії в прозорих середовищах на основі уявлень про світловий промінь.

§ 50. Природа світла

Розвиток уявлень про природу світла. Століттями тривали між вченими суперечки про природу світла. Світло стало для них одним з «найміцніших горішків», його навіть називали «темною плямою у фізиці»! У 1678 р. голландський астроном і фізик Християн Гюйгенс запропонував *хвильову теорію світла*, згідно з якою світло – це хвилі, що поширюються в особливому, гіпотетичному середовищі – ефірі, який заповнює увесь простір і проникає всередину всіх тіл. Ця теорія добре пояснювала низку оптичних явищ, зокрема перетинання світлових потоків, коли вони вільно проходять один крізь одного, не здійснюючи взаємного впливу, так само, як будь-яка кількість звукових хвиль може одночасно поширюватися в повітрі, не перешкоджаючи одна одній. Теорія Гюйгенса добре пояснювала й такі хвильові процеси, як відбивання і заломлення хвиль, явища дифракції та інтерференції. Основний недолік теорії полягав у тому, що вона ґрунтувалась на уявленні про світло як про механічну поперечну хвилю, для поширення якої необхідна наявність певного середовища – ефіру.

У 1704 р. І. Ньютон висунув іншу, так звану *корпускулярну теорію світла*, згідно з якою світло – це потік частинок (Ньютон назвав їх корпускулами), що рухаються за законами класичної механіки: у вільному просторі прямолінійно з постійною швидкістю (за інерцією) тобто як повинні рухатися частинки за відсутності взаємодії згідно з першим законом Ньютона. Якщо ж на шляху світла зустрічається перешкода, то під час взаємодії з нею світлові частинки змінюють свій імпульс згідно з другим законом Ньютона, що й спричинює огинання перешкод. Теорія Ньютона пояснювала прямо-

лінійне поширення світла, утворення за предметами різких тіней. Але перетинання світлових потоків пояснити не могла. Адже гіпотетичні світлові частинки повинні зіштовхуватися. Крім того, досить проблематичним з позицій корпускулярної теорії було пояснення явища заломлення світла.

Обидві теорії тривалий час існували паралельно. Незважаючи на досить вагомі успіхи механіки у вивченні багатьох природних явищ, за допомогою механічних уявлень не вдавалося підійти до розкриття таємниці природи світла. Загадкове світло на відмінну від інших фізичних об'єктів не має розмірів, форми, якогось певного положення в просторі.

Нарешті у другій половині XIX століття, у 1865 р., англійський фізик Дж. Максвелл висловив припущення про електромагнітну природу світла і переконливо показав, що світло є окремим випадком електромагнітних хвиль.

Але на початку XX ст. знову довелося повернутися до уявлення про корпускулярну природу світла. У 1905 р. А. Ейнштейн, пояснюючи явище фотоефекту, довів, що під час випромінювання і поглинання світло поводить себе подібно до потоку частинок (квантів енергії), які дістали назву *фотонів*. У процесі ж поширення світла виявляються його хвильові властивості.



Прояв у поведінці одного і того самого об'єкта залежно від умов експерименту як корпускулярних, так і хвильових властивостей, було названо **корпускулярно-хвильовим дуалізмом**.

Класична фізика завжди чітко розрізняла об'єкти, що мають хвильову природу, та об'єкти з дискретною корпускулярною структурою. Сучасна квантова фізика довела, що протиставлення хвильових і квантових властивостей матеріальних об'єктів помилкове та є наслідком наших обмежених можливостей опису природних явищ. Одним з найвагоміших досягнень сучасної фізики є поєднання, на перший погляд, несумісних теорій – хвильової і корпускулярної – та доведення того, що корпускулярно-хвильовий дуалізм властивий обом видам матерії. *Корпускулярно-хвильовий дуалізм є універсальною властивістю не тільки світла, а й будь-яких матеріальних об'єктів.*

Оперуючи поняттям «світло» у розділі «Оптика», ми вважатимемо що світло – це електромагнітні хвилі у діапазоні частот коливань від $4 \cdot 10^{14}$ до $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц (оптичний діапазон). У цьому інтервалі кожній частоті відповідає свій колір випромінювання. У вакуумі світлове випромінювання має довжини хвиль від 400 нм (фіолетовий колір) до 760 нм (червоний).

Зазначимо, що під час переходу світлового випромінювання з одного середовища в інше його колір зберігається, оскільки зберігається його частота, а довжина хвилі змінюється внаслідок зміни швидкості поширення світлової хвилі.

Джерела й приймачі світла. Можна навести безліч прикладів різних джерел світла: Сонце, зорі, лампи розжарювання, світлодіоди, газосвітні трубки тощо. За механізмом випромінювання розрізняють *телові* та *люмінесцентні* джерела світла. У перших – світіння досягається за рахунок внутрішньої енергії, збільшеної під час нагрівання до високої температури (наприклад, лампа розжарювання, Сонце). У других – світло випромінюють атоми чи молекули газів або твердих тіл за рахунок енергії, отриманої від потоку електронів, електричного поля, струму, хімічної реакції тощо (наприклад, неонova, дугова, ртутна, галогенна лампи, лампа денного світла).

Взагалі джерелом світла є будь-яке тіло або пристрій, що перетворює будь-який вид енергії в електромагнітну енергію оптичного діапазону.

Приймачами світла називають пристрої, призначені для виявлення або ж вимірювання світлового (оптичного) випромінювання.

Принцип дії приймачів полягає у перетворенні енергії випромінювання в інші види енергії, зручніші для безпосереднього вимірювання (теплову, механічну, електричну). Приймачами світла є термоелементи, фотоелементи, фотодіоди й, звичайно, очі живих істот.

Поглинання і відбивання світла. Розглянемо тонкий світловий пучок, що падає з повітря на поверхню води (мал. 199). Як ми уже знаємо, для світлових хвиль (як і хвиль будь-якої природи) на межі поділу двох середовищ спостерігаються явища відбивання і заломлення, які описуються відповідними законами.

У точці падіння частина світлового пучка відбивається – повертається у повітря, а частина проникає у воду і при цьому заломлюється. Із закону збереження енергії випливає, що одну частину енергії випромінювання W , яка надходить за деякий час у точку O , забирають відбиті промені $W_{\text{від}}$, іншу $W_{\text{зал}}$ – заломлені, при цьому $W = W_{\text{від}} + W_{\text{зал}}$.

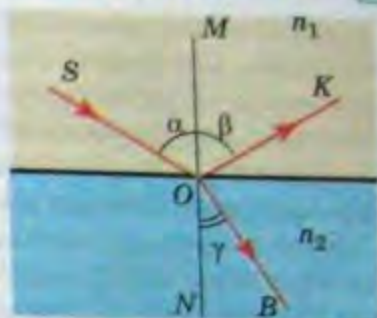
Зменшення енергії світлової хвилі, яке відбувається в міру проникнення її вглиб речовини, називають **поглинанням світла**.

Оскільки всяке середовище (крім вакууму) поглинає енергію, рівність енергій виконується лише у невеликому околі точки O . Якщо світлове випромінювання проходить у середовищі значні відстані, мало ослаблюючись, то середовище називають **прозорим** (наприклад, скло, вода, спирт тощо).

Кожне середовище у тій чи іншій мірі відбиває і поглинає світлові промені. Ступінь поглинання та відбивання залежить від роду речовини, стану поверхні, складу випромінювання, кута падіння променів та інших причин. Зокрема, зі збільшенням кута падіння променів α частина відбитого світла збільшується, а заломленого – зменшується. Залежність частки відбивання і поглинання від частоти коливань найчастіше має вибіркового характеру, тобто коливання з однією частотою речовина відбиває або поглинає добре, а з іншою – погано. Наприклад, атмосфера Землі добре поглинає короткі хвилі видимого спектра і значно слабше – його довгі хвилі.

Метали сильно поглинають світлове випромінювання, яке проникає в них, тобто вони **непрозорі** для нього. З великим поглинанням світла всередині металів тісно зв'язаний їх великий коефіцієнт відбивання. Якщо для скла коефіцієнт відбивання від поверхні дорівнює 4%, то для металів він досягає 80–90%.

Показник заломлення. Вивчаючи електромагнітні хвилі, ми неодноразово згадували про показник заломлення.



Мал. 199. Оптичні явища на межі двох прозорих середовищ

Абсолютний показник заломлення середовища n , це – фізична величина, що показує у скільки разів швидкість поширення світла у вакуумі c більша

ніж у середовищі v , $n = \frac{c}{v}$.

Абсолютний показник заломлення середовища має глибокий фізичний зміст. Він пов'язаний зі швидкістю поширення світла в даному середовищі, яка залежить від його фізичного стану (температури, густини тощо). Крім того, показник заломлення залежить від властивостей світла: для червоного світла він менший, ніж для зеленого, а для зеленого менший, ніж для фіолетового. Для будь-якого середовища абсолютний показник заломлення $n > 1$.

З двох прозорих середовищ *оптично більш густим* називають середовище з більшим показником заломлення, тобто в якому швидкість поширення світла менша. Потрапляючи в більш густе середовище промінь відхиляється в бік перпендикуляра, проведеного до межі поділу середовищ у точку падіння променя (мал. 199). Навпаки, якщо відбувається перехід променя з середовища оптично більш густого в оптично менш густе, кут заломлення є більшим за кут падіння. Скориставшись визначенням абсолютного показника заломлення, формулу *закону заломлення світла* можна записати так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n = \frac{n_2}{n_1}.$$

Абсолютний показник заломлення повітря для жовтого світла за нормальних умов дорівнює приблизно $n = 1,000292$. Таблицю показників заломлення деяких речовин відносно повітря наведено в додатку.

? Дайте відповіді на запитання

1. Назвіть факти, які доводять правильність корпускулярної теорії Ньютона; які доводять її хибність.
2. Які факти підтверджують правильність хвильової теорії Гюйгенса? Які доводять її хибність?
3. Яке припущення про природу світла висловив Максвелл?
4. Що називають корпускулярно-хвильовим дуалізмом?
5. Які оптичні явища спостерігаються на межі поділу двох прозорих середовищ?

§ 51. Явище інтерференції

Когерентність світлових хвиль. Дуже часто в середовищі одночасно поширюється кілька різних хвиль, які можуть накладатись одна на одну, внаслідок чого в одних точках простору виникають коливання з максимальною, а в інших – з мінімальною амплітудою. Таким чином, на деяких ділянках інтенсивність світла виявиться більшою, на інших – меншою, тобто утвориться чергування світлих і темних ділянок – *інтерференційна картина*.



Додавання в просторі двох і більше хвиль, за якого відбувається постійний в часі розподіл амплітуд результируючих коливань називається **інтерференцією** (від латинських слів *enter* – взаємно, між собою і *ferio* – ударяю, вражаю).

Проте далеко не завжди утворюється інтерференційна картина, коли кілька хвиль накладаються одна на одну. Для її отримання необхідне виконання деяких умов. З'ясуємо їх.

Щоб інтерференційна картина була стійкою, потрібні узгоджені хвилі, тобто такі, що мають однакові довжини і сталу різницю фаз у будь-якій точці простору. Хвилі, які відповідають цим умовам називають *когерентними*, відповідно когерентними називають і джерела, які їх випромінюють.

Але, як виявилось, щоб добути когерентні хвилі необхідно вдатись до певних прийомів. Отримати хвилі однакової довжини від двох джерел можна, використавши хороші світлофільтри, що пропускають світло в дуже вузькому інтервалі довжин хвиль (такі хвилі ще називають монохроматичними). Проте для хвиль від двох незалежних джерел не можна добитись, щоб різниця фаз їх коливань була сталою, адже атоми джерел випромінюють світло незалежно один від одного.

Для одержання когерентних джерел світла вдаються до штучного прийому: пучок світла від одного джерела розділяють на два чи кілька пучків, які йдуть різними шляхами, і подалі зводяться і накладаються один на одного. Якщо ці пучки пройдуть різну відстань, то між ними виникне різниця фаз, зумовлена різницею їх ходу. В разі накладання таких пучків і виникає стійка інтерференційна картина.

Вперше такий метод використав французький фізик О. Ж. Френель. На мал. 200 наведено схему досліду Френеля для одержання когерентних джерел світла, за допомогою так званої біпризми Френеля. Дві однакові скляні призми A_1 і A_2 з дуже малими заломними кутами склеюють вузькими поверхнями. Якщо помістити з одного боку біпризми джерело світла S , а з іншого – екран D , то на екрані можна спостерігати інтерференцію світла. Пояснюється це тим, що всі промені, які потрапляють на призму A_1 , після заломлення в ній ідуть так, ніби вони вийшли з точки S' , яка є уявним зображенням джерела світла S . Аналогічно промені після заломлення в призмі A_2 ідуть так, ніби вони вийшли з точки S'' . Отже, хвилі йдуть ніби від двох уявних когерентних джерел світла і накладаються на всій поверхні екрана D .

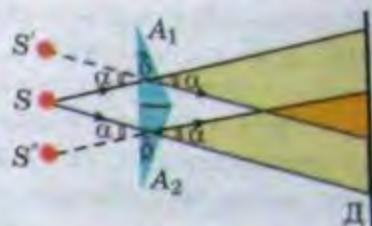
Існують й інші способи отримання когерентних джерел світла.

Інтерференція світла. Вперше явище інтерференції дослідив Томас Юнг (1773–1820) (йому належить і термін «інтерференція»). Юнг також першим виміряв довжину світлової хвилі.

Розглянемо знаменитий дослід Юнга. До речі, метою проведення досліду була перевірка припущення про корпускулярну природу світла. Світло від джерела (Юнг використав сонячне світло) спрямовувалось крізь щілину S на екран, в якому на близькій відстані одна від одної були прорізані ще дві щілини S_1 та S_2 . Якщо світло є потоком частинок, то на наступному екрані повинні спостерігатися дві яскраві лінії. Проте Юнг побачив цілу серію яскравих і темних ліній. Цю картину він назвав інтерференційною, а пояснити її можна лише на основі хвильової природи світла. (Подібні явища спостерігаються, наприклад, на поверхні води в разі накладання хвиль (мал. 201).

Щоб зрозуміти, яким чином виникає інтерференційна картина на екрані, скористаємось серією малюнків 202.

На малюнках зображено монохроматичні хвилі довжиною λ , які проходять крізь дві щілини S_1 та S_2 . За щілинами хвилі поширюються в усіх на-



Мал. 200. Схема дії біпризми Френеля



Мал. 201. Інтерференція механічних хвиль

прямок. Ми ж розглядатимемо тільки три напрямки – a , b та c . На мал. 202, a зображено хвилі, які попадають в центр екрана, на мал. 202, b , та 202, c – хвилі падають під різними кутами.

Кожна з хвиль проходить певну відстань. Розрізняють звичайну довжину пройденного 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 $\Delta d = d_1 - d_2$, залежить амплітуда результуючої хвилі.

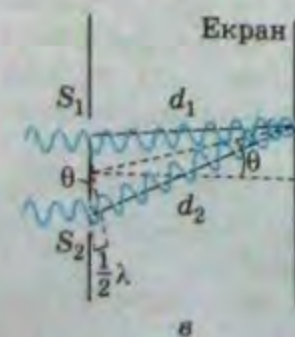
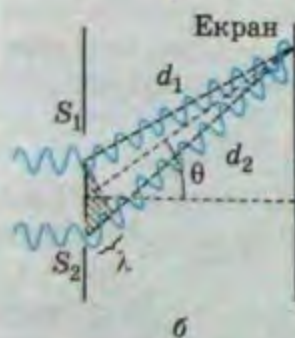
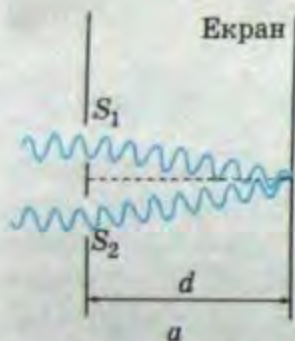
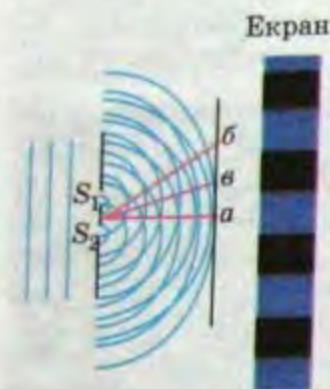
У першому випадку a від кожної із двох щілин хвилі проходять однакові відстані $d_1 = d_2$ та досягають екрана в одній фазі. У цьому випадку амплітуда результуючої хвилі подвоюється і спостерігається підсилення світла (світла лінія). Таке саме підсилення спостерігається і у випадку, коли різниця ходу двох хвиль $d_1 - d_2$ буде дорівнювати цілому числу довжин хвиль (або парному числу півхвиль).

Якщо ж одна із хвиль проходить додатково відстань, яка дорівнює половині хвилі, півтори хвилі і т.д., тобто різниця ходу $d_1 - d_2$ складається з непарного числа півхвиль, то обидві хвилі попадуть на екран у протифазі й «погасять» одна одну, оскільки результуюча амплітуда дорівнюватиме нулю (випадок b).

Можливий і ще один випадок (на мал. 202 не показано), коли різниця ходу дорівнює не цілому числу півхвиль. У цьому випадку хвилі прийдуть з різними фазами і будуть або підсилювати або послаблювати одна одну. Амплітуда результуючої хвилі буде мати проміжне значення між нулем і подвійною амплітудою.

Узагальнення розглянутих випадків носить назву умов максимуму та мінімуму інтерференції. Так, щоб отримати *максимум інтерференційної картини* (підсилення) необхідно, щоб оптична різниця ходу d , дорівнювала нулю (мал. 202, a) або парному числу півхвиль (мал. 202, b), $\Delta d = d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2}$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. *Мінімум інтерференційної*

картини (послаблення) спостерігається в точках, для яких хвильова різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль (мал. 202, c), $\Delta d = d_2 - d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$.



Мал. 202. Інтерференція від двох щілин

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 хвиль), то спостерігатиметься аналогічна картина, але відстані між світлими і темними смугами будуть іншими. Так, для червоного світла відстані між смугами виявляться більшими, ніж для зеленого чи синього.

А що ж ми спостерігатимемо на екрані, освітлюючи його білим світлом? У цьому випадку у 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 і чому на деякій відстані від центра екрана смуги зникають і екран є рівномірно освітленим).

З'ясуємо ще одне питання. Як відомо, електромагнітні хвилі (у тому числі й світлові) несуть енергію. Що ж відбувається з цією енергією, коли хвилі гасять одна одну? Можливо ця енергія переходить в інші види і в мінімумах інтерференційної картини виділяється теплота? Ні. Мінімум у даній точці інтерференційної картини означає, що енергія сюди зовсім не надходить. Внаслідок інтерференції енергія перерозподіляється в просторі. Вона концентрується в максимумах, не потрапляючи в мінімуми.

? Дайте відповіді на запитання

1. Які хвилі називаються когерентними?
2. Що таке інтерференція? Назвіть способи спостереження інтерференції.
3. Сформулюйте умови максимумів та мінімумів інтерференційної картини.
4. На якому шляху у вакуумі вкладається стільки ж довжин хвиль монохроматичного світла, скільки їх вкладається на шляху 3 мм у воді?
5. Дві когерентні світлові хвилі довжиною $4 \cdot 10^{-7}$ м приходять у деяку точку на екрані з різницею ходу 0,64 мм. Посилення чи ослаблення світла спостерігається у цій точці?
6. Як зміняться смуги інтерференції у досліді Юнга, якщо розмістити всю установку не в повітрі, а у воді?

Приклади розв'язування задач

Задача. У досліді Юнга 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. Визначити за цими даними довжину хвилі.

Дано:

$$a = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$L = 2 \text{ м}$$

$$x = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\lambda = ?$$

Розв'язання

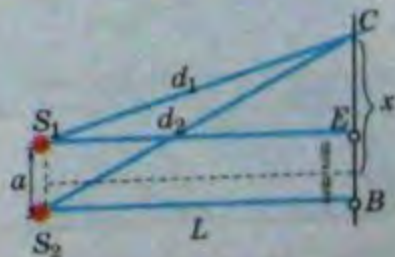
У певній точці С екрана (мал. 203) буде максимум освітленості за умови

$$\Delta d = d_2 - d_1 = k\lambda.$$

Визначимо оптичну різницю ходу Δd , для цього застосуємо до трикутників S_1CE і S_2CB теорему Піфагора

$$d_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2,$$

$$d_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2.$$



Мал. 203

Віднімаючи від першого рівняння друге, дістаємо $d_2^2 - d_1^2 = 2xa$, $(d_2 - d_1)(d_2 + d_1) = 2xa$. Оскільки $a \ll L$, то $d_1 + d_2 \approx 2L$. Отже $d_2 - d_1 = \frac{xa}{L}$.

Враховуючи, що $d_2 - d_1 = k\lambda$, можемо записати $k\lambda = \frac{xa}{L}$.

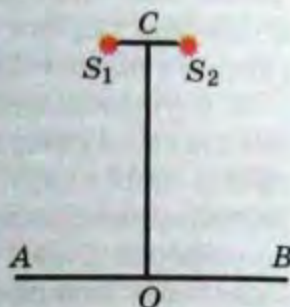
Звідси $\lambda = \frac{a \cdot x}{L}$, оскільки за умовою $k = 1$.

Після підстановки даних отримаємо $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-7}$ м.

Відповідь: $5,6 \cdot 10^{-7}$ м.

Вправа 25

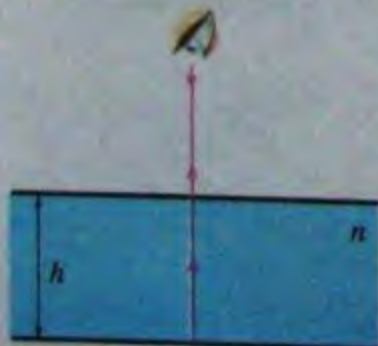
1. Два когерентні джерела світла S_1 та S_2 освітлюють екран AB , площина якого паралельна напрямку $S_1 S_2$ (мал. 204). Довести, що на екрані в точці O , яка лежить на перпендикулярі, опущеному із середини відрізка $S_1 S_2$, буде максимум освітленості.
2. Два когерентні джерела світла S_1 та S_2 (мал. 204) випускають монохроматичне світло з довжиною хвилі 600 нм. Визначити, на якій відстані від точки O буде перший максимум освітленості, якщо $|OC| = 4$ м і $|S_1 S_2| = 1$ мм.
3. Відстань на екрані (див. мал. 204) між двома сусідніми максимумами освітленості дорівнює 1,2 мм. Визначити довжину хвилі світла, що його випускають когерентні джерела S_1 та S_2 , коли $|OC| = 2$ м і $|S_1 S_2| = 1$ мм.
4. Як зміниться інтерференційна картина на екрані AB (див. мал. 204), коли: 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. 204.

§ 52. Інтерференційні картини в тонких пластинках і плівках

Інтерференція у тонких плоско-паралельних пластинках. У природних умовах інтерференцію світла можна спостерігати на тонких мильних бульбашках, на плівках бензину, розлитому на мокрому асфальті.



Мал. 205. Інтерференція у тонкій пластинці

Спочатку з'ясуємо, як утворюється інтерференційна картина при освітленні тонкої плоско-паралельної пластинки. Розглянемо випадок, коли інтерференція спостерігається у відбитому світлі, тобто спостерігач дивиться на пластинку згори, і вважатимемо, що хвилі падають на пластинку перпендикулярно (мал. 205).

Оптична різниця ходу інтерферуючих променів дорівнюватиме $2hn$, де h – товщина пластинки, n – абсолютний показник заломлення речовини пластинки. Така різниця ходу зумовлена тим,

що відбитий від нижньої поверхні пластинки промінь світла проходить додатковий шлях, що дорівнює подвійній товщині пластинки.

Далі слід враховувати той факт, що в оптиці, як і у випадку механічних хвиль, під час відбиття променів від оптично більш густого середовища втрачається півхвилі, а в разі відбиття від середовища оптично менш густого, втрати півхвилі не буде. У розглядуваному випадку півхвиля втрачається під час відбиття від верхньої поверхні. Отже оптична різниця ходу становить $2hn + \frac{\lambda}{2}$.

Максимальне підсилення у відбитому світлі буде тоді, коли оптична різниця ходу дорівнює парному числу півхвиль (див. § 51). Отже, умова максимального підсилення інтерферуючих хвиль для пластинки, коли інтерференцію спостерігають у відбитому світлі, визначається співвідношенням $2hn + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2}$, де $m = 1, 2, \dots$.

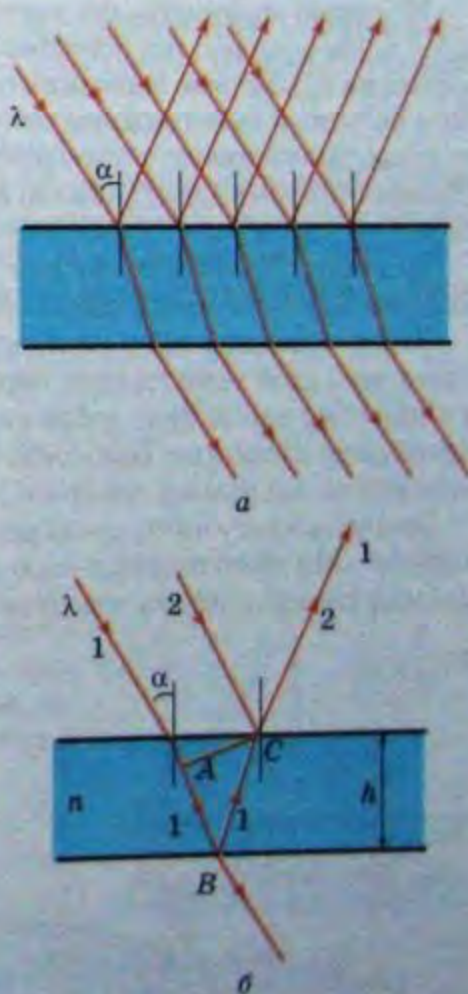
Відповідно, умова максимального ослаблення світла визначається співвідношенням $2hn + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$, де $m = 0, 1, 2, \dots$.

Якщо дивитись на пластинку в *прохідному світлі*, тобто знизу, то ці умови міняються місцями.

Якщо монохроматичні промені падають на поверхню пластинки під кутом α (мал. 206, а), різниця ходу між інтерферуючими променями змінюється. Для променів 1 і 2 вона дорівнює $(AB + BC)n + \frac{\lambda}{2}$

(мал. 206, б). Тут треба мати на увазі, що згідно з принципом Гюйгенса АС є положенням фронту хвилі в момент відбивання променя 2 у точці С (тобто $AC \perp AB$). Можна довести, що із збільшенням кута падіння оптична різниця ходу зменшується. Це означає, що під час повороту пластинки відносно променів вона по чергово здаватиметься то темною, то світлою.

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.



Мал. 206. Хід променів крізь плівку

Зрозуміло, що повертаючи пластинку відносно променів, спостерігати-
 мемо зміну її забарвлення. Підкреслимо ще раз, що все викладене стосуєть-
 ся випадку, коли на пластинку падають паралельні промені.

Інтерференція у клиноподібних плівках. Кільця Ньютона. З'ясуємо
 особливості інтерференції світла у клиноподібній плівці з дуже малим ку-
 том α і показником заломлення речовини n . Будемо освітлювати плівку па-
 ралельними монохроматичними хвилями, які перпендикулярні до однієї
 з граней клина. Побачимо, що на поверхні грані чергуються темні і світлі
 смуги, паралельні гострому ребру клина. Пояснимо їх утворення.

На мал. 207 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 А
 буде максимальне підсилення світла. Тоді на деякій відстані a від точки А
 буде наступна точка В, в якій, внаслідок збільшення товщини клина, знову
 буде максимальне підсилення світла, відповідно при цьому різниця ходу по-
 винна зростати на λ . Тобто оптична різниця ходу $2BC \cdot n$ має дорівнювати λ .

З малюнка видно, що $BC = atg\alpha$, тому $2natg\alpha = \lambda$.

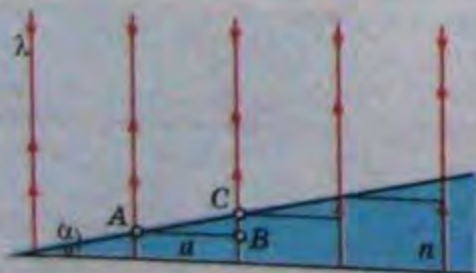
Для малих кутів тангенс кута можна вважати таким, що дорівнює само-
 му куту, вираженому в радіанах, отже дістанемо $2aan = \lambda$, звідки $a = \frac{\lambda}{2n\alpha}$.

Неважко зрозуміти, що наступна світла смуга буде на відстані a від точки
 С і т.д. Це означає, що інтерференційні смуги в описаному випадку розміщу-
 ються на однакових відстанях одна від одної. Із збільшенням кута α відстань
 між світлими (або темними) смугами зменшується. Якщо кут α у плівки по-
 ступово зменшувати, то інтерференційні смуги розсуватимуться, і коли грані
 плівки стануть паралельними, смуги зовсім зникнуть. Із збільшенням кута α
 смуги зближуються і для кута близько 1° накладаються одна на одну.

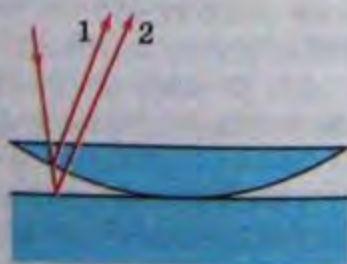
Клиноподібний повітряний простір можна отримати, якщо на плоско-
 паралельну пластинку покласти плоско-опуклу лінзу (мал. 208).

Якщо освітити таку систему паралельними монохроматичними проме-
 нями 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. У цьому разі інтерферують промені, які від-
 биваються від кривої поверхні лінзи і від поверхні пластини.

Зверніть увагу на те, що перша хвиля відбивається від межі скло-повітря,
 а друга – від межі повітря-скло. Тому у другому випадку відбувається зміна
 фази коливань відбитої хвилі на 180° , що відповідає збільшенню різниці ходу
 на $\frac{\lambda}{2}$.



Мал. 207. Інтерференція на клиноподібній плівці



Мал. 208. Утворення кілець Ньютона

На мал. 209 зображено вигляд кілець Ньютона у відбитому світлі (у прохідному світлі у центрі розташовується світла пляма) для хвиль зеленого та червоного кольору. Як видно, з віддаленням від центра кільця зближуються. Це пояснюється тим, що у цьому напрямку зростає кут повітряного клина (мал. 208). До того ж радіус кілець залежить від довжини падаючої хвилі.



Мал. 209. Вигляд кілець Ньютона для зелених та червоних хвиль у відбитому світлі

Дайте відповіді на запитання

1. В останній момент перед тим, як розірватись і утворити отвір, мильна бульбашка втрачає прозорість. Як це пояснити, адже в цей момент товщина плівки найменша?
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 і відстань між ними, якщо проміжок між лінзою й склом заповнити водою?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Мильна бульбашка у точці, найближчій до спостерігача, здається зеленою ($\lambda = 540$ нм). Яка мінімальна товщина плівки? Показник заломлення мильного розчину $n = 1,35$.

Дано:

$$\lambda = 540 \text{ нм}$$

$$n = 1,35$$

$$h_{\min} - ?$$

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 $2h_{\min}n = \frac{\lambda}{2}$. Звідки $h_{\min} = \frac{\lambda}{4n}$.

$$h_{\min} = \frac{540 \text{ нм}}{4 \cdot 1,35} = 100 \text{ нм}.$$

Відповідь: 100 нм.

Задача 2. Визначити 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:

$$\Delta r = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

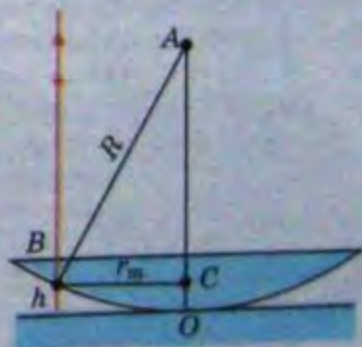
$$R - ?$$

Розв'язання

Із $\triangle ABC$ (мал. 210) маємо

$$|BA|^2 = |BC|^2 + |AC|^2 \text{ або}$$

$$R^2 = r_m^2 + (R - h)^2.$$



Мал. 210

Звідки $r_m^2 - 2Rh + h^2 = 0$, нехтуючи малою величиною h^2 порівняно з іншими доданками, отримуємо $r_m^2 = 2hR$, 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 у цю формулу вираз для h , визначимо радіус кільця $r_m^2 = (2m - 1) \frac{\lambda R}{2n}$.

$$\text{Для } m = 2 \quad r_2 = \sqrt{(2 \cdot 2 - 1) \frac{\lambda R}{2n}} = \sqrt{\frac{3\lambda R}{2n}}.$$

$$\text{Для } m = 3 \quad r_3 = \sqrt{(2 \cdot 3 - 1) \frac{\lambda R}{2n}} = \sqrt{\frac{5\lambda R}{2n}}.$$

$$\text{Тоді } \Delta r = r_3 - r_2 = \sqrt{\frac{5\lambda R}{2n}} - \sqrt{\frac{3\lambda R}{2n}} = \sqrt{\frac{\lambda R}{2n}} (\sqrt{5} - \sqrt{3}) = 0,5 \sqrt{\frac{\lambda R}{2n}}.$$

Оскільки між лінзою і пластинкою повітряний простір, то $n = 1$.

$$\text{Отже, } R = \frac{\Delta r^2}{0,125\lambda}; \quad R = \frac{(0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2}{0,125 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 3,6 \text{ м}.$$

Відповідь: 3,6 м.

Зверніть увагу! Проаналізувавши розв'язання задачі, можна зробити узагальнюючий висновок: у відбитому світлі радіус світлого кільця визначається за форму-

лою $r = \sqrt{\frac{2m-1}{2}} \lambda R$, радіус темного кільця — $r = \sqrt{2m\lambda R}$, де $m = 1, 2, 3$ — порядковий

номер кільця. При $m = 0$ в центрі спостерігається темна пляма. Якщо розглядати інтерференційну картину у прохідному світлі, темні та світлі кільця міняються місцями (у центрі спостерігається світла пляма).



Вправа 26

1. 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). Визначити відстань між сусідніми синіми смугами. Вважати, що форма плівки за час спостереження не змінюється.
2. Біле світло, що нормально падає на мильну плівку і відбите від неї, дає у видимому спектрі інтерференційний максимум для хвилі довжиною 630 нм та ближчий до нього мінімум для хвилі 450 нм. Яка товщина плівки?
3. Тонка плівка завтовшки 0,5 мкм освітлюється світлом довжиною хвилі 590 нм. Якою буде ця плівка у прохідному світлі, якщо показник заломлення речовини плівки 1,48, а промені направлені перпендикулярно до поверхні плівки? Що буде відбуватись з кольором плівки, якщо її нахилити відносно променів?
4. На мильний клин ($n = 1,33$) нормально до його грані падає монохроматичне світло довжиною хвилі 546 нм. Відстань між п'ятьма смугами 2 см. Визначити заломний кут клина.
5. Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає нормально до поверхні пластинки. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Радіуси двох сусідніх темних кілець $r_k = 4$ мм

- і $r_{k+1} = 4,38$ мм. Радіус кривизни лінзи 6,4 м. Визначити порядкові номери кілець та довжину хвилі падаючого світла.
6. Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом ($\lambda = 600$ нм), що падає нормально до поверхні установки. Визначити товщину повітряного простору між лінзою і пластинкою у тому місці, де спостерігається п'яте темне кільце у відбитому світлі.
7. 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 світлими кільцями 9 мм. Визначити 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 раза. Визначити показник заломлення рідини.

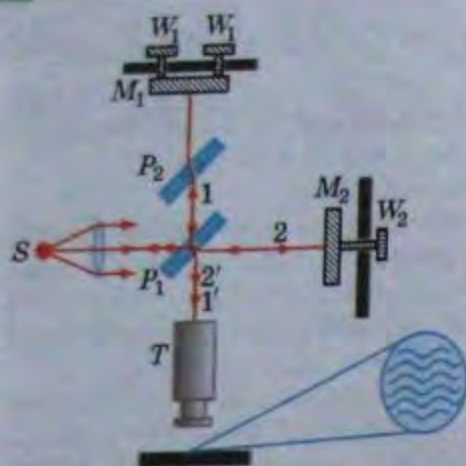
§ 53. Практичне використання інтерференції

Сучасна наука і техніка використовує інтерференцію світла для точних вимірювань, для визначення якості обробки поверхонь, для поліпшення якості зображень, отриманих оптичними приладами 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, в результаті чого було дано нове його означення: метром називають довжину, на якій довжина хвилі оранжевих променів у вакуумі, що їх випромінюють атоми Криптонію, укладається 1 650 763,73 раза. (У 1983 р. було прийнято новий еталон метра, виражений через швидкість світла).

Просвітлення оптики. У 1935 р. український учений О. Смакула зробив відкриття – спосіб поліпшення оптичних приладів, що отримав назву «просвітлення оптики». Суть відкриття полягає в тому, що поліровану поверхню скляної лінзи покривають тонким шаром певного матеріалу. Завдяки явищу інтерференції у цій тонкій плівці відбите від полірованої поверхні світло гаситься і більше світла проходить вперед. 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 б. Лінзи є основним елементом різних оптичних приладів: фотоапаратів, мікроскопів, телескопів, перископів, стереотруб, біноклів, оптичних пристроїв до стрілецької зброї тощо (мал. 211). Таким чином, це відкриття стало великим здобутком, яким користується все людство і сьогодні як на Землі, так і в космосі для фотографування Землі та інших планет.



Мал. 211. Об'єктиви з просвітленою оптикою



Мал. 212. Схема інтерферометра Майкельсона

ції. За їх допомогою здійснюють точні вимірювання довжин і кутів (особливо в астрономічних дослідженнях), визначають показник заломлення прозорих речовин.

Найвідомішим є інтерферометр конструкції А. Майкельсона, схему якого наведено на мал. 212.

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 на дзеркало M_2 . Пластинку P_2 , такої самої товщини як і P_1 , ставлять на шляху променя 1 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 змінювати положення дзеркал. Достатньо змістити одне із дзеркал у напрямі 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 застосовуються для визначення лінійних розмірів досліджуваних об'єктів із точністю близько 100 нм, а також у космічних дослідженнях (де замість світлових хвиль можуть використовуватись хвилі радіодіапазону). Чутливість астрономічних інтерферометрів значно вища, ніж чутливість звичайних радіотелескопів.

Для додаткового читання.

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 у 1881 р. американські учені А. Майкельсон і Е. Морлі. Ще раз пригадаємо суть дослідів.

Контроль якості поверхонь. 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.

Інтерферометри. Інтерферометрами називають прилади, які застосовують для вимірювань на основі явища інтерференції.

Згідно із законами 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 \vec{v} , швидкість світла вже дорівнюватиме $\vec{c} \pm \vec{v}$ (згідно з принципом відносності Галілея). Отже, виникли певні суперечності між електродинамікою Максвелла та механікою Ньютона, які намагались вирішити різними способами.

Один із способів полягав у тому, щоб принцип відносності Галілея вважати не застосовним до електромагнітних явищ. Саме такої думки дотримувався голландський фізик Х. 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, в 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 не правильними рівняння Максвелла і спробувати замінити їх такими, щоб з переходом від однієї системи відліку до іншої (згідно із звичайними, класичними уявленнями про простір і час) вони не змінювались. Таку спробу зробив Г. Герц. Він вважав, що ефір повністю захоплюється рухомими тілами, і тому електромагнітні явища відбуваються в ефірі однаково, не залежно 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 у системі, зв'язаній з ефіром, то, вимірюючи швидкість світла в довільній інерціальній системі, можна було б виявити рух цієї системи відносно ефіру і 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 півроку «ефірний вітер» має обдувати її в одному напрямку, півроку – в іншому, і відповідно картинка на виході інтерферометра повинна змінюватись то в один, то в інший бік. Проведені досліді не виявили ніякого вітру, а отже, і ніякого ефіру! Це означало, що не існує і ніякої абсолютної системи відліку.

І як ви уже знаєте, А. Ейнштейн усунув цю неузгодженість між класичною механікою і електродинамікою революційним шляхом, відмовившись від класичних уявлень про абсолютний простір і час і цим самим зберігши принцип відносності і рівняння Максвелла. Так і виникла спеціальна теорія відносності, в якій закони класичної механіки розглядаються як граничний випадок руху макроскопічних тіл із швидкостями, набагато меншими за швидкість поширення світла.

? Дайте відповіді на запитання

1. Чому просвітлювальна плівка, нанесена на поверхню лінзи, здається кольоровою?
2. Хто першим запропонував метод просвітлення оптики?
3. Яка будова і принцип дії інтерферометра Майкельсона? З якою метою застосовують інтерферометри?

§ 54. Дифракція світла



Мал. 213. Огинання хвилями перешкод



Мал. 214. Проходження хвилі крізь отвори різної ширини

На мал. 214 зображено проходження хвиль крізь отвори у перешкоді.

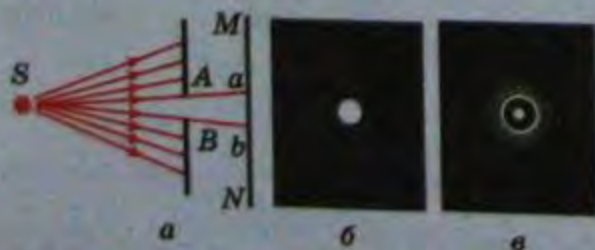
Спостерігати дифракцію світла не так легко. Справа в тому, що хвилі відхиляються від прямолінійного поширення на помітні кути лише на перешкодах, розміри яких порівнянні з довжиною світлової хвилі. Тому для перешкод, великих порівняно з довжиною хвилі, дифракцію можна спостерігати лише на великій відстані від перешкоди.

Дифракційні картини від різних перешкод. Якщо від джерела S пропустити пучок світла крізь отвір AB (мал. 215), то на екрані дістанемо світлу пляму.

Діаметр цієї плями відповідає ширині світлового пучка, що падає на екран (мал. 215, 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! При цьому пляма втрачає різкість, вона розширена і нерівномірно освітлена (мал. 215, в). На екрані з'являються світлі і темні кільця, що чергуються і займають ділянку, значно більшу, ніж це виходить із геометричних побудов, які ґрунтуються на законі прямолінійного поширення світла.

Змінюючи діаметр отвору, можна отримати в центрі дифракційної картини або темну, або світлу пляму.

На мал. 216 показано дифракційні картини від тонкої дротини та круглого диска.



Мал. 215. Дослід із виявлення залежності вигляду світної плями від розмірів отвору



Мал. 216. Дифракційні картини від тонкої дротини (а) та круглого диска (б)

Явище дифракції. Ознайомимось ще з одним хвильовим явищем – дифракцією. Дифракція – явище огинання хвилями перешкод.

Легко спостерігати дифракцію хвиль, які поширюються на поверхні води. Перешкоди порушують прямолінійність переміщення фронту хвилі. Якщо перешкода велика (порівняно з довжиною хвилі), то за нею хвиль немає (мал. 213, а), якщо розмір перешкоди малий – хвилі заходять за її краї (мал. 213, б), дуже малу перешкоду хвилі огинають так, ніби її немає – фронт хвилі не змінюється (мал. 213, в).

Принцип Гюйгенса–Френеля. Досліджував явище дифракції О.Ж. Френель. Він побудував кількісну теорію дифракції, яка дає можливість уявити собі розрахувати дифракційну картину, що виникає внаслідок огинання світлом будь-яких перешкод. Френель також уперше дав пояснення прямолінійного поширення світла в однорідному середовищі з погляду хвильової теорії.

Цих успіхів Френель досяг, об'єднавши принцип Гюйгенса (див. § 47) з припущенням про інтерференцію вторинних хвиль. 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.*

Таким чином, принцип Гюйгенса–Френеля пояснює дифракцію як результат незалежного накладання когерентних вторинних хвиль. Іншими словами, *дифракція є наслідком інтерференції хвиль.*

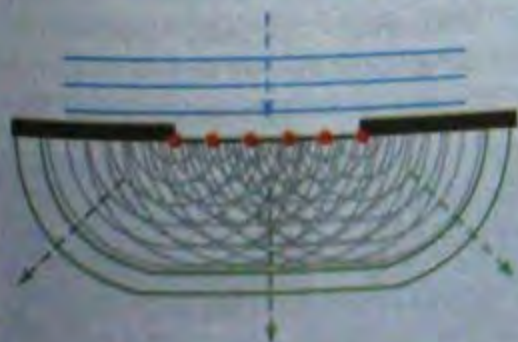
Розглянемо детальніше механізм проходження хвилі крізь щілину (мал. 217).

Як тільки фронт хвилі дійде до щілини, то кожна точка простору між краями щілини стає самостійним джерелом вторинних хвиль. Новий фронт хвилі утворюється у результаті інтерференції цих вторинних хвиль. Оскільки вторинні хвилі від крайніх точок щілини мають вигнуту поверхню, то новоутворений фронт хвилі розширюється і деформується. Промені, проведенні перпендикулярно до фронту хвилі, показують напрям поширення хвилі.

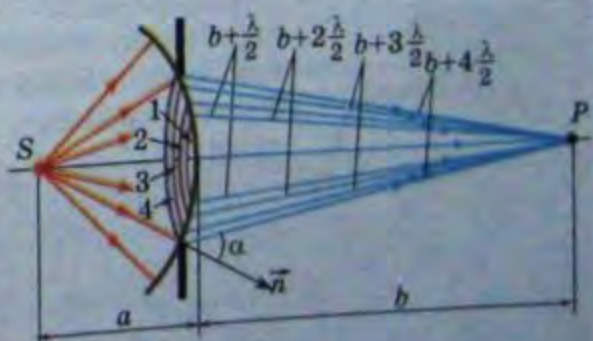
Метод зон Френеля. Френель запропонував розбивати фронт хвилі на ділянки (зони Френеля), які розглядаються як самостійні однакові джерела хвиль. Відповідно амплітуда й інтенсивність хвилі у точці спостереження визначається як результат інтерференції хвиль, створених окремими зонами.

Ознайомимось у дещо спрощеному вигляді з методом зон і застосуємо його до пояснення дифракції світла на круглому отворі (мал. 218).

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 $\lambda/2$ (мал. 218). У цьому випадку коливання, які приходять в точку P від аналогічних точок двох сусідніх зон, будуть накладатися з протилежними фазами. Якщо в отворі діаграми вкладається парне число зон Френеля, то в центрі екрана спостерігатиметься послаблення інтенсивності світла (темна пляма), якщо



Мал. 217. Пояснення дифракції світла за принципом Гюйгенса–Френеля



Мал. 218. Метод зон Френеля

непарне їх число – підсилення світла (світла пляма). Радіус k -ої зони Френеля визначається як $r_k = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} k \lambda$, де a – радіус k -ого сферичного монохроматичного хвильового фронту (поверхні), що поширюється від джерела S

до точки P на екрані; b – віддаль від вершини хвильової поверхні до точки P ; $k = 1, 2, 3, \dots$ – порядковий номер зони Френеля; λ – довжина хвилі. Кількість зон Френеля, що вміщується у круглому отворі радіусом R , дорівнює

$$k = \frac{R^2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right).$$

Метод зон Френеля можна застосувати і у випадку дифракції від щілини. У цьому випадку хвильовий фронт необхідно розбити на зони Френеля у вигляді вузьких смужок, паралельних краю щілини.

В принципі можна виготовити таку пластинку, яка перекривала б усі парні або непарні зони. Тоді всі хвилі приходять у точку P у фазі і підсилюватимуть одна одну (хвилі, які приходять у протифазі перекрито). Дістаємо прилад цілком аналогічний лінзі.

? Дайте відповіді на запитання

1. У чому полягає явище дифракції світлових хвиль і як його можна спостерігати? Чи можливе явище інтерференції і дифракції з ультрафіолетовими, інфрачервоними і рентгенівськими променями?
2. Якими уявленнями Френель доповнив принцип Гюйгенса?
3. Для чого і як саме хвильова поверхня розбивається на зони Френеля?

§ 55. Дифракційна ґратка

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 й явище інтерференції, оскільки промені, які йдуть від усіх щілин, будуть когерентними. Відповідний пристрій називають *дифракційною ґраткою* (мал. 219). Це тонка пластинка, на яку нанесені паралельні штрихи з проміжками (щілинами) між ними.

Ширина щілини зі штрихом позначається d і називається *сталою ґратки* або *періодом ґратки*.



Мал. 219.
Дифракційна ґратка

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 внаслідок інтерференції можливе тільки у певних напрямках. З'ясуємо, у 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. 220), який можна визначити з трикутника ABC : $AC = d \sin \varphi$. Як відомо, якщо на цьому відрізку

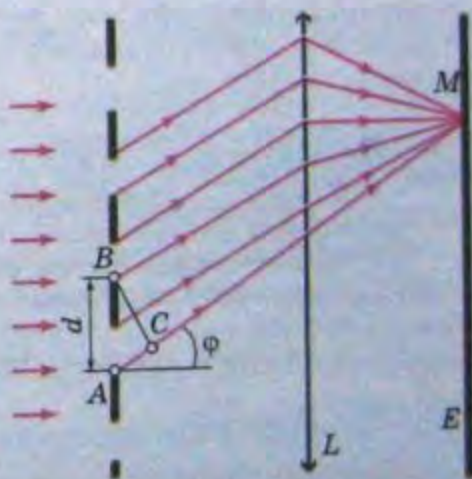
вміщується парне число півхвиль (або ціле число довжин хвиль), то хвилі від усіх щілин, додаючись, підсилюють одна одну і в точці M спостерігатиметься максимум інтерференції. Отже умовою максимуму є рівність $d \sin \varphi = k \lambda$. Відповідно, мінімумам інтерференції відповідає умова $d \sin \varphi = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – ціле число, n – показник заломлення середовища, в якому поширюється хвиля. Оскільки для повітря $n = 1$, то отримані співвідношення записують так: $d \sin \varphi = k \lambda$ (умова максимуму) та $d \sin \varphi = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$ (умова мінімуму).

Зазначимо, що на мал. 220 показано інтерферуючі промені, які йдуть від краю кожної щілини. Зрозуміло, що промені, які йдуть від будь-якої іншої точки щілини (наприклад з центра) інтерферують з аналогічними променями від інших щілин. Чим більше щілин має ґратка і чим ближче вони розміщені одна від одної, тим яскравіші максимуми і тим ширшими мінімумами вони розділені.

Дифракційний спектр. Утворену на екрані картину називають *дифракційним спектром* (мал. 221, 222). Кожному значенню коефіцієнта k відповідає своя лінія (максимум освітленості), тому його ще називають *порядком спектра*. Між максимумами розміщуються мінімуми освітленості.

Якщо $k = 0$, по центру ґратки у 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. Всі 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 у кольоровий спектр (мал. 222). З обох боків від центральної білої лінії максимуми розміщуються в порядку зростання довжин хвиль (від фіолетового до червоного).



Мал. 220. Проходження хвиль крізь дифракційну ґратку



Мал. 221. Розташування порядків у дифракційному спектрі



Мал. 222. Дифракційний спектр білого світла

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 з великою точністю, отже велика точність буде забезпечена і для визначення довжини хвилі. Зазначимо, що чим менший період ґратки, тим точніший буде результат вимірювання λ .

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 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 і розміщені вони не впритул, то утворюється складніша система плям. Виявляється, що, аналізуючи розміщення плям на екрані в таких випадках, можна визначити відстань між ґратками і їх період. Це дало змогу дізнатись про розміщення атомів у кристалічній ґратці багатьох твердих тіл.

? Дайте відповіді на запитання

1. Як зміниться: а) положення максимумів; б) інтенсивність центрального максимуму; в) ширина максимумів, якщо половину дифракційної ґратки закрити непрозорою площиною так, щоб кількість штрихів зменшилася вдвоє?
2. Чому штрихи на дифракційній ґратці мають бути розміщені щільно один біля одного?
3. Як зміниться вигляд спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?

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 $d \sin \varphi_2 = k \lambda_2$.



Мал. 223

Для малих кутів φ_1 і φ_2 , можна вважати, що

$$\sin \varphi_1 \approx \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{k\lambda_1}{d} \quad \text{і} \quad \sin \varphi_2 \approx \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{k\lambda_2}{d}.$$

З мал. 223 видно, що $\Delta b = L(\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1)$ або $\Delta b = \frac{Lk}{d}(\lambda_2 - \lambda_1)$.

Після підстановки даних отримуємо $\Delta b = 0,114$ м.

Відповідь: 0,114 м.

Вправа 27

1. Визначити 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 вважати малими.
3. Світло нормально падає на дифракційну ґратку. Найменший кут відхилення, за якого суміщаються лінії довжинами хвиль 656 нм та 410 нм, дорівнює 41° . Визначити період дифракційної ґратки.
4. На плоску дифракційну ґратку нормально падає пучок світла. Під кутом 20° видно червону (669 нм) лінію спектра. Визначити період ґратки, якщо під цим самим кутом видно і синю (446 нм) лінію в спектрі вищого порядку. Найбільший порядок спектра, під яким видно червону лінію, дорівнює 5.

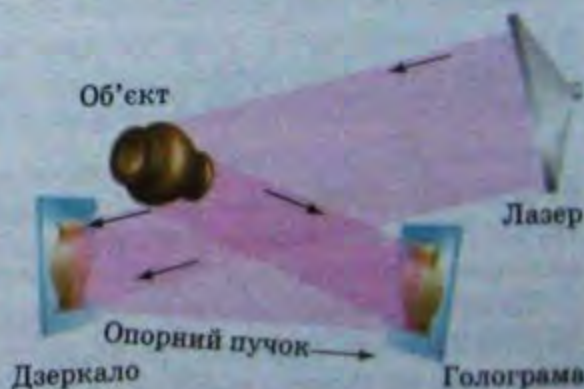
Для додаткового читання

Голографія та умови її спостереження. Голографічний метод Денисюка

В середині ХХ ст. (1947 р.) Денис 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 і відтворення просторового (об'ємного) зображення.

Основні принципи голографії, сформульовані Д. Габором, не знаходили свого практичного застосування до початку 60-х рр. ХХ ст., коли був винайдений лазер. Застосовувавши лазер та вдосконаливши початковий голографічний метод, американці Е. Лейт та Ю. Упатнієкс отримали голограми, які відображали реальні тривимірні зображення. Після цього метод голографії став швидко розвиватись.

Розглянемо у загальних рисах принцип голографії. Для запису голограми (мал. 224) 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. 224. Схема запису голографічного зображення



Мал. 225. Схема відтворення голографічного зображення

Опорна та предметна хвилі когерентні і, накладаючись, утворюють на фотопластинці інтерференційну картину. Після проявлення пластинки отримуємо голограму.

Для відтворення зображення по голограмі її встановлюють в те саме положення, в якому її було отримано (мал. 225). Голограму освітлюють опорним пучком світла від того самого лазера (другу частину лазерного пучка перекривають діафрагмою). У результаті дифракції світла на інтерференційній структурі голограми відтворюється копія предметної хвилі, яка утворює об'ємне уявне зображення предмета, розташоване

у тому самому місці, де був розміщений предмет під час голографування. Це зображення здається настільки реальним, що виникає бажання доторкнутись до нього рукою.

Таким чином, суть голографії полягає у 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 і дає змогу їх спостерігати за відсутності об'єкта спостереження.

Розглянутий нами спосіб одержання голографічного зображення називають *голографічним методом Денисюка*, він був запропонований радянським дослідником Юрієм Денисюком. У цьому методі запису фотопластинка встановлюється 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.

§ 56. 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. 226).

Це явище вперше досліджував І. Ньютон у 1666 р. і назвав його *дисперсією* (від латинського *dispergo* – розкидаю), а кольорову гаму – *спектром* (від латинського *spectrum* – марево).

Замість скла можна використовувати лід, органічне скло та інші прозорі для світла матеріали. Чим більший показник заломлення матеріалу, тим

яскравіше виражене явище дисперсії. Середовища, в яких спостерігається явище дисперсії, називаються *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 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Під час перетину межі поділу середовищ швидкість електромагнітної хвилі змінюється, внаслідок чого відбувається її заломлення. Причому *кожна монохроматична хвиля має свою певну швидкість поширення в середовищі*.



Мал. 226. Розкладання білого світла призмою

Пояснення цього дає теорія дисперсії Х. Лоренца на основі електромагнітної теорії світла і електронної будови речовини. Під час проходження електромагнітної хвилі крізь діелектрик на кожен електрон діє електрична сила, яка змушує їх здійснювати коливання. Коливання електронів є джерелом вторинних хвиль, котрі накладаються на первинні хвилі. Вторинні хвилі внаслідок інерції електронів дещо запізнюються в часі і, накладаючись на первинні хвилі, дають результуючі хвилі з відставанням за фазою порівняно з первинними. Зсув фаз між первинною і результуючою хвилями залежить від частоти коливань напруженості електромагнітного поля E , тобто світло різних довжин хвиль (частот) матиме різні швидкості поширення в речовині, а отже, і 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

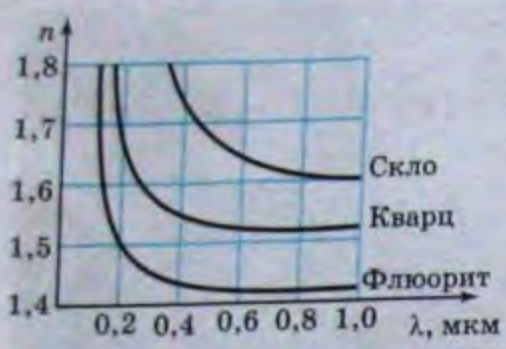
швидкість поширення світла v в середовищі для кожної монохроматичної хвилі має своє певне значення, то відповідно для кожної монохроматичної хвилі $\sin \gamma$ і відповідно кут заломлення γ також набуватиме певного значення.

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 і, 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 речовини спостерігається зворотнє явище – *аномальна дисперсія*.



Мал. 227. Графічна залежність показника заломлення від довжини хвилі для деяких речовин

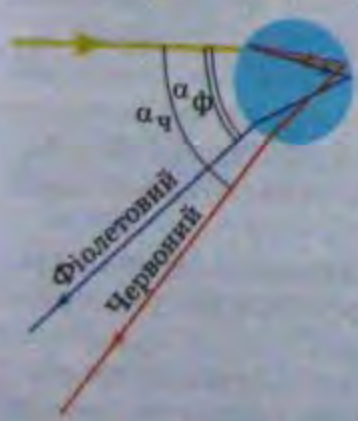
виною спостерігається обернене явище, так звана *аномальна дисперсія*, коли із збільшенням частоти світла (зменшенням довжини хвилі) показник заломлення світла зменшується.

Нормальна дисперсія видимих променів спостерігається у всіх прозорих безбарвних діелектриках: кварці, склі, воді тощо. Мірою дисперсії, тобто величиною, що показує, на скільки розходяться при заломленні 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 мал. 227. 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.

Неперервний спектр світла. Світло Сонця, лампи розжарювання, свічки розкладається призмою в суцільний (неперервний) спектр. Це свідчить про те, що ці тіла випромінюють хвилі усіх можливих частот (довжин) хвиль.

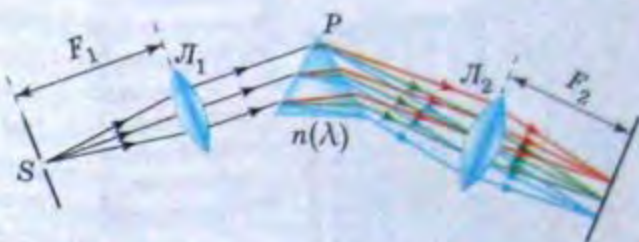
З кривої дисперсії для скла (мал. 227) видно, що в області коротких хвиль показник заломлення скла зі зміною довжини хвилі змінюється швидко, а в області довгих хвиль – повільно. Тому дисперсійний спектр білого світла стиснутий у червоній частині і розтягнутий у фіолетовій. Як відомо, дифракційна ґратка також розкладає біле світло у спектр, але утворений нею спектр окрім кольорових смужок має ще й чорні. До того ж дифракційний спектр (мал. 222, § 55) 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. 228. 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. 228). 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° .

Спектроскоп. Окрім неперервних, як нами далі буде з'ясовано, існують лінійчасті та смугасті спектри, вивчення яких дало змогу з'ясувати будову атома.



Мал. 229. Будова та принцип дії спектроскопа

Одним з приладів, за допомогою якого досліджуються спектри є спектроскоп (мал. 229).

Основними елементами спектроскопа є коліматор 1, зорова труба 2, трикутна призма 3. В коліматорі є щілина 4, через яку проходить світло від досліджуваного джерела світла. Проходячи крізь призму, світло заломлюється і 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.

Потрапляючи через об'єктив у зорову трубу, всі 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 призначений для вимірювань, то на зображення ліній за допомогою спеціального пристрою накладається зображення шкали з поділками, що дає змогу точно визначити положення лінії у спектрі.

? Дайте відповіді на запитання

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 і чому розташовані кольорові смуги відносно аркуша?

§ 57. Поляризація світла

Природне і поляризоване світло. Дослідимо ще одну властивість світлових хвиль – їх поляризацію. Із дослідів Герца (§ 47) встановлено, що електромагнітні хвилі поперечні. Коливання зарядів у передавальній антені відбуваються вздовж її осі. Внаслідок чого в електромагнітній хвилі вектор напруженості електричного поля розташований у тій же 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 певних площинах, називають **плоскополяризованою**.



Мал. 230. Схема поляризації хвилі

Оскільки світло випромінюють атоми, кількість яких у речовині величезна, то зрозуміло, що таке світло не буде поляризованим (коливання вектора \vec{E} здійснюються у всіх можливих напрямках у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі). Проте, бувають випадки, коли світлова хвиля є поляризованою (чи частково поляризованою).

Поляризація світла – стан світлової хвилі, в якому певні напрямки коливань електричного вектора \vec{E} переважають над іншими.

Методи отримання поляризованого світла. Метод поляризації природного світла можна зрозуміти з такого досліду (мал. 230). Поставимо на шляху неполяризованої хвилі пластину із паралельними щілинами. З коливань різних напрямів пластина виділить коливання в одній певній площині – хвиля стане поляризованою.

Якщо на її шляху поставити ще одну таку саму пластину, але повернуту відносно першої на 90° , то коливання крізь неї не пройдуть. Хвиля повністю погаситься.

Для поляризації світла використовують спеціальні пристрої з асиметрією оптичних властивостей. Зокрема, існують природні і штучні кристали, які мають оптичну анізотропію – неоднорідність оптичних властивостей в різних напрямках. Проходячи крізь такі кристали, світло поляризується.

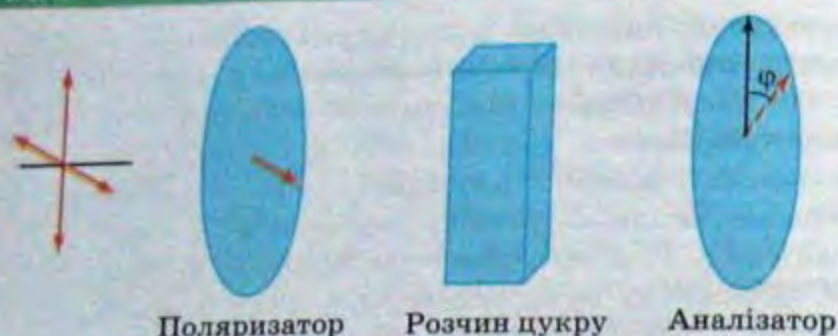
Поляризатором називають пристрій, який перетворює природне світло в поляризоване.

Аналізатором називають пристрій, яким визначають, поляризована хвиля, що проходить крізь нього, чи ні.

Прикладом поляризатора (аналізатора) може бути природний кристал турмаліну, значення показника заломлення якого в різних напрямках різне. Завдяки цьому він поглинає випромінювання з коливаннями вектора \vec{E} одного певного напрямку, а випромінювання з коливаннями в перпендикулярному напрямку майже не поглинає. Цю властивість кристалів називають *дихроїзмом*.

Підібравши таку товщину турмалінової пластинки, за якої коливання одного напрямку цілком поглинаються в ній, можна отримати повністю поляризований промінь. Якщо пластинка буде тоншою, то в хвилі залишаться коливання у взаємно перпендикулярних напрямках, але амплітуда коливань в одному з них буде більшою, ніж у другому. Таку хвилю називають *частково поляризованою*.

Світло – також електромагнітна хвиля, тому можна очікувати на поляризацію і світлової хвилі. Враховуючи 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.



Поляризатор Розчин цукру Аналізатор

Мал. 232. Принцип дії цукрометра

на мал. 232 світло проходить крізь поляризатор, а потім крізь розчин цукру у кюветі. Полярізатор-аналізатор за кюветою, розташований під кутом 90° до поляризатора, повинен був повністю погасити світло, але цього не відбулося. Проте, якщо аналізатор повернути ще на деякий кут φ – світло гаситься. Це означає, що розчин у кюветі повертає на кут φ площину поляризації. Такі речовини називають *оптично активними*.

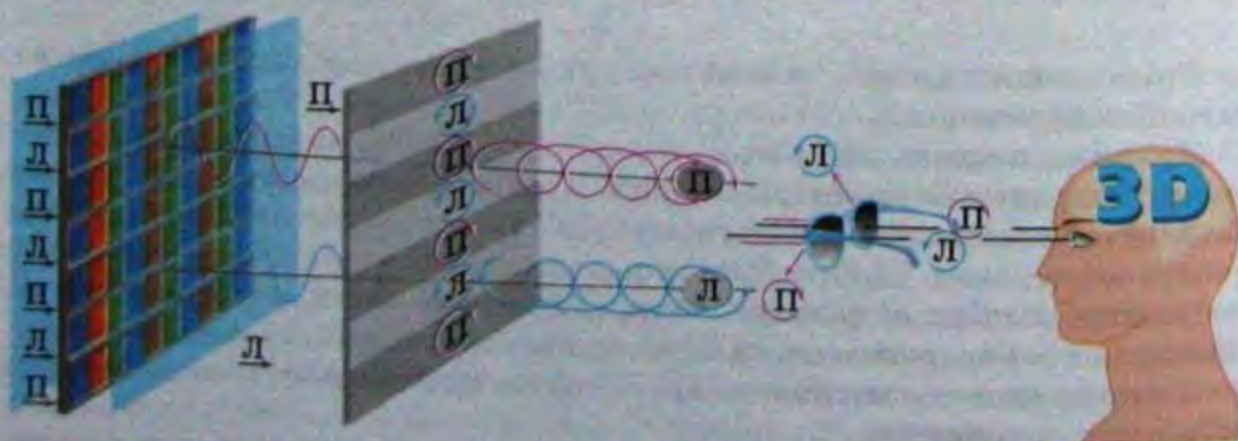
Оптична активність речовин зумовлена асиметрією молекул, які мають форму спіралі, як, наприклад, молекули деяких білків. Деякі речовини (цукор, декстроза, D-глюкоза) повертають площину поляризації вправо, а деякі речовини (амінокислоти, білки) – вліво.

Кут повороту φ пропорційний концентрації розчину. Тому цю властивість використовують для виготовлення спеціальних пристроїв – цукрометрів, за допомогою яких встановлюють вміст цукру.

Спеціальні поляризаційні окуляри використовують під час перегляду стереофільмів у кінотеатрах.

Отримати зображення у 3D форматі можна і на домашньому комп'ютері за допомогою відповідних екранів. Вивчаючи властивості рідкокристалічних екранів, ми зазначали, що їм притаманна певна властивість, зумовлена самою технологією отримання зображення за їх допомогою, – 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, в яких площини поля-



Мал. 233. Механізм утворення зображення у 3D форматі за допомогою поляризованого світла

ризації повернуті так, що крізь одну лінзу видно парні ряди, а крізь іншу – непарні. Таким чином створюються зображення, які видно окремо лівим оком і правим оком. Мозок людини співставляє два зображення і «бачить» його об'ємним (мал. 233).



Дайте відповіді на запитання

1. Чим відрізняється поляризоване світло від природного?
2. Як отримують поляризоване світло?
3. У чому суть закону Брюстера?
4. Де на практиці застосовують явище поляризації світла?

§ 58. Геометрична оптика як граничний випадок хвильової оптики

Основні моделі і закони геометричної оптики. Вчення про явища поширення, відбивання та заломлення світла (геометрична оптика) – феноменологічна, тобто описова наука. Геометрична оптика не вивчає природу явищ, а описує закони поширення світла, виходячи з узагальнених емпіричних даних. Витоки цього вчення належать глибокій давнині. Вважається, що закони прямолінійного поширення світла в однорідному прозорому середовищі та дзеркального відбиття сформулював ще Евклід. Французький математик та філософ Р. Декарт і голландський математик В. Снелль експериментально і теоретично вивчили закони поведінки світлових променів на межі поділу двох середовищ. У 1660 р. французький вчений П. Ферма сформулював принцип, з якого і випливали всі закони геометричної оптики.

У XVII ст. були винайдені такі оптичні прилади, як зорова труба, телескоп, мікроскоп. Процес їх створення супроводжувався досить інтенсивними дослідженнями основних законів поширення світла.

Для встановлення і перевірки законів геометричної оптики застосовують фізичні моделі – *світловий промінь, точкове джерело світла*.

Точковим називається таке джерело світлового випромінювання, розміри якого малі порівняно з відстанню до поверхні, до якої доходить випромінювання.

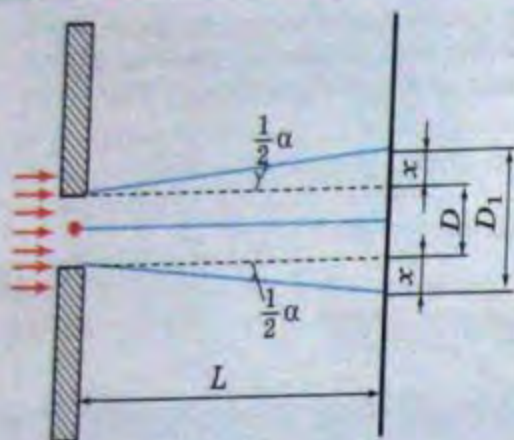
Під *світловим променем* розуміють лінію, вздовж якої поширюється світлова енергія.

Наближеною моделлю світлового променя є вузький світловий пучок з дуже малою розбіжністю і довжиною, яка значно більша за діаметр поперечного перерізу пучка. Виявляється, що світловий промінь є оборотним, тобто шлях, яким промінь поширюється від джерела до приймача, буде таким самим і в зворотному напрямку, коли джерело і приймач поміняти місцями. Ця властивість має назву *оборотності світлових променів*. На основі уявлень про світловий промінь сформульовані закони геометричної оптики.

Першим законом геометричної оптики є закон прямолінійного поширення світла: *світло в прозорому однорідному середовищі поширюється прямолінійно*.

Підтвердженням прямолінійного поширення світла в однорідному середовищі є утворення тіні (півтіні).

Зміна напрямку поширення світлового променя (заломлення) відбувається в разі проходження межі поділу двох середовищ з різними показниками



Мал. 234. Проходження світла крізь отвір

заломлення (наприклад, вода–повітря, повітря–скло тощо). У цьому випадку, як ви знаєте, спостерігається відбивання і заломлення світла, які описуються відповідними законами.

Частковим випадком заломлення є явище *рефракції* – явище викривлення світлового променя в результаті заломлення світла в оптично неоднорідному середовищі, коли його показник заломлення плавно змінюється. Рефракцією пояснюється виникнення міражів. Викривлення світлових променів у цьому випадку зумовлене зменшенням густини атмосфери з віддаленням від поверхні Землі.

Уявлення та закони геометричної оптики є правильними лише до тієї міри, до якої можна нехтувати явищами дифракції та інтерференції хвиль. Як відомо, у результаті дифракції світлова хвиля огинає краї перешкоди і прямолінійність світла порушується. Якщо світло проходить крізь отвір, то замість очікуваного за законами геометричної оптики пучка з різко окресленими твірними, дістанемо пучок, що розширюється, і в якого немає чіткої межі (мал. 234).

Кут розхилу конуса визначається із співвідношення $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\lambda}{D}$, де D –

діаметр отвору. Отже, за наявності отвору (наприклад діафрагми оптичного приладу) закон прямолінійного поширення світла порушується. У біль-

шості випадків розширення пучка $x = \frac{D_1 - D}{2}$ мале порівняно з діаметром

отвору і тоді дифракцією можна знехтувати.

За умови $D \leq \sqrt{L\lambda}$ хвиля довжиною λ , стикаючись з перешкодою (неоднорідністю) розміром D , що міститься на відстані L від джерела, згідно з принципом Гюйгенса – Френеля «ділиться» на декілька когерентних хвиль, які в результаті накладання (інтерференції) утворюють стійку в часі картину розподілу максимумів і мінімумів коливань.

Лише за умови $D \gg \sqrt{L\lambda}$ можливий перехід від хвильових уявлень до уявлень про світловий промінь.

Принцип Ферма. У геометричній оптиці *принцип Ферма* приймають за аксіому про найкоротшу оптичну довжину:



оптична довжина ходу променя, який проходить між двома точками, менша за оптичну довжину будь-якої іншої кривої, яку можна провести між цими точками.

Цей принцип можна перефразувати ще й таким чином:



Світло поширюється від однієї точки простору до іншої завжди по шляху, який вимагає мінімального часу.

З принципу Ферма випливає і закон прямолінійного поширення світла. Поміркуємо. Швидкість світла в однорідному середовищі в усіх точках од-

накова. Це означає, що найменший час для проходження світла з однієї точки середовища в іншу буде у випадку проходження найкоротшої відстані, тобто для прямолінійного поширення світла.

Закони відбиття та заломлення світла є також наслідками принципу Ферма. За його допомогою можна пояснити хід променів у будь-якій оптичній системі, що складається з лінз, призм, дзеркал.

Дайте відповіді на запитання

1. Чому геометричну оптику називають граничним випадком хвильової оптики? Що є граничною умовою?
2. У чому суть принципу Ферма?
3. Сформулюйте закон прямолінійного поширення світла.

§ 59. Відбивання світла. Дзеркала

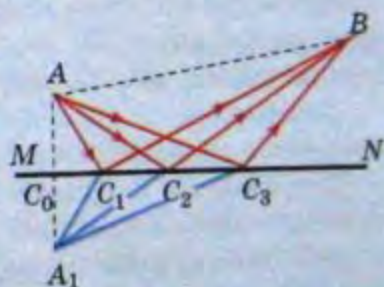
Закон відбивання світла. Закон відбивання справджується для хвиль будь-якої природи. Нагадаємо його:

Падаючий промінь, відбитий промінь та перпендикуляр до межі поділу середовищ, поставлений в точці падіння, лежать в одній площині; кут відбивання дорівнює куту падіння.

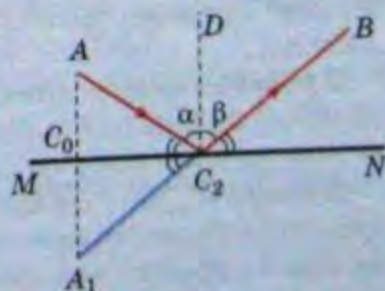
Доведемо правильність закону відбивання світла за допомогою принципу Ферма. Нехай MN – межа поділу двох середовищ (мал. 235). Промінь світла виходить з точки A й після відбивання від поверхні потрапляє в точку B . По якому шляху здійснюється цей перехід?

Намалюємо декілька можливих шляхів: AC_1B , AC_2B та AC_3B . Завдяки тому, що світло як до, так і після відбивання поширюється в однорідному середовищі, мінімальному часу відповідає шлях мінімальної довжини. Знайдемо його. Для цього побудуємо точку A_1 , симетричну точці A відносно поверхні MN . Зрозуміло, що з цього випливає таке: $A_1C_0 = AC_0$ та $AA_1 \perp MN$. З'єднавши точки C_1 , C_2 та C_3 з точкою A_1 , легко впевнитися у тому, що $AC_1 = A_1C_1$, $AC_2 = A_1C_2$ та $AC_3 = A_1C_3$. 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 за будь-яку ламану, що проходить через точки A_1 та B .

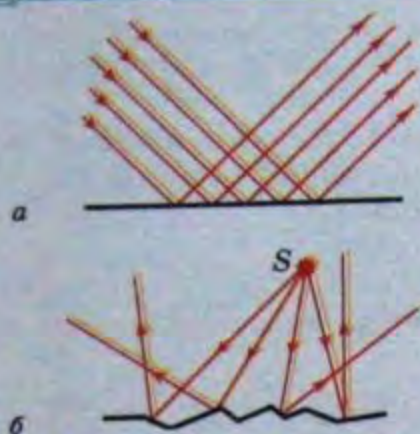
Тепер залишається показати, що під час відбиття променя від поверхні поділу двох середовищ в точці C_2 виконується закон відбиття, а саме, що кут відбиття β дорівнює куту падіння α (мал. 236). Оскільки трикутники AC_2C_0



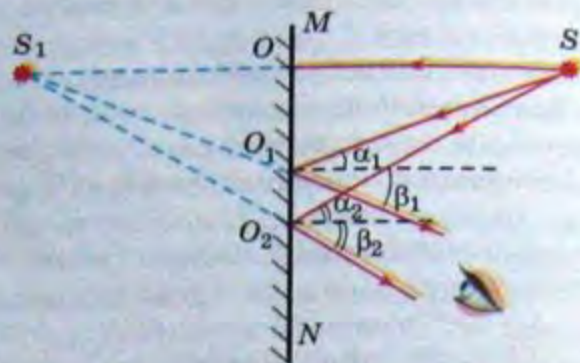
Мал. 235. До пояснення закону відбивання



Мал. 236. До виведення закону відбивання світла



Мал. 237. Дзеркальне (а) та дифузне (б) відбивання



Мал. 238. Утворення зображення в плоскому дзеркалі

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 й 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 випливає з принципу Ферма.

Дзеркальне та дифузне відбивання. Залежно від властивостей і якості поверхні відбивання розрізняють дзеркальне та розсіяне відбивання. Дзеркальною вважають поверхню, яка має нерівності, розміри яких менші за довжину 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. 237). Саме завдяки такому відбиванню світла ми бачимо предмети, які самі не випромінюють світло.

Одержання зображень за допомогою дзеркал. На практиці використовують в основному *плоскі та сферичні дзеркала*.

Зображення предмета в плоскому дзеркалі можна побудувати, скориставшись законами відбивання світла. Для цього з точки, зображення якої хочемо побудувати, проводимо довільні промені (на мал. 238 з точки S проведено три промені, хоча зрозуміло, що для побудови точки на площині достатньо перетину двох променів). Після цього за законом відбивання світла будуюмо промені, відбиті від поверхні дзеркала, та їх продовження. Саме перетин продовжень відбитих променів є зображенням точки у плоскому дзеркалі.

Одержане зображення є прямим, уявним (оскільки одержане в результаті перетину не самих променів, а їх продовжень), рівним за розмірами предмету та симетричним йому відносно площини дзеркала.

Нагадаємо, щоб визначити частину простору, з якої можна побачити зображення певної точки у плоскому дзеркалі, необхідно з'єднати зображення точки і крайні точки дзеркала.

Поряд з плоскими дзеркалами широкого застосування набули сферичні дзеркала. Дзеркала, поверхню яких утворює частина поверхні кулі, на-

зивають *сферичними*. Вони бувають увігнуті й опуклі.

На мал. 239 зображені 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*. Всі інші вісі, проведені через точку O називають *побічними*.

Якщо спрямувати промені паралельно головній оптичній осі увігнутого дзеркала (мал. 239, 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, $F = \frac{R}{2}$.

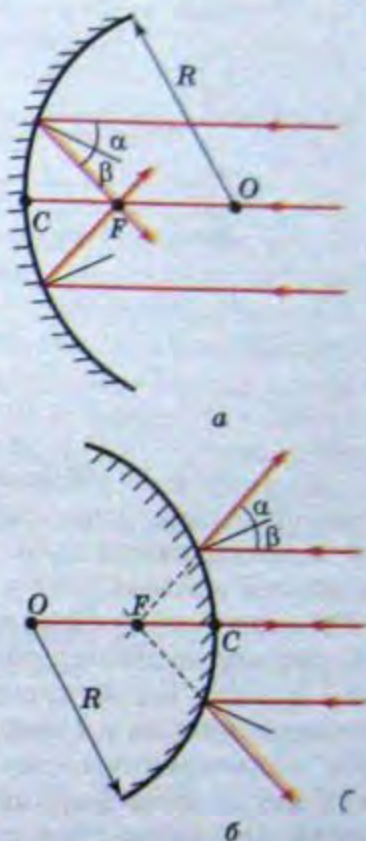
Якщо ж спрямувати світлові промені паралельно головній оптичній осі на опукле дзеркало, то відбиті промені будуть розходитися (див мал. 239, б). Їх продовження перетинатимуться в певній точці F , яка лежить за дзеркалом. Цю точку називають *головним фокусом опуклого дзеркала*. Оскільки в цій точці перетинаються не самі промені, а їх 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.

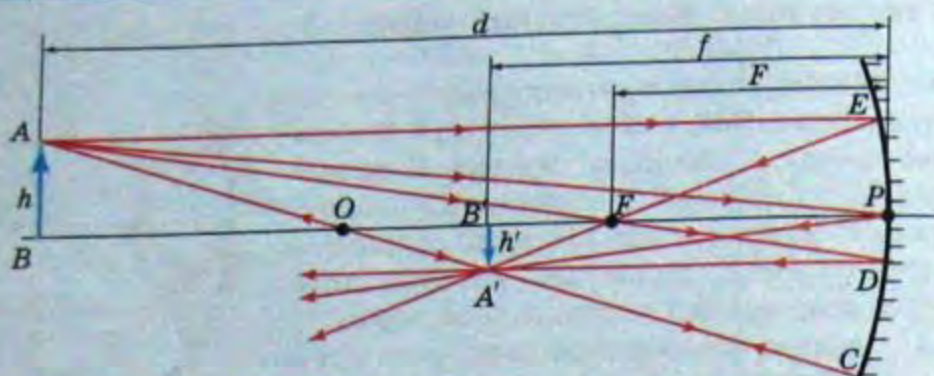
Площину, яка перпендикулярна до головної оптичної осі дзеркала і проходить через фокус, називають *фокальною площиною*. Зрозуміло, що для увігнутого дзеркала вона буде *дійсною*, для опуклого – *уявною*.

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), $[D] = 1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$.
Оптична сила увігнутого дзеркала є додатною, опуклого – від'ємною.



Мал. 239. Оптичні характеристики увігнутого (а) та опуклого (б) дзеркал



Мал. 240. Побудова зображення в сферичному дзеркалі

Для побудови зображення будь-якої точки предмета найзручніше використовувати такі промені (мал. 240):

- ♦ якщо падаючий промінь проходить через оптичний центр дзеркала, то відбитий промінь також проходить через оптичний центр (промені AOC і COA лежать на одній прямій);
- ♦ 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 мал. 241 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 та полюсом. Уявні зображення є завжди прямими (не перевернутими), а дійсні зображення, навпаки, завжди перевернуті по відношенню до предмета.

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 $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$.



Мал. 241. Побудова зображень у сферичних дзеркалах

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 та сферичних дзеркал вам добре відомі. Сферичні дзеркала використовують для виготовлення прожекторів, дзеркал огляду на транспорті, автомобільних фар, проекційних і кишенькових ліхтарів тощо. Якщо взяти увігнуте дзеркало порівняно великих розмірів, то в його фокусі можна одержати дуже високу температуру. Тут можна розмістити резервуар з водою для одержання гарячої води, скажімо, для побутових потреб, використовуючи енергію Сонця. В медицині ними користуються ЛОР-лікарі, стоматологи. Крім того, увігнуті дзеркала застосовуються в телескопах-рефлекторах, за допомогою яких спостерігають небесні тіла.



Дайте відповіді на запитання

1. Доведіть закон відбивання світла, виходячи з принципу Ферма.
2. Намалюйте сферичне увігнуте дзеркало і вкажіть його головну оптичну вісь, радіус і центр кривизни, головний фокус.
3. Де відносно увігнутого 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 ?
5. Якої мінімальної висоти дзеркало треба взяти людині зростом h , щоб вона могла побачити себе на повний зріст?

Приклади розв'язування задач

Задача. Опукле і увігнуте дзеркала мають однакові радіуси кривизни R . Відстань між їх 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

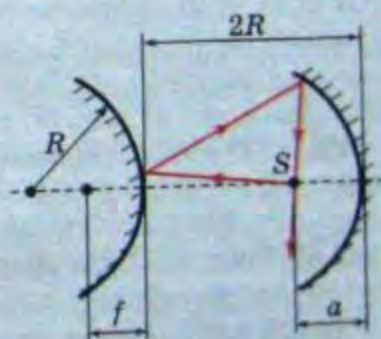
Нехай a - відстань від джерела до увігнутого дзеркала, f - відстань від зображення, утвореного опуклим дзеркалом, до цього дзеркала (мал. 242).

Запишемо формулу опуклого сферичного дзеркала $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{2}{R}$ або $\frac{1}{2R-a} - \frac{1}{f} = -\frac{2}{R}$. 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 у цю формулу вираз для f , після перетворень отримуємо $2a^2 - 6Ra + 3R^2 = 0$. Звідси, враховуючи, що $a < 2R$, отримуємо $a = 0,63R$.

Відповідь: $0,63R$.



Мал. 242

Вправа 28

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 стане 1,5 м? Визначити таким самим 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 попали на дно колодязя?
4. Плоске дзеркало утворює із столом двограний кут α . На столі на відстані l від ребра двогранного кута лежить монета. Визначити відстань d , на яку зміститься 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 вдвічі більшим 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 слід розташувати плоске дзеркало, щоб промені, відбиті дзеркалами, повернулись у точку S ?

§ 60. Заломлення світла

Закон заломлення світла. З принципу Ферма можна отримати і закон заломлення світлових променів (його ще називають законом Снеля).

Розглянемо випадок (мал. 243), коли першим середовищем є вакуум, в якому швидкість світла c , а другим – прозора речовина, швидкість світла в якій v ($v < c$).

Як і у випадку доведення закону відбивання, 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 точки зору мінімуму часу, буде деякий шлях ACB , за умови, що довжини пройдених шляхів у середовищах будуть пропорційними швидкостям руху світла у 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 $d-x$ (див. мал. 243). Тоді шлях AC у першому середовищі становить

$$\sqrt{y_1^2 + x^2}, \text{ відповідно час проходження цього шляху } t_1 = \frac{\sqrt{y_1^2 + x^2}}{c}.$$

Аналогічно у другому середовищі шлях CB світло проходить за час

$$t_2 = \frac{\sqrt{y_2^2 + (d-x)^2}}{v}. \text{ Загальний час}$$

$$t = t_1 + t_2 = \frac{\sqrt{y_1^2 + x^2}}{c} + \frac{\sqrt{y_2^2 + (d-x)^2}}{v}.$$

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 отрима-

ний 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

$$\frac{\sin \alpha}{c} = \frac{\sin \gamma}{v}, \text{ або } \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v} = n.$$

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 і в середовищі, яке з ним межує, тобто дорівнює абсолютному показнику заломлення цього середовища.

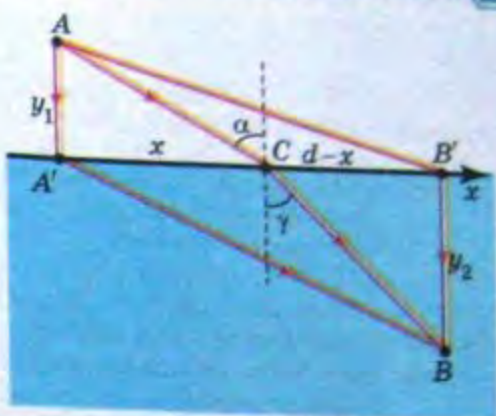
Згідно з принципом Ферма шлях, який вимагає мінімального часу, лежить у площині падіння. Отже, формулювання закону слід доповнювати твердженням.

Падаючий промінь, заломлений промінь та перпендикуляр до межі поділу середовища, опущений в точку падіння променя, лежать в одній площині.

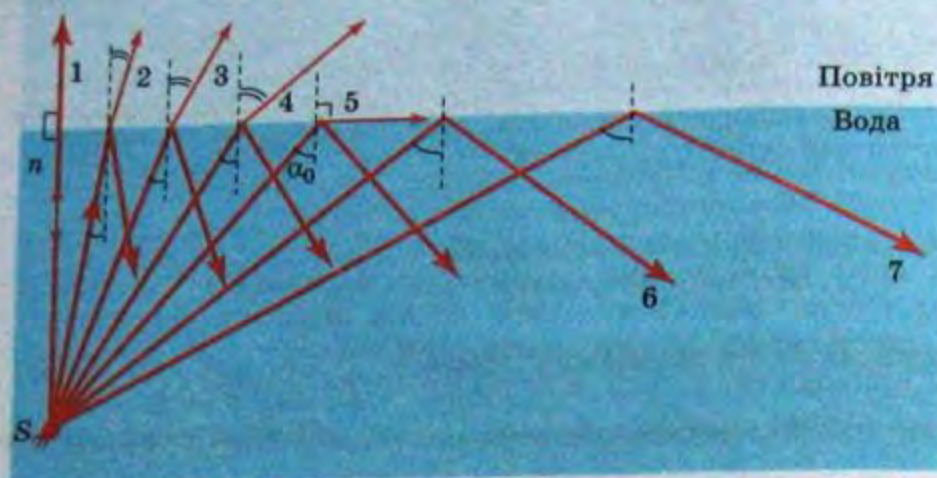
Повне відбивання. Закон заломлення світла дозволяє пояснити цікаве і практично важливе явище – *повне відбивання світла*.

Якщо промінь світла поширюється від точкового джерела з оптично більш густого в оптично менш густе середовище, то кут заломлення більший від кута падіння. Зі збільшенням кута падіння світлового променя, збільшується і кут заломлення, разом з тим, інтенсивність заломленого променя зменшується (мал. 244). 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 відбивання*.

Явище, в якому світло, поширюючись в більш густому середовищі, відбивається від межі поділу з менш густим середовищем не заломлюючись, називається **явищем повного відбивання**.



Мал. 243. Доведення закону заломлення за принципом Ферма



Мал. 244. Визначення умови повного відбивання

Кутом повного внутрішнього відбивання 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 $\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right)$.

Саме повне відбивання спричиняє яскравий блиск краплинок роси, осколків скла тощо. Це явище використовують, огранюючи та шліфуючи дорогоцінне каміння. Оброблюваному камінцю надають такої форми, щоб більшість падаючих на нього променів після заломлення відбивались від внутрішніх граней.

Волоконна оптика. Технічне використання явище повного відбивання знайшло у волоконній оптиці. Термін «волоконна оптика» з'явився у 50-х рр. XX ст. Основним елементом волоконної оптики є оптичне волокно (найчастіше тонка прозора скляна нитка) (мал. 245). Зазнаючи повного внутрішнього відбиття, світло поширюється всередині світловоду і здатне передавати оптичні сигнали без спотворення на великі відстані.

Явище повного відбивання використовується в біноклях, перископах, катафотах засобів дорожнього руху та ін.



Мал. 245. Оптичні волокна

Дайте відповіді на запитання

1. Як з принципу Ферма доводиться закон заломлення світла?
2. Поясніть суть явища повного внутрішнього відбивання світла. Що називають граничним кутом повного внутрішнього відбивання світла? Чому він дорівнює?
3. Яке практичне застосування повного внутрішнього відбивання світла? Що таке волоконна оптика?

Рекомендації до розв'язування задач

Серед задач геометричної оптики, в 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 же кутом, під яким вони на неї падають. При цьому пластинка зміщує промінь світла паралельно йому самому на відстань x (мал. 246).

Зміщення променя на виході з плоскопаралельної пластинки можна знайти з формули

$$x = d \frac{\sin(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma}$$

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. 247). Якщо матеріал призми оптично більш густий, ніж навколишнє середовище, промінь, заломлюючись, обидва рази відхиляється до основи призми AC . Кут φ між заломними гранями називається *заломним кутом призми*. Кут θ між продовженням променя, що падає на призм, і променя, що виходить з призми, називається *кутом відхилення променя від початкового напрямку*. Між цими кутами існує співвідношення

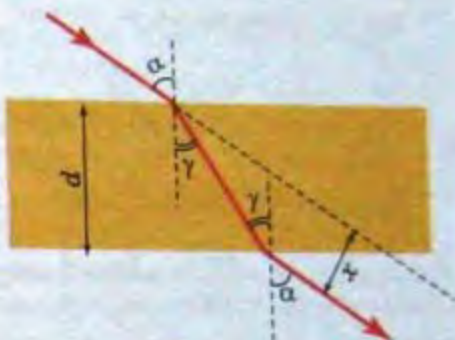
$$\varphi = \alpha_1 + \gamma_2 - \theta.$$

Якщо кут φ малий, то можна користуватись наближеною формулою

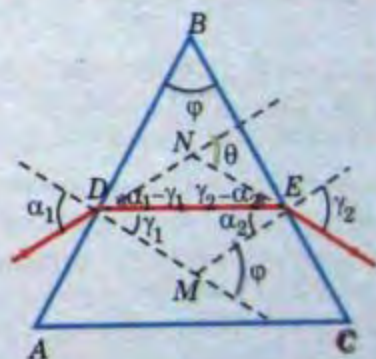
$$\theta = (n - 1)\varphi.$$

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 з призми, якщо показник заломлення матеріалу призми $n = 1,54$?



Мал. 246. Проходження світла крізь плоскопаралельну пластинку



Мал. 247. Заломлення світла у тригранній призмі

Отримати формулу для визначення кута зміщення променя для випадку, коли кут падіння на поверхню призми і заломний кут призми φ малі.

Дано:

$$\alpha_1 = 60^\circ$$

$$\varphi = 40^\circ$$

$$n = 1,54$$

$$\theta = ?$$

$$\theta = f(\varphi) = ?$$

Розв'язання

Скористаємось мал. 247

Із $\triangle DEM$: $\gamma_1 + \alpha_2 = \varphi$, звідки $\alpha_2 = \varphi - \gamma_1$.

Із $\triangle DEN$: $\theta = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\gamma_2 - \alpha_2) = \alpha_1 + \gamma_2 - \varphi$ 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 із призми $\frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} = \frac{1}{n}$. Звідки $\sin \gamma_2 = n \sin \alpha_2$ або

$$\sin(\varphi + \theta - \alpha_1) = n \sin(\varphi - \gamma_1).$$

Підставляючи числові значення, отримуємо $\sin(\theta - 20^\circ) = n \cdot \sin 5^\circ 48' = 1,54 \cdot \sin 5^\circ 48'$.

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 для малих α_1 і φ , запишемо

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{\alpha_1}{\gamma_1} = n \text{ і } \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} = \frac{\alpha_2}{\gamma_2} = \frac{1}{n}, \text{ тоді } \alpha_1 = n \gamma_1 \text{ і } \gamma_2 = n \alpha_2.$$

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: $28^\circ 54'$, $\theta = (n-1)\varphi$.

Задача 2. Промінь падає на плоско-паралельну скляну пластинку під кутом $\alpha = 30^\circ$ (мал. 248). Показник заломлення скла $n = 1,5$. Яка товщина 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

$$\angle BAD = \alpha, \angle CAD = \alpha - \gamma,$$

$$AC = \frac{CD}{\sin(\alpha - \gamma)}, AB = AC \cos \gamma.$$

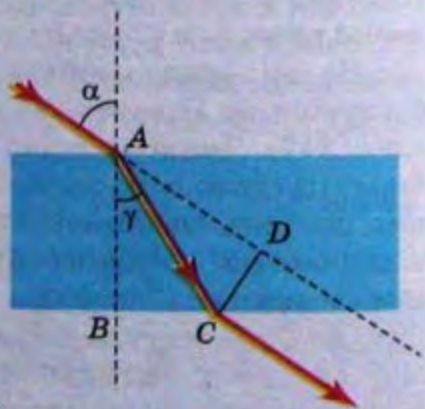
$$\text{Звідси } AB = \frac{CD \cos \gamma}{\sin(\alpha - \gamma)}.$$

Кут заломлення γ визначаємо із закону заломлення $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$. Звідси $\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n} = 0,333$, $\gamma \approx 19^\circ 30'$,

$$\alpha - \gamma = 10^\circ 30'.$$

Після підстановки даних отримаємо $AB = 0,2 \text{ м}$.

Відповідь: 0,2 м.

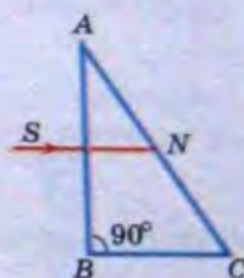


Мал. 248

Вправа 29

1. На нижню грань плоско-паралельної скляної пластинки нанесено риску. Спостерігач, що дивиться згори, бачить риску на відстані 4 см від верхньої грані пластинки. Яка товщина пластинки?

- Промінь падає під кутом 60° на скляну пластинку завтовшки 2 см з паралельними гранями. Визначити зміщення променя, який вийшов з пластини. Яким буде зміщення, якщо промінь під таким самим кутом падає на цю саму скляну пластинку, розташовану у воді?
- Маємо дві плоско-паралельні 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° . Визначити зміщення променя після виходу його із пластинок.
- Чи може промінь, пройшовши крізь пластинку з паралельними гранями, зміститися так, щоб відстань між ним та його початковим напрямком була більшою за товщину пластинки?
- Промінь SN падає на прямокутну скляну призму BAC (мал. 249) перпендикулярно до грані AB . Заломиться промінь на грані AC в точці N його падіння чи зазнає повного відбиття, якщо кут $A = 30^\circ$?
- При якому найменшому значенні заломного кута A скляної призми BAC (мал. 249) промінь SN зазнаватиме повного відбивання?
- Промінь падає під кутом 50° на пряму трикутну скляну призму із заломним кутом 60° . Визначити кут заломлення променя в точці виходу з призми.
- 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?
- Який заломний кут призми із скла з показником заломлення 1,56, якщо промінь падає перпендикулярно на одну її грань і виходить вздовж другої?
- Визначити кут відхилення променя скляною призмою, заломний кут якої 3° , якщо кут падіння променя на передню грань дорівнює нулю.
- Промінь світла виходить з призми під тим самим кутом, під яким входить у неї, причому відхиляється від початкового напрямку на кут 15° . Заломний кут призми 45° . Визначити показник заломлення матеріалу лінзи.
- Промінь світла входить у скляну призму під кутом $\alpha = \pi/6$ і виходить з неї в повітря під кутом $\pi/3$, причому, пройшовши крізь призму, відхиляється на кут $\pi/4$ від початкового напрямку. Визначити заломний кут призми.



Мал. 249

§ 61. Лінзи

Лінзи. У 7 класі ми вже ознайомились із лінзами та правилами побудови зображень, які отримують за їх допомогою. Пригадаємо основні поняття.



Лінзою називають прозоре тіло, обмежене з обох боків сферичними поверхнями (одна з поверхонь може бути плоскою).

Внаслідок кривизни поверхонь промені, які проходять крізь лінзу, два рази заломлюються (як і в призмі), змінюючи свій напрям поширення. Якщо товщина лінзи значно менша від радіуса її кривизни, то таку лінзу називають *тонкою*.



Мал. 250. Збиральна та розсіювальна лінзи

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*.

На мал. 250 зображено збиральну і розсіювальну лінзи та їх умовне позначення. (Зауважимо, що збиральна лінза є опуклою, а розсіювальна – вгнутою, лише коли показник заломлення речовини лінзи більший за показник заломлення оточуючого середовища.)

Лінза як оптична система має ряд характеристик: фокус, фокальну площину, головну оптичну вісь тощо. Зміст деяких термінів зрозумілий з мал. 251.

Центр лінзи називають *оптичним центром* (точка O на малюнку).

Головна оптична вісь – пряма, що проходить через центри сферичних поверхонь, які обмежують лінзу, і головні фокуси лінзи. Будь-яку іншу пряму, яка проходить через центр лінзи називають *побічною віссю*.

Головний фокус лінзи – точка F , в якій після заломлення в збиральній лінзі перетинаються промені, що падають на лінзу паралельно головній оптичній осі (у розсіювальній лінзі у цій точці збираються продовження заломлених променів, які падали на лінзу паралельно головній оптичній осі).

У збиральній лінзі фокус буде дійсним, а в розсіювальній – уявним.

Дві площини, які перпендикулярні до головної оптичної осі і проходять через її фокуси, називаються *фокальними площинами*. Точки перетину побічних осей з цими площинами називаються *побічними фокусами*. У побічному фокусі перетинаються промені (для розсіювальних лінз – їх продовження) після проходження лінзи, що падають на лінзу паралельно даній побічній осі.

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*



Мал. 251. Оптичні характеристики лінз

силою лінзи D , $D = \frac{1}{F}$.

У СІ оптичну силу лінзи вимірюють в діоптріях, $[D] = 1/\text{м} = 1 \text{ дптр}$.

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. 252).

Знак «+» використовується для опуклих поверхонь, знак «-» для вгнутих.

Побудова зображень, одержаних за допомогою лінз. Лінзи як оптичні прилади цінні тим, що за їх допомогою отримують зображення предметів, які можуть світитись самі чи світитись відбитим світлом.

Кожну точку зображення формує величезна кількість променів, що вийшли з відповідної точки предмета. Хід більшості з них побудувати важко, але в цьому і немає потреби. На практиці для побудови зображень, отриманих за допомогою лінз, використовують чотири так звані зручних промені, хід яких відомий без використання закону заломлення.

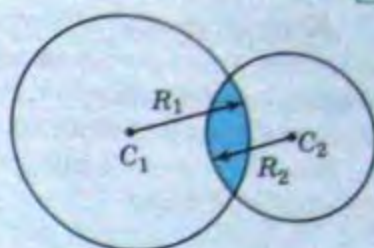
Хід зручних променів через лінзу такий (мал. 253):

- ◆ якщо падаючий промінь паралельний головній оптичній осі, заломлений пройде через фокус;
- ◆ якщо падаючий промінь пройшов через фокус, то заломлений піде паралельно головній оптичній осі;
- ◆ промінь, який пройшов через оптичний центр, не заломлюючись, іде прямо;
- ◆ якщо падаючий промінь паралельний побічній осі, то заломлений перетнеться з цією віссю в фокальній площині.

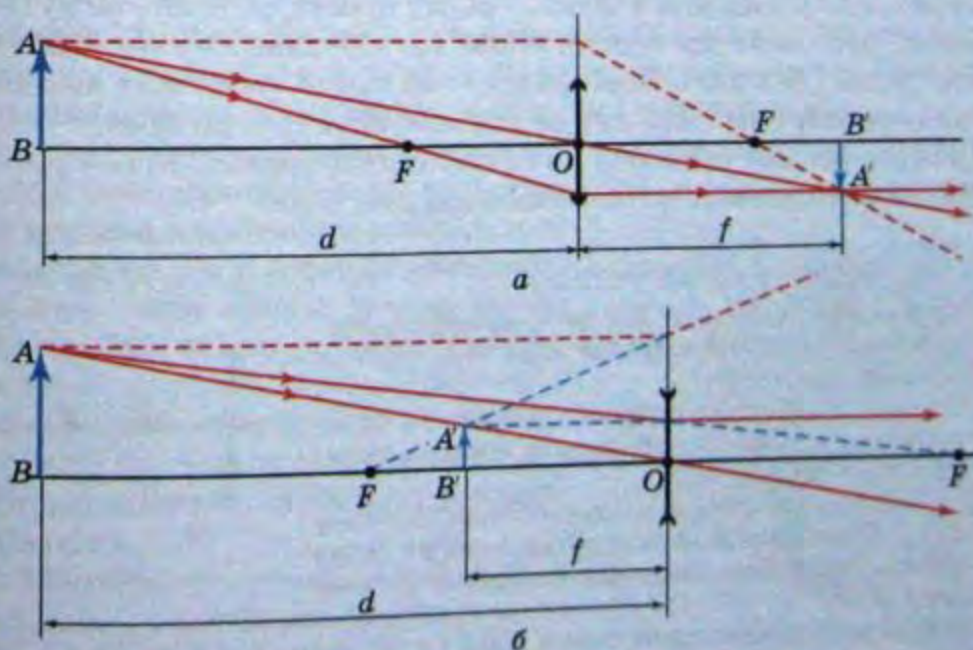
Зображення у лінзі може бути прямим чи перевернутим, збільшеним чи зменшеним, дійсним чи уявним.

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

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm D.$$



Мал. 252. Радіуси кривизни лінзи



Мал. 253. Побудова зображень у збиральній та розсіювальній лінзах

Користуючись формулою тонкої лінзи, слід враховувати 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. Співвідношення між предметом і його зображенням у збиральній лінзі наведено у таблиці.

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 і розміщене між переднім фокусом і лінзою, причому $f < d$.

Якщо оптична система складається із декількох лінз (їх оптичні сили D_1, D_2, \dots, D_n), розміщених близько одна до одної, то виконується така формула:

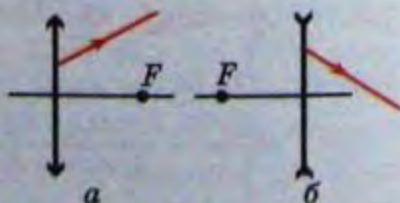
$$D_{\text{системи}} = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n.$$

Якщо ж лінзи розміщені в різних точках простору, то спочатку будують зображення, отримане від першої лінзи. Це зображення слугує предметом для другої лінзи і так далі. 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.

? Дайте відповіді на запитання

1. Що називають лінзою? Яку лінзу називають опуклою, а яку – ввігнутою? Які види лінз існують? Що таке тонка лінза?
2. Поясніть усі випадки побудови зображень, отриманих за допомогою збиральної лінзи; розсіювальної лінзи.
3. 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?
4. В яких умовах двоопукла скляна лінза з показником заломлення $n = 1,6$ стане розсіювальною?



Мал. 254

5. Симетричну лінзу розрізали точно навпіл по площині симетрії. Яку частину початкової оптичної сили матимуть дві утворені лінзи?
6. На мал. 254 зображено хід променя після виходу із збиральної (а) та розсіювальної (б) лінз. Знайдіть побудовою хід цих променів до лінзи.

§ 62. Оптичні прилади і системи

У 7 класі ми ознайомились з основними оптичними приладами, такими як мікроскоп, телескоп, труба Кеплера, фотоапарат, проекційний апарат тощо. Око людини теж можна віднести до оптичної системи. Коротко пригадаємо основні відомості про оптичні прилади та розкриємо нові поняття – аберації та роздільна здатність оптичних систем.

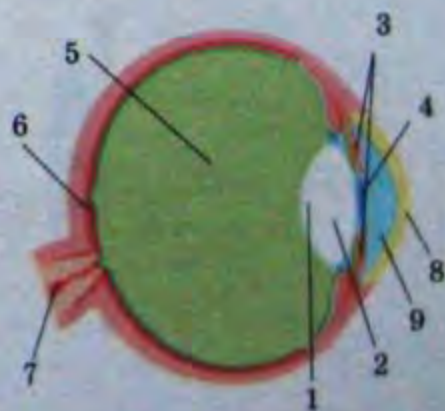
Око. Кут зору. Око (мал. 255) є оптичною системою, яка дає зображення на світлочутливій сітчастій оболонці очного яблука – сітківці. Оптичний центр ока 1 лежить поблизу задньої стінки кришталика 2. Перед кришталиком є так звана райдужна оболонка 3, яка посередині має отвір – зіницю 4. Зіниця може змінювати свій діаметр залежно від того, яка кількість світла потрапляє в око. Зі збільшенням інтенсивності світла зіниця звужується (приблизно до 2 мм у діаметрі), зі зменшенням інтенсивності освітлення до 0,01 лк – розширюється (≈ 8 мм). За кришталиком міститься очне яблуко, заповнене скловидним тілом 5. На дні очного яблука розташована сітківка 6, яка сприймає зображення. Через оболонку ока (в задній його частині) входить зоровий нерв 7, який розгалужується на множину нервових волокон, котрі закінчуються колбочками, що забезпечують кольоровий зір вдень, і палочками, що забезпечують чорно-білий зір вночі. Око як оптичний прилад складається з чотирьох лінз: *рогова оболонка 8* – основна за оптичною силою лінза; *опукло-вгнута рідка лінза (передня камера 9)* – розсіювальна лінза, основний компенсатор аберації в оптичній системі ока; *кришталик 2* – лінза, яка забезпечує акомодацию ока; *скловидне тіло 5*.

Акомодация ока – фокусування зображення різновіддалених предметів на сітківці ока. Відбувається за допомогою стискання чи розтягування кришталика очними м'язами (зміна фокусної відстані ока).

Відстань найкращого зору L_0 – це відстань від ока до предмета, який чітко видно при ненапруженому кришталику. Якщо у людини відстань найкращого зору менша за 25 см, то у неї короткозорість. Короткозорі люди погано бачать далекі предмети. Щоб виправити цей недолік, призначають окуляри з розсіювальними лінзами. Якщо ж у людини $L_0 > 25$ см, вона – далекозора і погано бачить близькі предмети. Їй допомагають окуляри із збиральними лінзами.

Кут зору φ – кут, утворений прямими, проведеними з оптичного центра ока до крайніх точок предмета.

Око здатне розрізнити дві точки в тому



Мал. 255. Будова ока

випадку, якщо їх зображення потрапляють на різні колбочки (палочки). Це відповідає мінімальному куту зору близько $1'$. Лінійні розміри h зображення на сітківці ока прямо пропорційні тангенсу кута зору, $h = atg\varphi$, де a – оптична база ока (відстань між зіницями очей).

Оптичні параметри людського зору. Для нормального здорового ока тривалість збереження оком зорового відчуття – $0,14$ с; діаметр очного яблука дорослої людини – $24 \div 25$ мм; поле зору нерухомого ока по горизонталі приблизно 160° , по вертикалі – 130° ; показник заломлення кришталика – $1,4$; оптична сила кришталика (у молодій людини) – $19 \div 33$ дптр; відстань між зіницями очей («база очей») у дорослої людини – $54 \div 72$ мм; оптична сила всього ока приблизно 60 дптр.

Оптичні прилади. Оптичні прилади призначені для отримання зображень (фотоапарат, проекційний апарат тощо) або для збільшення кута зору (лупа, мікроскоп, телескоп тощо).

Лупа – збиральна лінза з певною фокусною відстанню. Предмет, який розглядають у лупу, розміщують у фокальній площині лінзи або трохи ближче. Лупа створює уявне, пряме і збільшене зображення, розташоване перед лупою. Збільшення, яке дає лупа, визначається формулою

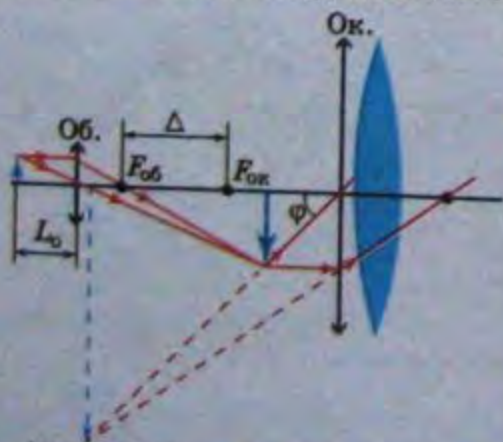
$$\Gamma = \frac{L_0}{F} = \frac{0,25}{F}, \text{ оскільки для людей з нормальним зором, відстань найкращого зору } L_0 = 0,25 \text{ м.}$$

Мікроскоп (оптичний) – прилад, призначений для дослідження дрібних об'єктів. Він складається з двох основних оптичних систем: об'єктива (Об.) і окуляра (Ок.). Об'єктив створює збільшене зображення, а окуляр збільшує кут зору на це зображення (діє як лупа) (мал. 256). Збільшення мікроскопа

$$\Gamma = \Gamma_{об} \Gamma_{ок} \text{ або } \Gamma = \frac{L_0 \Delta}{F_{об} F_{ок}}, \text{ де } \Delta - \text{відстань між фокусами об'єктива і окуляра,}$$

$F_{об}, F_{ок}$ – фокусні відстані об'єктива і окуляра відповідно.

Телескопи. Астрономічну трубу, призначену для спостереження за небесними об'єктами, називають *телескопом* (мал. 257). Перші астрономічні труби були збудовані в 1609 р. італійським вченим Г. Галілеєм і німецьким вченим Й. Кеплером. Астрономічну трубу, кут зору в якій збільшується завдяки застосуванню лінз, називають *рефрактором*; трубу, в якій той самий ефект досягається за допомогою сферичних дзеркал – *рефлектором*.



Мал. 256. Хід променів у мікроскопі



Мал. 257. Телескоп

Об'єктиви сучасних телескопів – рефракторів – мають діаметр, більший за метр, а їхня фокусна відстань становить приблизно 20 м.

Телескоп не тільки 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.

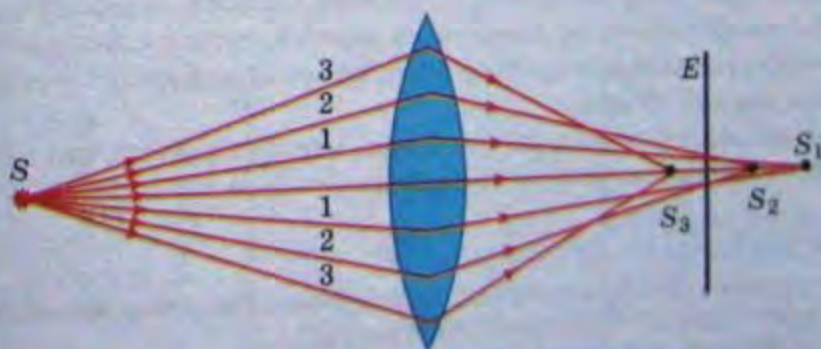
Аберації. Під час побудови зображень у тонкій лінзі (§ 61) ми, не акцентуючи на цьому увагу, користувались світловими променями, які йдуть вали залежністю показника заломлення матеріалу лінзи від довжини хвилі падаючого світла. У реальних оптичних приладах, наприклад фотоапарата, падає на лінзу, має бути досить широким, тобто використовуються промені, що утворюють великий кут з головною оптичною віссю. Це, в свою чергу, впливає на якість отриманого зображення. Уважне вивчення похибок оптичних систем дає змогу виявити шляхи їх усунення, і в сучасних оптичних приладах ці похибки настільки зменшено, що вони практично мало позначаються на якості зображення.

Похибки оптичних систем називаються *абераціями*.

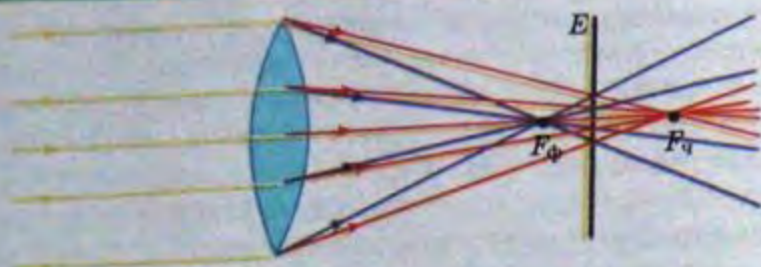
Сферична аберація зумовлена широким світловим пучком (мал. 258). Промені, більш віддалені від центра лінзи, сильніше заломлюються і перетинають головну оптичну вісь ближче від центра лінзи. У результаті цього замість точкового зображення на екрані буде розпливчата пляма.

Для кількісної характеристики сферичної аберації вводяться поняття поздовжньої аберації, що дорівнює лінійній відстані між точками перетину з головною оптичною віссю крайніх (промені 3 на мал. 258) і центральних (промені 1) променів пучка. Лінійна аберація залежить від матеріалу та кривизни поверхонь лінзи. Поздовжні аберації збиральної і розсіювальної лінз протилежні за знаком. Це дає можливість, комбінуючи такі лінзи, зменшувати сферичну аберацію. Сферичну аберацію також можна зменшити, якщо провести спеціальну обробку сферичної поверхні так, щоб на кожній частині поверхні лінзи заломлення було однаковим.

Для точок об'єкта, які не лежать на осі лінзи, виникають додаткові аберації: *кома* (форма зображення нагадує комету, а не круг) та *астигматизм* (зображення точки у вигляді двох відрізків прямої, взаємно перпендикулярних і розташованих у різних площинах). Вказані аберації характерні для монохроматичного світла.




Мал. 258. Утворення сферичної аберації



Мал. 259. Утворення хроматичної аберациї

У випадку немонохроматичного світла виникає ще й *хроматична аберация*. Хроматична аберация зумовлена тим, що показник заломлення речовини лінзи залежить від довжини світлової хвилі (дисперсія). Хроматична аберация приводить до того, що фокуси для різних кольорів виявляються зміщеними один відносно одного (мал. 259), в результаті чого зображення білої плями виходить кольоровим.

Хроматична аберация кількісно характеризується поздовжньою хроматичною аберацией аналогічно сферичній. Для зведення, по можливості, до мінімуму хроматичної аберации використовують комбінацію лінз, виготовлених із 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 веде до того, що зображення окремих точок спостережуваного предмета має вигляд дисків, оточених темними і світлими кільцями. Якщо розглядувальні точки предмета лежать близько одна від одної, то їх дифракційні зображення більше чи менше перекриваються.

Щоб кількісно охарактеризувати роздільну здатність об'єктива оптичного приладу, використовують *критерій Релея*, який 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.

Підвищити роздільну здатність оптичного мікроскопа можна, зменшивши довжину хвилі світла, за допомогою якого ведеться спостереження, наприклад, застосувавши ультрафіолетове випромінювання і фотографування спостережуваних об'єктів.

Крім звичайних оптичних мікроскопів, існують електронні мікроскопи, роздільна здатність яких набагато більша.



Дайте відповіді на запитання

1. Що називають кутом зору? роздільною здатністю оптичних приладів?
2. Що таке аберация? Які основні види аберации?
3. Яка з аберации лінзи може бути усунута склеюванням з іншою лінзою, а яка – в 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. Яка відстань від лінзи до предмета? Яким буде зображення?

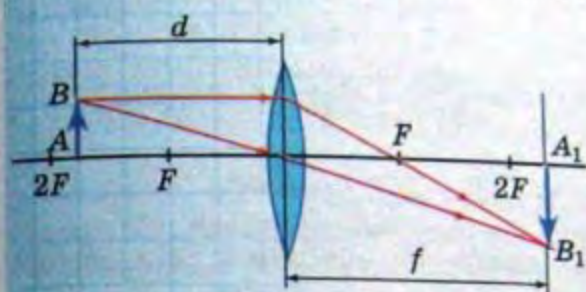
Дано:

$$F = 0,2 \text{ м}$$

$$h = 1 \text{ м}$$

$$f = 1 \text{ м}$$

$$d = ?$$



Мал. 260

одна від одної. Предмет розміщено на відстані $d_1 = 25$ см від першої лінзи. Визначити, де знаходиться зображення, утворене даною системою лінз, та збільшення системи.

Дано:

$$F_1 = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$F_2 = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$$

$$L = 35 \text{ см} = 0,35 \text{ м}$$

$$d_1 = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$$

$$f_2 = ? \quad \Gamma = ?$$

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.

Виконаємо креслення (мал. 260), використовуючи для побудови точки A два будь-які зручні промені.

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.

Задача 2. Оптична система складається із 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

Розв'язання

Із формули тонкої лінзи $f_1 = \frac{F_1 d_1}{d_1 - F_1}$, $f_1 = 0,166$ м.

Побудуємо хід променів через систему лінз (мал. 261).

Збільшення, яке дає перша лінза $\Gamma_1 = \frac{f_1}{d_1}$; $\Gamma_1 = 0,664$.

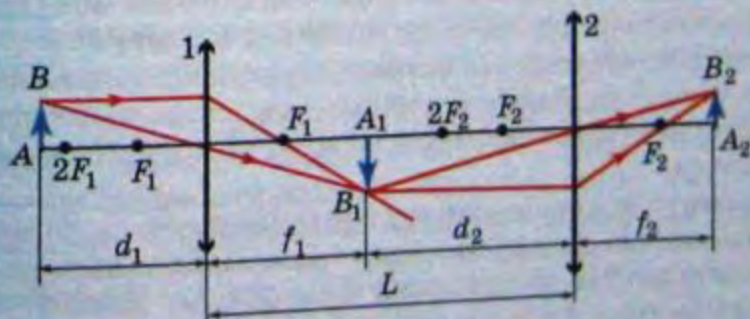
З малюнка видно, що $d_2 = L - f_1$, $d_2 = 0,184$ м.

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 $\Gamma = \Gamma_1 \Gamma_2$, $\Gamma = 0,25$.

Відповідь: 0,0688 м; 0,25.



Мал. 261

Задача 3. Граничний кут зору людського ока приблизно дорівнює $1'$. Якою повинна бути відстань між точками, що лежать на відстані найкращого зору (25 см), щоб людина могла бачити їх роздільно?

Дано:

$$d = 0,25 \text{ м}$$

$$l = ?$$

Розв'язання

Зважаючи на мізерність кута зору, відстань між точками

$$l = 25 \text{ см} \cdot \operatorname{tg} \alpha \approx 25 \text{ см} \cdot \alpha,$$

де α – кут, виражений в 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 30

- Визначити 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 і екраном переміщують лінзу. З одної 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 від розмірів другого?
- Екран міститься на відстані l від свічки. Ставлячи між свічкою та екраном збиральну лінзу, можна дістати різке зображення свічки на екрані для двох положень лінзи, віддалених одне від одного на відстань a . Довести, що в даному випадку головну фокусну відстань лінзи можна обчислити за формулою $F = \frac{l^2 - a^2}{4l}$.
- 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 знаходиться друга лінза такої самої оптичної сили. Оптичні осі обох лінз збігаються. Де буде зображення світної точки?
- 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?
- Об'єкт складається з трьох контактуючих тонких лінз: перша двоопукла з фокусною відстанню 12,5 см, друга двоввігнута з фокусною відстанню –10 см, і третя двоопукла з фокусною відстанню 5 см. Визначити фокусну відстань об'єктива.
- 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? Вважати, що граничний кут зору $2'$.
- Мікроскоп складається з об'єктива і окуляра, відстань між головними фокусами яких 18 см. Визначити збільшення, що дає мікроскоп, якщо фокусні відстані об'єктива і окуляра відповідно 2 і 40 мм. Побудувати зображення предмета.
- Побудувати графік залежності відстані f (від зображення до лінзи) від відстані d (від предмета до лінзи). Розглянути також випадок, коли предмет уявний.
- Обчислити лінійне збільшення k через фокусну відстань F і відстань від предмета до лінзи d для випадків: а) $d > F$; б) $d < F$. Побудувати графік залежності k від d .



§ 63. Елементи фотометрії

Фотометричні величини. *Фотометрія* – розділ оптики, в якому розглядається вимірювання енергії, що переноситься електромагнітними світловими хвилями.

Розрізняють енергетичні величини, що характеризують будь-яке випромінювання та фотометричні величини, які враховують зорові відчуття людинкових приймачів, чутливість яких до світла близька до чутливості ока.

У таблиці зіставлено енергетичні величини та відповідні фотометричні величини.

Енергетична величина	Одиниця величини	Фотометрична величина	Позначення	Одиниця величини
Енергія випромінювання	Дж	Світлова енергія	W	лм·с (люмен на секунду)
Потік випромінювання (потужність випромінювання)	Вт	Світловий потік	Φ	лм (люмен)
Поверхнева густина потоку випромінювання	Дж/м ²	Освітленість	E	лк (люкс)
Сила випромінювання	Вт/ср	Сила світла	I	кд (кандела)
Енергетична яскравість	Вт/(ср·м ²)	Яскравість	L	кд/м ²

Світловий потік. Сила світла. Електромагнітне випромінювання оптичного діапазону створює у людини зорове відчуття, причому кожній довжині хвилі в цьому діапазоні відповідає певне кольорове відчуття.

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 в одиницю часу, $\Phi = \frac{W}{t}$.

Одиниця світлового потоку – люмен, $[\Phi] = 1 \text{ лм}$.

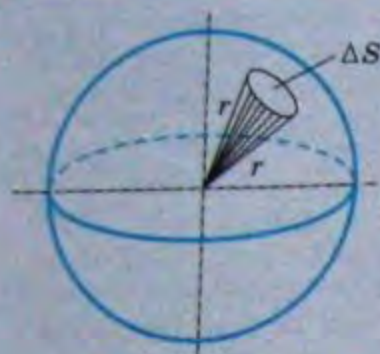
Якщо розміри джерела світла настільки малі, що його форму не можна розрізнити з відстані, на якій досліджується випромінюваний ним світловий потік, і цей потік розподілений рівномірно в усіх напрямках, то таке джерело світла називають *точковим*. Характерним для точкового джерела світла є те, що випромінювані ним світлові хвилі сферичні.

Основною характеристикою джерела світла є *сила світла*.



Сила світла I – світлова фотометрична величина, що характеризує просторовий розподіл потужності випромінювання у 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 у СІ є кандела, $[I] = 1 \text{ кд}$.



Мал. 262. Тілесний кут

Тілесний кут – частина простору, яка обмежена конічною поверхнею і вирізує на поверхні сфери радіусом r сегмент площею ΔS (мал. 262). Тілесний кут вимірюється відношенням площі ΔS до квадрата радіуса r сфери, $\Delta\omega = \frac{\Delta S}{r^2}$.

Одиниця тілесного кута – стерadian, $[\Delta\omega] = 1$ ср. Тілесний кут 1ср – це тілесний кут з вершиною в центрі сфери радіусом r , який вирізає на поверхні сфери сегмент, площа якого дорівнює площі квадрата зі стороною r .

В разі рівномірного випромінювання світла в усі боки повний світловий потік точкового джерела світла дорівнює $\Phi = 4\pi I$. З 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 можливість перерозподілити світловий потік у тілесному куті й 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 за рахунок значного її зменшення у всіх 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 ($\lambda = 610$ нм) потужністю 1 Вт створює зорове відчуття такої самої інтенсивності, як потік зелених променів потужністю 0,5 Вт.

Встановити 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.

Освітленість. Закони освітленості. У темноті ми не бачимо оточуючих нас тіл. За наявності джерела світла світловий потік, який поширюється від нього, падає на тіла, відбивається і, потрапляючи в око людини, дає змогу їх бачити. Чим більший світловий потік упаде на тіло, тим більшим буде і відбитий потік, тому людина чіткіше зможе бачити це тіло.

Освітленість E – фотометрична величина, яка характеризує різну видимість окремих тіл. Вона визначається відношенням світлового потоку $\Delta\Phi$, який падає на малу ділянку поверхні, до площі ΔS цієї поверхні, $E = \frac{\Delta\Phi \cos \alpha}{\Delta S}$,

де α – кут між нормаллю до поверхні і напрямком поширення світлового променя.

Одиниця освітленості – люкс, $[E] = 1 \text{ лк}$.

Якщо освітленість різних ділянок поверхні не однакова, треба взяти таку малу площу ΔS , щоб розподіл потоку $\Delta \Phi$ у її межах можна було вважати рівномірним. Для 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.

Закони освітленості

1. З віддаленням джерела освітленість зменшується обернено пропорційно квадрату відстані.

2. Освітленість, яку створюють кілька джерел світла в деякій точці поверхні, дорівнює сумі освітленостей, створюваних кожним джерелом окремо.

Для кожного приміщення (простору) існують вироблені практикою норми необхідної освітленості залежно від його призначення. Наприклад, для читання потрібна освітленість 50 лк. Для порівняння: Сонце в середині дня (на середніх широтах) створює освітленість порядку 10^5 лк, повний Місяць (в 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.

Яскравість. Читаючи книжку, ми чітко бачимо букви на білому фоні аркуша, хоч 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, який відбиває світло можна вважати вторинним джерелом світла), які ми розглядаємо в певному напрямі, можуть значно відрізнятися 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 і напрямком поширення світлової хвилі.

Одиниця яскравості – кандела на квадратний метр, $[L] = 1 \text{ кд/м}^2$.

Яскравість пов'язана з іншими фотометричними величинами: силою

світла I , $L = \frac{I}{\Delta S \cos \varphi}$, та освітленістю E , $L = \frac{E}{\Delta \omega \cos \varphi}$.

Наведемо для прикладу яскравість деяких джерел світла в кд/см^2 : нічне небо – 10^{-7} кд/см^2 , Місяць – до 1 кд/см^2 , Сонце поблизу горизонту – 600 кд/см^2 , Сонце опівдні – до $150\,000 \text{ кд/см}^2$, полум'я свічки – до 1 кд/см^2 .

? Дайте відповіді на запитання

1. Назвіть основні фотометричні величини та їх одиниці.
2. Накресліть графік залежності освітленості поверхні книжки від кута між напрямком на джерело світла і нормаллю до сторінки.
3. На яку висоту треба підняти над центром круглого стола радіусом R точкове джерело, сила світла якого I , щоб освітленість краю поверхні стола була найбільшою з можливих?

Приклади розв'язування задач

Задача. На висоті 3 м від землі висить лампа, сила світла якої 250 кд, а на висоті 4 м висить лампа з силою світла 150 кд. Відстань між лампами 2,5 м (мал. 263). У скільки разів освітленість під першою лампою більша, ніж під другою.

Дано:

$$I_1 = 250 \text{ кд}$$

$$I_2 = 150 \text{ кд}$$

$$h_1 = 3 \text{ м}$$

$$h_2 = 4 \text{ м}$$

$$l = 2,5 \text{ м}$$

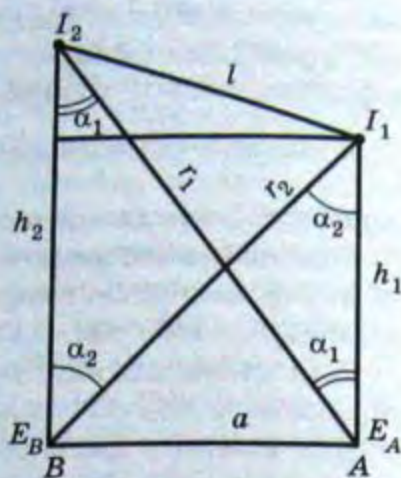
$$\frac{E_A}{E_B} = ?$$

Розв'язання

Освітленість під кожною лампою дорівнює сумі освітленостей, яку створюють обидві лампи. Отже, на основі законів освітленості маємо (див. мал. 263):

$$E_A = \frac{I_1}{h_1^2} + \frac{I_2}{r_1^2} \cos \alpha_1 = \frac{I_1}{h_1^2} + \frac{I_2 h_2}{r_1^3};$$

$$E_B = \frac{I_2}{h_2^2} + \frac{I_1}{r_2^2} \cos \alpha_2 = \frac{I_2}{h_2^2} + \frac{I_1 h_1}{r_2^3}.$$



Мал. 263

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

$$r_1 = \sqrt{h_2^2 + l^2 - (h_2 - h_1)^2}; \quad r_1 = \sqrt{16 \text{ м}^2 + 6,25 \text{ м}^2 - 1 \text{ м}^2} = \sqrt{21,25 \text{ м}^2} = 4,6 \text{ м},$$

$$r_2 = \sqrt{h_1^2 + l^2 - (h_2 - h_1)^2}; \quad r_2 = \sqrt{9 \text{ м}^2 + 6,25 \text{ м}^2 - 1 \text{ м}^2} = \sqrt{14,25 \text{ м}^2} = 3,8 \text{ м}.$$

Визначимо E_A і E_B :

$$E_A = \frac{250 \text{ кд}}{9 \text{ м}^2} + \frac{150 \text{ кд} \cdot 4 \text{ м}}{(4,6)^3 \text{ м}^3} = 27,8 \text{ лк} + 6,2 \text{ лк} = 34 \text{ лк},$$

$$E_B = \frac{150 \text{ кд}}{16 \text{ м}^2} + \frac{250 \text{ кд} \cdot 3 \text{ м}}{(3,8)^3 \text{ м}^3} = 9,4 \text{ лк} + 13,7 \text{ лк} = 23 \text{ лк}.$$

Визначимо відношення освітленостей

$$\frac{E_A}{E_B} = \frac{34 \text{ лк}}{23 \text{ лк}} \approx 1,48.$$

Відповідь: 1,48

Вправа 31

- 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?
- Визначити освітленість поверхні Землі, що створюється перпендикулярними сонячними променями. Яскравість Сонця $1,2 \cdot 10^9$ кд/м², відстань від Землі до Сонця $1,5 \cdot 10^8$ км, радіус Сонця $7 \cdot 10^5$ 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 зменшилася удвічі порівняно з освітленістю площини під час перпендикулярного падіння променів?

5. Ліхтар для освітлення вулиці, сила світла якого 500 кд, висить на стовпі на висоті 3 м від поверхні землі. Визначити освітленість поверхні землі на відстані 4 м від основи стовпа.
6. Визначити 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. Визначити повний світловий потік, який випромінює це джерело.
7. Який світловий потік попадає на поверхню стола, якщо її середня освітленість дорівнює 9500 лк, а площа $1,6 \text{ м}^2$?
8. 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?
9. 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 боків? Сила світла ламп дорівнює 100 і 50 кд.
10. Лампа, сила світла якої 400 кд, знаходиться на відстані 1 м від екрана. На якій відстані потрібно поставити позаду лампи плоске дзеркало, паралельне екрану, щоб освітленість в центрі екрана збільшилась на 100 лк?

Найголовніше в розділі «Хвильова та геометрична оптика»

Фізична (або хвильова) оптика – розділ оптики, який вивчає властивості світла і його взаємодію з речовиною, виходячи з уявлень про хвильову природу світла.

Видиме (біле) світло – це електромагнітні хвилі довжиною від $4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ (фіолетове) до $7,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ (червоне). Світло однієї певної частоти (довжини хвилі) називається *монохроматичним*.

Світло має *корпускулярно-хвильову природу*.

Інтерференція світла – явище накладання (додавання) когерентних світлових хвиль, внаслідок якого відбувається просторовий перерозподіл їхньої енергії. *Когерентні хвилі* – хвилі однакової частоти (монохроматичні хвилі), які мають сталу в часі різницю фаз. До винайдення лазерів, щоб отримати когерентні хвилі, один світловий пучок (що вийшов з одного джерела) ділили на частини, які змушували йти до точки накладання різними шляхами, здобуваючи певну різницю ходу (зсув по фазі).

Щоб отримати *максимум інтерференційної картини* (підсилення) необхідно, щоб оптична різниця ходу d дорівнювала нулю або парному числу півхвиль, $\Delta d = d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2}$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Мінімум інтерференційної картини (послаблення) спостерігається в точках, для яких оптична різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль, $\Delta d = d_2 - d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Дифракція – явище відхилення променів від прямолінійного поширення в середовищі з неоднорідностями і перешкодами, сумірними з відповідною довжиною хвилі.

Принцип Гюйгенса-Френеля (доповнений О.Ж. Френелем принцип Гюйгенса): у будь-якій точці поза фронтом хвилі первинну світлову хвилю, що

випромінюється точковим джерелом, можна розглядати як результат інтерференції когерентних вторинних хвиль, що випромінюються хвильовою поверхнею.

Дисперсія світла – залежність показника заломлення світла в речовині від частоти або довжини хвилі світла. У вакуумі дисперсія світла не спостерігається. Червоний колір у речовині поширюється з найбільшою швидкістю, тому заломлюється менше, а промінь фіолетового кольору поширюється з найменшою швидкістю і заломлюється найбільше.

Поляризація світла – стан світлової хвилі, в якому переважають певні напрямки коливань електричного вектора \vec{E} . **Закон Брюстера** – умова повної поляризації відбитого променя світла, $\text{tg} \alpha_B = n$, де α_B – кут падіння світлового променя, за якого настає повна поляризація відбитого променя.

Голографія – метод одержання просторових зображень предметів. На відміну від звичайної фотографії, яка несе інформацію лише про амплітуду світлової хвилі, голографія реєструє повну інформацію про різні параметри світлової хвилі – амплітуду, частоту, фазу коливань. Ґрунтується на явищі інтерференції світла.

У геометричній оптиці принцип Ферма приймається за аксіому про найкоротшу оптичну довжину: *відстань між двома точками світло проходить тим шляхом, на який необхідно витратити мінімальний час*. З цього принципу виводяться основні закони геометричної оптики.

Закон прямолінійного поширення світла: в оптично однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно.

Закон відбивання: падаючий промінь, відбитий промінь і перпендикуляр до межі поділу двох середовищ, поставлений у точці падіння променя, лежать в одній площині. Кут відбивання β дорівнює куту падіння α .

Закон заломлення: падаючий промінь, заломлений промінь і перпендикуляр до межі поділу двох середовищ, поставлений у точці падіння променя, лежать в одній площині. Відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення γ світла є величина стала, 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 по-

казники заломлення першого і другого середовищ, n_{21} – відносний показник заломлення.

Мінімальний кут падіння, за якого відбувається повне відбивання світла, називається *граничним кутом повного відбивання* $\alpha_{\text{гр}}$.

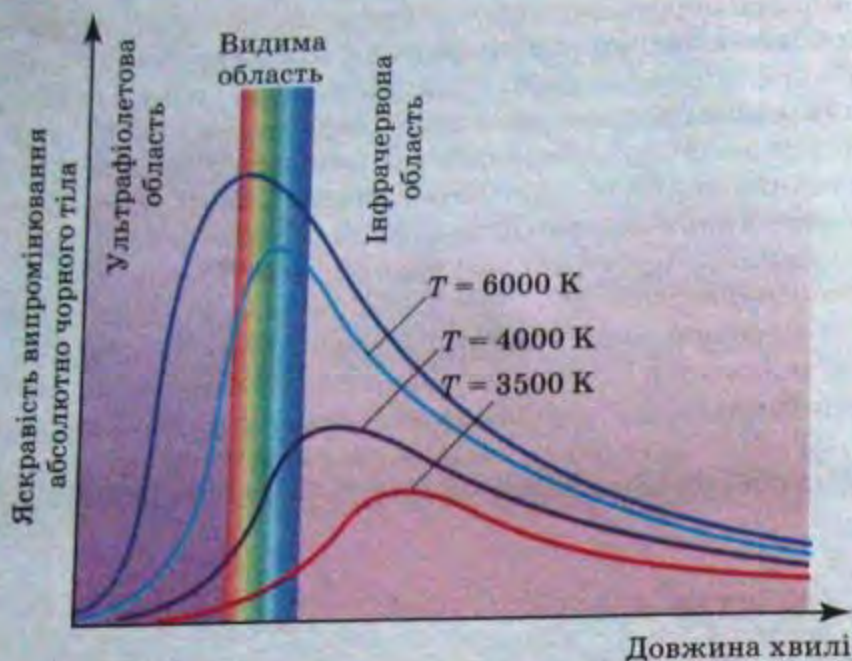
Формула тонкої лінзи $\pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}$, де d – відстань від предмета до лінзи,

f – відстань від лінзи до зображення. Для збиральної лінзи перед $1/F$ ставиться знак «плюс», для розсіювальної – знак «мінус». Величина $1/f$ – додатна, якщо зображення дійсне, і від'ємна, якщо зображення уявне.

Оптичні прилади використовують для отримання зображення (фотоапарат, проекційний апарат тощо) та збільшення кута зору (лупа, мікроскоп, телескоп тощо).

Фотометрія – розділ оптики, в якому розглядається вимірювання енергії, що переноситься електромагнітними світловими хвилями.

Розрізняють енергетичні величини, що характеризують будь-яке випромінювання, та фотометричні величини, які враховують зорові відчуття людини.



Мал. 264. Розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла

випромінювання одиниці поверхні світлого тіла в одиничному інтервалі довжин хвиль. Різні криві відповідають різним температурам абсолютно чорного тіла. Площа під кривою визначає загальну енергетичну світність абсолютно чорного тіла при відповідній температурі. Чим вища температура тіла – тим більшою є його енергетична світність.

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 все 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. В різних наближеннях вдавалося непогано описати лише край реальної кривої – в деякому околі нуля та для $\lambda \rightarrow \infty$.

Гіпотеза М. Планка. Вихід з критичного стану був запропонований у 1900 р. німецьким фізиком М. Планком. На відміну від зрозумілого уявлення про те, що поглинання і випромінювання світлових хвиль відбувається неперервно, М. 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 *сталой Планка*.

Виходячи з цієї ідеї, 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 використовується 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.

¹ Від латинського слова quantum – порція.

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 дозволяв отримати правильний результат при поясненні теплового випромінювання, настільки неймовірно було уявити неперервний хвильовий процес дискретним, адже за класичними уявленнями неперервність принципово відрізняє хвилю від частинки.

Ідея квантування – одна з найважливіших ідей у науці ХХ ст. На її основі виникла й розвивається *квантова механіка*, яка дає можливість вивчати особливості мікросвіту – світу атомів, елементарних частинок та їх взаємодій. Як ми дізнаємось з подальшого, багато характеристик елементарних частинок квантуються, тобто можуть набувати лише певного ряду дискретних значень. Так, квантуються енергія атома, момент імпульсу електрона під час руху по орбіті атома та ін.



Дайте відповіді на запитання

1. У чому полягає суть гіпотези М. Планка?
2. Чому довелося звернутися до уявлення про дискретність світлового потоку?
3. Чому дорівнює стала Планка? Покажіть, що стала Планка вимірюється у тих же одиницях, що і момент імпульсу.

§ 65. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла

Принцип доповнюваності. Першим зрозумів важливість ідеї квантування А. Ейнштейн, який у 1905 р. з квантових позицій пояснив фотоелектричний ефект, за що йому було присуджено Нобелівську премію.

Фотоелектричний ефект, ефект Комптона та інші експерименти (про які детально мова йтиме у наступних параграфах) міцно утвердили квантову (корпускулярну) теорію світла. Проте класичні досліди Юнга та інших дослідників із вивчення явищ інтерференції, дифракції доводять хвильову природу світла. Постає дилема: одні експерименти доводять, що світло поводить себе як хвиля, а інші – як потік частинок. Яку із теорій світла – хвильову чи корпускулярну – вважати визначальною? Для виходу із цієї ситуації датський фізик Нільс Бор (1885–1962) запропонував *принцип доповнюваності*, згідно з яким для пояснення природи світла слід використовувати і корпускулярні, і хвильові властивості світла – як дві складові його природи, що доповнюють одна одну. Хвильові і квантові властивості світла не можна протиставляти. Властивості неперервності, характерні для електромагнітного поля світлової хвилі, не виключають властивостей дискретності, характерних для квантів світла – фотонів.



Квант світла – мінімальна порція світлової енергії, локалізована у частинці, яку називають **фотон**ом.

Дане поняття ввів А. Ейнштейн, пояснюючи закони фотоелектричного ефекту, механізм люмінесценції.

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 виявляють себе однаковою мірою.

Хвильові властивості світла проявляються 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 проявляються хвильові властивості (наприклад, для радіовипромінювання), а на великих частотах – квантові (наприклад, рентгенівське випромінювання).

Властивості фотона. У сучасній фізиці фотон розглядають як одну з елементарних частинок, проте на відміну від частинок речовини він має специфічні властивості.

Оскільки фотони рухаються зі швидкістю світла c , і згідно з основними положеннями спеціальної теорії відносності в усіх інерціальних системах відліку швидкість світла є сталою, то не існує таких систем відліку, відносно яких фотони можуть перебувати у стані спокою. Іншими словами, фотон існує тільки в русі. Зупинити чи загальмувати фотон неможливо, він або рухається зі швидкістю світла, або не існує. На відміну від частинок речовини (електронів, атомів) фотони можуть порівняно легко випромінюватись або поглинатись.

Враховуючи те, що фотон – це квант світла, його енергія визначається за формулою $E = h\nu$. Повну енергію фотона можна визначити і за законом взаємозв'язку маси-енергії $E = mc^2$. Прирівнюючи ці формули, можна визначити масу фотона $m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$.

Підставляючи у формулу $E = h\nu$ значення граничних частот діапазону видимого світла, можна обчислити діапазон енергій фотонів: від 2 еВ (червоний колір) до 3 еВ (фіолетовий колір). Цієї енергії фотонів буває достатньо для того, щоб збудити електрони всередині атомів речовини або навіть вирвати їх за межі атома (явище виривання електронів з поверхні металу носить назву фотоефекту).

Співвідношення між енергією фотона та довжиною хвилі можна записати у такому вигляді:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{ch}{E}.$$

Враховуючи, що

$$ch = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 1,99 \cdot 10^{-25} \text{ Дж} \cdot \text{м}; 1 \text{ Дж} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ еВ};$$

$$1 \text{ м} = 10^{10} \text{ \AA} \quad (\text{\AA} \text{ читається ангстрем}), E = h\nu, \text{ отримуємо } \lambda E = 12397 \text{ еВ} \cdot \text{\AA}.$$

За енергією одного фотона можна визначити число фотонів у пучку, якщо відомий його повний потік енергії. Наприклад, для світла довжиною хвилі $\lambda = 500 \text{ нм}$ межа зорового відчуття дорівнює $W = 2,1 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Розрахуємо кількість фотонів, які сприймає око на межі зорового відчуття.

Для цього визначимо енергію одного фотона $E = h \frac{c}{\lambda}$.

$$E = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{500 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 3,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Тоді кількість фотонів дорівнює $n = \frac{W}{E}$; $n = \frac{2,1 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})}{3,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/фотон}} = 53 \cdot 10^4 \text{ фотон}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Фотон масою m , рухаючись зі швидкістю c , має імпульс $p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

Імпульс фотона було виявлено експериментально А. Комптоном, за що роботу він отримав Нобелівську премію у 1927 р.

Таким чином, під час взаємодії фотона з атомом він передає речовині не лише енергію, а й імпульс. Цим, зокрема, пояснюється тиск світла: потік фотонів, ударяючись об перешкоду, передає їй імпульс подібно до того, як молекули газу, ударяючись об стінки посудини, чинять тиск на них.

Отже, ґрунтуючись на квантовій природі світла, можна пояснити такі фізичні явища, як тиск світла, виривання електронів з поверхні металу під дією світла (фотоелектричний ефект) та інші. Водночас світлу властиві хвильові явища. Дуалізм властивостей світла проявляється у формулах, з яких визначають характеристики фотонів: $E = h\nu$, $p = \frac{h\nu}{c}$, $m = \frac{h\nu}{c^2}$. У цих форму-

лах квантові характеристики фотонів (енергія, імпульс, маса) зв'язані з хвильовою характеристикою світла – його частотою ν .



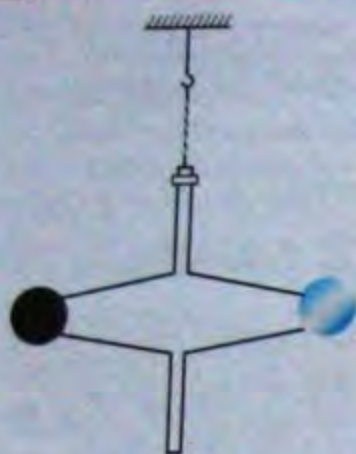
Дайте відповіді на запитання

1. Назвіть основні властивості фотона.
2. Як визначити масу та імпульс фотона? Як напрямлений імпульс фотона?
3. У чому полягає корпускулярно-хвильовий дуалізм світла?
4. До якого виду треба віднести промені, енергія фотонів яких становить $2 \cdot 10^{-17}$ Дж, $4 \cdot 10^{-19}$ Дж, $3 \cdot 10^{-23}$ Дж?
5. Співвідношення між частотами двох фотонів таке: $\nu_1 = k\nu_2$. Порівняйте їх енергії та імпульси.

§ 66. Тиск світла

Дослід Лебедева. Вперше висловив припущення про існування тиску світла Й. Кеплер у 1619 р., пояснюючи цим тиском відхилення хвостів комет, які наближались до Сонця. У 1873 р. Дж. 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 сила 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 і виміряти тиск світла вдалось у 1900 р. російському фізику П. М. Лебедеву.



Мал. 265. Схема дослідження тиску світла

В експериментальній установці Лебедева (мал. 265) на тонкій пружній кварцовій нитці було підвішено коромисло з тонкими легкими пластинками з металевої фольги. Одна з пластинок була покрита тонким шаром сажі. Світло падало на пластинки. Чорною пластинкою світло поглиналось, дзеркальною – відбивалось. Про величину світлового тиску можна було судити з кута закручування нитки. Проте на закручування нитки впливало не однакове нагрівання боків пластинок (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. Внаслідок цього виникає закручуючий момент, який в 1000 разів більший від

закручуючого моменту, зумовленого тиском світла. Щоб позбутись цього впливу, Лебедєв помістив установку в скляний балон, з якого було откачане 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 пластинка, що поглинає фотони, отримує вдвічі менший імпульс, ніж дзеркальна. Це й зумовлює обертання пластинок. 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. Ця величина називається сонячною сталою $I_s = 1370 \text{ Вт/м}^2$.

? Дайте відповіді на запитання

1. Поясніть ідею дослідження Лебедева.
2. Яка основна трудність і як її вдалось подолати Лебедеву під час вимірювання тиску світла?
3. Чи може фотон, зіткнувшись із перешкодою, віддати їй більше, ніж мав до зіткнення, а) енергії, б) імпульсу?

Приклади розв'язування задач

Задача. Потік монохроматичного світла $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м падає нормально на плоску дзеркальну поверхню і тисне на неї з силою 10^{-8} Н. Визначити 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 при нормальному падінні 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

у 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 32

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. Визначити світловий тиск у випадках, коли поверхня повністю відбиває і повністю поглинає світло.
3. Визначити силу світлового тиску сонячного випромінювання, що падає нормально на дзеркальну поверхню площею 30 м^2 . Вважати, що сонячна стала дорівнює $1,4 \text{ кВт/м}^2$.
4. Пучок світла 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 відбивання світла від даної поверхні $0,25$.
5. Визначити тиск світла на стінки електричної лампи потужністю 100 Вт . Колба лампи має сферичну поверхню радіусом 5 см , стінки якої відбивають 10% світла. Вважати, що вся спожита лампою потужність йде на випромінювання.

§ 67. Фотоефект

Досліди О. Г. Столетова. Про явище фотоефекту ми вже неодноразово згадували.

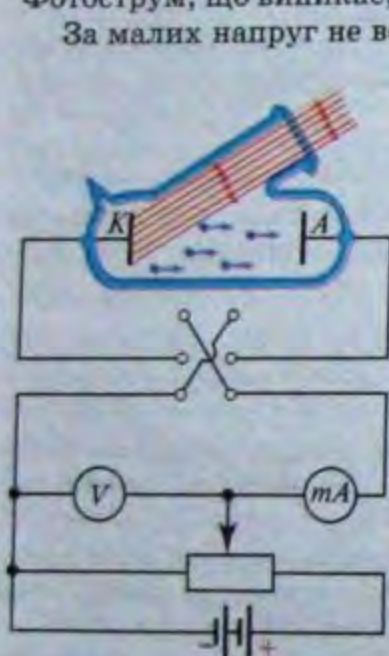


Фотоефект – це явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини й останні переходять у новий енергетичний стан.

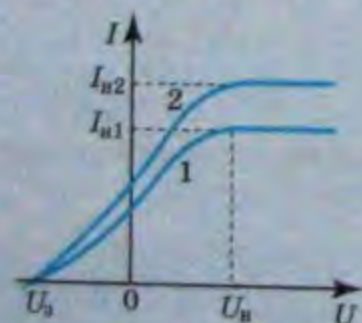
Це явище може проявлятися по-різному: як фотоіонізація окремих атомів і молекул газу під дією опромінення світлом; як фотоелектронна емісія під дією електромагнітного випромінювання (зовнішній фотоефект); у зміні

електропровідності під дією світла (внутрішній фотоэффект); у ініціюванні фотоядерних реакцій тощо.

Вперше закономірності зовнішнього фотоэффекту дослідив російський вчений О. Г. Столетов. У 1888 р. він створив установку, яка дала змогу добути електричний струм (фотострум) і дослідити його залежність від інтенсивності і довжини хвилі випромінювання. На мал. 266 зображено більш сучасну схему установки для дослідження явища фотоэффекту. У скляний балон, з якого викачано повітря, вміщено два електроди – анод A і катод K . 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 і вимірювати вольтметром. Якщо освітлювати електрод, приєднаний до негативного полюса батареї, то з нього вириватимуться електрони, які, рухаючись в електричному полі, утворюватимуть струм. Фотострум, що виникає, вимірюють міліамперметром.



Мал. 266. Схема установки з дослідження фотоэффекту



Мал. 267. Вольт-амперні характеристики фотоэффекту (графіку 1 відповідає менший світловий потік, ніж графіку 2)

За малих напруг не всі електрони, що їх вириває світло, досягають другого електрода. Коли, не змінюючи світлового потоку, збільшувати різницю потенціалів між електродами, то сила струму зростатиме. При певній напрузі вона досягає максимального значення і вже не збільшується. Найбільший фотострум, який дістають за незмінного світлового потоку, називають *фотострумом насичення*. Очевидно, фотострум насичення створюється за таких напруг, коли всі електрони, вирвані світловим потоком з катода, досягають анода. Отже, фотострум насичення може бути кількісною характеристикою фотоэффекту.

Змінюючи характеристики падаючого світла (збільшуючи чи зменшуючи світловий потік або 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 й надає їм кінетичної енергії. 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. 267). У цьому разі навіть електрони, що вилетіли з максимальною швидкістю, вже не можуть подолати гальмівну дію електричного поля і долетіти до анода. Вимірявши затримуючу напругу U_n ,

за якої припиняється фотострум, можна виміряти максимальну кінетичну енергію вибитих електронів, $eU_s = \frac{mv^2}{2}$.

Продовжуючи дослід, можна встановити залежність величини максимальної кінетичної енергії фотоелектронів від характеристик світлового випромінювання.

І ще одну закономірність фотоефекту можна виявити, якщо замінювати матеріал, з якого виготовлено катод.

Закони зовнішнього фотоефекту. У результаті дослідів були встановлені три закони фотоефекту.



Кількість електронів, що вилітають з поверхні тіла під дією електромагнітного випромінювання (а отже, і фотострум насичення), пропорційна його інтенсивності.

Перший закон фотоефекту легко пояснити з точки зору хвильової природи світла: чим більша енергія хвилі, тим ефективніша її дія. Наступні два закони фотоефекту пояснити з позицій хвильової теорії світла не вдавалось. Виявилось, що



максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно залежить від частоти опромінення і не залежить від його інтенсивності.

Для кожної речовини залежно від її температури і стану поверхні існує мінімальна частота ν_0 , за якої ще можливий зовнішній фотоефект. Мінімальну частоту ν_0 (або максимальну довжину λ_0) електромагнітного випромінювання, за якої відбувається фотоефект, називають *червоною межею фотоефекту*. Термін «червона межа» підкреслює, що фотоефект обмежений з боку довгохвильової частини спектра. Отже, не кожне випромінювання здатне викликати 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 і стану поверхні тіла.



Червона межа фотоефекту визначається лише матеріалом освітлюваного катода і не залежить від його освітленості.

Другий і третій закони фотоефекту не можна пояснити на основі електромагнітної теорії світла. Справді, за хвильовою теорією фотоефект повинен спостерігатись 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 коливань, а не довжиною хвилі. Крім того, кінетична енергія вибитих електронів повинна була б залежати від освітленості поверхні, оскільки зі збільшенням освітленості електрону передавалась би більша енергія.

Рівняння фотоефекту. У 1905 р. А. 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 $A_{\text{вих}}$ з цієї речовини. Нехай монохроматичне випроміню-

вання, 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 у цьому випадку 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 відбуватись зовнішній фотоефект при взаємодії світла з будь-якою речовиною?).

Таким чином, квант енергії фотона, що поглинається у процесі зовнішнього фотоефекту, витрачається на виконання роботи виходу електрона з металу і 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:

♦ Із збільшенням інтенсивності монохроматичного випромінювання зростає кількість поглинутих металом фотонів, а отже, і кількість електронів, які вилітають з нього, прямо пропорційна інтенсивності випромінювання (перший закон).

♦ Із рівняння фотоефекту видно, що кінетична енергія електронів, які вилітають, залежить тільки від роду металу (який характеризується відносною роботою виходу $A_{\text{вих}}$) та від частоти (довжини) падаючого випромінювання ($h\nu$), а від інтенсивності не залежить, $E_k = h\nu - A_{\text{вих}}$ (другий закон).

♦ Якщо енергія фотона менша за роботу 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 із рівняння фотоефекту, припустивши, що вся енергія падаючого фотона йде на виконання роботи виходу ($E_k = 0$): $h\nu_0 = A_{\text{вих}}$ або

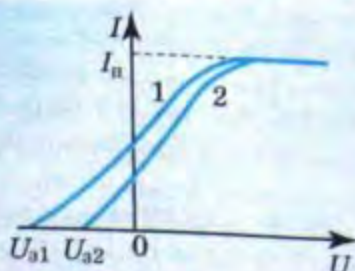
$$h \frac{c}{\lambda_0} = A_{\text{вих}}.$$

З рівняння Ейнштейна можна визначити сталу Планка. Розрахунки підтверджують теоретично запропоноване Планком значення $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, яке він отримав, пояснюючи теплове випромінювання тіл. Збіг значень сталої Планка, добутих різними методами, підтверджує правильність квантової теорії світла.

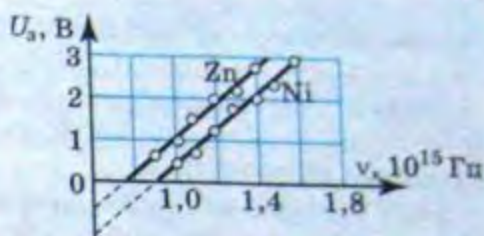
Найважливіше значення фотоефекту полягає в тому, що його відкриття і дослідження стали експериментальною основою квантової теорії.

? Дайте відповіді на запитання

1. Що таке зовнішній фотоефект? Які закономірності виявляються у процесі зовнішнього фотоефекту?
2. Які протиріччя виявились між закономірностями фотоефекту і хвильовою теорією світла?
3. Як з позицій квантової фізики пояснюються закони фотоефекту?
4. На мал. 266 зображено установку для вивчення зовнішнього фотоефекту. Змінюючи напругу між анодом і катодом вакуумної трубки, вимірюють силу струму в колі і знімають вольт-амперну характеристику фотоефекту (мал. 267). Поясніть: 1) від чого залежить величина характеристики фотоефекту (мал. 267). Поясніть, чому вольт-амперна характеристика фотоефекту перестав збільшуватись, досягаючи максимально можливого в даних умовах значення $I_{\text{н}}$; від чого залежить значення $I_{\text{н}}$; 3) чим пояснити, що для двох наведених графіків значення $U_{\text{з}}$ однакові, а значення $I_{\text{н}}$ різні?



Мал. 268. Вольт-амперні характеристики зовнішнього фотоелектричного ефекту



Мал. 269. Залежності U_a від частоти ν для фотоелектричного ефекту на двох металах

- Однією лампою, інтенсивність випромінювання якої не змінюється із часом, по черзі освітлюють два фотокатоди і одержують дві вольт-амперні характеристики зовнішнього фотоелектричного ефекту, графіки яких наведено на мал. 268. Пояснити, 1) чому для вказаних графіків значення затримуючої напруги U_a відрізняються; 2) у якого з фотокатодів більша робота виходу і чому; 3) чому на графіках значення фотоструму насичення однакові?
- На мал. 269 наведені експериментальні криві залежності U_a від ν для фотоелектричного ефекту на двох металах – цинку і нікелі. Як видно з графіка, ці криві є прямими, тобто залежності носять лінійний характер. Пояснити: 1) чому залежності $U_a(\nu)$ 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?

Вправа 33

- Якої довжини промені світла треба спрямувати на поверхню цезію, щоб максимальна швидкість вивірваних фотоелектронів дорівнювала 2000 км/с? Червона межа фотоелектричного ефекту для цезію дорівнює 690 нм.
- Найбільша довжина хвилі світла, за якої відбувається фотоелектричний ефект для вольфраму, дорівнює 0,275 мкм. Визначити роботу виходу електронів з вольфраму; найбільшу швидкість руху електронів, що вириваються із вольфраму світлом довжиною хвилі 0,18 мкм; найбільшу енергію цих електронів.
- Енергія фотона дорівнює кінетичній енергії електрона, що має початкову швидкість 10^6 м/с і прискорюється різницею потенціалів 4 В. Визначити довжину хвилі фотона.
- У явищі фотоелектричного ефекту електрони, що вириваються з поверхні металу випромінюванням частотою $2 \cdot 10^{15}$ Гц, повністю затримуються гальмівним полем з різницею потенціалів 7 В, а частотою $4 \cdot 10^{15}$ Гц – з різницею потенціалів 15 В. За цими даними обчислити сталу Планка.
- На поверхню деякого металу падає фіолетове світло довжиною хвилі 0,4 мкм. При цьому затримуюча напруга для вибитих світлом електронів дорівнює 2 В. Чому дорівнює затримуюча напруга в разі освітлення того ж самого металу червоним світлом довжиною хвилі 0,77 мкм?
- Краплина води об'ємом 0,2 мл нагрівається світлом довжиною хвилі 0,75 мкм, поглинаючи щосекунди 10^{10} фотонів. Визначити швидкість нагрівання води.
- Цезієву пластинку, робота виходу електронів з якої 1,9 еВ, опромінюють фіолетовим світлом довжиною хвилі $4 \cdot 10^{-7}$ м. До якого максимального потенціалу зарядиться пластинка?
- Фотони енергією 4,9 еВ виривають електрони з металу, робота виходу якого 4,5 еВ. Визначити максимальний імпульс, що передається поверхні металу у момент вильоту кожного електрона.
- Плоска пластинка з металу, червона межа фотоелектричного ефекту 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, напрям якого паралельний площині пластинки. Визначити радіус кола, який описують фотоелектрони, що вилітають з пластинки.

§ 68. Застосування фотоефекту

Внутрішній фотоефект. У 1873 р. англійські електрики А. Мей і У. Сміт, досліджуючи провідний кабель із селену, помітили, що під час освітлення його опір зменшується.

Пригадаємо, що селен належить до напівпровідників. Оскільки у звичайних умовах у напівпровідників дуже мало вільних носіїв зарядів (електронів і дірок), напівпровідники мають великий питомий опір. Проте у напівпровідниках валентні електрони порівняно слабо зв'язані з атомами і, діставши надлишкової енергії під час опромінення, вони можуть відірватися від атомів і перейти у вільний стан.

Подальші дослідження показали, що подібні процеси можуть відбуватися не тільки у напівпровідниках. Спостережуване явище отримало назву *внутрішнього фотоефекту*.

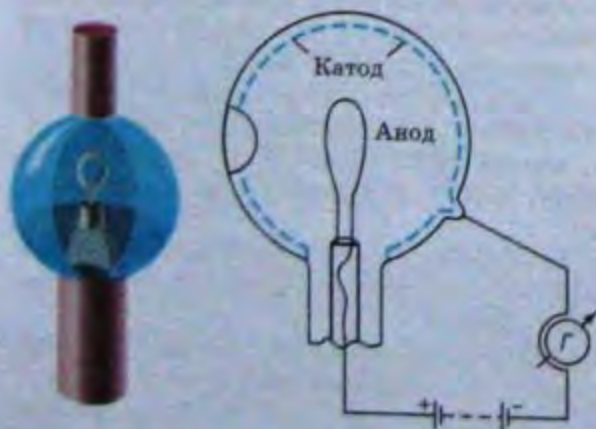
Внутрішній фотоефект – явище перерозподілу електронів за енергетичними станами в рідинах і твердих тілах внаслідок поглинання ними електромагнітного випромінювання.

На відміну від зовнішнього фотоефекту опромінені електрони залишаються в тілі, але переходять у якісно новий енергетичний стан – стають «вільними», утворюючи пару «електрон-дірка». Таким чином, внаслідок опромінення напівпровідника чи діелектрика в них збільшується концентрація вільних носіїв заряду, а отже, підвищується провідність.

Застосування фотоефекту. Відкриття явища фотоефекту мало велике значення для кращого розуміння природи світла. Але цінність науки полягає не лише в тому, що вона з'ясовує складну і багатогранну будову навколишнього середовища, а й в тому, що наука дає нам в руки засоби, за допомогою яких можна удосконалювати виробництво, поліпшувати умови матеріального і культурного життя. Широкого практичного використання набули *фотоелементи із зовнішнім фотоефектом та напівпровідникові фотоелементи з внутрішнім фотоефектом*.

Фотоелементи із зовнішнім фотоефектом – це вакуумні прилади для одержання фотострумів. Найпростіший вакуумний фотоелемент є скляним балоном, майже вся внутрішня поверхня якого покрита світлочутливим шаром металу, котрий відіграє роль фотокатода (мал. 270). Відкритим є невелика частина для доступу світла. Анодом є металеве кільце, закріплене в центрі балона.

За умови освітлення катода з нього вибиваються електрони і в колі виникає електричний струм. Фотоелементи широко використовуються для автоматизації різних процесів. У поєднанні з електричними підсилювачами фотоелементи входять до складу різних фотореле – пристроїв автоматичного керування, які вико-



Мал. 270. Вакуумні фотоелементи

ристовують безінерційність фотоефекту, тобто здатність фотоелемента практично миттєво реагувати на світловий вплив чи 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 з внутрішнім фотоефектом належать фотоопори (фоторезистори), фотодіоди, сонячні батареї та ін. (Принцип дії деяких із цих пристроїв ми розглянули під час вивчення напівпровідникових приладів (§ 18).)

Пристрої, дія яких ґрунтується на використанні фотопровідності напівпровідників, називаються *фотоопорами (фоторезисторами)*. Їх застосовують для автоматичного керування електричними колами за допомогою світлових сигналів. На відміну від фотоелементів фоторезистори можна використовувати в колах змінного струму, оскільки їх електричний опір не залежить від напрямку струму.

Виготовляючи фоторезистори, тонкий шар напівпровідника наносять на ізолятор з електродами і 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. Кожен з 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 навколишнього середовища, інерційність. Останній недолік пояснюється тим, що електрони і дірки після припинення освітлення починають рекомбінувати, тому в умовах швидких змін світлового потоку провідність провідника не встигає слідувати за цими змінами.

Сонячні батареї – це фотоеlementи із внутрішнім фотоефектом, які перетворюють енергію світла в електричну, наприклад кремнієві фотоеlementи (мал. 271).

Елемент кремнієвої сонячної батареї – це пластина кремнію *n*-типу, оточена шаром кремнію *p*-типу товщиною близько одного мікрометра, з контактами для приєднання зовнішнього кола.

Під час освітлення поверхні елемента в тонкому зовнішньому шарі *p*-типу генеруються пари «електрон-дірка», більшість яких, не встигнувши рекомбінувати внаслідок малої товщини шару, потрапляє в *p-n*-перехід. У *p-n*-переході заряди поділяються: під дією поля електрони перекидаються в *n*-область, а дірки відкидаються в *p*-область. Це означає, що під час освітлення між електродами виникає електрорушійна сила (фотоЕРС), величина якої досягає приблизно



Мал. 271. Сонячні батареї

0,5 В. Після замикання електродів такий елемент може створювати струм до 25 мА з кожного см² освітлюваної поверхні. Найбільша чутливість кремнієвих фотоелементів припадає на зелені промені, що зумовлює досить високий їх ККД та широке використання.

? Дайте відповіді на запитання

1. Що називають внутрішнім фотоефектом? У чому полягає принципова відмінність між зовнішнім і внутрішнім фотоефектами?
2. Що називають фотоелементом? Який принцип дії фотоелемента із зовнішнім фотоефектом?
3. Що таке фоторезистор? Який його принцип дії? Як і де використовують фоторезистори?

§ 69. Явища, що пояснюються квантовими властивостями світла

Ефект А. 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 А. Г. 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 від довжини хвилі падаючого фотона λ . Досліди показали, що різниця $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не залежить від довжини падаючого світла і природи речовини, що розсіює, а визначається тільки значенням кута розсіювання θ

(мал. 272), а саме визначається формулою $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) = 2\frac{h}{mc}\sin^2\frac{\theta}{2}$,

де $\frac{h}{mc} = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м (m – маса електрона).

Довжину хвилі $\lambda_K = \frac{h}{mc}$ називають комптонівською довжиною хвилі.

Зменшення частоти (збільшення довжини хвилі) вказувало на втрату енергії. Пояснити цей ефект в рамках електромагнітної теорії світла не вдавалось. Довжина хвилі розсіяного випромінювання не повинна змінюватись, адже під його дією в речовині повинні утворитись електромагнітні хвилі тієї самої частоти, що й хвилі падаючого випромінювання.

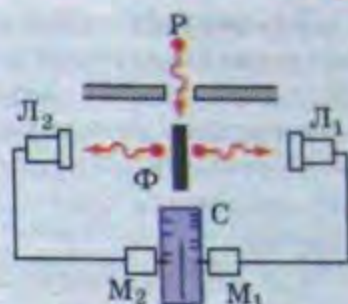
Комптон показав, що виявлений ним ефект можна пояснити на основі квантової теорії світла, а саме співударом налітаючого фотона з електроном речовини. Під час співудару падаючий фотон передає частину свого імпульсу електрону. Згідно із законом збереження імпульсу $\vec{p} = \vec{p}_e + \vec{p}_\phi$, звідси $p_\phi < p$, тобто $\lambda' > \lambda$.



Мал. 272. Комптонівське розсіювання фотона

Встановлено, що ефект Комптона не спостерігається в діапазоні видимого випромінювання, оскільки енергія світлового кванта у цьому випадку 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 В. Боте. Ще один чудовий дослід, який безпосередньо підтверджував гіпотезу А. Ейнштейна про корпускулярну природу світла, у тому числі й рентгенівського випромінювання, було проведено німецьким фізиком В. Боте. У досліді Боте на певній відстані від джерела рентгенівського випромінювання розміщували два лічильники Гейгера–Мюллера (мал. 273). З курсу фізики 9 класу ви знаєте, що ці лічильники здатні реєструвати появу в них заряджених частинок, зокрема і вільних електронів. У досліді Боте поява вільних електронів була зумовлена фотоефектом або комптон-ефектом після попадання в лічильник рентгенівського випромінювання.



Мал. 273. Схема дослідів Боте

Рентгенівські промені випускались звичайною рентгенівською трубкою Р і потрапляли на пластинку із тонкої металевої фольги Ф, у результаті чого в ній також збуджувались рентгенівські промені, але інтенсивність їх була дуже слабкою. Ідея дослідів полягала в тому, щоб зареєструвати електрони у лічильниках Л₁ та Л₂. Якщо збуджене рентгенівське випромінювання виходить з пластинки Ф 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, кожен з яких випускається з пластинки Ф незалежно від інших, то одночасна реєстрація механізмами М₁ та М₂ (які робили відповідні відмітки на рухомій стрічці С) влучання в лічильники Л₁ та Л₂ рентгенівських фотонів має бути випадковою подією.

Дослід Боте показав, що одночасний показ лічильників дійсно носить випадковий характер, 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 внаслідок дії світла, називаються *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 кожен поглинутий фотон взаємодіє з однією молекулою.

Найважливішою фотохімічною реакцією в природі є *фотосинтез* – процес утворення під дією світла вуглеводнів із 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 і підтримується життя. Учені встановили, що фотосинтез хлорофілом вуглеводів, що містяться у рослинах, відбувається під дією червоних променів спектра сонячного світла. Приєднуючи до вуглеводного ланцюга атоми інших елементів, одержуваних з ґрунту, рослини будують молекули вуглеводів, жирів і білків, створюючи їжу для людини і 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.

? Дайте відповіді на запитання

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 внаслідок співудару з електроном розсіявся під кутом 90° . Визначити 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

За формулою Комптона $\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$.

Виразимо довжини хвиль λ і λ' через енергії E і E' відповідних

фотонів: $\lambda = \frac{hc}{E}$ і $\lambda' = \frac{hc}{E'}$.

Тоді формулу Комптона можна записати у вигляді $\frac{hc}{E'} - \frac{hc}{E} = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$.

Враховуючи, 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: $1,85 \text{ MeV}$.

Вправа 34

1. Рентгенівські промені з довжиною хвилі $70,8 \text{ пм}$ зазнають комптонівського розсіювання на парафіні. Визначити довжину розсіяного рентгенівського випромінювання у напрямках: а) $\theta = \pi/2$; б) $\theta = \pi$.
2. Якою була довжина хвилі рентгенівського випромінювання, якщо внаслідок комптонівського розсіювання цього випромінювання графітом під кутом 60° довжина хвилі розсіяного випромінювання дорівнює $25,4 \text{ пм}$?

3. Рентгенівські промені довжиною хвилі 20 пм зазнають комптонівського розсіювання під кутом 90° . Визначити зміну довжини хвилі рентгенівського випромінювання, а також енергію та імпульс електрона віддачі.
4. В акті комптонівського розсіювання енергія падаючого фотона розподіляється порівну між розсіяним фотоном та електроном віддачі. Кут розсіювання 90° . Визначити енергію та імпульс розсіяного фотона.
5. Енергія рентгенівських променів 0,6 MeV. Визначити енергію електрона віддачі, якщо довжина хвилі рентгенівських променів після комптонівського розсіювання змінилась на 20%.

§ 70. Модель атома Резерфорда-Бора

Історія вивчення атома. 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 сформувались сучасні уявлення про будову атома. Після перших експериментів можна було робити висновки про складну будову атома і наявність в його структурі електричних зарядів. Ці результати отримано М. Фарадеєм у 1833 р. під час вивчення законів електролізу. У 1897 р. Дж. Томсон, вивчаючи електричний розряд у розріджених газах, відкрив електрон. Він виміряв важливу характеристику цієї частинки – питомий заряд $e/m = 1,76 \cdot 10^{-11}$ Кл/кг. Американський фізик – Р. Міллікен 1909 р. дуже точно виміряв заряд електрона. Він виявився однаковим у всіх електронів з різних джерел і дорівнював $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Маса електрона приблизно в 2000 разів менша за масу одного з найлегших атомів – атома Гідрогену – і дорівнює $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Виходячи з цих результатів, Томсон запропонував модель атома, згідно з якою атом є позитивно зарядженою кулею радіусом $R = 10^{-8}$ см, всередині якої містяться електрони. Таким чином, атом Томсона подібний булочці з родзинками, роль родзинок при цьому виконують електрони.

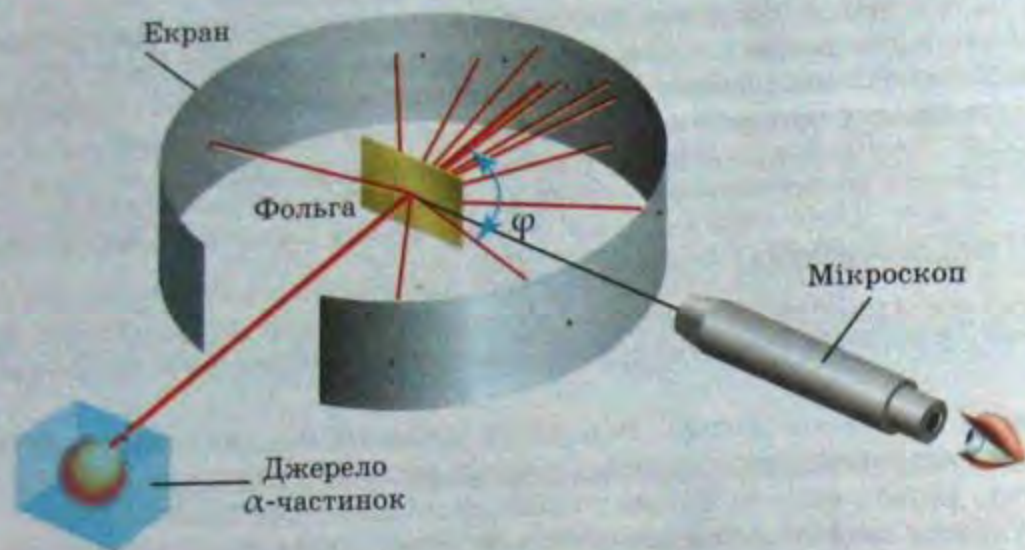
Однак модель атома Томсона не пояснювала багатьох фізичних явищ. Е. Резерфорд у 1906 р. запропонував *планетарну* модель атома. Модель була одержана з низки дослідів, які називають дослідом Резерфорда. Схему дослідів зображено на мал. 274. Резерфорд зондував атоми золота швидкими ядрами Гелію (α -частинками), які вилітали із радіоактивного джерела, вміщеного у свинцевий контейнер.

Навпроти отвору в свинцевому контейнері на екрані, покритому $ZnSO_4$, по ходу променя α -частинок, можна було помітити світну пляму. Резерфорд помістив на шляху α -частинок тонку золоту пластинку (фольгу), і помітив, що деякі ядра, проходячи крізь фольгу, відхиляються на значні кути, а нещодавня їх кількість навіть відбивається назад. Переважна ж більшість ядер, проходила, не помічаючи перешкоди. Узагальнивши результати дослідів, Резерфорд зробив висновки, які і сформували планетарну модель атома.

♦ В об'ємі атома більшість простору порожня. Майже вся маса атома сконцентрована в дуже малому ядрі (діаметром $d \sim 10^{-15}$ м).

♦ Ядро має позитивний заряд q^+ , величина якого за модулем дорівнює заряду електрона, помноженому на порядковий номер елемента в таблиці Менделєєва.

♦ Оскільки атом електрично нейтральний, то позитивний заряд ядра компенсується зарядом електронів, які мають рухатись навколо ядра. Кількість електронів дорівнює порядковому номеру елемента в таблиці Менделєєва.



Мал. 274. Схема досліду Резерфорда

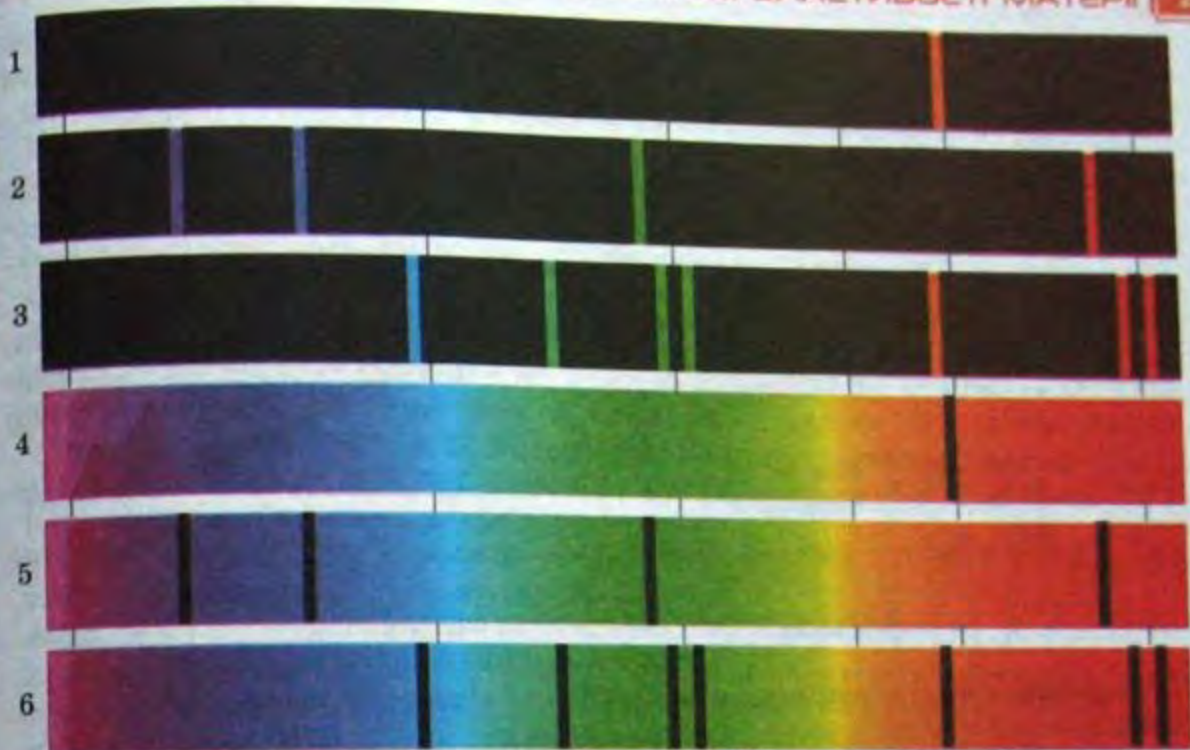
Планетарна модель атома змогла пояснити багато спостережень, але одразу ж постали й питання, на які не було відповіді. Дійсно, ядро заряджено позитивно, а електрони – негативно, між ними існує кулонівська сила притягання. Для того, щоб електрони не впали на ядро, вони мусять рухатись навколо нього з доцентровим прискоренням. З теорії Максвелла випливає, що заряд, який рухається з прискоренням, має випромінювати електромагнітні хвилі, втрачаючи енергію, і за розрахунками за час $\Delta t \approx 10^{-8}$ с електрон, рухаючись по спіралі, мусить припинити свій рух. Дослідні ж дані показували, що за нормальних умов атом не випромінює енергії і існує як завгодно довго. Крім того, у кінці XIX ст. досить детально були досліджені спектри випромінювання та поглинання розжарених газів – *лінійчаті спектри*. Закономірності цих спектрів також не узгоджувались з моделлю атома Резерфорда.

Лінійчаті спектри. *Лінійчаті спектри випромінювання*, що мають вигляд вузьких ліній різних кольорів (мал. 275), дістають під час світіння газів або пари.

Світіння газу можна викликати, пропускаючи крізь нього електричний струм або нагріваючи його до високої температури тощо. Можна дістати лінійчатий спектр речовини, яка у звичайних умовах перебуває у твердому стані. Для цього крупинки твердих речовин або розчин вводять у полум'я пальника. Речовина, випаровуючись, дає лінійчатий спектр. *Лінійчаті спектри поглинання* мають вигляд темних ліній на фоні неперервної радуги, розташування яких збігається із розташуванням кольорових ліній у спектрі випромінювання цього ж газу.

Вивчення лінійчатих спектрів різних речовин показало, що кожний хімічний елемент дає свій лінійчатий спектр, який не збігається зі спектром інших елементів. Лінійчаті спектри хімічних елементів відрізняються кольором, положенням і кількістю окремих світних ліній. Характерні для кожного хімічного елемента лінії утворюються не тільки у видимій, а й в інфрачервоній та ультрафіолетовій частинах спектра.

Найбільш дослідженим на той час був спектр атома Гідрогену. У 1885 р. вчителю фізики однієї із швейцарських шкіл І. Бальмеру вдалось встано-



Мал. 275. Лінійчаті спектри випромінювання (1–3) та поглинання (4–6).

1, 4 – Натрій; 2, 5 – Гідроген; 3, 6 – Гелій

вити для Гідрогену, що його частоти випромінювання у видимій частині спектра можуть бути визначені з формули $\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right)$, 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....

З часом, після відкриття спектральних ліній не лише у видимій частині спектра, а й у інфрачервоній та ультрафіолетовій, формула набула вигляду

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \text{ де } n \text{ і } k - \text{цілі числа, } k > n.$$

Ця формула отримала назву формули Бальмера¹.

Таким чином, будь-яка теорія будови атома повинна була пояснити, чому атоми (а в розріджених газах можуть випромінювати лише атоми) випромінюють дискретні лінії і як розрахувати частоту цих випромінювань.

Квантові постулати Бора. Як ми вже зазначали, запропонована Резерфордом модель атома не могла пояснити спектри випромінювання атомів. Вихід із ситуації запропонував датський фізик Нільс Бор у 1913 р. Він прийшов до висновку, що планетарну модель атома Резерфорда слід доповнити

¹ У деяких навчальних посібниках можна зустріти і такий запис формули Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Справа в тому, 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 різні значення. У даному випадку $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ (відрізняється від попередньої сталої на c).

ідеями квантової теорії, яка починала утверджуватись. Бор припустив, що електрони в атомах не випромінюють енергію неперервно, випромінювати вони можуть лише під час переходу із одного енергетичного стану в інший.

Н. Бор доповнив планетарну модель атома такими *постулатами*.

♦ 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 і атом енергію не випромінює.

♦ Перехід атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням чи поглинанням фотонів, енергію яких $h\nu$ визначають за формулою $h\nu = E_k - E_n$, де k і n – цілі числа (номери стаціонарних станів); якщо $E_k > E_n$ фотон з частотою ν випромінюється, якщо $E_k < E_n$ – поглинається.

♦ Момент імпульсу електрона, що рухається зі швидкістю v_n на n -ій орбіті, радіус якої r_n , набуває дискретних значень $L = m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$, де

$n = 1, 2, 3, \dots, m$ – маса електрона, \hbar – зведена стала Планка.

? Дайте відповіді на запитання

1. У чому полягає сутність моделі Томсона?
2. Побудуйте і поясніть схему досліду Резерфорда з розсіювання α -частинок. Що спостерігають в цьому досліді? У чому сутність планетарної моделі атома?
3. У чому планетарна модель атома не узгоджується із законами класичної фізики?
4. Сформулюйте постулати Бора.

§ 71. Експериментальне підтвердження постулатів Бора

Досліди Д. Франка і Г. Герца. Першими експериментами, що підтвердили теорію Бора, стали досліди, проведені Д. Франком та Г. Герцем у 1913 р. Ідея дослідів була така. Якщо через газ пропускати потік електронів певної енергії, то відбуватимуться зіткнення електронів з атомами, внаслідок чого енергія електронів буде змінюватись. Якщо співударі будуть пружними, то внаслідок того, що маса електронів набагато менша за масу атомів, втрати їх кінетичної енергії будуть незначними. Під час непружного удару, електрон може передати всю свою енергію, або її частину одному з електронів атома. Згідно з законами класичної механіки кількість переданої енергії буде визначатись умовами зіткнення і може набувати довільних значень. Якщо ж стаціонарні стани дійсно існують, то зміни енергії електронів не будуть довільними, – вони будуть дорівнювати різниці значень енергій стаціонарних рівнів атомів.

Схему досліду наведено на мал. 276. Скляна колба заповнена паром ртуті (хімічний елемент Меркурій).

Електрони з катода K під дією електричного поля, створеного між електродами джерелом струму \mathcal{E} , прямують до сітки й анода A . Між сіткою й анодом A існує незначна напруга (0,5 В), яка гальмує повільні електрони, перешкоджаючи їх руху до анода.

Результати дослідження залежності сили струму I в колі анода від на-

пруги U показали, що ця залежність має складний нелінійний характер (мал. 277).

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 і, зіткнувшись з атомами Меркурію, пружно від них відбиваються (адже $m_e < m_{Hg}$) і легко долають гальмівну напругу між сіткою й 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 гальмівну напругу і сила струму в колі анода різко спадає. В міру подальшого зростання напруги між катодом K і сіткою сила анодного струму знову зростає, досягаючи максимуму при 9,8 В. Знову відбуваються непружні зіткнення з передавання енергії від електрона до атома, тобто енергія атома Меркурію змінюється на 4,9 еВ.

Енергетичні стани атомів Гідрогену.

Використовуючи закони механіки Ньютона та правила квантування, Бор зумів з високою точністю обчислити енергетичні стани 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 формулою $h\nu = E_k - E_n$, або $\nu = \frac{E_k - E_n}{h}$. Частоту

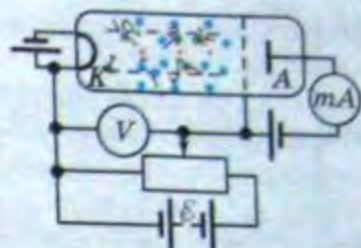
випромінювання спектральних ліній атома Гідрогену визначають за формулою Бальмера $\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$. З порівняння цих формул бачимо, що енергія

електрона до і після випромінювання дорівнює $E_k = -\frac{hR}{k^2}$ та $E_n = -\frac{hR}{n^2}$.

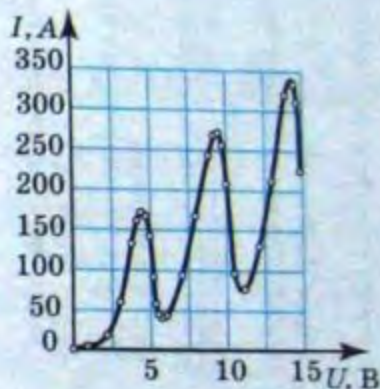
Для наочності прийнято зображати значення енергій атомів у вигляді горизонтальних прямих, розташованих одна над одною на відстані, пропорційній різниці їх енергій. Найнижча пряма відповідає нормальному стану атома.

На мал. 278 зображено схему рівнів енергії атома Гідрогену.

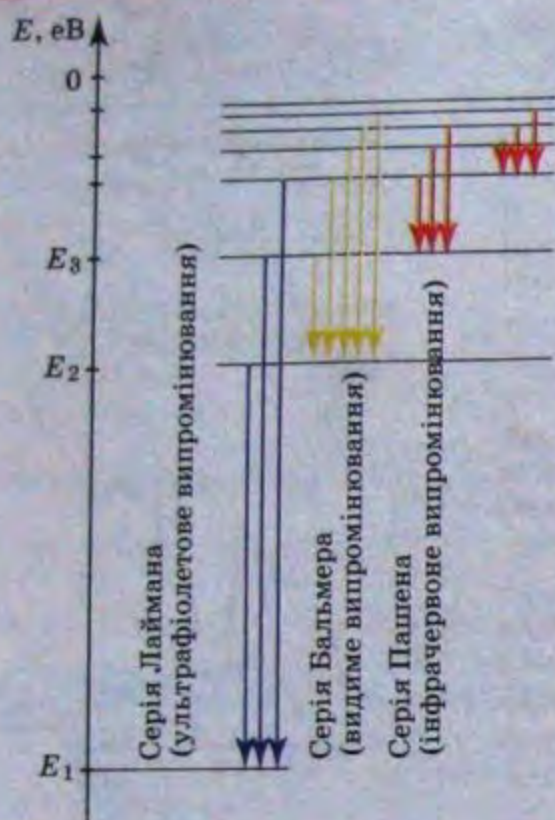
Енергію електрона, що покинув атом (міститься на нескінченній відстані від ядра) приймають за нуль. Зрозуміло, що в цьому випадку енергія будь-якого електрона, який перебуває ближче до ядра, буде меншою, а отже, від'ємною. У нормальному (не збудженому) стані енергія атома буде мінімальною і у випадку атома Гідрогену її значення $E_1 = -13,55$ еВ. У першому збудженому стані



Мал. 276. Схема дослідження Франка і Герца



Мал. 277. Залежність сили струму від напруги в досліді Франка і Герца



Мал. 278. Енергетичні рівні в атомі Гідрогену

(другий енергетичний рівень) атом Гідрогену матиме енергію $E_2 = -3,38$ еВ, у другому – $E_3 = -1,5$ еВ.

З основного стану у збуджений атом може перейти, діставши ззовні у будь-який спосіб (наприклад, поглинувши фотон чи 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 ($n = 1$) з другого, третього і т.д. випромінюється ультрафіолетове випромінювання (серія Лаймана), під час переходів на другий рівень з вищих рівнів – випромінювання оптичного діапазону (серія Бальмера) і під час переходів на третій рівень – інфрачервоне випромінювання (серія Пашена). Серії названо на честь вчених, які їх відкрили.

Дайте відповіді на запитання

1. У чому полягала ідея досліду Франка і Герца? Який висновок можна було зробити на основі його результатів?
2. Зобразіть за допомогою схеми енергетичних рівнів атома Гідрогену перехід, який відповідає випромінюванню ультрафіолетових променів.
3. За яким принципом спектральні лінії Гідрогену об'єднано у серії?
4. Чи можуть фотони, утворені при випромінюванні атома Гідрогену, мати однакові імпульси, якщо їх енергії різні?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Визначити радіус першої борівської орбіти для атома Гідрогену, а також лінійну та кутову швидкості електрона на цій орбіті.

Дано:
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
 $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ 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, $ma_n = F_K$, або

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}, \text{ звідки } mv_n^2 r_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \quad (1).$$

За постулатом Бора момент імпульсу електрона

$$r_n m v_n = n \frac{h}{2\pi}, \text{ звідки } v_n = \frac{nh}{2\pi m r_n}.$$

Підставляючи даний вираз у формулу (1), отримуємо $m \left(\frac{nh}{2\pi m r_n} \right)^2 r_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}$, звідки $r_n = \frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m e^2}$ (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 $r_1 = 0,528 \cdot 10^{-10}$ м.

Виходячи з формули (2), можна розрахувати радіус n -ої орбіти як $r_n = r_1 \cdot n^2$ (3).

Знаючи радіус орбіти, можемо розрахувати швидкість руху електрона на цій орбіті $v_n = \frac{nh}{2\pi m r_n}$, або $v_n = \frac{h}{2\pi m r_1 n}$. Отже $v_1 = 2,2 \cdot 10^6$ м/с.

Щоб визначити швидкість на n -ій орбіті, можна скористатись співвідношенням

$$v_n = \frac{v_1}{n} \quad (4).$$

Кутова швидкість обертання електрона на n -ій орбіті

$$\omega_n = \frac{v_n}{r_n}, \quad \omega_1 = \frac{v_1}{r_1} = 4,1 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}.$$

Враховуючи формули (3) і (4), можна записати $\omega_n = \frac{\omega_1}{n^3}$ (5).

Відповідь: $0,528 \cdot 10^{-10}$ м; $2,2 \cdot 10^6$ м/с; $4,1 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$.

Задача 2. Визначити потенціальну, кінетичну і повну енергії електрона на першій орбіті в атомі Гідрогену.

Дано:

$$\begin{aligned} e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ h &= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \\ c &= 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \\ \epsilon_0 &= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \\ m &= 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \end{aligned}$$

$$E = ? \quad E_{\text{пот}} = ? \quad E_{\text{к}} = ?$$

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

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{пот}} = \frac{mv_n^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}.$$

За теорією Бора електрон у атомі Гідрогену обертається по коловій орбіті з доцентровим прискоренням, якого йому надає кулонівська сила, $ma_n = F_n$, $\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}$,

$$\text{звідки } v_n^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n m}, \text{ тоді } E = E_{\text{к}} + E_{\text{пот}} = \frac{m}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n m} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}.$$

З формули випливає, що модуль повної енергії дорівнює половині модуля потенціальної, або модуль потенціальної вдвічі більший за модуль повної: $E_{\text{пот}} = 2E$, 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

$$E = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}; \quad E = -2,485 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = -13,53 \text{ еВ}, \text{ тоді } E_{\text{пот}} = -27,1 \text{ еВ}, \quad E_{\text{к}} = 13,53 \text{ еВ}.$$

Значення повної енергії електрона на n -ій орбіті можна визначати як $E_n = \frac{E_1}{n^2}$.

Відповідь: $-13,53$ еВ; $-27,1$ еВ; $13,53$ еВ.

Вправа 35

1. Внаслідок переходу електрона в атомі Гідрогену з третьої стаціонарної орбіти на другу випромінюються фотони, що відповідають довжині хвилі $6,52 \cdot 10^{-7}$ м. Яку енергію втрачає атом Гідрогену при цьому?
2. 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.
3. На якій орбіті швидкість електрона атома Гідрогену дорівнює 734 км/с?
4. Визначити для першої та другої орбіт атома Гідрогену значення сили кулонівського притягання і напруженість електричного поля.
5. У скільки разів збільшиться радіус орбіти електрона в атомі Гідрогену, що перебуває в основному стані, після збудження його фотоном енергією 12,09 еВ?
6. Як зміниться повна енергія електрона, якщо збільшити у k разів: а) радіус орбіти, б) номер орбіти в атомі Гідрогену?
7. Накресліть графік залежності повної енергії електрона в атомі Гідрогену від номера орбіти.
8. У скільки разів зміниться енергія електрона на першій орбіті атома Гідрогену, якщо збільшити заряд ядра в k разів?
9. У скільки разів довжина n -ої орбіти електрона в атомі Гідрогену відрізняється від довжини $(n+1)$ -ої орбіти?



§ 72. Хвильові властивості матерії

Гіпотеза де Бройля. У 1923 р. французький фізик Луї де Бройль (1892–1987) розширив уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм. Усвідомлюючи існуючу у природі симетрію, він використав *принцип симетрії* і 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 б мати хвильові властивості.

Одним із вихідних аргументів для гіпотези де Бройля про хвильову природу матеріальних частинок, зокрема електронів, було те, що ця гіпотеза підтверджувала теорію Бора. Де Бройль припустив, що між корпускулярними і хвильовими характеристиками електрона існує такий самий зв'язок, як між відповідними характеристиками фотона, тобто довжина хвилі, що відповідає матеріальній частинці, пов'язана з її імпульсом співвідношенням

$$\lambda = \frac{h}{p}. \text{ Або для частинки масою } m, \text{ що рухається зі швидкістю } v, \lambda = \frac{h}{mv}.$$

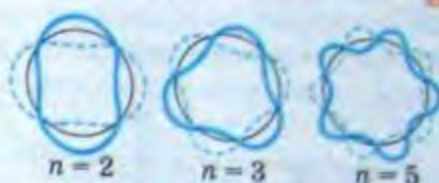
Величину λ називають *дебройлівською довжиною хвилі*.

Кожному електрону в атомі, вважає де Бройль, відповідає стояча хвиля, яка виникає за умови, що на довжині колової орбіти має вкладатись ціле число довжин хвиль (мал. 279).

Довжина борівської орбіти радіусом r_n дорівнює $2\pi r_n$, тому $2\pi r_n = n\lambda$, де $n = 1, 2, 3 \dots$.

Враховуючи, що $\lambda = \frac{h}{mv}$, отримуємо $2\pi r_n =$

$$= \frac{nh}{mv}, \text{ звідки } mvr_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar. \text{ Як видно,}$$



Мал. 279. Електронні стоячі хвилі

останній вираз є не чим іншим, як умовою

квантування, введеною Н.Бором. Саме на основі цієї умови, обґрунтовується умова квантування енергії електрона в атомі. Таким чином, ідея де Бройля дозволяє пояснити квантування орбіт і станів у моделі атома Бора, іншими словами, *корпускулярно-хвильовий дуалізм закладено у самій структурі атома.*

Слід зазначити, що корпускулярно-хвильовий дуалізм – це модель для пояснення властивостей матерії. Не слід вважати, що електрон можна вважати хвилею або частинкою у прямому розумінні. Хвиля, корпускула – це також моделі, які ми використовуємо для вивчення властивостей матерії. Підкреслимо, що хвилі де Бройля, пов'язані з рухомими частинками, не є електромагнітними хвилями, вони не мають ніякого відношення до поширення електромагнітного поля. Хвилі де Бройля мають специфічну квантову природу, яка не має аналогії у класичній фізиці.

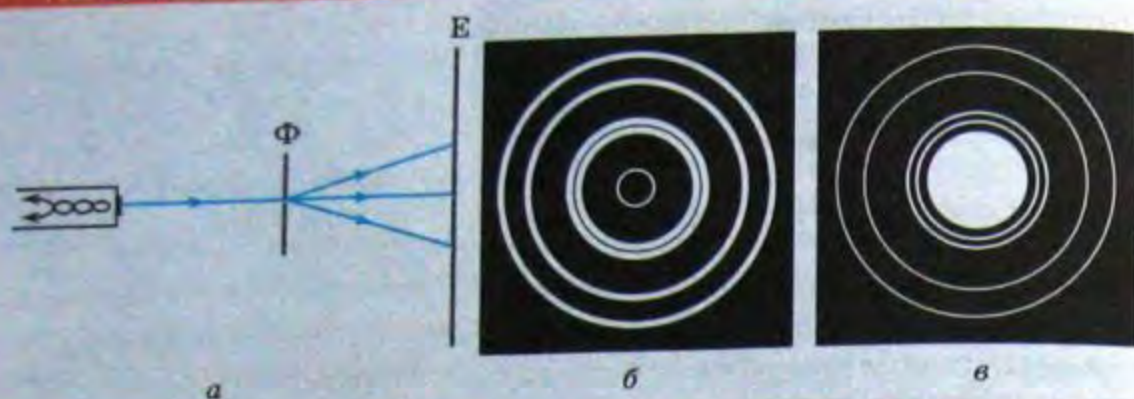
Дебройлівська довжина хвилі звичайного тіла дуже мала, щоб її можна було виявити та виміряти. Так, наприклад, дебройлівська довжина хвилі м'яча масою 200 г, що летить зі швидкістю 15 м/с, становить приблизно $2,2 \cdot 10^{-34}$ м. Згадайте, що типові хвильові властивості – інтерференція та дифракція – виявляються тільки у тому випадку, коли розміри предметів або щілин сумірні з довжиною хвилі. Оскільки нам невідомі предмети або щілини, на яких би могли дифрагувати хвилі довжиною $2,2 \cdot 10^{-34}$ м, тому хвильові властивості звичайних тіл виявити не вдається.

Для тіл малої маси (наприклад, електронів) дебройлівська довжина хвилі має уже значно більше значення. Так, електрону, що рухається зі швидкістю $5,6 \cdot 10^6$ м/с, відповідає дебройлівська довжина хвилі $1,2 \cdot 10^{-10}$ м. Такі хвилі уже можна виявити експериментально.

Як показали дослідження, хвильові властивості мають не лише електрони, а й інші частинки – протони, нейтрони та ін.

Дифракція електронів. Оскільки міжатомні відстані в кристалі твердого тіла є величинами порядку 10^{-10} м і розташовані атоми в кристалі впорядковано, то кристал можна використати як дифракційну ґратку.

У 1927 р. американські фізики К. Девіссон і Л. Джермер досліджували відбивання електронів від монокристала нікелю (мал. 280, а). У проведених дослідах спостерігався неоднаковий розподіл відбитих пучків електронів. Отримані результати можна було пояснити як результат дифракції електронів. Незабаром, у 1928 р., англійський фізик Г. Томсон (син Дж. Томсона) спостерігав дифракцію електронів під час проходження ними тонких металевих плівок. На мал. 280, б зображено дифракційну картину від розсіювання електронів на алюмінієвій фользі, а на мал. 280, в – аналогічну фотографію, отриману при опроміненні фольги рентгенівським випромінюванням.



Мал. 280. *а* – Схема досліду із 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.

? Дайте відповіді на запитання

1. Електрон та протон рухаються з однаковими швидкостями. Якій із цих частинок відповідає менша довжина хвилі?
2. Яке співвідношення між довжиною n -ої орбіти електрона в атомі Гідрогену і довжиною λ хвилі де Бройля, що характеризує електрон у цьому стані?
3. Про що свідчить дифракція електронів?

§ 73. 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. По своїй суті вона була спрямована на вирішення конкретної проблеми: обґрунтування стабільності атома та пояснення лінійчатих спектрів. Незважаючи на це, теорія Бора у розвитку фізики відіграла значну роль – вона стала поштовхом для розвитку *квантової механіки*. Квантова механіка пояснила спектри складних атомів, відмінності у яскравості їх спектральних ліній, утворення молекул із атомів. Квантова механіка, яка в основному займається вивченням мікросвіту, разом з тим має більш широкий і узагальнюючий характер, оскільки властивості всіх макроскопічних тіл залежать від їх 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 обговоримо деякі її основні ідеї і розглянемо, як за їх допомогою пояснюється будова атома.

Хвильова функція. З точки зору класичної механіки кожна частинка рухається вздовж певної траєкторії і потік частинок не може виявляти хвильових властивостей. Основною задачею класичної механіки є визначення положення тіла у будь-який момент часу. Якщо, наприклад, задано початкове положення тіла (його координати) і початкову швидкість його руху, то за другим законом Ньютона можна визначити положення і швидкість тіла

у будь-який наступний момент часу. При цьому вважають, що початкові координати і швидкість руху тіла можна задати з будь-яким ступенем точності, що залежить лише від якості приладів, за допомогою яких вимірюють координати і швидкості.

Квантова ж механіка має статистичний характер. У квантовій механіці можна лише передбачити, з якою ймовірністю у даний момент часу частинка може перебувати у певній точці простору.

Основними характеристиками хвиль є довжина, частота та амплітуда. У квантовій механіці амплітуду хвилі де Бройля називають *хвильовою функцією* і 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, було запропоноване в 1926 р. німецьким фізиком Е. Шредингером. Через відсутність відповідної математичної підготовки ми не наводимо загальний вигляд рівняння і його розв'язок. Розглянемо лише якісний зміст хвильової функції.

З дослідів дифракції електронів, нейтронів та інших частинок речовини випливає, що в цих дослідах виявляється неоднаковий розподіл пучків електронів чи нейтронів, відбитих чи розсіяних в різних напрямках, – у певних напрямках спостерігається більша кількість частинок, ніж у всіх інших. З хвильової точки зору наявність максимумів кількості частинок у певних напрямках означає, що ці напрями відповідають найбільшій інтенсивності хвиль де Бройля. Пояснимо сказане на прикладі світлової електромагнітної хвилі.

Як відомо, інтенсивність I будь-якої хвилі пропорційна квадрату амплітуди. У випадку електромагнітної хвилі $I \propto E^2$, де E – напруженість електричного поля. З точки зору корпускулярної теорії інтенсивність світлового потоку пропорційна кількості фотонів N , що проходять через одиничний переріз за одиницю часу, $I \propto N$. Об'єднавши два вирази, отримуємо $N \propto E^2$. Якщо ж ми маємо справу з одиничним фотоном, то даний вираз означає, що квадрат напруженості електричного поля E^2 характеризує ймовірність того, що фотон перебуває у певній точці. У точках, де значення E^2 велике, більша ймовірність виявити фотон.

Ці міркування послужили німецькому фізику Максу 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 у 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 ймовірність.



Квадрат хвильової функції ψ^2 електрона у заданій точці простору і в даний момент часу характеризує ймовірність перебування цього електрона у даній точці простору у вибраний момент часу.

Принцип невизначеностей Гейзенберга. Пояснимо, як у квантовій механіці розуміють точність виявлення частинки у певній точці простору.

Як відомо, проводячи будь-які вимірювання у 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. Допустимо, вам необхідно знайти у темній кімнаті тенісний м'ячик. Ви на дотик (рукою чи іншим предметом) намагаєтесь визначити його місцезнаходження, і у той момент, коли ви до нього доторкаєтесь, ви зсовуєте його з місця (положення м'ячика ви уже визначите не точно).

Значно легше визначити положення м'ячика, ввімкнувши світло у кімнаті. М'ячик стає видно, адже ті фотони, що відбилися від нього, створюють зоровий образ. У випадку взаємодії фотонів з м'ячиком переданий м'ячику імпульс фотона незначний. Досліджуючи частинки мікросвіту за допомогою фотонів (наприклад, з використанням електронного мікроскопа) взаємодія фотона з електроном і переданий імпульс уже відіграють значну роль.


Таким чином, сам акт спостереження частинки мікросвіту вносить суттєву невизначеність або в координату, або в імпульс частинки.

У квантовій механіці ступінь точності, з якою можна виявити частинку у певній точці простору, визначається співвідношенням невизначеностей, встановленим у 1927 р. німецьким фізиком В.Гейзенбергом. 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 $\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$.

Проведені В.Гейзенбергом точніші дослідження показали, що невизначеності одночасного вимірювання координати і відповідної складової імпульсу задовольняють умову $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}$.

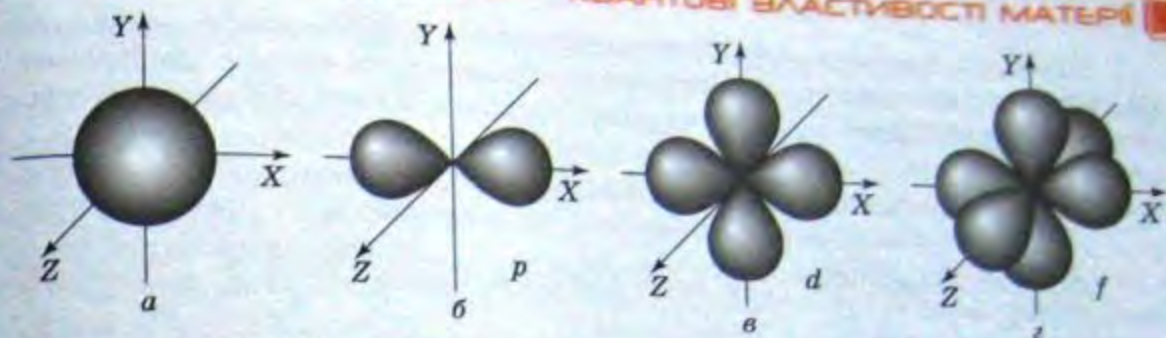
Принцип невизначеності можна записати і через енергію та час: $\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$.

Будова електронної оболонки. Виходячи з уявлень квантової механіки, в атомі не існує чітких колових орбіт, як це стверджувалось у теорії Бора. Через хвильову природу електрон «розмитий» в 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.

Якщо говорити про ту частину електронної орбіталі, де її густина найбільша, то можна говорити про її розмір і форму. Залежно від величини енергії електронні орбіталі розрізняються за розмірами. Чим сильніше притягається електрон до ядра, тим його електронна орбіталь менша за розміром, але густіша. Орбіталі розрізняються не лише за розмірами, а й за формою. Розміри і 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. 281). Такі орбіталі позначають літерою s , а електрони, орбіталі яких мають сферичну форму, називають s -електронами.



Мал. 281. Просторові форми електронних орбіталей

Як видно з малюнка, хмарина 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. 281, б-г). Так, *p*-орбіталь має вигляд об'ємної вісімки, центр якої збігається з центром ядра. У просторі *p*-орбіталі розміщуються вздовж трьох взаємно перпендикулярних координатних осей. Орбіталі складніших форм позначаються буквами *d*, *f* та ін.

? Дайте відповіді на запитання

1. У чому полягає протиріччя між ньютонівською та квантовою механіками?
2. Чим відрізняється будова атома Гідрогену за теорією Бора та за квантовою механікою?
3. Положення електрона можна визначити з точністю $1,6 \cdot 10^{-8}$ м. З якою точністю можна визначити його швидкість?
4. Користуючись принципом невизначеностей, оцініть невизначеність положення електрона в основному стані атома Гідрогену. Примітка: імпульс електрона визначіть на основі борівської моделі, отриманий результат порівняйте з борівським радіусом.



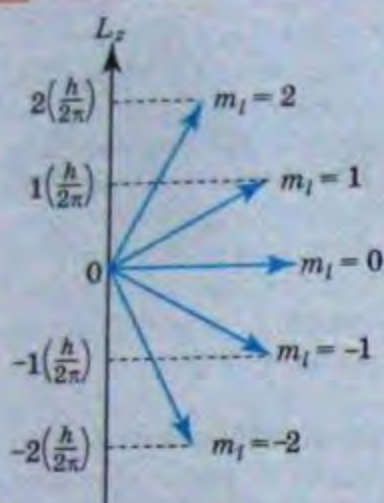
§ 74. Фізичні основи побудови періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва

Квантові числа. На уроках хімії у 8 класі ви вже ознайомились із будовою електронної оболонки атома. Вмієте записувати електронні конфігурації атомів, знаєте, що властивості хімічних елементів періодично повторюються, оскільки періодично повторюється будова зовнішніх енергетичних рівнів у їх атомах. Розглянемо детальніше, як квантова механіка пояснює будову складних атомів.

Як відомо, у теорії Бора квантується енергія атома та момент імпульсу електронів у атомі, тобто ці величини виражаються через квантове число n :

$$E_n = -\frac{13,55 \text{ eV}}{n^2} \text{ та } L = \frac{nh}{2\pi}, \text{ де } n = 1, 2, 3, \dots - \text{ціле число, яке називають квантовим числом.}$$

У квантовій механіці стан атома описується чотирма квантовими числами.



Мал. 282. Орієнтація моменту імпульсу

значення $-2, -1, 0, +1, +2$. У квантовій механіці, як правило, орієнтацію моменту імпульсу задають через його компоненту L_z (мал. 282), яка пов'язана з m_l співвідношенням $L_z = m_l \frac{h}{2\pi}$.

Назва «магнітне квантове число» зумовлена тим, що під час експериментальних досліджень було виявлено, що у газовому розряді в магнітному полі спектральні лінії розщеплюються на декілька ліній. (Це розщеплення називають ефектом Зеемана). Це означає, що розщеплюються і енергетичні рівні. Залежність енергії від орієнтації моменту імпульсу пояснюється взаємодією рухомого електрона з магнітним полем.

♦ **Спінове квантове число m_s** , яке може набувати двох значень: $m_s = +1/2$ та $m_s = -1/2$. Спін – фундаментальна характеристика мікроскопічної частинки, (яка в деякому відношенні аналогічна «власному моменту імпульсу частинки»). Спін є квантовою властивістю частинок і не має аналогів у класичній фізиці. Тоді як класичний 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.

Про два можливих значення спінового квантового числа – $m_s = +1/2$ та $m_s = -1/2$ – 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 знаходитись 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 $+1/2$ та $-1/2$. Тому в атомі у стані із заданим n можуть перебувати не більше, ніж $2n^2$ електронів.

♦ Квантове число n із теорії Бора зберігається і в квантовій механіці під назвою *головного квантового числа* $n = 1, 2, 3, \dots$ і збігається з номером енергетичного рівня.

♦ **Орбітальне квантове число l** визначає модуль моменту імпульсу електрона. Його обчислюють із співвідношення $L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi}$, де L – мо-

мент імпульсу електрона. Воно може набувати значень від 0 до $n-1$.

♦ **Магнітне квантове число m_l** – характеризує орієнтацію моменту імпульсу і може набувати значень від $-l$ до $+l$. Це пояснюється тим, що момент імпульсу векторна величина, тому вона квантується і за числовим значенням і за напрямком. Наприклад, якщо $l = 2$, то m_l може мати

Розглянемо будову деяких атомів, використовуючи принцип Паулі.

Наступний за атомом Гідрогену у періодичній системі атом Гелію має два електрони. Обидва електрони можуть мати головне квантове число $n = 1$, оскільки їх 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, які наведено у таблиці.

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 у таблиці. Квантові числа третього електрона можуть бути й іншими, наприклад, $n = 2$ та $l = 1$, але у такому разі він перебуватиме у збудженому стані, оскільки рівень з $n = 2$ та $l = 1$ має вищу енергію, ніж рівень $n = 2$ та $l = 0$. Тому з часом електрон перейде в основний стан з випромінюванням фотона.

n	l	m_l	m_s
He			
1	0	0	1/2
1	0	0	-1/2
Li			
1	0	0	1/2
1	0	0	-1/2
2	0	0	1/2

Аналогічно можна продовжити перелік квантових чисел для основного стану складніших атомів.

Електронні конфігурації атомів. Як відомо, кількість електронів у атомі дорівнює кількості протонів в ядрі атома і дорівнює 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 (див. таблицю).

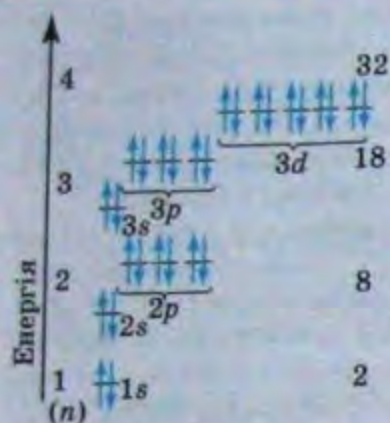
Значення n	1	2	3	4	5	6	...
Позначення оболонки	K	L	M	N	O	P	...

Електрони з однаковим значенням l належать одній підоболонці (орбіталі). Числові значення l замінюють буквеним позначенням (див. таблицю).

Значення l	0	1	2	3	4	...
Позначення оболонки	s	p	d	f	g	...

Складаючи схеми будови електронних оболонок атомів, керуються таким алгоритмом:

Визначають кількість електронів в електронній оболонці атома (хімічного елемента) за його порядковим номером у таблиці Менделєєва.



Мал. 283. Схема забудови енергетичних рівнів

За номером періоду визначають кількість енергетичних рівнів n в електронній оболонці.

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).

Число 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 і п'ять d -орбіталей.

На кожній орбіталі може перебувати максимум два електрони з протилежними спінами.

Заселення електронами орбіталей підпорядковується *правилу Гунда*: заселення орбіталей, що належать одному енергетичному рівню, починається з одиночних електронів з паралельними спінами, і лише після того, як електрони займуть усі орбіталі, починається заселення орбіталей парами електронів (з протилежними спінами).

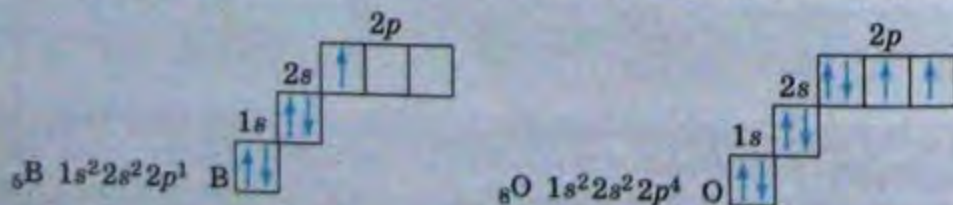
На мал. 283 показано схему забудови енергетичних рівнів.

На мал. 284 наведено приклади електронних формул та електронних конфігурацій деяких хімічних елементів.

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 у 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, охарактеризуємо 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 еле-



Мал. 284. Електронні формули та конфігурації елементів Ванадію та Оксигену

менти, в яких невелике число валентних електронів (на зовнішньому енергетичному рівні) і великий радіус атома, то атом Натрію, що має 1 валент-металічні властивості.

? Дайте відповіді на запитання

1. Як за допомогою квантової механіки пояснюється будова електронних оболонок атомів?
2. У чому суть принципу Паулі?
3. Яка із наведених електронних формул неможлива: а) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^3$; б) $1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 4p^2$; в) $1s^2 2s^2 2p^8 3s^1$?
4. Запишіть електронні формули атомів Ca, Cl та зобразіть їх електронні конфігурації.

§ 75. Спектри теплового випромінювання та люмінесценції

Теплове випромінювання та люмінесценція. Випромінювання тілами електромагнітних хвиль (світіння) може здійснюватись за рахунок різних видів енергії. Найпоширенішим видом випромінювання є *теплове* – випромінювання електромагнітних хвиль за рахунок внутрішньої енергії тіл. Чим вища температура тіла, тим швидше рухаються атоми. Під час зіткнень швидких атомів частина їх кінетичної енергії перетворюється в енергію збудження атомів, які потім випромінюють світло.

Всі інші види світіння, для яких збудження відбувається за рахунок інших видів енергії (крім теплової), об'єднують під загальною назвою *люмінесценція*.



Люмінесценція – випромінювання світла джерелом за рахунок надходження до нього енергії, яка приводить атоми джерела у збуджений стан в результаті нетеплових процесів.

За тривалістю існування атомів у збудженому стані люмінесценцію поділяють на *флуоресценцію* (швидко затухаючу, час світіння порядку 10^{-8} с) і *фосфоресценцію* (тривалу, час світіння більший за 10^{-4} с).

За механізмом збудження атомів люмінесценцію поділяють так:

Катодолюмінісценція – світіння тіл, викликане бомбардуванням речовини зарядженими частинками. Наприклад, світіння екранів електронно-променевої трубок.

Електролюмінісценція – світіння речовини під час проходження через неї електричного струму або під впливом електричного поля. З прикладом електролюмінісценції ми ознайомились, вивчаючи газові розряди. Північне сяйво – явище електролюмінісценції. Потоки заряджених частинок від Сонця захоплюються магнітним полем Землі, збуджують атоми верхніх шарів атмосфери і спричиняють їх світіння. Електролюмінісценція властива також напівпровідникам, які застосовують у *світлодіодах*. Під час пропускання прямого струму через *p-n*-перехід світлодіода електрони і дірки інтенсивно рекомбінують, випускаючи кванти випромінювання. У цьому разі електрична енергія перетворюється в світлову, тобто відбувається процес,

зворотний до внутрішнього фотоефекту. Кремнієві світлодіоди є джерелами інфрачервоного випромінювання, а світлодіоди на карбіді кремнію (SiC), фосфіді галію (GaP) випромінюють видиме світло.

Хемілюмінесценція – світіння, яке виникає внаслідок екзотермічної хімічної реакції. Наприклад, світіння трухлого дерева, гнилі. Цей вид світіння властивий деяким живим організмам – комахам-світлячкам, деяким видам риб, що мешкають на значній глибині.

Фотолюмінесценція – світіння тіл під впливом опромінення їх видимим світлом, ультрафіолетовими, рентгенівськими, гамма-променями.

Як правило, світло, яке падає на речовину, частково відбивається, а частково поглинається нею. Енергія поглинутого світла переважно тільки нагріває тіло. Проте для деяких речовин цієї енергії достатньо для того, щоб речовина почала світитись. Наприклад, світна фарба, якою покривають дорожні знаки, світловідбивачі тощо.

Випромінене під час фотолюмінесценції світло, як правило, має більшу довжину хвиль, ніж випромінювання, яке збуджує світіння. Наприклад, якщо на флюоресцеїн (органічний барвник) спрямувати світловий пучок, пропущений крізь фіолетовий світлофільтр, ця рідина починає світитись зелено-жовтим світлом, тобто світлом більшої довжини хвилі ніж фіолетове.

Явище фотолюмінесценції застосовується в лампах денного світла. С.І.Вавилов запропонував покривати внутрішню поверхню розрядної трубки речовинами, здатними яскраво світитись під дією короткохвильового випромінювання газового розряду.

Види спектрів випромінювання. Ще у 1666 р. за допомогою скляної тригранної призми І. Ньютон вперше встановив, що біле світло розкладається у суцільний (неперервний) спектр. Спектр білого світла можна одержати ще й за допомогою дифракційної ґратки. Для точного дослідження спектрів використовують спеціальні прилади – *спектральні апарати*, які добре виокремлюють хвилі різної довжини і не допускають (або майже не допускають) їх перекривання. Найчастіше основною частиною спектрального апарата є призма або дифракційна ґратка.

Спектральний склад випромінювання різних речовин досить різноманітний. Проте всі спектри можна поділити на три групи: *лінійчаті, смугасті та неперервні*.

Про лінійчаті спектри ми вже дещо говорили у § 70.

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 кожен хімічний елемент дає свій лінійчатий спектр, який не збігається зі спектрами інших елементів (мал. 274, §70).

Розкладаючи теплове випромінювання у спектр за допомогою дифракційної ґратки і вимірюючи інтенсивність різних ділянок спектра, отримують розподіл енергії випромінювання за довжинами хвиль. На мал. 285 зображено приблизний розподіл інтенсивності випромінювання за довжиною

хвилі у лінійчатому спектрі. Як видно з малюнка, кожна лінія має скінченну ширину.

Основна властивість лінійчатих спектрів полягає в тому, що довжини хвиль (або частоти) лінійчатого спектра якої-небудь речовини залежать лише від властивостей атомів цієї речовини, і зовсім не залежать від способу збудження світіння атомів.

Виняткову сталість частот випромінювання атомів було використано для визначення еталона основної одиниці часу – секунди. Для цього було взято одну з 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.

Смугастий спектр має вигляд кольорових смуг, розділених темними проміжками (*молекулярні спектри*).

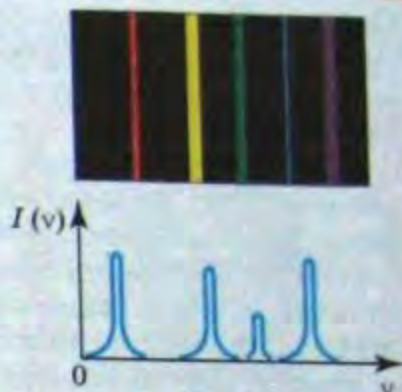
Утворення молекули з атомів змінює енергетичні рівні зовнішніх електронів, оскільки у молекулі вони взаємодіють один з одним. До того ж, виникають додаткові рівні, що відповідають коливанням атомів і обертанням молекули як цілого. Енергетичні рівні коливального та обертального рухів також квантовані. Таким чином, кожний атомний рівень розчеплюється на ряд близьких рівнів. У результаті переходів між цими рівнями і 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.

На початку цього розділу ми уже з'ясували деякі особливості вигляду кривих розподілу енергії за довжиною хвилі для абсолютно чорного тіла (мал. 264 § 64), а саме: *довжина хвилі, на яку припадає найбільша енергія випромінювання, тим менша, чим вища температура тіла*. Проводячи детальне дослідження у 1893 р. В.Він виявив деяку закономірність, яку називають *законом Віна*: *добуток довжини хвилі, яка відповідає максимуму випромінювання в спектрі абсолютно чорного тіла, на його абсолютну температуру є величина стала, $\lambda_{\max} T = b$* . Тут b – стала Віна, яка дорівнює $b = 0,002892 \text{ м} \cdot \text{К}$.

Спектральний розподіл енергії теплового випромінювання якого-небудь реального тіла може помітно відрізнитись від спектра випромінювання абсолютно чорного тіла, проте має такий самий характер. Установивши, на яку довжину хвилі припадає найбільша енергія в спектрі випромінювання



Мал. 285. Розподіл спектральної густини інтенсивності випромінювання в лінійчатому спектрі

тіла, можна визначити його температуру. Цим способом можна визначити температуру розплавленого металу, Сонця, зір тощо. Такий спосіб визначення температури джерела випромінювання називають *оптичною пірометрією*.

Спектри поглинання. Усі речовини, атоми яких перебувають у збудженому стані, випромінюють світлові хвилі певної довжини. Поглинання світла речовинами також залежить від його довжини хвилі. Значний інтерес становить вивчення спектрів поглинання одноатомних газів, які мають лінійчаті спектри випромінювання. Вперше такі дослідження провів у 1854 р. Г. Кірхгоф, який встановив, що *будь-яка речовина поглинає переважно промені тих довжин хвиль, які сама може випромінювати*. Пояснення спектрів поглинання випливає із постулатів Бора.

Спектральний аналіз та його застосування. Спектральний аналіз широко використовують у науці і 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 і зір досліджено їх хімічний склад. Випромінювання поверхні Сонця (фотосфери) дає неперервний спектр. Це випромінювання має температуру близько $6\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 фоні неперервного спектра фотосфери з'являється майже 20 000 ліній поглинання. За цими лініями було встановлено, що на Сонці є водень, кальцій, натрій, залізо та інші хімічні елементи. Вперше дослідження ліній поглинання у спектрі сонячного випромінювання провів у 1817 р. І. Фраунгофер, тому ці лінії називають *фраунгоферовими*.

Під час проведення спектрального аналізу користуються спеціальними таблицями або атласами спектральних ліній, в яких наведено точне розміщення ліній у спектрі кожного хімічного елемента, тобто довжини хвиль, що їм відповідають. За допомогою спектрального аналізу були відкриті нові хімічні елементи – Рубідій і Цезій. Цікава історія відкриття Гелію. Спочатку він був виявлений під час аналізу спектра сонячного випромінювання у 1868 р., звідки й походить його назва (від грец. «геліос» – Сонце).

Основні переваги спектрального аналізу – дуже висока чутливість, простота і швидкість проведення – зумовлюють його широке використання в металургії і машинобудуванні, хімії і геології, медицині і біології та багатьох інших галузях науки і техніки.



Дайте відповіді на запитання

1. Які речовини дають суцільний спектр? Які – лінійчатий?
2. Чим відрізняються лінійчаті спектри різних газів і пар?
3. З'ясуйте, який спектр і чому виникає в газі внаслідок рекомбінації позитивних йонів з вільними електронами.
4. Чому спектр випромінювання йонізованого газу має чітко виражену довгохвильову межу?

§ 76. 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 свій початок воно брало на катоді трубки, проміння називали *катодним*. Пізніше було з'ясовано, що катодне проміння – це потік електронів.

Досліджували катодне проміння Іван Пулюй та Вільям Рентген. І. Пулюй досліджував катодне проміння за 10 років до відкриття В. Рентгена. Він помітив, що фотопластинка поблизу газорозрядної трубки засвічувалась навіть тоді, коли трубка була обгорнута чорним папером. Таким чином, йому вдалось встановити, що невідомі промені, які виникають під час роботи трубки, здатні виходити за її межі. Якщо між трубкою і фотопластинкою розташовували якийсь предмет, невідомі промені проникали крізь нього і засвічували фотопластинку. У такий спосіб до 1890 р. І. Пулюй отримав «фотографії» скелета жаби та дитячої руки, які 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 англomовній та франкомовній науковій літературі, ввійшовши в мови багатьох народів світу. У нашій країні ми частіше використовуємо назву *рентгенівське випромінювання*, хоча поправу його можна назвати *пулюївське проміння*.

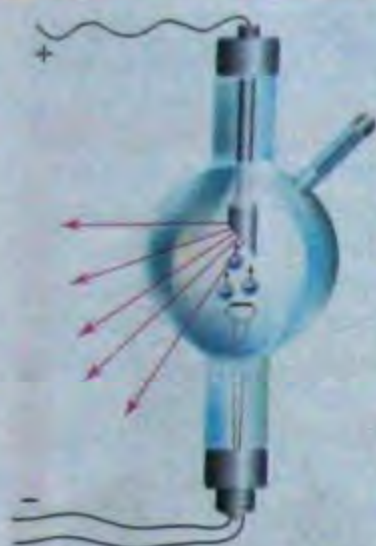
Рентгенівські промені утворюються під час гальмування швидких електронів. Навколо потоку цих електронів існує магнітне поле, оскільки напрямлений рух електронів є електричним струмом. У момент удару об перешкоду і різкого гальмування електрона його магнітне поле швидко змінюється, і в простір випромінюється електромагнітна хвиля, довжина якої тим менша, чим більша швидкість електрона до удару об перешкоду.

Рентгенівські промені добувають за допомогою спеціальних двохелектродних ламп (мал. 286), на які подається висока напруга порядку 50–200 кВ. Принцип дії рентгенівської трубки такий. Електрони, що їх випускає розжарений катод рентгенівської трубки, прискорюються потужним електричним полем у просторі між анодом і катодом і з великою швидкістю ударяються об анод. При цьому з поверхні анода випромінюється рентгенівське проміння, яке виходить назовні крізь скло трубки.

Якщо ж електрони в прискорюючому полі набувають достатньо великої швидкості, щоб проникнути всередину атомів речовини анода і вибити один



І. П. 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 добробком є його праці з дослідження «X-променів», які вражали науковий світ того часу.



Мал. 286. Схема рентгенівської трубки



Мал. 287. Електронограма кристала берилу

із електронів його внутрішнього шару, то на його місце переходить електрон з віддаленішого шару з випромінюванням кванта великої енергії.

Таким чином, рентгенівське випромінювання виникає внаслідок гальмування швидких електронів у речовині та випромінюється під час енергетичних переходів електронів між рівнями внутрішніх оболонок атома.

Рентгенівські промені розрізняють за їх *жорсткістю*: чим коротша довжина хвилі рентгенівських променів, тим вони жорсткіші.

Важливою особливістю рентгенівських променів є їх висока проникаюча здатність. Чим жорсткіші рентгенівські промені, тим слабше вони поглинаються і тим вища їх проникаюча здатність. Поглинання рентгенівських променів речовиною залежить від її природи. Добре поглинають рентгенівські промені атоми важких елементів, незважаючи на те, до складу яких хімічних речовин вони входять.

Як і будь-які електромагнітні хвилі, рентгенівські промені не відхиляються в електричному і магнітному полях. Вони майже не заломлюються, переходячи з одного середовища в інше. Цю властивість у поєднанні з їх високою проникаючою здатністю використовують у практичних цілях в медицині, техніці, виробництві.

Довгий час після відкриття рентгенівських променів не вдавалось встановити їх хвильові властивості – спостерігати їх дифракцію і виміряти довжину хвилі. Усі спроби використати дифракційні ґратки, призначені для подібних досліджень, не

давали ніяких результатів. У 1912 р. німецький фізик М. Лауе запропонував використати для спостереження дифракції рентгенівських променів природні кристали. Досліди показали, що вузький пучок рентгенівських променів, пройшовши крізь кристал, дає на екрані або фотоплівці складну дифракційну картину. Одержувана дифракційна картина називається *електронограмою*. На мал. 287 для прикладу наведено електронограму кристала берилу (берил – мінерал класу силікатів). За допомогою електронограм визначають структуру речовини – розташування атомів у кристалах даної речовини.

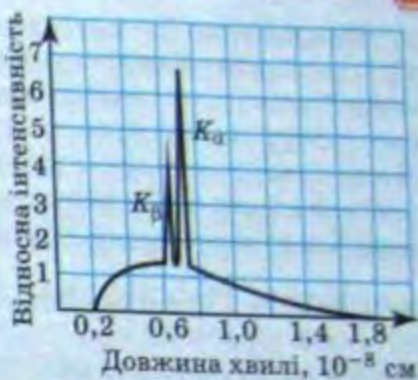
Вивчення дифракційної картини, отриманої від кристала кам'яної солі, дало змогу визначити довжину хвилі рентгенівського випромінювання, оскільки відстань між вузлами цієї кристалічної ґратки відома. Було з'ясовано, що довжина хвилі рентгенівських променів в десятки і сотні разів менша за довжину хвилі 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, у свою чергу, допомогли утвердитися гіпотезі де Бройля щодо хвильових властивостей частинок.

Рентгенівські спектри. Розглянемо особливості спектра випромінювання рентгенівської трубки. Вигляд типового рентгенівського спектра наведено на мал. 288. Як видно з малюнка, *рентгенівський спектр* – це неперервний спектр, який обмежується граничною довжиною хвилі λ_0 та має характерні максимуми, що накладаються на неперервний спектр.



Мал. 288. Рентгенівський 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 та його гранична довжина хвилі будуть зміщуватись вліво.

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 його 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 із великою швидкістю й 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 із 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 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 у бік коротших хвиль. Г. Мозлі в 1913 р. показав, що квадратний корінь з 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% своєї енергії електрони можуть віддавати на теплоту, 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 у такий спосіб величина λ_0 точно збігається з експериментальними даними.

Застосування рентгенівського випромінювання в науці, техніці, медицині, на виробництві. Як ми з'ясували, кожен елемент дає свій характеристичний спектр незалежно від того, чи цей елемент до випускання рентгенівських променів перебуває у вільному стані чи в хімічному з'єднанні. 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 речовини.

Найбільш широко рентгеноспектральний аналіз застосовують у металургії та геології для визначення макро- і мікрокомпонентів; для визначення вмісту Pb і Br в нафті і бензинах, сірки в газоліні, домішок у мастилах та 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), рентгеноспектральний 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 і гази, молекули білків, нуклеїнових кислот і т.д.

Для проведення численних досліджень за допомогою рентгенівських променів використовують спеціальні установки – *синхротрони*.

На сьогодні у світі є близько 70 синхротронів. Рентгенівське випромінювання, що отримується на синхротроні, дуже інтенсивне і дозволяє аналізувати структуру матерії з дуже високою роздільною здатністю.

Властивості рентгенівських променів широко використовуються в медицині для виявлення змін в організмі (рентгенодіагностика) та для лікування злоякісних пухлин. Хворі клітини і тканини організму мають під-

вищену чутливість до дії рентгенівських променів, тому відповідною дозою випромінювання можна стримувати ріст і навіть руйнувати хворі тканини організму, не пошкоджуючи сусідніх здорових тканин.

? Дайте відповіді на запитання

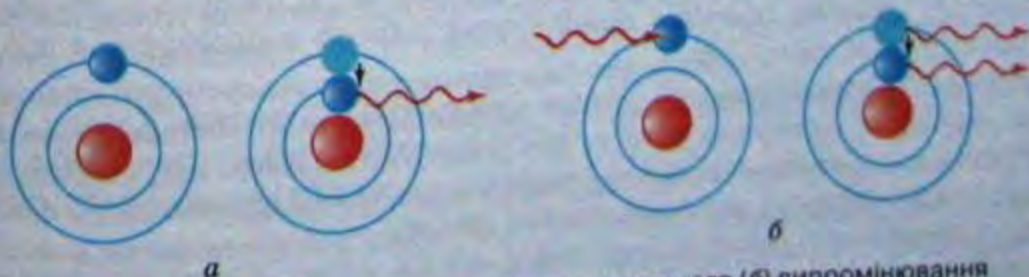
1. Поясніть принцип збудження рентгенівських променів. Що таке рентгенівське характеристичне випромінювання?
2. На мал. 288 наведено характеристичний спектр рентгенівського випромінювання, отриманий за деякої напруги на рентгенівській трубці. Як зміниться вигляд кривої, якщо напругу на трубці зменшити вдвічі?
3. Назвіть основні властивості рентгенівських променів.

§ 77. 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. 289, а).

Перейти на нижчий енергетичний рівень та випромінити квант енергії квантова система може і під впливом зовнішнього електромагнітного поля (мал. 289, б). Таке випромінювання називається *вимушеним* (індукованим). Характерною особливістю вимушеного випромінювання є те, що воно тотожне первинному падаючому на речовину випромінюванню, тобто збігається з ним за частотою, напрямками поширення і поляризації та когерентне у всьому 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 напрямі. Якщо зовнішня електромагнітна хвиля має частоту $\nu = \frac{E_2}{h} - \frac{E_1}{h}$, то вона ніби «струшує» із збудженого атома



Мал. 289. Механізм спонтанного (а) та вимушеного (б) випромінювання

подібні до себе кванти випромінювання, не затрачаючи на це енергії. Під її дією атоми узгоджено переходять на нижчі енергетичні рівні, випромінюючи хвилі, які збігаються за частотою і фазою із 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 від незбуджених. Бо хвиля одночасно збуджує атоми і спричинює індуковані переходи з верхнього рівня на нижній.

Для створення потужного індукованого випромінювання необхідна така квантова система, в якій кількість атомів у збудженому стані перевищувала б кількість атомів в основному стані (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. А. Ейнштейн. Можливість створення інверсного заселення передбачив радянський фізик В. О. Фабрикант у 1939 р. Таким чином зародилась нова галузь фізики – квантова електроніка, розвиток якої привів до створення квантових генераторів – *мазерів* та *лазерів*.

У 1951–1954 рр. радянські фізики М. Г. Басов і О. М. Прохоров запропонували застосовувати для збудження атомів газорозрядну лампу, яка оточує прозорий стрижень. Під час спалаху цієї лампи атоми стрижня переходять у збуджений стан, після чого можливе підсилення світла. 1954 року М. Г. Басов і О. М. Прохоров та американський фізик Ч. Таунас сконструювали прилад, який працював на довжині хвилі $\lambda = 1,27$ см, його назвали «мазер», а у 1960 р. в США вдалось побудувати прилад, який випромінював в оптичному діапазоні, – його назвали «лазер».

Квантові генератори – це джерела когерентного електромагнітного випромінювання з точно певною частотою і 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 вузьконаправленого монохроматичного електромагнітного випромінювання сантиметрового радіодіапазону (ультракороткі хвилі). Принцип дії подібний до принципу дії лазера і ґрунтується на вимушеному випромінюванні.

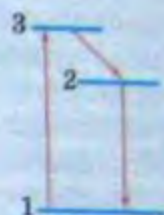
Розглянемо принцип дії рубінового лазера, схему якого наведено на мал. 290. Він складається з штучного рубінового стержня (окис алюмінію з домішками хрому), торці якого точно паралельні, гладенько відполіровані і покриті сріблом, причому лівий торець роблять непрозорим, а правий (вихідний) – напівпрозорим.

Світлове випромінювання лазера створюється атомами Хрому. Саме атоми Хрому в кристалі мають три енергетичні рівні (мал. 291), для збудження яких використовують спеціальну потужну газорозрядну лампу, що має форму спіралі і дає синьо-зелене світло.

При опроміненні світлом ксенонової лампи, атоми Хрому переходять з основного енергетичного рівня 1 на збуджений рівень 3. На рівні 3 електрон



Мал. 290. Схема рубінового лазера

Мал. 291.
Енергетичні
рівні атомів
Хрому

«живе» дуже мало, приблизно 10^{-8} с, після цього самовільно без випромінювання переходить до стану 2 (енергія при цьому передається кристалічній ґратці). На рівні 2 електрони можуть перебувати тривалий час (приблизно 10^{-3} с), чим забезпечується інверсний (перенаселений) стан. У цьому випадку кристал рубіну є активним середовищем. Якщо тепер декілька електронів перейдуть із стану 2 в стан 1, вони стимулюють вимушене випромінювання інших атомів і починається лазерна генерація.

Внаслідок переходів $2 \rightarrow 1$ випромінюються фотони у 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 вздовж осі кристала, багато разів відбивається від спеціальних дзеркал, які наносяться на торцях кристала і утворюють так званий резонатор. Хвиля індукованого випромінювання збуджених атомів хрому швидко підсилюється. Через один із торців стрижня (напівпрозорий) виходить потужний короточасний 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 в промисловості.

Лазер – це одне з найбільших досягнень сучасної фізики. За допомогою лазера дістають когерентні хвилі, які завдяки високому ступеню напрямленості можуть сфокусувати всю енергію лазерного випромінювання в пляму розмірами, близькими до довжини хвилі. Це приводить до того, що результуюче значення напруженості поля \vec{E} у світлі лазера настільки велике, що може відірвати електрон від атома, нагріти середовище до температури випаровування тощо.

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 чи 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, в 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 і напруженістю діючого світлового поля веде до виникнення нових оптичних ефектів і до істотних змін у перебігу вже відомих оптичних явищ.

Дайте відповіді на запитання

1. Яке випромінювання називають спонтанним і чому воно є некогерентним?
2. Яке випромінювання називають вимушеним (або індукованим)? Виконайте рисунок і поясніть процес утворення вимушеного випромінювання.
3. Поясніть принцип дії рубінового лазера.
4. Чим відрізняється лазерне випромінювання від випромінювань, створюваних іншими джерелами світла? Назвіть основні сфери застосування лазерів.

Найголовніше в розділі «Квантові властивості матерії»

Початок квантової теорії було закладено гіпотезою квантування М. Планка, згідно з якою енергія електромагнітного випромінювання квантується. Ця гіпотеза дозволила пояснити розподіл інтенсивності енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла.

А. Ейнштейн, створюючи теорію фотоефекту, запропонував вважати, що світло випромінюється та поглинається окремими квантами – фотонами. Фотонна теорія світла чудово пояснює ефект Комптона, тиск світла.

До числа перших моделей атома належать модель Томсона та планетарна (ядерна) модель Резерфорда–Бора. Щоб усунути протиріччя нестабільності атома Резерфорда–Бора та пояснити лінійчаті спектри атомів, Н. Бор сформулював *два постулати*: 1) електрони в атомах можуть рухатись лише на певних орбітах з квантованим моментом імпульсу (внаслідок чого значення радіуса орбіти та енергії електрона дискретні); 2) електрон у стаціонарному стані не випромінює, перехід електрона з вищого стану на нижчий супроводжується випромінюванням, енергія кванта випромінювання дорівнює різниці значень енергій між початковим і кінцевим станом. Момент імпульсу електрона в атомі квантується за правилом $L = \frac{n\hbar}{2\pi}$, де n – ціле число, яке називають квантовим числом.

Стан атома Гідрогену з $n = 1$ називають основним станом (його енергія $E_1 = -13,55$ еВ), більшим значенням n відповідають збуджені стани, енергія яких $E_n = -13,6 / n^2$ еВ.

Атоми переходять у збуджені стани внаслідок співударів з іншими атомами або поглинаючи квант випромінювання відповідної енергії. Повертаючись у основний стан, атом випромінює.

Перехід електрона в збудженому атомі з верхнього енергетичного рівня на нижній може відбуватись не лише *спонтанно*, а й *вимушено* – під впливом зовнішнього електромагнітного поля, у результаті чого отримується

монохроматичне і когерентне випромінювання. Джерела такого випромінювання – *квантові генератори* (лазери, мазери).

Чим більше електронів має атом, тим складніша схема його енергетичних рівнів і спектр. Спектри випромінювання речовини в атомарному стані (атомарні спектри) – *лінійчаті*. Молекулярні спектри – *смугасті*, оскільки енергія молекул складається із енергії електронів, енергії коливально-ці складові дискретні, і відповідно кількість можливих переходів із одного енергетичного стану в інший дуже велика. Це зумовлює велику кількість спектральних ліній, які утворюють смугу.

У рідких і твердих тілах, де енергія кожної частинки включає в себе й енергію її взаємодії з іншими частинками, спектри випромінювання *неперервні*.

Гіпотеза де Бройля про те, що електрон та інші частинки мають хвильові властивості, дозволила пояснити квантування борівських орбіт на основі корпускулярно-хвильового дуалізму: дозволені орбіти відповідають стоячим хвилям, довжина яких вкладається на орбіті ціле число раз.

Теорія Бора, яка поєднувала класичні та квантові ідеї не спроможна була пояснити всі особливості будови складних атомів (вона добре пояснювала лише особливості будови атома водню).

Е. Шредінгер та В. Гейзенберг розробили нову теорію, яка отримала назву *квантової механіки*, яка і нині є основною теорією явищ мікросвіту. Згідно з квантовою механікою стан електрона в атомі характеризується чотирма квантовими числами. Розподіл електронів по рівнях в багатоелектронних атомах підпорядковується *принципу Паулі*, згідно з яким два електрони в атомі не можуть мати однакові набори квантових чисел.

Оболонкова структура атомів приводить до періодичності властивостей хімічних елементів.

РОЗДІЛ 7

ФІЗИКА АТОМНОГО ЯДРА ТА
ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

На початку XX ст. завдяки дослідям Резерфорда вдалось встановити, що в центрі атома міститься крихітне за розмірами ядро, але в ньому зосереджена практично вся маса атома. Одночасно із створенням квантової теорії та спробами пояснити будову атома і його електронних оболонок розпочалось дослідження й атомного ядра. Вивчення властивостей атомних ядер, їх різних перетворень і ядерних (радіоактивних) випромінювань має надзвичайно велике наукове і практичне значення.

У цьому розділі ми розглянемо основи **ядерної фізики та фізики елементарних частинок**.

§ 78. Атомне ядро

Протонно-нейтронна модель атомного ядра. Історія ядерної фізики почала свій відлік з 1896 року. 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 XX ст. була досліджена структура атомного ядра і розроблена його модель, яку і по нині 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 забуваємо, 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 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 протонів Z в атомному ядрі визначає атомний номер і місце елемента в таблиці Менделєєва. Кожне атомне ядро характеризується зарядом Ze , масою m_a і масовим числом A , що дорівнює кількості нуклонів у ядрі, $A = N + Z$, де N – кількість нейтронів, Z – кількість протонів.

Позначаючи ядра хімічного елемента, вказується число протонів Z внизу і масове число A – вгорі. Наприклад, ядро Гелію позначається так: ${}^4_2\text{He}$.

Наближено розміри ядер вперше були визначені Резерфордом у досліді з розсіювання α -частинок. Зрозуміло, що, оскільки мікрочастинкам властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм, розміри ядра є дещо розмитими. Тим не менш, оцінити розміри ядра вдається під час розсіювання електронів на ядрах. Виявилось, що ядра мають приблизно сферичну форму, причому радіус ядер збільшується залежно від масового числа за формулою $r \approx (1,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}) A^{1/3}$. Розміри ядер за порядком величини становлять 10^{-14} – 10^{-15} м, у той час як для зовнішніх електронних оболонок атомів характерні розміри порядку 10^{-10} м.

У 1919 р. був побудований прилад, яким можна визначати маси атомів з точністю до 0,01%. Цей прилад, як ви уже знаєте (§ 25), називається мас-спектрограф. Маса ядер прийнято вимірювати в атомних одиницях маси (а.о.м.). Маса протона $m_p = 1,672617 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.о.м.}$, нейтрона $m_n = 1,674920 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.о.м.}$ (Згідно з формулою взаємозв'язку маси-енергії $E = mc^2$ маси ядер також вимірюють одиницями енергії – електрон-вольтами.)

В ядрі зосереджена майже вся (понад 99,95 %) маса атома. Таким чином, з точки зору атомних масштабів, ядра мають мізерно малі розміри і гігантську міцність. Це є причиною якісного розмежування явищ атомної та ядерної фізики. В атомній фізиці, розглядаючи переходи електронів на орбітах, ядро вважають зарядженою матеріальною точкою. У ядерній фізиці мають справу з такими великими енергіями, що майже завжди нехтують впливом процесів, що відбуваються в електронних оболонках.

Енергія зв'язку. Дослідженнями доведено, що загальна маса ядра завжди менша від суми мас частинок, з яких воно складається, тобто $M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n$ (m_p та m_n – маси протона та нейтрона у вільному стані).

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: чим більший дефект мас, тим більша енергія зв'язку і тим стійкіше ядро.



Енергія зв'язку ядра $E_{\text{зв}}$ визначається роботою, яку потрібно виконати, щоб розділити ядро на окремі частинки і віддалити їх одну від одної на таку відстань, на якій їхньою взаємодією можна нехтувати.

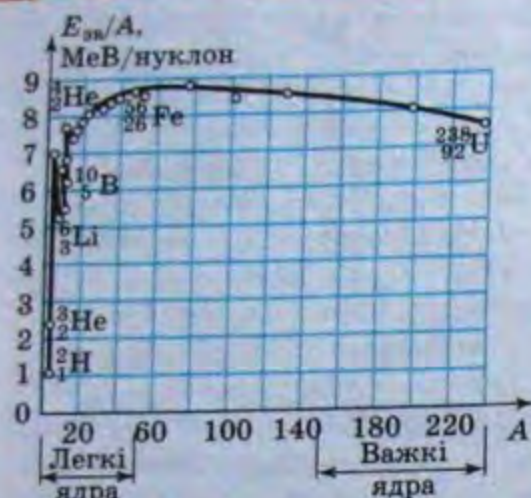
Згідно з законом взаємозв'язку маси-енергії $E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$. Оскільки енергію зв'язку звичайно виражають у МеВ, а дефект мас у а.о.м. і, враховуючи, що $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2$ та $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, для обчислень можна користуватись формулою $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot 931,5 \text{ МеВ/а.о.м.}$

Якби не було дефекту маси, то ядро розпалося б на нуклони самотійно, без виконання роботи. Для забезпечення стабільності ядра його маса має бути меншою за суму мас його нуклонів.

Важливу інформацію про властивості ядер містить залежність енергії зв'язку від масового числа A .



Питома енергія зв'язку називають енергію зв'язку, яка припадає на один нуклон.



Мал. 292. Крива залежності питомої енергії зв'язку від атомного числа для стабільних ядер

На мал. 292 наведено криву залежності питомої енергії зв'язку від атомного числа для стабільних ядер. Як видно з малюнка, питома енергія зв'язку спочатку зростає із збільшенням масового числа, досягає насичення (близько 8 MeB/нуклон для $A \approx 15$) і для $A > 60$ крива повільно спадає. Питома енергія зв'язку має максимум (приблизно 8,8 MeB) для $A \approx 56$. Максимум кривої відповідає найстабільнішим ядрам.

Сильна взаємодія. Ядра атомів можна аналізувати не лише з точки зору енергії, але й з точки зору тих сил, які утримують нуклони в ядрі. Сили, які діють між ядерними частинками і зумовлюють утворення атомних ядер мають особливий характер. Оскільки

ці сили перевищують електромагнітну кулонівську силу відштовхування, яка, в свою чергу, перевищує гравітаційну силу притягання, то ці сили отримали назву *сильних (ядерних) сил*. Ядерні сили належать до нового типу взаємодії – *сильної взаємодії*.

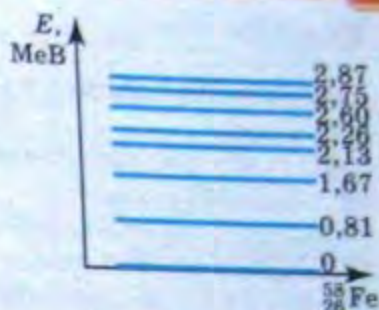
Дослідження показали, що ядерні сили притягання діють між будь-якими двома нуклонами на відстанях між центрами частинок близько $2 \cdot 10^{-15}$ м і різко зменшуються із збільшенням відстані; на відстанях, більших за $3 \cdot 10^{-15}$ м, вони вже практично дорівнюють нулю. Коли ж нуклони, зіткнувшись, зближаються до відстані $0,5 \cdot 10^{-15}$ м, ядерні сили виявляють себе як 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 зв'язані 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 чи 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 їх властивості.

Але чи завжди процес зіткнення ядра з іншим ядром чи частинкою буде супроводжуватись вильотом нуклона? Чи не може атомне ядро поглинути енергію, одержану при зіткненні, 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. Їх результати дуже схожі на результати дослідів Франка і Герца щодо вивчення зіткнення електронів з атомами (§ 71). Виявляється, з поступовим збільшенням енергії протонів спочатку спостерігаються тільки пружні зіткнення з атомними ядрами, кінетична енергія не перетворюється в інші види енергії, а лише перерозподіляється між протоном і атомним ядром як єдиною 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 строго певним набором «порцій» енергії, які воно може сприйняти. Пояснити властивості ядра у цьому випадку можна за допомогою *оболонкової моделі*. Згідно з цією моделлю нуклони в ядрі не перемішані як завгодно, а, подібно до електронів у атомі, розміщуються зв'язаними групами, заповнюючи дозволенні ядерні оболонки.



Мал. 293. Енергетичні рівні ядра атома Феруму

Таким чином, квантування енергії та ряду інших параметрів є властивістю не лише атомів, а й атомних ядер. Проте між енергетичними діаграмами атомів та атомних ядер є суттєві відмінності. На мал. 293 зображено енергетичну діаграму ядра ізотопу Феруму $^{56}_{26}\text{Fe}$. Зверніть увагу, що енергія, потрібна для переведення атомного ядра у збуджений стан, порядку мегаелектронвольт, у той час як для переведення у збуджений стан атома достатньо кількох електронвольт.

Самодовільний перехід атомного ядра із 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.

? Дайте відповіді на запитання

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_3Li та ^7_4Be .
3. Нуклони в ядрі мають кінетичну і потенціальну енергії. Яка за модулем сумарна енергія нуклонів більша? Чому?

Приклади розв'язування задач

Задача. Розрахувати енергію зв'язку ядра атома Дейтерію. Відповідь навести в електрон-вольтах. Використати необхідні довідкові дані з таблиць мас ізотопів.

Розв'язання

Дано:

$$m_p = 1,00728 \text{ а. о. м.}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ а. о. м.}$$

$$M_{\text{ДН}} = 2,01410 \text{ а. о. м.}$$

$$m_e = 0,00055 \text{ а. о. м.}$$

$$E_{\text{зв}} = ?$$

Енергія зв'язку ядра визначається як $E_{\text{зв}} = \Delta m c^2$, 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 із таблиць відомості про маси протона m_p , нейтрона m_n та атома Дейтерію $M_{\text{ДН}}$. Для знаходження дефекту маси ядра Дейтерію Δm необхідно врахувати з маси атома дейтерію масу електрона, що утворює його оболонку,

$$\Delta m = m_p + m_n - m_{\text{ДН}} = m_p + m_n - (M_{\text{ДН}} - m_e).$$

Виконавши розрахунки, отримуємо $\Delta m = 0,00239 \text{ а. о. м.}$

Оскільки $1 \text{ а. о. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2$ та $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, то для обчислень можна користуватись формулою: $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot 931,5 \text{ МеВ/а. о. м.}$

$$E_{\text{зв}} = 0,00239 \text{ а. о. м.} \cdot 931,5 \text{ МеВ/а. о. м.} = 2,23 \text{ МеВ.}$$

Відповідь: 2,23 МеВ.

Вправа 36

1. Обчислити енергію зв'язку ядра Тритію ${}^3_1\text{H}$ (в МеВ).
2. Визначити енергію зв'язку ядра Алюмінію ${}^{27}_{13}\text{Al}$.
3. Визначити 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 $R_1 = 1,224 \text{ м}$ і $R_2 = 1,232 \text{ м}$. Визначити відношення мас ізотопів. Яка маса m_1 йонів легкого ізотопу (в атомних одиницях маси), якщо маса йонів важкого ізотопу $m_2 = 238 \text{ а. о. м.}$?

§ 79. Радіоактивність

Ізотопи. Природна і штучна радіоактивність. Одним із найбільш переконливих доказів складної будови атомів стало відкрите у 1896 р. французьким фізиком А. Беккерелем явище природної радіоактивності. Вивчення цього явища привело до важливого відкриття, що стосується природи атомних ядер. У результаті спостереження великої кількості радіоактивних перетворень поступово з'ясувалось, що є речовини, які мають різні радіоактивні властивості (тобто розпадаються по-різному), але цілком однакові за хімічними властивостями. На цій підставі Ф. Содді у 1911 р. висловив припущення про можливість існування елементів з однаковими хімічними властивостями, але різних за іншими властивостями (зокрема щодо радіоактивності). Ці елементи треба ставити в одну й ту саму клітку періодичної системи Менделєєва. Содді назвав такі елементи *ізотопами* (тобто такими, що займають однакові місця).

Атомні ядра з однаковим Z , але різними кількостями нейтронів N називаються *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, її вміст становить $1/4500$ частину.

${}^3_1\text{H} = {}^3_1\text{T}$ – надважкий водень – Тритій, отримують штучно, він радіоактивний.

Існування ізотопів доводить, що заряд атомного ядра і, отже, будова електронної оболонки визначають не всі властивості атома, а лише його хімічні, наприклад розміри. Маса ж атома і його радіоактивні властивості не залежать від порядкового номера в таблиці Менделєєва.

З явищем радіоактивності ви вже частково ознайомились в курсі фізики 9 класу. Пригадаємо його.



Радіоактивність – це спонтанне перетворення нестійких ізотопів хімічного елемента в ізотопи іншого хімічного елемента, яке супроводжується випусканням певних частинок.

Радіоактивний розпад ядер (радіоактивність) є властивістю самого атомного ядра; на швидкість його протікання не впливають зовнішні фактори (температура, тиск, електричне або магнітне поле тощо).

Радіоактивність нестабільних ізотопів, що зустрічаються в природі називається *природною*. *Штучна* радіоактивність – це радіоактивність нестабільних ізотопів, отриманих в лабораторних умовах і як продукти штучних перетворень атомних ядер.

Види радіоактивного випромінювання. Дослідження Беккереля, Резерфорда, П'єра Кюрі, Марії Склодовської-Кюрі та інших учених показали, що радіоактивне випромінювання буває трьох видів. Їх умовно було названо першими трьома літерами грецького алфавіту – α -, β -, γ -випромінювання.


Дослідження методом відхилення в магнітному полі, поставлені М. Склодовською-Кюрі, а згодом і Е. Резерфордом, показали, що радіоактивне випромінювання має різний електричний заряд: α -промені – позитивний, β – негативний, а γ -промені електрично нейтральні. Детальні дослідження радіоактивного випромінювання дали змогу з'ясувати його природу.

α -частинки – це ядра атома Гелію (2 протони та 2 нейтрони). Характеристичною величиною α -частинок є їх енергія (від 4 до 9 MeV). Різні радіоактивні речовини випромінюють α -частинки різної енергії, однак усі α -частинки, випущені даною радіоактивною речовиною, мають цілком певну енергію. Найчастіше радіоактивна речовина випромінює не одну, а кілька груп α -частинок з цілком певним значенням початкової енергії. Пролітаючи крізь речовину, α -частинки поступово втрачають енергію, іонізуючи молекули речовини, і врешті, зупиняються. У повітрі за нормальних умов α -частинки утворюють в середньому приблизно 50 000 пар іонів на 1 см шляху. Довжина їх вільного пробігу у повітрі від 2 до 12 см, у твердих речовинах і рідинах – кілька мікрометрів. Тому α -частинки легко затримуються аркушем паперу.

β -частинки – це потік швидких електронів. Пригадайте, у рентгенівських трубках також використовується потік електронів (катодне проміння). Проте β -промені відрізняються від катодних значно більшою енергією. Швидкості β -електронів можуть наближатись до швидкості світла та ся-

гати 0,999 с. На відміну від α -частинок, β -електрони даної радіоактивної речовини мають не одне значення енергії, а можуть мати енергію від 0 до деякого максимального значення (характерного для даного хімічного елемента). Внаслідок відносно малої маси β -електрони розсіюються в речовині, їх траєкторії мають покручений вигляд, для них не існує певної довжини вільного пробігу. Щоб затримати β -частинки треба шар металу товщиною близько 3 мм.

γ -промені, як було з'ясовано у попередньому параграфі, – це короткохвильовий вид електромагнітного випромінювання, який виникає внаслідок переходу ядра із збудженого стану в основний. За допомогою кристалічних ґраток вдалось спостерігати дифракцію гамма-променів і визначити їх довжину хвилі. Вона виявилась порядку 10^{-10} м, тобто в десятки разів меншою, ніж у жорстких рентгенівських променів, що зумовлює високу проникну здатність γ -променів. Енергія γ -променів становить від 0,02 до 2,6 МеВ. Для їх поглинання потрібен шар свинцю товщиною понад 20 см.

 **Альфа- і 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 -проміння, як правило, не є самостійним типом радіоактивності, воно супроводжує α - і β -розпади. Розглянемо детальніше види радіоактивного розпаду.

У процесах радіоактивного розпаду всіх видів виконуються класичні закони збереження: енергії, імпульсу, моменту імпульсу та електричного заряду. Крім того виконується й 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 в інший. Ядро, що утворюється у результаті α -розпаду буде відрізнатись від вихідного тим, що воно втрачає 2 протони і 2 нейтрони. Наприклад, при α -розпаді радію ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ утворюється елемент, порядковий номер якого $Z = 88 - 2 = 86$ і масове число $A = 226 - 4 = 222$. Отже, у результаті утворюється радон, ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$.

Загальне рівняння α -розпаду записують у вигляді ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$.

α -розпад зумовлений тим, що сильна взаємодія не в змозі забезпечити стабільності дуже важких ядер. Внаслідок того, що сильна взаємодія короткодійна, вона зв'язує лише сусідні нуклони. Кулонівська ж сила відштовхування діє в об'ємі всього ядра.

Нестабільність ядра можна охарактеризувати й енергією зв'язку, у нашому випадку вона недостатня, щоб ядро було стабільним. Маса «вихідного» ядра більша за сумарну масу утвореного ядра та α -частинки. Різниця мас, згідно із законом взаємозв'язку маси-енергії, виділяється, в основному, у вигляді кінетичної енергії α -частинки.

Наприклад, оцінимо кінетичну енергію α -частинки, яка випромінюється ядром урану ${}^{232}_{92}\text{U}$. У результаті α -розпаду утворюється ядро торію ${}^{228}_{90}\text{Th}$, ${}^{232}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{228}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$. Використовуючи табличні значення мас ядер, визначимо дефект маси, який виникає в результаті розпаду і виділяється у вигляді

кінетичної енергії, що перерозподіляється між продуктами розпаду. $232,03714 \text{ а.о.м.} - (228,02873 \text{ а.о.м.} + 4,002603 \text{ а.о.м.}) = 0,00581 \text{ а.о.м.}$

Оскільки $1 \text{ а.о.м.} = 931,5 \text{ МеВ}$, то кінетична енергія приблизно дорівнює $5,4 \text{ МеВ}$. Використовуючи закон збереження імпульсу, можна показати, що кінетична енергія α -частинки дорівнює приблизно $5,3 \text{ МеВ}$, ядро торію отримує віддачу у протилежному напрямі і має кінетичну енергію приблизно $0,1 \text{ МеВ}$.

Може виникнути запитання, чому ядро випромінює саме α -частинку (комбінацію 2 протонів та 2 нейтронів), а не окремо протони і нейтрони? Справа в тому, що в такій комбінації енергія зв'язку утвореного ядра досить велика.

Якщо механізм α -розпаду дістав просте і природне пояснення, то механізм β -розпаду довгий час залишався не розгаданим. Дійсно, звідки при β -розпаді беруться електрони, адже їх немає у складі ядра.

Зрозуміло, що β -частинка не є електроном оболонки атома, тому що видалення електрона з оболонки є йонізацією атома, в результаті якої не відбувається зміни хімічної природи атома. Таким чином, оскільки β -частинка не є складовою ядра і не є електроном, вирваним з оболонки атома, можна припустити, що β -електрон «народжується» у 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 із випусканням β -електрона. Дійсно самодовільний процес перетворення протона у нейтрон має супроводжуватись виділенням енергії (коли б цього не було, то такий процес не міг відбутись 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 величину від 0 до деякого максимального значення E_m . Неперервний характер спектрів β -випромінювання виявився несподіваним, адже це начебто означало не виконання закону збереження енергії. Як показали детальніші дослідження, закон збереження імпульсу та моменту імпульсу також не виконувались при β -розпаді. Для подолання цих труднощів швейцарський фізик В.Паулі у 1931 р. запропонував гіпотезу, згідно з якою при β -розпаді з ядра вилітає ще одна частинка, яка не має електричного заряду і маса якої надзвичайно мала. Гіпотетична частинка могла б мати відповідну енергію, імпульс, що і забезпечило б виконання законів збереження. Експериментально виявити цю частинку вдалось лише у 50-х роках ХХ ст.

Згодом були відкриті й інші процеси перетворення частинок та виявлені нові частинки (та їх античастинки), що зумовило появу нового напрямку у фізиці – *фізики елементарних частинок*. Детальніше про це у наступних параграфах.

Щодо процесів β -розпаду, то встановлено їх два види – β^+ - та β^- -розпади. У β^- -розпаді один з нейтронів всередині ядра перетворюється на протон,

електрон і антинейтрино, ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}$. Електрон і антинейтрино вилітають з ядра, а нуклони, які залишились, утворюють нове ядро.

Таким чином, загальне рівняння β -розпаду (природного) записується у вигляді ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}$.

У β^+ -розпаді протон перетворюється в нейтрон і одночасно випускаються позитрон і нейтрино ${}_1^1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_{+1}\text{e} + \nu$. 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 звичайно виникає слідом за α - і β -розпадами, оскільки атомне ядро у результаті розпадів перебуває у збудженому стані і, переходячи на нижчий енергетичний рівень (у нормальний стан), випромінює γ -квант.

? Дайте відповіді на запитання

1. Що є причиною радіоактивного випромінювання? Яка природа α -, β -, γ -випромінювання?
2. Альфа-частинку поглинула речовина. Де поділась α -частинка?
3. Певний радіоактивний елемент випускає тільки один тип частинок або α -, або β -частинки. Чому ж тоді радіоактивному елементу (наприклад Радію) властиві всі три види випромінювань: α , β , γ ?
4. Чому під час радіоактивного розпаду з ядра атома вилітає саме α -частинка, а не окремо один або два протони чи нейтрони?
5. Чому виникає γ -квант в ядрі атома в процесі його радіоактивного розпаду?
6. Внаслідок радіоактивного розпаду ядро U^{238} перетворюється в ядро Pb^{206} . Скільки α - і β -розпадів при цьому відбувається?
7. Який закон електродинаміки постулює той факт, що в разі перетворення нейтрона на протон виникає саме електрон, що вилучається з ядра як β -частинка?

§ 80. Закон радіоактивного розпаду

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, що розпалось), що відбувається протягом малого інтервалу часу Δt , пропорційна цьому інтервалу часу Δt та повній кількості ядер N , $\Delta N = -\lambda N \Delta t$.

Коефіцієнт пропорційності λ називається *сталою розпаду*. Для кожного ізотопу стала розпаду має своє значення. Чим більша λ , тим більша швидкість розпаду (активність ізотопу). Знак «мінус» вказує 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 у диференціальній формі:

$$dN = -\lambda N dt \text{ або } \frac{dN}{N} = -\lambda dt.$$

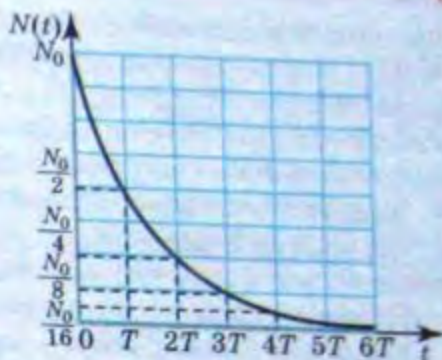
Після інтегрування $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt$,

де N_0 – початкова кількість ядер при $t = 0$, N – кількість ядер, що не розпалась на момент часу t , матиме $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$ або

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Отриманий вираз і є **законом радіоактивного розпаду**.

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 встановлює, яка в середньому кількість атомів розпадеться за даний інтервал часу. Але завжди бувають неминучі відхилення від середнього значення, і чим менше атомів у препараті, тим більші ці відхилення.



Мал. 294. Графічне відображення закону радіоактивного розпаду

Швидкість розпаду (або загальна кількість розпадів за одиницю часу) називається **активністю ізотопу**

$$A = -\lambda N = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

Одиниця активності – бекерель, $[A] = 1 \text{ Бк}$.

1 Бк дорівнює активності джерела, за якої за 1 с відбувається один акт розпаду. Позасистемна одиниця – кюрі, $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Як видно, активність A ізотопу зменшується з часом за експонентою з такою ж швидкістю, як і кількість ядер, що не розпалась, N (мал. 294).

Період піврозпаду. Швидкість розпаду характеризують також **періодом піврозпаду T** .

Період піврозпаду T – це інтервал часу, за який розпадається половина радіоактивних ядер.

Періоди піврозпаду для різних ізотопів досить 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. Чим більший період піврозпаду, тим менша стала розпаду. Точний зв'язок сталої розпаду з пері-

одом піврозпаду має вигляд $T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$.

Отримання і застосування радіонуклідів. Радіоактивні ізотопи різних хімічних елементів (як природні, так і отримані у процесі штучної радіоактивності) мають свої галузі застосування. Основою їх практичного використання є такі їхні властивості:

- будь-який радіоактивний ізотоп є «міченим» атомом відповідного елемента, тобто атомом, який за фізичними і хімічними властивостями не від-

різняється від звичайного атома, однак поведінку якого можна спостерігати за його радіоактивним випромінюванням, наприклад, за допомогою лічильника Гейгера-Мюллера;

- ♦ будь-яке радіоактивне випромінювання має певну проникну здатність, тобто властивість поширюватись і поглинатись в 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 дізнатись про швидкість обміну речовин в тканинах живого організму, про швидкість руху крові в судинах або нафтопродуктів трубопроводами тощо. У машинобудуванні мічені атоми використовують для вивчення характеру зношування деталей машин залежно від режиму їх роботи і властивостей змащувальних речовин. У медицині за допомогою мічених атомів проводять діагностику деяких захворювань, вивчають вміст тих чи інших речовин в 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.

Проникна здатність радіоактивних речовин (найчастіше гамма-променів) використовується у приладах, призначених для вимірювання товщини, густини речовини, рівня рідин чи сипучих тіл в закритих ємкостях. Вона є основою принципу дії лічильників, дефектоскопів, гамма-релейних пристроїв.

Наведена радіоактивність (зокрема опромінення нейтронами) використовується для дослідження вмісту речовини. Деякі з атомів стабільних ізотопів досліджуваної речовини, захопивши нейтрони, перетворюються в радіоактивні ізотопи. За характером наведеного радіоактивного випромінювання можна судити про наявність у речовині тих чи інших домішок. Особливістю методу є те, що він дає змогу виявити домішки у дуже малих концентраціях. Цей метод використовують для встановлення віку археологічних об'єктів (за вмістом у них радіоактивного ізотопу Карбону-14).

? Дайте відповіді на запитання

1. Чим характеризується швидкість розпаду радіоактивного ізотопу?
2. Чому радіоактивні елементи з порівняно невеликим періодом піврозпаду T (наприклад, радій) не зникли за час існування Землі, адже ядра їх атомів весь час перетворюються в інші ядра.
3. Коли відбувається більша кількість n розпадів за секунду в заданій масі радіоактивного препарату – на початку чи наприкінці деякого інтервалу часу τ ?

Приклади розв'язування задач

Задача. Деяка маса радіоактивного Радію містить $25 \cdot 10^6$ атомів. Скільки атомів розпадеться за добу, якщо період піврозпаду Радію 1620 років?

Дано:

$$N_0 = 25 \cdot 10^6$$

$$t = 1 \text{ доба}$$

$$T = 1620 \cdot 365 \text{ діб}$$

$$\Delta N = ?$$

Розв'язання

Оскільки час t малий порівняно з періодом піврозпаду, то можна скористатись наближеною формулою для визначення

$$\text{кількості ядер, що розпались, } \Delta N = \frac{0,693}{T} N_0 t.$$

$$\Delta N = \frac{0,693 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 1 \text{ доба}}{1620 \cdot 365 \text{ діб}} = 30.$$

Відповідь: $\Delta N = 30$.

Вправа 37

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 $^{54}_{24}\text{Cr}$, якщо період його піврозпаду 27,8 діб?
3. Було встановлено, що в радіоактивному препараті відбувається $6,4 \cdot 10^8$ розпадів ядер за хвилину. Визначити активність цього препарату в беккерелях.
4. За який час в препараті з постійною активністю 8,2 МБк розпадеться $25 \cdot 10^8$ ядер?
5. Визначити період піврозпаду Радону, якщо за 1 добу з мільйона атомів розпадається 175000 атомів.
6. Радіоактивний Натрій-24 розпадається, викидаючи β -частинки. Період піврозпаду Натрію 14,8 год. Обчислити кількість атомів, що розпадається в 1 мг даного радіоактивного зразка за 10 год.
7. Маємо урановий препарат з активністю 20,7 МБк. Визначити в препараті масу ізотопу $^{235}_{92}\text{U}$ з періодом піврозпаду $7,1 \cdot 10^8$ років.
8. Під час археологічних розкопок знайдено кусок деревини, в якій вміст радіоактивних ядер ізотопу Карбону C^{14} на 1,5% менший, ніж у свіжо зрубаних деревині. Період піврозпаду ізотопу Карбону становить 5579 років. Встановити, скільки років тому була зрубана знайдена деревина.
9. Зразок, що містить 1 мг Полонію-210, вміщено в калориметр з теплоємністю 8 Дж/К. У результаті α -розпаду полоній перетворюється на Плюмбум-206. На скільки підніметься температура в калориметрі за 1 год? Період піврозпаду Полонію 138 діб. Вважайте, що α -частинки не вилітають за межі калориметра.

§ 81. Ядерні реакції

Ядерні реакції. Вивчення природної радіоактивності показало, що перетворення одного хімічного елемента в інший зумовлено внутрішньоядерними процесами, тобто змінами, які відбуваються всередині атомних ядер. У зв'язку з цим було здійснено спроби штучного перетворення одних хімічних елементів в інші шляхом 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 внаслідок їх взаємодії з елементарними частинками або з іншими ядрами.

Як видно з визначення, ядерні реакції спричинюються зовнішніми причинами. Частинки високої енергії (α , β , n , p) зіткнувшись з ядром можуть викликати різноманітні перетворення.

У 1919 р. Е. Резерфорд здійснив першу ядерну реакцію, бомбардуючи азотну мішень α -частинками, і відкрив протон: ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p}$.

Відкриття Резерфорда привело до створення нової галузі наукових досліджень – штучного перетворення хімічних елементів, – яка і сьогодні має важливе наукове і 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 Д. Чедвік відкрив нейтрон: ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$, а Жоліо-Кюрі, здійснивши реакцію ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$, вперше отримав штучний радіоактивний ізотоп фосфору ${}^{30}_{15}\text{P}$, який є джерелом позитронів. Так був відкритий позитрон ${}^+_0\text{e}$.

Енріко Фермі показав, що нейтрони є придатнішими для ініціювання ядерних реакцій, оскільки вони не мають електричного заряду і 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 з 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 і атомної електростанції, і 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:

Реакція захоплення. Ядро поглинає бомбардуючу частинку і перетворюється в нове, масивніше ядро. Прикладом може бути реакція ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$, в якій протон поглинається ядром Бору і виникає ядро Карбону. Звичайно в реакціях такого типу нове ядро утворюється в збудженому стані і, випромінювавши один чи кілька γ -квантів, переходить у нормальний (основний) стан.

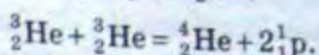
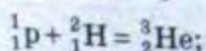
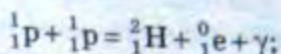
Поглинання ядром бомбардуючої частинки і випускання новоутвореним ядром однієї або кількох частинок. Прикладом такої реакції може бути реакція ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$. Тут Дейтрон поглинається ядром Берилію, а проміжне ядро, що утворилось, випромінює нейтрон і перетворюється в ядро атома Бору.

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 в два етапи. Спочатку вилітає одна α -частинка ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$, 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.

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 із Дейтерію і Тритію, ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$.

Термоядерні реакції відіграють вирішальну роль в еволюції Всесвіту, зокрема шляхом термоядерних реакцій сформувалися існуючі нині хімічні елементи. Енергія випромінювання Сонця і зір – це енергія термоядерних реакцій, що відбуваються в їх 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, числа нуклонів). На основі закону збереження і 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 і після реакції.

$E_{\text{вих}} = \Delta mc^2$, де m – дефект маси, який можна розрахувати як різницю між сумою мас спокою ядер і частинок до і після ядерної реакції. Якщо сумарна маса продуктів реакції менша за суму 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.



Дайте відповіді на запитання

1. Що таке ядерна реакція? енергетичний вихід ядерної реакції?
2. У чому полягає основна відмінність ядерних реакцій на нейтронах?
3. Які бувають типи ядерних реакцій?
4. Написати рівняння ядерної реакції, яка відбувається під час бомбардування Алюмінію (${}^{27}_{13}\text{Al}$) α -частинками і супроводжується вибиванням протона.

Приклади розв'язування задач

Задача. Обчислити енергетичний вихід ядерної реакції ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$.

Дано:

$$m_{\text{ON}} = 14,00307 \text{ а.о.м}$$

$$m_{\text{OHe}} = 4,00260 \text{ а.о.м}$$

$$m_{\text{OO}} = 16,99991 \text{ а.о.м}$$

$$m_{\text{OH}} = 1,00783 \text{ а.о.м}$$

$$E_{\text{вих}} = ?$$

Розв'язання

Енергетичний вихід ядерної реакції $E_{\text{вих}} = \Delta mc^2$ (в Дж)

$$\text{або } E_{\text{вих}} = \Delta m_{\text{а.о.м}} \cdot 931 \frac{\text{МеВ}}{\text{а.о.м.}} \quad (\text{в МеВ}).$$

$$\Delta m = m_{\text{ON}} + m_{\text{OHe}} - m_{\text{OO}} - m_{\text{OH}}$$

Після підстановки даних отримуємо $\Delta m = -0,0014$ а.о.м.

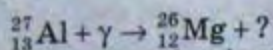
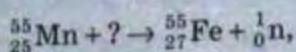
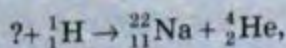
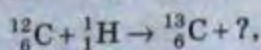
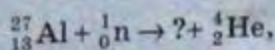
$$E_{\text{вих}} = -0,0014 \text{ а.о.м} \cdot 931 \text{ MeV/а.о.м} = -1,303 \text{ MeV}.$$

Знак мінус вказує на те, що енергія у даній реакції поглинається.

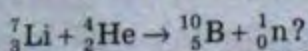
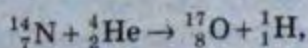
Відповідь: $-1,303 \text{ MeV}$.

Вправа 38

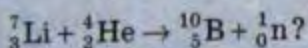
1. Дописати позначення, яких бракує в рівняннях таких ядерних реакцій:



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 MeV налітає на ядро ${}_3^7\text{Li}$, що перебуває у спокої. У результаті реакції вилітають дві α -частинки з однаковими енергіями. Визначити кут між напрямками руху α -частинок.

6. Визначити мінімальну енергію і частоту гамма-кванта, здатного «розбити» ядро Дейтерію на протон і нейтрон.

§ 82. Ланцюгова реакція поділу ядер урану

Механізм поділу важких ядер. У лабораторіях багатьох країн світу у 30-х роках XX ст. проводились дослідження із бомбардування природного Урану нейтронами. У 1938 р. німецькі вчені О. Хан і Ф. Штрассман під час аналізу хімічно чистого Урану, опроміненого нейтронами, виявили Барій та Лантан, поява яких виявилась несподіваною. Англійський фізик О. Фріш та австрійський фізик Л. Мейтнер у 1939 р. теоретично обґрунтували реакції поділу Урану. Вони пояснили появу нових елементів, як результат поділу ядра Урану на дві частини (осколки). Після захоплення нейтрона ядром атома Урану в ньому відбувається перегрупування нуклонів. Ядро сильно деформується і розпадається на два приблизно однакових ядра (мал. 295). При цьому нуклони вихідного ядра розподіляються між новими ядрами з виконанням законів збереження зарядів і масових чисел, а кілька нейтронів, що виявилися зайвими, вилітають окремо.

Поділ ядра можливий тому, що маса важкого ядра більша за суму мас осколків, які утворилися. У результаті виділяється енергія, яка еквівалентна зменшенню маси продуктів.

Можливість поділу важких ядер і екзотермічний характер цих реакцій можна також пояснити за допомогою графіка залежності питомої енергії зв'язку від масового числа A (мал. 292, § 78). Питома енергія зв'язку ядер атомів, що займають останні місця у періодичній системі ($A \approx 200$), приблизно на 1 MeV менша від питомої енергії зв'язку в ядрах елементів, що займають середні місця періодичної системи ($A \approx 100$). Тому процес поділу важких ядер на ядра елементів середньої частини періодичної системи є «енергетично вигідним». Оскільки в кожному акті поділу беруть участь понад 200 нуклонів, загальна енергія, яка виділяється в акті поділу одного важкого ядра, становить близько 200 MeV. Ні в якій іншій ядерній реакції (не зв'язаній з поділом) така кількість енергії не виділяється. Причому більша частина цієї енергії (168 MeV) припадає на кінетичну енергію осколків.

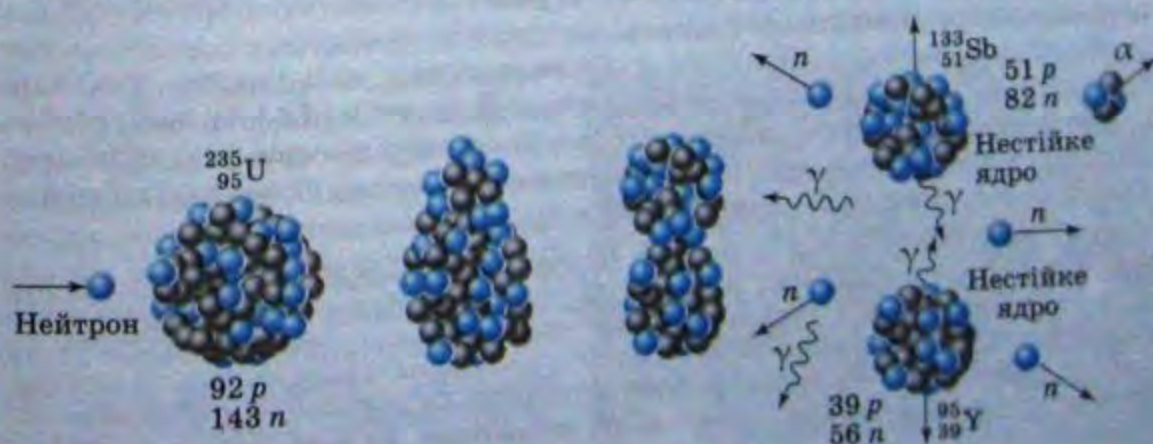
Ланцюгова ядерна реакція. Для перебігу реакцій поділу Урану надзвичайно важливим є викидання 2–3 так званих вторинних нейтронів. Енергія цих нейтронів лежить в широких межах: від дуже малих значень – порядку 1 eV і менших – до приблизно 10 MeV. Нейтрони, що мають енергію порядку 1 MeV і меншу, називають тепловими нейтронами, оскільки їх енергія відповідає енергії теплового руху при нормальній температурі. Нейтрони з енергією понад 1,5 MeV називають швидкими. Ці вторинні нейтрони можуть самі зумовлювати поділ інших ядер – може виникнути так звана ланцюгова реакція поділу, яка підтримується без зовнішнього опромінювання Урану нейтронами.

Ланцюгова ядерна реакція – ядерна реакція, в якій частинки, що її спричиняють, утворюються як продукт цієї ж реакції.

В реальних умовах не всі нейтрони, які утворюються під час поділу, беруть участь у поділі інших ядер. Частина з них захоплюється ядрами сторонніх атомів, які не діляться, інші вилітають з куска Урану назовні.

Відношення кількості актів поділу, спричинених вторинними нейтронами, до кількості поділів, в яких вони самі утворились, називається **ефективним коефіцієнтом розмноження нейтронів K** .

(Для Урану-235 він дорівнював би 2,5, якби всі вторинні нейтрони взяли участь у поділі нових ядер.)



Мал. 295. Схема поділу ядра Урану

Доля реакції поділу принципово залежить від значення K . Якщо $K < 1$, кожне нове покоління нейтронів спричинює дедалі меншу кількість поділів і реакція без зовнішнього джерела нейтронів швидко згасає;

$K = 1$, кількість поділів підтримується на сталому рівні – такий режим самопідтримуваної ланцюгової реакції називається стаціонарним і використовується в ядерних реакторах;

$K > 1$, кожне нове покоління нейтронів спричинює дедалі більшу кількість поділів, ланцюгова реакція лавиноподібно наростає і має характер вибуху.

Значення коефіцієнта розмноження залежить від ряду факторів, зокрема від природи і кількості речовини, яка ділиться, від геометричної форми об'єму, який вона займає. Для однієї й тієї самої кількості даної речовини коефіцієнт K буде найбільшим за кулястої форми об'єму, оскільки в цьому випадку втрата вторинних нейтронів через поверхню об'єму найменша.

Для кожного типу ядерного пального існує *критична маса*, тобто маса, за якої підтримується ланцюгова реакція поділу з $K = 1$. Так, для чистого Урану-235 критична маса становить кілька десятків кілограмів. Перевищення критичної маси в одному шматку призводить до ядерного вибуху.

Практичне здійснення ядерної ланцюгової реакції вимагає подолання значних труднощів. Справа в тому, що природний Уран є сумішшю двох ізотопів – Урану-235 в кількості 0,7% і Урану-238 (99,3%). Ці ізотопи під дією нейтронів поведуть себе по-різному. Ядра Урану-235 діляться нейтронами будь-яких енергій, однак особливо добре повільними (тепловими) нейтронами. Ядра ж Урану-238 діляться лише дуже швидкими нейтронами, енергія яких понад 1 МеВ. Нейтрони меншої енергії поглинаються ядрами Урану-238 без наступного їх поділу. У результаті утворюється нестабільне ядро Уран-239 (період піврозпаду якого 25 хв). Випускаючи електрон, антинейтрино і фотон, це ядро перетворюється в ядро трансуранового елемента Нептунію, який після β -розпаду перетворюється у Плутоній (період піврозпаду якого 24 400 років). Ядерну реакцію одержання Плутонію (як ядерного пального) широко використовують у сучасних ядерних реакторах-розмножувачах.

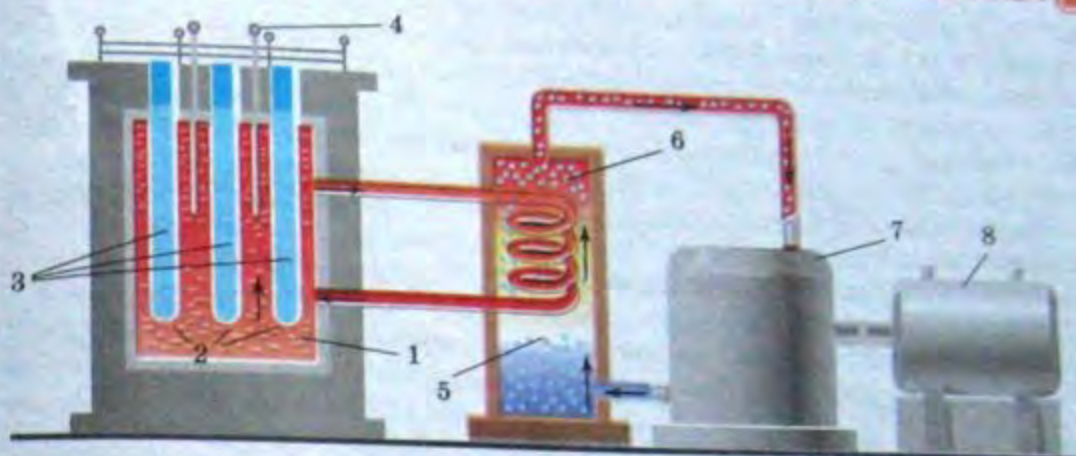
Така істотна відмінність реакцій поділу різних ізотопів Урану робить неможливим здійснення ланцюгової ядерної реакції на природному урані. Цю трудність долають шляхом збагачення природного урану ізотопами Урану-235 до 5% та сповільненням нейтронів, щоб істотно зменшити їх поглинання ядрами Урану-238.

Ядерний реактор. Людство зробило істотний крок уперед, освоївши ядерну енергію. У 1942 р. під керівництвом Е. Фермі в США було збудовано перший ядерний реактор. Перший у Європі ядерний реактор було збудовано в 1946 р. під керівництвом І. В. Курчатова в Обнінську (Росія). Нині у світі налічується понад 1000 ядерних енергетичних установок.



Ядерний реактор – пристрій, в якому відбувається керована ланцюгова ядерна реакція, що супроводжується виділенням величезної кількості енергії.

Принципову схему атомної електростанції на повільних нейтронах, де сповільнювачем і теплоносієм є вода, зображено на мал. 296. Головними частинами електростанції є ядерний реактор, парогенератор, турбіна, електрогенератор, конденсатор.



Мал. 296. Принципова схема атомної електростанції

Основними частинами ядерного реактора є активна зона (де міститься ядерне паливо, відбувається ланцюгова реакція ядерного поділу і виділяється енергія), відбивач нейтронів (який оточує активну зону), теплоносій, система регулювання ланцюгової реакції, радіаційний захист.

Ядерна реакція відбувається в активній зоні реактора, яка заповнена водою 1 та пронизана стержнями 2 із збагаченого Урану-235 (до 3%) 3. В активну зону вводяться і регулюючі стержні 4, що містять кадмій або бор, які інтенсивно поглинають нейтрони. Це дозволяє керувати швидкістю ланцюгової реакції.

Активна зона охолоджується за допомогою теплоносія, яким може бути вода 5 або метал із низькою температурою плавлення (наприклад, натрій, температура плавлення якого 98°C). В парогенераторі 6 теплоносій віддає теплову енергію воді, перетворюючи її у пар високого тиску. Пара спрямовується в турбіну 7, з'єднану з електрогенератором 8. Із турбіни пара потрапляє в конденсатор. Щоб уникнути витоку радіації, контури теплоносія та парогенератора працюють за замкненими циклами.

На мал. 297 зображено зовнішній вигляд ядерного реактора атомної електростанції та керуючі стержні.

Турбіна атомної електростанції є тепловою машиною, яка згідно з другим законом термодинаміки визначає загальну ефективність електростанції. ККД сучасних атомних електростанцій становить приблизно 30%. Це означає, що для виробництва 1000 МВт електричної потужності теплова потужність реактора має досягати 3000 МВт. З них 2000 МВт просто відводиться теплоносієм. Це призводить до локального перегрівання природних водойм і зумовлює подальші екологічні проблеми.

Після аварій на деяких АЕС, зокрема в Пенсільванії (США,



Мал. 297. Зовнішній вигляд ядерного реактора з керуючими стержнями

1979 р.), на Чорнобильській АЕС (Україна, 1986 р.), на АЕС Фукусіма (Японія, 2011 р.), проблема безпеки ядерної енергетики постає з особливою гостротою. Головними проблемами є забезпечення радіаційної безпеки працівників атомної електростанції, попередження випадкових радіаційних викидів, які накопичуються в активній зоні реактора. Під час розробки ядерних реакторів цим проблемам відводиться головна увага.

Окрім описаного вище ядерного реактора на повільних нейтронах, великий практичний інтерес становлять реактори, що працюють на швидких нейтронах (без сповільнювачів). Перевагою таких реакторів є те, що вони крім електроенергії виробляють Плутоній-239, який також використовують як паливе для атомних електростанцій. Із 1 кг Урану-238 в таких реакторах утворюється 1,5 кг Плутонію.

Дайте відповіді на запитання

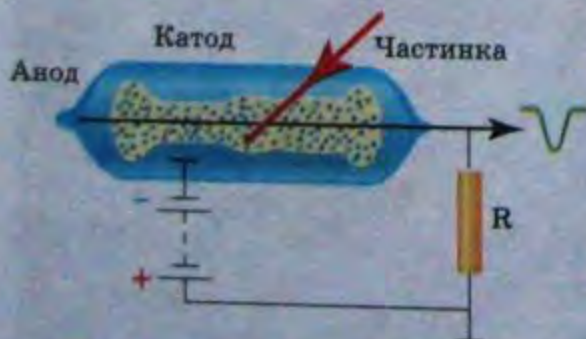
1. За яких умов можлива ланцюгова ядерна реакція?
2. Що таке коефіцієнт розмноження нейтронів і від чого він залежить?
3. У чому труднощі практичного здійснення ланцюгової ядерної реакції? Які існують шляхи їх подолання?
4. З яких частин складається і як працює ядерний реактор?

§ 83. Методи реєстрації йонізуючого випромінювання

Принцип дії приладів реєстрації йонізуючого випромінювання. Арсеналом ядерної фізики є реєструючі пристрої, які дають потрібну інформацію про події у 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, ці їхні властивості й використовують у конструкції реєструючих пристроїв.

Лічильники йонізуючих частинок. Лічильники йонізуючих частинок згідно з принципом своєї дії в основному лише фіксують факт проходження частинки. До них належать лічильник



Мал. 298. Принципова схема лічильника Гейгера-Мюллера

Гейгера-Мюллера, сімейство сцинтиляційних лічильників, напівпровідникові лічильники та інші.

У 9 класі ми ознайомились з принципом дії одного із перших лічильників — лічильником Гейгера-Мюллера, який понад півстоліття використовують у ядерних дослідженнях.

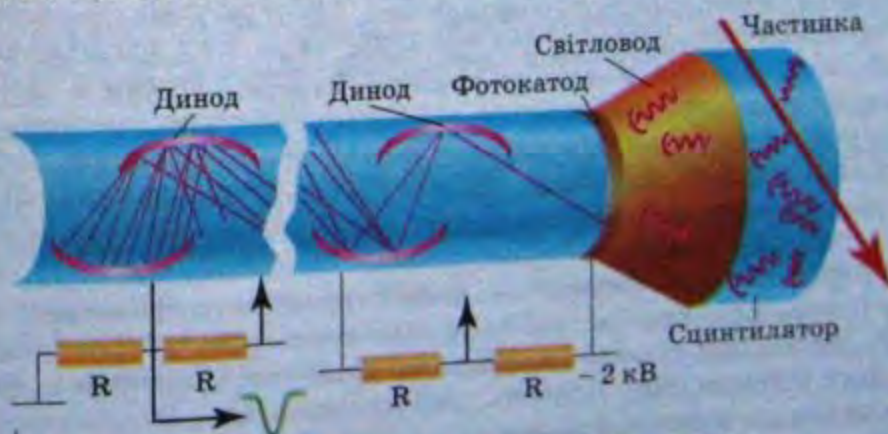
Принципову схему цього лічильника зображено на мал. 298.

У скляну трубку вміщено два електроди: анод (тонка металева нитка) та циліндричний катод, до яких прикладається постійна (у декілька сотень вольт) напруга. Скляна трубка заповнена інертним газом під зниженим тиском (для збільшення довжини вільного пробігу і полегшення ударної іонізації). Заряджена частинка, потрапляючи в трубку, іонізує газ. Утворені електрони та йони, рухаючись прискорено до електродів, здійснюють вторинну іонізацію, внаслідок якої відбувається пробій газу, і сила струму через лічильник різко зростає. Поки триває розряд в об'ємі газу, лічильник не може реєструвати наступну частинку, тому в коло послідовно з лічильником вмикають резистор з великим опором R . Як тільки в колі виникає електричний струм, напруга перерозподіляється між трубкою і опором. А різке зменшення напруги на трубці гасить розряд – трубка готова для реєстрації наступної частинки. Імпульс напруги з навантаження R подається в реєструючий пристрій (підсилювач і лічильний механізм).

Принцип дії *сцинтиляційних* (від латинського «сцинтиляцію» – блискання, спалах) лічильників полягає у виникненні спалаху на екрані, вкритому люмінесцентною речовиною, в місці попадання на нього частинки з досить високою енергією. Подібний пристрій використовував Резерфорд у досліді із розсіювання α -частинок.

На мал. 299 зображено схему сучаснішого сцинтиляційного лічильника. Заряджена частинка зумовлює спалах люмінофору. Оскільки спалах може бути дуже слабким, його слід підсилити. Для цього спалах через світловод передається на фотокатод. Фотони спалаху вибивають із фотокатода електрони, які спрямовуються на перший електрод помножувача (перший динод). Матеріал динода 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 10^5 разів.

Напівпровідниковий лічильник – це по суті плоский напівпровідниковий діод, включений у електричне коло у непропускному режимі. Якщо через p - n -перехід пролітає заряджена частинка, вона утворює додаткові пари електрон-дірка, які під дією електричного поля рухаються до електродів, створюючи імпульс струму. Напівпровідникові лічильники за чутливістю перевищують сцинтиляційні, у яких отриманий спалах ще слід підсилювати. Кристали германію, активовані літієм, дають змогу вимірювати енергії частинок з точністю до 0,1%.



Мал. 299. Схема сцинтиляційного лічильника



Мал. 300. Нейтринний детектор

Різноманітністю напівпровідникових лічильників є *стрипові детектори*, в яких напівпровідникові кремнієві смужки розташовані взаємно перпендикулярно. Це дає можливість вимірювати координати частинки. Таким чином напівпровідникові лічильники дають змогу не просто фіксувати йонізуючу частинку, а й досліджувати її.

На особливу увагу заслуговують так звані нейтринні детектори, або як їх ще називають – *черенковські лічильники*, названі на честь П. О. Черенкова. У 1934 р. він відкрив явище випромінювання світла електронами, які рухаються у середовищі зі швидкістю, більшою за швидкість світла в цьому середовищі. Такі лічильники дають змогу досліджувати не лише заряджені частинки, а й нейтральні. На мал. 300 наведено

фотографію нейтринного детектора. У цю ємність заливають 167 тон мінерального масла з домішками сцинтилятора. В акті взаємодії нейтрино з атомами речовини утворюються електрони високої енергії, швидкість руху яких більша за швидкість світла у цьому середовищі. Рух таких електронів супроводжується світленням у вигляді конуса, яке фіксується 1220 фотопомножувачами, розташованими 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 Ч. Вільсон. Принцип її дії ґрунтується на конденсації перенасиченої пари на йонах, що утворюються в робочому об'ємі камери вздовж траєкторії руху зарядженої частинки.

Циліндрична посудина з поршнем заповнена сумішшю повітря з паром води або спирту у стані, близькому до насичення. Різке опускання поршня змушує пару у камері адіабатно розширитися. Від цього вона охолоджується і стає перенасиченою. Якщо в цей час крізь камеру пролітає заряджена частинка, вона йонізує молекули повітря. Утворенні йони є центрами конденсації, і на них утворюються крапельки, які роблять «видимою» траєкторію руху частинки. Цю картину можна спостерігати безпосередньо крізь віконце або фотографувати. Щоб підготувати камеру до наступного використання, всередині неї створюють електричне поле, яке притягує йони на електроди, де вони нейтралізуються.

Фотографії треків, отримані за допомогою камери Вільсона, дають повнішу інформацію про частинку. За довжиною треку можна визначити її енергію, швидкість. Камеру, як правило, вміщують у магнітне поле. Тоді 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 Д. Глейзер запропонував для спостереження треків частинок використовувати перегріту рідину. У такій рідині на йонах, що утворюються під час руху заряджених частинок, виникають бульбашки пари, які роблять видимим трек. Камери цього типу дістали назву *бульбашкових* (мал. 301, а). Перевагу бульбашкової камери порівняно з камерою Вільсона зумовлює більша густина робочої речовини. Внаслідок цього пробіги частинок коротші, і частинки навіть високих енергій застряють у камері. Це дає можливість спостерігати і фотографувати (мал. 301, б) серію послідовних перетворень частинки і реакцій, які вона спричинює.

Поряд з камерами Вільсона й бульбашковими камерами для реєстрації частинок застосовують *товстошарові фотоемульсії*. Заряджена частинка, рухаючись у фотоемульсії, руйнує молекули бромистого срібла на своєму шляху.

Головна частина *іскрової (стрімерної) камери* нагадує багат шаровий конденсатор, пластини якого розміщені на відстані кількох міліметрів одна від одної. 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 всієї їх множини. Сучасні установки для дослідження елементарних частинок досить складні. Так, наприклад на Великому адронному колайдері використовується установка, яка за розмірами відповідає восьмиповерховому будинку.



Мал. 301. а – бульбашкова камера; б – фотографія треків

? Дайте відповіді на запитання

1. Яка властивість заряджених частинок покладена в основу дії реєструючих пристроїв?
2. У чому відмінність між лічильниками і камерами реєстрації йонізуючого випромінювання?
3. Опишіть будову і принцип дії одного із пристроїв для реєстрації йонізуючого випромінювання.

§ 84. Біологічна дія радіації та захист від йонізуючого випромінювання

Біологічна дія йонізуючого випромінювання. Біологічна дія йонізуючих випромінювань на живі тканини пов'язана із збудженням та йонізацією атомів та молекул, а також з 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 йонізуючого випромінювання ядра клітин, особливо клітин, які швидко діляться. Тому радіоактивне випромінювання вражає в організмі насамперед кістковий мозок, внаслідок чого порушується процес творення крові. Потім ушкоджуються клітини травного тракту та інших органів. Ураження статевих органів веде до необоротних генетичних змін (мутацій) хромосом, у результаті чого виникають спадкові хвороби і потворства нащадків. Це ще не весь перелік можливих наслідків опромінення людського організму. небезпека від радіоактивного випромінювання посилюється тим, що воно не чинить відчуття болю навіть у смертельних дозах.

Організм людини постійно підлягає дії радіоактивного випромінювання. Джерелами цього випромінювання є космічні промені, природні копалини в надрах Землі, будинки, в яких ми живемо (радіоактивними будівельними матеріалами є граніт, бетон, цегла), електронно-променеві трубки кінескопів телевізорів, рентгенівські апарати. Навіть в тілі самої людини знаходиться близько 0,01 г радіоактивного Калію, який розпадається зі швидкістю 4000 розпадів за секунду.

Характер впливу радіоактивних речовин залежить від їх 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 W , яка поглинається одиницею маси речовини m , тобто поглинутою дозою випромінювання, $D = \frac{W}{m}$.

Одиниця в СІ поглинутої дози йонізуючого випромінювання – грей, $[D] = 1 \text{ Гр}$.

1 Гр – це така доза будь-якого йонізуючого випромінювання, яка опроміненій речовині масою 1 кг передає енергію 1 Дж.

Використовують також і позасистемну одиницю 1 рад (rad – за першими літерами англійського словосполучення radiation absorbed dose – поглинута доза випромінювання).

1 рад – це доза, за якої опроміненій речовині масою 1 кг передається енергія 10^{-2} Дж.

Поглинута енергія затрачається на нагрівання речовини, на її хімічні й фізичні перетворення.

Поглинута доза випромінювання має властивість накопичуватись з часом; за інших однакових умов вона тим більша, чим 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* і позначають $D_e = \frac{q}{m}$.

В СІ експозиційну дозу вимірюють в кулонах на кілограм, $[D_e] = 1 \text{ Кл/кг}$.

Експозиційна доза 1 Кл/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).

Доза 1Р означає, що під час опромінення рентгенівським чи гамма-випромінюванням в 1 см³ повітря за нормальних умов утворюються йони із загальним зарядом кожного знака $\frac{1}{3 \cdot 10^9} \text{ Кл}$.

Зв'язок між позасистемною Р та системною Кл/кг одиницями такий: $1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ або $1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}$. Відповідно 1 рад = 1,1 Р.

Дозою 1 Р утворюється приблизно $2,08 \cdot 10^9$ пар йонів.

Експозиційна доза зручніша на практиці, оскільки йонізацію повітря легко виміряти за допомогою *дозиметра*.

Під дією опромінення в живих організмах, зокрема в організмі людини, виникають біологічні ефекти, різні для різних видів випромінювання хоч і з однаковою поглинутою дозою. Прийнято порівнювати біологічні ефекти, зумовлені будь-якими йонізуючими випромінюваннями, з ефектами від рентгенівського й гамма-випромінювань. Для цього користуються поняттям *еквівалентної дози випромінювання*.

Еквівалентна доза $D_{\text{екв}}$ – це поглинута доза, помножена на коефіцієнт K , що відображає здатність випромінювання певного типу чинити дію на тканини організму, $D_{\text{екв}} = KD$, K називають відносною біологічною ефективністю або коефіцієнтом якості. Для рентгенівського, γ - і β -випромінювань $K = 1$, для теплових нейтронів $K = 5$, для швидких нейтронів і протонів $K = 10$, для α -частинок $K = 20$.

В СІ еквівалентну дозу вимірюють у зівертах, $[D_{\text{екв}}] = 1 \text{ Зв}$.

Позасистемна одиниця еквівалентної дози йонізуючого випромінювання називається *біологічним еквівалентом рентгена (бер)*, $1 \text{ бер} = 1 \text{ Р} = 0,01 \text{ Гр} = 0,01 \text{ Зв}$.

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*, а саме: 0,03 – для кісткової тканини та щитовидної 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.

Короткочасне опромінення людини дозою в 20–50 Р призводить до змін у крові, доза в 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 йонізуючого випромінювання. Оскільки радіоактивне випромінювання шкідливо впливає на живі клітини, то, зрозуміло, потрібно організувати захист від нього. З цією метою генеральна асамблея ООН у грудні 1955 р. заснувала Науковий комітет з дії атомної радіації (НКДАР) для оцінки у світовому масштабі доз опромінення, їх ефекту і пов'язаного з ними ризику.

Для зниження загрози опромінення навколо джерел радіоактивного випромінювання розташовують біологічний захист з речовин, що добре поглинають випромінювання. Найпростішим методом захисту є віддалення на достатню відстань від джерел випромінювання. Якщо це не можливо, то для захисту використовуються 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 -променів використовують свинцеві контейнери. Навколо 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).

? Дайте відповіді на запитання

1. Який вплив чинить радіоактивне випромінювання на живі тканини?
2. Які дозиметричні величини характеризують радіоактивне випромінювання? Назвіть їх одиниці.
3. Які допустимі і небезпечні дози опромінення людини?

§ 85. Загальна характеристика елементарних частинок

Етапи розвитку фізики елементарних частинок. Сьогодні фізика елементарних частинок стала новою, великою і самостійною галуззю науки. Умовно можна виділити декілька етапів її розвитку.

Перший етап (1895 – 1932 рр.). Дослідження явищ емісії (термо-, фото- та ін.) виявили існування потоку заряджених частинок, які називали катодним промінням. Пізніше було встановлено, що це *потік електронів*. Перші експериментальні дослідження електронів проводили у 1906–1916 рр. американський фізик Р. Міллікен і незалежно від нього радянський вчений А. Ф. Іоффе.

У 1896 р. французьким фізиком Анрі Беккерелем була відкрита природна радіоактивність. Проведені у 1898р. дослідження М. Склодовської-Кюрі і незалежно Е. Резерфорда показали, що у магнітному полі радіоактивне випромінювання розділяється на три пучки: α -частинки, β -частинки, γ -промені.

У 1911 р. була створена планетарна модель атома: англійський фізик Ернест Резерфорд показав, що у центрі атома міститься ядро, навколо якого обертаються електрони.

Протягом наступних років проводились дослідження штучної радіоактивності (ядерних реакцій) з метою дослідження будови атомного ядра. У 1919 р. Е. Резерфорд здійснив першу ядерну реакцію і відкриває суб'ядерну частинку – протон (p) – як продукт реакції ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p}$. У 1932 р. Д. Чедвік відкриває ще одну суб'ядерну частинку – нейтрон (n): ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$.

Таким чином були встановлені елементарні складові частинки атомів речовини: електрони, протони і нейтрони. Проте фізиків цікавило питання, чи існує межа поділу елементарних частинок, чи поділяться електрони, протони, нейтрони на складові частинки?

З 1932 р. починається другий етап дослідження фізики елементарних частинок. Під час проведення експериментів із дослідження штучної радіоактивності були виявлені частинки, які не є складовими речовини.

Ще у 1928 р. англійський фізик П. Дірак створив релятивістську теорію руху електрона. Розробляючи цю теорію, Дірак використав дві експериментально встановлені характеристики електрона – масу та заряд – і спирався на загальні принципи теорії відносності та квантову теорію. З його теоретичних розрахунків випливала можливість існування такої самої частинки, як і електрон, але з позитивним зарядом – позитрона. У 1932 р. американський фізик К. Д. Андерсон, фотографуючи сліди космічних променів у камері Вільсона, виявив на одній із фотографій слід, який міг належати позитрону.

У 1932 р. Жоліо-Кюрі вперше отримав штучний радіоактивний ізотоп у реакції ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$, де радіоактивний ізотоп ${}^{30}_{15}\text{P}$ розпадається з випромінюванням позитрона.

Експериментальне підтвердження існування позитрона дало новий поштовх у дослідженні елементарних частинок. Було виявлено, що майже кожна частинка має свою античастинку, частинки зазнають взаємних перетворень. Так, при β^- -розпаді один з нейтронів всередині ядра перетворюється в протон, електрон і антинейтрино, ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}$. Електрон і антинейтрино вилітають з ядра, а нуклони, які залишились, утворюють нове ядро. У вільному стані нейтрон може існувати в середньому 15 хв, після чого зазнає такого перетворення.

У процесі β^+ -розпаду протон перетворюється в нейтрон і одночасно випускаються позитрон і нейтрино, ${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_{+1}\text{e} + \nu$. Це перетворення відбувається з поглинанням енергії, оскільки маса протона менша за масу нейтрона,



Мал. 302. Сучасні прискорювачі елементарних частинок

і тому може відбуватися тільки в ядрі. У вільному стані протон – стабільна частинка.

У 1933 р. був відкритий процес утворення позитрона і електрона під час взаємодії фотона великої енергії з якоюсь зарядженою частинкою, наприклад, з атомним ядром, $\gamma \rightarrow e^- + e^+$.

Згодом було виявлено і зворотний процес – *анігіляцію* – перетворення частинки й античастинки в гамма-кванти, $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$.

Дослідження елементарних частинок в земних умовах здійснюється за допомогою прискорювачів частинок різних конструкцій: лінійних прискорювачів, циклотронів, синхрофазотронів, колаїдрів (мал. 302) тощо. У результаті прискорення енергії частинок стають надвисокими, і такими частинками бомбардуються досліджувані частинки. У колаїдрах досліджують зіткнення потоків заряджених частинок.



Проводяться дослідження і природних потоків частинок – *космічного проміння*. Перші дослідження космічного проміння проводились ще у 1912 р. за допомогою повітряних куль. З часу запуску штучних супутників та космічних кораблів можливості дослідження космічних променів значно збільшились. Було виявлено, що космічне проміння складається із частинок високих енергій, які летять у найрізноманітніших напрямках в космічному просторі. Джерелом космічного випромінювання є вибух наднової зорі (мал. 303, а).



Внаслідок зіткнень космічних променів з ядрами атомів речовин, які входять до складу атмосфери, відбувається народження нових частинок, які надалі також зазнають нових зіткнень і нових перетворень (мал. 303, б).

Таким чином було встановлено найважливішу загальну властивість елементарних частинок – *їх здатність до взаємного перетворення; розпадаючись, одні частинки зникають, інші народжуються*.

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.

У 1964 р. американські фізики М. Гелл-Манн та Дж. Цвейг запропонували модель, згідно з якою мають існувати фундаментальніші (первинні) частинки – *кварки*. За їх припущенням, електрони і протони мають складатися з трьох кварків: *u*-кварка, *d*-кварка та *s*-кварка (названі від англійських слів *up* – верхній, *down* – нижній і *strange* – дивний).

Мал. 303. вверху – поширення космічних променів внаслідок вибуху наднової зорі, внизу – схематичне зображення взаємодії космічної частинки з ядром атома речовини атмосфери

З цього часу розпочався третій етап експериментальних досліджень, спрямований на виявлення кварків. Паралельно розвиваються і теоретичні дослідження, що пояснюють структуру мікросвіту та її зв'язок з макросвітом. Це так звана кваркова теорія (її ще називають квантовою хромодинамікою), яка разом із електрослабкою теорією утворюють стандартну модель елементарних частинок. А також струнна модель, модель великого об'єднання тощо.

Поняття елементарної частинки. Як видно з розвитку фізики елементарних частинок, термін «елементарна» потребує уточнення. Поняття елементарних частинок ґрунтується на факті дискретної будови речовини. Ряд елементарних частинок має складну внутрішню структуру, проте розділити їх на частини не можливо. Інші елементарні частинки є безструктурними і можуть вважатися первинними *фундаментальними частинками*.

Елементарна частинка – збірний термін, що відноситься до мікрооб'єктів у суб'ядерному масштабі.

Найхарактернішою особливістю елементарних частинок є їхня здатність до перетворень і взаємодії. При цьому 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 за сильну і навіть електромагнітну взаємодії. Проте вона значно більша за гравітаційну взаємодію, оскільки маси елементарних частинок надто малі і радіус їхньої взаємодії становить лише 10^{-18} м.

За властивостями елементарні частинки поділяють на такі групи: фотони, лептони й адрони. Майже всі елементарні частинки нестабільні (за винятком електрона, протона, нейтрона (у складі ядра), нейтрино, фотона). Основні характеристики елементарних частинок такі: електричний заряд, маса, тривалість життя, спин, лептонний і баріонний заряди, дивність (квантове число).

Починаючи з 1932 р. було відкрито понад 400 елементарних частинок, і це число продовжує зростати.

Відомий нам зараз набір елементарних частинок не був таким протягом всього існування Всесвіту. Є припущення, що на самих його початках у момент часу 10^{-33} с після Великого вибуху існували частинки-прабатьки, так звані преони, з енергією понад 10^{15} GeV. Прямими «нащадками» преонів стали кварки, що близько 10^{-6} с після Великого вибуху утворили вже згадані протони і нейтрони. За цими уявленнями через приблизно 3 хв після початку процесу утворилася більша частина ядер Гелію, які існують у Всесвіті.

? Дайте відповіді на запитання

1. Назвіть основні етапи розвитку фізики елементарних частинок.
2. Що таке елементарні частинки? Назвіть стабільні елементарні частинки.
3. Який тип фундаментальної взаємодії характерний для елементарних частинок?

§ 86. Види взаємодій

Типи фізичних взаємодій у природі. У попередньому параграфі ми зазначили, що взаємодія між елементарними частинками носить специфічний характер і має назву слабкої. Щоб зрозуміти механізм слабкої взаємодії, пригадаємо інші відомі нам типи взаємодій і їх характер.

Вивчаючи механіку, ми ознайомились із гравітаційною взаємодією (силами всесвітнього тяжіння) і деякими проявами 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, що його 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. У результаті можна пояснити електромагнітну взаємодію між зарядженими частинками 1) як *взаємодію через поле* і 2) як *обмін фотонами між частинками*.

На мал. 304 наочно зображено, як у результаті обміну частинками відбувається взаємодія. На мал. 304, а діти кидають один одному м'яч. Упіймавши м'яч, хлопчик відкочується назад. Це ілюстрація сили відштовхування. Якщо діти намагаються вирвати кільця із рук один одного (мал. 304, б), то кожен тягне партнера до себе. Це ілюстрація сили притягання.

Подібним чином може відбуватися електромагнітна взаємодія між зарядженими частинками: одна із заряджених частинок випромінює фотон і зазнає внаслідок цього віддачі. Інша частинка поглинає фотон. При такій взаємодії відбувається передача енергії та імпульсу від однієї частинки до іншої, і посередником при цьому є фотон.



Мал. 304. Ілюстрація обмінного характеру взаємодії

У 1935 р. японський фізик Хідекі Юкава (1907–1981) висловив припущення, що подібним чином відбувається і сильна взаємодія між нуклонами у ядрі. Частинка, яка є посередником сильної взаємодії, повинна мати масу проміжного значення між масою протона та електрона, тому Юкава назвав її *мезоном*. Оскільки у випадку електромагнітної взаємодії фотон ніяк себе не виявляє, а його можна спостерігати лише у вільному стані, мезон також вдалось виявити частинку, яка за масою збігалася з теоретично передбачуваною. Проте, як з'ясувалось, ця частинка не виявляє сильної взаємодії, а отже, і не може бути її посередником. Цю частинку назвали *мю-мезоном* (або *мюоном*). Існує два їх різновиди μ^+ та μ^- .

Дивною властивістю мюона є його повна схожість з електроном в усьому, крім маси. Мюон у 207 разів важчий за електрон. Цей «важкий електрон» може навіть на деякий час зайняти місце електрона в атомі, обертаючись дуже близько від ядра. При розпаді мюонів утворюються електрони, позитрони і по два нейтрино – електронне і мюонне, $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$; $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$.

Передбачувана Юкавою частинка була виявлена у 1947 р. і отримала назву *пі-мезон* (піон), до того ж, як виявилось, піони бувають трьох видів, які відрізняються зарядовим станом: π^+ ; π^- ; π^0 . Всі три піони беруть участь у сильній взаємодії. Подальші ж дослідження показали, що посередником сильної взаємодії є глюони.

Таким чином, природно припустити, що мають існувати посередники слабкої та гравітаційної взаємодій. Пошук таких частинок тривав десятиліттями. У 1983 р. Карло Руббіа заявив про довгоочікуване відкриття *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.

Тип взаємодії	Характер взаємодії	Відносна інтенсивність взаємодії ¹	Радіус дії	Квант взаємодії
Сильна	Забезпечує зв'язок нуклонів у ядрі	1	$r = 10^{-15}$ м	Мезони/глюони
Електромагнітна	Взаємодія між електрично зарядженими частинками	10^{-2}	$r = \infty$	Фотон
Слабка	Взаємодія, яка проявляється у розпадах частинок, а також у дії нейтрино на речовину	10^{-14}	$r = 10^{-15}$ м	Бозони
Гравітаційна	Універсальна взаємодія, властива усім без винятку частинкам, які мають масу (у мікросвіті суттєвої ролі не відіграє).	10^{-40}	$r = \infty$	Гравітон (?)

¹ Іntenсивність взаємодій характеризують за допомогою так званої константи взаємодії, яка є безрозмірним параметром, що визначає ймовірність процесів, зумовлених цією взаємодією. Відношення значень констант дає відносну інтенсивність відповідних взаємодій.

Фізики ставлять задачу створити теорію, яка б об'єднала всі типи взаємодій, пояснивши їх з єдиної точки зору. Ця ідея впливає зі сприйняття оточуючого нас світу як єдиного цілого. Задача ця надзвичайно складна. Ейнштейн у свій час затратив 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 С. Вайнберг і Ш. Глешоу та пакистанський фізик А. Салам запропонували так звану *калібрувальну теорію*, яка об'єднує слабку та електромагнітну взаємодії. У цій теорії слабка і електромагнітна взаємодії розглядаються як два різні прояви 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 слабкої взаємодії.

Згідно з цією теорією процес β -розпаду має відбуватись за участі проміжних бозонів. Наприклад, розглядуваний нами β^- -розпад ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$ насправді є двоступеневим процесом: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + W^-$, а потім $W^- \rightarrow {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$.

Створення теорії електрослабкої взаємодії було відзначено присудженням С. Вайнбергу, Ш. Глешоу, і А. Саламу Нобелівської премії з фізики за 1979 р.

За видами взаємодій елементарні частинки поділяють на такі групи:

Адрони – частинки, що беруть участь у всіх видах фундаментальних взаємодій. Вони складаються з кварків.

Лептони – частинки, які мають вид точкових частинок аж до розмірів порядку 10^{-18} м. Не беруть участі в сильних взаємодіях. Участь в електромагнітних взаємодіях експериментально спостерігалася тільки для заряджених лептонів. Відомі 6 типів лептонів.

Адрони і лептони утворюють речовину.

Калібрувальні бозони – це кванти різних видів випромінювання, які є посередниками взаємодій:

- ♦ фотон – частинка, що переносить електромагнітну взаємодію;
- ♦ вісім глюонів – частинок, що переносять сильну взаємодію;
- ♦ три проміжні векторні бозони W^+ , W^- і Z^0 , що переносять слабку взаємодію;
- ♦ гравітон – частинка, що переносить гравітаційну взаємодію. Існування гравітонів, поки не доведено експериментально у зв'язку зі слабкістю гравітаційної взаємодії, проте вважається цілком достовірним.

Закони збереження у мікросвіті. Кожна елементарна частинка характеризується набором дискретних квантових чисел, що визначають її специфічні властивості. Маса елементарних частинок виражають числом, кратним масі електрона; електричний заряд – в одиницях, кратних заряду електрона; спин – кратний значенню сталої Планка. Для кількісного опису поведінки елементарних частинок вводять ще й такі квантові числа: баріонний та лептонний заряди; дивність, ізотонічний спин; час життя; магнітний момент; парність.

Елементарні частинки можуть перетворюватись одна в одну при взаємодіях, можуть народжуватись, поглинатись й розпадатись. Ці процеси відбуваються лише за певних умов згідно із законами збереження. Закони збере-

ження у фізиці елементарних частинок відіграють основну роль, оскільки для елементарних частинок не існує рівнянь, які б описували їх рух. Для елементарних частинок закони збереження можна поділити на три групи: 1) закони збереження, пов'язані з геометрією чотиривимірного простору-часу; 2) закони збереження зарядів (електричного, баріонного, лептонних); 3) наближені закони збереження, які виконуються лише для деяких фундаментальних взаємодій.

? Дайте відповіді на запитання

1. Які типи фундаментальних взаємодій ви знаєте?
2. Що загального можна сказати про механізм усіх фундаментальних взаємодій?
3. Що є носієм гравітаційної взаємодії?
4. За допомогою чого здійснюється електромагнітна взаємодія між зарядженими частинками і що є посередником цієї взаємодії?
5. За рахунок чого здійснюється взаємодія між протонами і нейтронами у разі сильної взаємодії?
6. Яку роль відіграють закони збереження у фізиці елементарних частинок?

§ 87. Класифікація елементарних частинок

Класифікація елементарних частинок. Основні характеристики елементарних частинок: електричний заряд, маса, тривалість життя, спин, лептонний і баріонний заряди, дивність (квантове число) – можуть слугувати підставою для їх класифікації. І як ми зазначали у попередньому параграфі, усі частинки можна класифікувати за їх здатністю брати участь у тому чи іншому виді взаємодії.

Таблиця «Елементарні частинки» відображає класифікацію частинок за характером взаємодії частинок¹.

Окрему групу складає *фотон*. Фотон бере участь в електромагнітній взаємодії. Не має античастинки.

Лептони – це частинки, які не беруть участі у сильній взаємодії. Вони проявляють себе в усіх інших взаємодіях (електрослабкій та гравітаційній). На сьогодні відомо 6 лептонів: електрон, мюон, два типи нейтрино (електронне та мюонне), тау-лептон та тау-нейтрино. Кожна з них має свою античастинку.

Третій клас утворюють *адрони*. Так називають частинки, які беруть участь у сильній взаємодії (саме слово «адрони» означає сильновзаємодійні частинки). Адрони можуть взаємодіяти й іншими типами сил, але на малих відстанях сили сильної взаємодії значно переважають.

Адрони поділяють на мезони, нуклони (протон, нейтрон) та гіперони (лямбда-гіперон, сигма-гіперони та ін.).

Звернімо увагу на те, що у таблиці наведено класифікацію стабільних та довгоживучих частинок (з часом життя, більшим за 10^{-19} с). Більшість частинок утворюють так звану групу *резонансних*, час життя яких настільки малий, що їх не вдається зареєструвати. Вони виявляють себе наслідком своєї дії.

¹ У довідниках з фізики можна зустріти і класифікацію за масою частинок. У ній виділяють три групи – легкі (лептоли), важкі (баріони) та проміжні (мезони).

Таблиця «Елементарні частинки»

Назва частинки	Символ		Маса		Спін в одиницях \hbar	Електричний заряд, кратний заряду електрона e (частинка-античастинка)	Час життя, с
	частинка	античастинка	в масах електрона m_e	в MeV			
Лептони	Фотон		0	0	1	0	Стабільний
	Електронне нейтрино	ν_e $\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	0	Стабільне
	Мюонне нейтрино	ν_μ $\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	0	Стабільне
	Тау-нейтрино	ν_τ $\bar{\nu}_\tau$	0	0	1/2	0	Стабільне
	Електрон	e^- e^+	1	0,511	1/2	-1 1	Стабільний
	Мюон	μ^- μ^+	207	105,66	1/2	-1 1	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	Тау-лептон	τ^- τ^+	3492	1782	1/2	-1 1	$1,46 \cdot 10^{-12}$
	Пі-мезони	π^0	264,1	134,96	0	0	$1,83 \cdot 10^{-16}$
Мезони		π^+ π^-	273,1	139,57	0	1 -1	$2,6 \cdot 10^{-8}$
	Ка-мезони	K^+ K^-	966,4	493,67	0	1 -1	$1,2 \cdot 10^{-8}$
		K^0 \bar{K}^0	974,1	437,7	0	0	$K_S^0 - 8,9 \cdot 10^{-11}$
							$K_L^0 - 5,2 \cdot 10^{-8}$
Адрони	Ета-нуль-мезон	η^0	1074	548,8	0	0	$2,4 \cdot 10^{-19}$
	Протон	p \bar{p}	1836,1	933,28	1/2	1 -1	Стабільний (?)
	Нейтрон	n \bar{n}	1838,6	939,57	1/2	0	10^3
	Лямбда-гіперон	Λ^0 $\bar{\Lambda}^0$	2183,1	1115,6	1/2	0	$2,63 \cdot 10^{-10}$
	Сигма-гіперони	Σ^+ $\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1189,4	1/2	1 -1	$8 \cdot 10^{-11}$
		Σ^0 $\bar{\Sigma}^0$	2333,6	1192,5	1/2	0	$5,55 \cdot 10^{-20}$
		Σ^- $\bar{\Sigma}^-$	2343,1	1197,4	1/2	-1 1	$1,48 \cdot 10^{-10}$

Кварки. Майже всі частинки, які можна безпосередньо спостерігати, належать до лептонів або адронів. Головна відмінність між ними полягає у тому, що адрони беруть участь у сильній взаємодії, а лептони – ні. До того ж лептонів існує лише 6, а адронів більше сотні. Це дало підставу вважати, що адрони не є суто елементарними частинками, а мають свою внутрішню структуру. Як ми уже зазначали, у 1964 р. американські фізики М. Гелл-Манн та Дж. Цвейг запропонували модель, за якою адрони мають склада-

тися з фундаментальніших частинок – *кварків*. Будову відомих на той час адронів можна було пояснити за допомогою трьох кварків: *u*-кварк, що має дробовий, електричний заряд $+2/3$ (по відношенню до заряду електрона) та *d*- і *s*-кварки, що мають заряди по $-1/3$. Щоб ці кварки відрізнити один від одного, їм приписували ще одну характеристику – дивність. Дивність *s*-кварка становить -1 , а для *u*- та *d*-кварків вона дорівнює нулю.

З відкриттям нових адронів виявилось, що наявністю лише трьох кварків не можна пояснити їхню будову. Виникла необхідність введення ще трьох кварків та їх антикварків, що, у свою чергу, вимагало введення нових понять для опису їх властивостей. Ці поняття стали називати *зачаруванням* та *кольором*.

Нову теорію, яка описувала властивості елементарних частинок на основі гіпотези кварків, стали називати *квантовою хромодинамікою*. За квантовою хромодинамікою протон та нейтрон мають таку структуру:

Частинка	Склад	Електричний заряд	Баріонне число	Дивність	Взаємна орієнтація спінів кварків	Спін частинки
<i>p</i>	<i>uud</i>	$+1$	$+1$	0	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$1/2$
<i>n</i>	<i>udd</i>	0	$+1$	0	$\uparrow\downarrow\uparrow$	$1/2$

Згідно з цією теорією посередником сильної взаємодії є не мезони, а глюони; істинно елементарними частинками є фотон, лептони, кварки та посередники взаємодій: сильної взаємодії – глюони; слабкої – W^+ , W^- , Z^0 -бозони.

Електрослабку теорію та квантову хромодинаміку для сильної взаємодії ще називають «*стандартною моделлю*».



Дайте відповіді на запитання

1. Назвіть класифікацію найбільш довгоживучих частинок (під час відповіді використовуйте таблицю елементарних частинок).
2. Чи всі елементарні частинки мають античастинку?
3. Що таке кварки?
4. Що таке квантова хромодинаміка?

Найголовніше в розділі «Фізика атомного ядра та елементарних частинок»

Ядерна фізика досліджує атомні ядра. Ядра атомів складаються з протонів та нейтронів (нуклонів), які утримуються в ядрі завдяки *сильній* взаємодії.

Маса ядра менша за суму мас окремих його нуклонів. Різниця цих мас (дефект мас), помножена на c^2 , дорівнює *повній енергії зв'язку ядра*.

Нестабільні ядра зазнають радіоактивного розпаду. α -розпад зумовлений тим, що сильна взаємодія не в змозі забезпечити стабільності дуже важких ядер. Загальне рівняння α -розпаду записують у вигляді ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$. Щодо процесів β -розпаду, то встановлено їх два види – β^+ - та β^- -розпади. Під час β -розпаду проявляється *слабка* взаємодія.

Що ж до γ -випромінювання, то воно зазвичай супроводжує α -і β -розпади, оскільки новоутворене збуджене атомне ядро, переходячи на нижчий енергетичний рівень, випромінює γ -квант.

Радіоактивний розпад ядер є властивістю самого атомного ядра і описується законом радіоактивного розпаду $N = N_0 e^{-\lambda t}$, де λ – стала радіоактивного розпаду – характеризує частку радіоактивних ядер, які розпадуться за час t .

Встановлено, що для кожного радіоактивного ізотопу існує свій період піврозпаду T – інтервал часу, за який розпадається половина радіоактивних ядер. 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.

Частинки високої енергії (α , β , n , p) при зіткненні з ядром можуть викликати різноманітні їхні перетворення – *ядерні реакції*.

Енергетичний вихід ядерної реакції $E_{\text{вих}}$ – різниця енергій спокою всіх ядер і частинок до і після реакції. $E_{\text{вих}} = \Delta m c^2$, де Δm – *дефект маси*, який можна розрахувати як різницю між сумою мас спокою ядер і частинок до і після ядерної реакції.

Ланцюгова ядерна реакція – ядерна реакція, в якій частинки, що її спричиняють, утворюються як продукт цієї ж реакції. Прикладом ланцюгової ядерної реакції є реакція поділу урану і деяких трансуранових елементів (наприклад, Плутонію-239) під дією нейтронів. Пристрій, в якому відбувається керована ланцюгова реакція, що супроводжується виділенням великої кількості енергії, називається *ядерним реактором*.

Термоядерна реакція – реакція злиття (синтезу) легких атомних ядер у більш важкі, яка відбувається за дуже високих температур – порядку 10^8 К і вищих.

Реєстрація частинок і спостереження за ними ґрунтуються на процесах взаємодії заряджених частинок з речовиною: люмінесценції, електризації, краплеутворенні тощо.

Елементарні частинки – найпростіші структурні елементи матерії.

Відкрито 38 елементарних частинок і більше 300 *резонанс-частинок* (короткоживучих частинок із середнім часом життя 10^{-22} – 10^{-23} с). Майже всі частинки мають свою античастинку.

Елементарні частинки за типом взаємодії поділяють на три класи: 1) фотони (γ -кванти електромагнітної взаємодії); 2) лептони – частинки, які не беруть участі у сильній взаємодії; 3) адрони – частинки, які беруть участь у всіх видах взаємодії.

Теорія, яка об'єднує слабку та електромагнітну взаємодії називається *електрослабкою*.

Адрони вважаються складними частинками, структурними елементами яких є кварки. Теорія кварків, яка описує сильну взаємодію, називається *квантовою хромодинамікою*.

Електрослабку теорію та квантову хромодинаміку для сильної взаємодії ще називають «стандартною моделлю».

Відповіді

Розділ 1. Електричне поле

Вправа 1

- Збільшилась у 1,8 раза; зменшилась у 1,25 раза.
- $\frac{q^2}{\pi \epsilon_0 a^2}$.
- $3,5 \cdot 10^{-3}$ Н.
- 0,12 м.

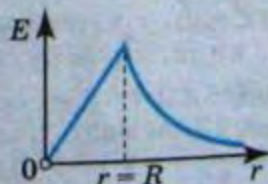
Вправа 2

- На прямій, яка з'єднує заряди, на відстані $1/3a$ від меншого і $2/3a$ від більшого; на тій самій прямій на відстані a від меншого і $2a$ від більшого.
- а) 70 кВ/м; 10 кВ/м; б) 50 кВ/м; 50 кВ/м.
- $\frac{3q}{2\pi \epsilon_0 a^2}$.
- $E_1 = E_2 = 2,8 \cdot 10^4$ Н/Кл.
- На 7° .
- 3° .

$$7. \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g^2 - \left(\frac{qE}{m}\right)^2}} = 1,56 \text{ с.}$$

Вправа 3

- 0; 0; 245 Н/Кл.
- Див мал. 305



Мал. 305

- $E = 0$.
- 3,4 Н/м.
- $R = 2,5$ м; $E = 113$ кВ/м; у 1,1 раза.
- Так. $d = 4,5$ мм.

Вправа 4

- $5,3 \cdot 10^8$ м/с²; $2 \cdot 10^4$ м/с; $0,4 \cdot 10^{-5}$ с.
- 6 см.
- 113 мкДж.
- 1,2 мкДж.
- $A = \frac{q_3(q_2 - q_1)}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{l_2 - l_1}{l_1 l_2} = 0,3$ мДж.

Вправа 5

- 0,1 м; $2,6 \cdot 10^{-8}$ Кл; 1,8 кВ.
- 65 В.
- а) ± 6 кВ; б) 0; в) $\pm 4,2$ кВ.
- 3,5 кВ.
- $8,4 \cdot 10^6$ м/с.

Вправа 6

- $1,2 \cdot 10^{-7}$ Кл; $1,8 \cdot 10^{-7}$ Кл.
- $12 \cdot 10^{-4}$ Кл; 120 В; 60 В; 40 В.
- $C_1 = \frac{C_2 U_2}{U_1 + U_2} = 1$ мкФ.
- 6.
- Від 10 до 170 нФ для паралельного з'єднання та від 2,23 до 3,27 нФ за послідовного.

Вправа 7

- 93 мДж/м³.
- 36 Дж; 15 кВт.
- $1,44 \cdot 10^{-5}$ Дж.
- $\epsilon = \frac{CU^2 + 2\Delta W}{CU^2 - 2\Delta W} = 1,7$.
- 705 нДж; 293 нДж.
- $1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Розділ 2. Електричний струм

Вправа 8

- 4,5 В; 1 Ом.
- 6 Ом, 33%, 67%.
- $q = C\epsilon \frac{R_2}{R_2 + r}$.
- $q = C\epsilon \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$; $q = C\epsilon$.

Вправа 9

- а) 0,6 Ом; б) 2 Ом; в) 1,3 Ом; г) 1 Ом; р) 1,4 Ом; д) 1,8 Ом; е) 0,5 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.

Вправа 10

$$1. R_1 = \frac{U^2}{10P} = 14,4 \text{ Ом};$$

$$\alpha = \frac{\frac{R_1}{R_2} - 1}{t_1 - t_2 \frac{R_1}{R_2}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}.$$

- 19,2 м.
- $l_1 \approx 43,6 l_2$.
- $\Delta R = 2\alpha \rho_0 l_0 t / S$;
 $\Delta R' = \frac{2\rho_0 l_0 t}{S} (\alpha + \beta)$.

Вправа 11

- 6,03 В.
- 180 В.
- 4 нс.
- 1,6 нс.

Вправа 12

- 6,1 год; 5,3 Вт·год.
- 0,054 кг.
- 0,043 мм.
- 1,3 Ом.
- 297 К.

Розділ 3. Електромагнітне поле

Вправа 13

- $B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{I_1}{l+s} + \frac{I_2}{s} \right]$.
- 58 А.
- 66,6 мк Тл.
- $5,5 \cdot 10^{-5}$ Тл.
- $2 \cdot 10^{-3}$ Н; $8 \cdot 10^{-3}$ Н; $6 \cdot 10^{-3}$ Н.

Вправа 14

- 20 мТл.
- $B = \frac{mg \cdot \operatorname{tg} \alpha}{I \cdot l}$.
- 0,04 Тл.
- 0,1 Н·м.
- $9,3 \cdot 10^{-24}$ А·м².

Вправа 15

- $6,3 \cdot 10^{-13}$ 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 16

- а) 0,5 А; б) 0,7 А; в) 0,3 А; ліворуч зі швидкістю 10 м/с.
- а) $I = \frac{Bvl}{r+R} = 0,1$ А;
 $F = \frac{B^2 vl^2}{r+R} = 2 \cdot 10^{-2}$ Н;
б)
в) $P = \frac{B^2 v^2 l^2}{r+R} = 2 \cdot 10^{-2}$ Вт.
- $q = BvlC = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл;
 $W = \frac{B^2 v^2 l^2 C}{2} = 1 \cdot 10^{-9}$ Дж.

Вправа 17

- 2 мТл.
- 0,1 А.
- 120 Дж; зменшиться в 4 рази.
- 2,5 Дж.

5. 6,4 Дж.
6. 2500 В.

Вправа 18

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 19

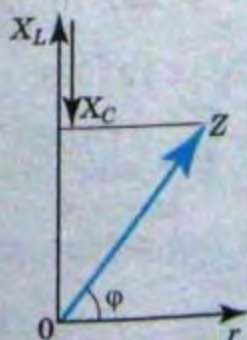
1. 26,4 мкФ; 130 В.
2. 4,6 мА; 73,4 В; 146,6 В.
3. 72,5%; 68,5%.
4. 3,74 мкФ.
5. Не менше ніж 319 В.
6. $i = 1,38 \sin 314t$; напруга відстає від струму за фазою на $\pi/2$;
 $q = -4,4 \cdot 10^{-3} \cos 314t$.

Вправа 20

1. 0,13 Гн; 30 Вт; 11 Вт.
2. 300 Гц.
3. 74%; 68%.

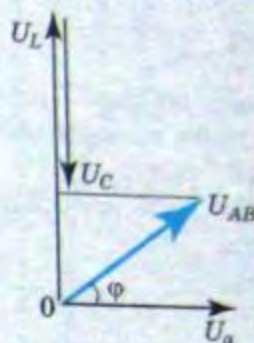
Вправа 21

1. 1,34 А; 121 В; 134 В; 295 В.
2. 156 В.
3. 130 В; 26 Ом; 5 А; $\cos \varphi = 0,92$;
598 Вт.
4. 12,7 мГн; 17,3 Вт
5. Див. мал. 306; 5 Ом; $\cos \varphi = 0,6$.



Мал. 306

6. 50 В; $\cos \varphi = 0,8$; див. мал. 307.



Мал. 307

Вправа 22

1. 95%.
2. 880; 144; 6,11.
3. 124 Вт.
4. 9,6 мм².
5. 1,5 А.
6. 120 кВ.
7. $e = \sin 314t$; 222 В.

Розділ 4. Електромагнітні хвилі

Вправа 23

1. $q = 10^{-4} \cos 500t$;
 $i = -0,05 \sin 500t$;
 $u = 100 \cos 500t$; 50 мА; 100 В.
2. $4\pi \cdot 10^{-5} \text{ с}$; 2 мкКл; 0,5 В (на кожному конденсаторі).
3. $i = U_m \sqrt{3C/4L}$.
4. -
5. $Q = \frac{3}{8} CU_m^2 = 0,6 \text{ Дж}$.
6. 120 мкДж; 40 мкДж.

Вправа 24

1. Збільшити в 9 разів.
2. 18 км; 8300 с^{-1} .
3. 9000; 225 м.

Розділ 5. Хвильова та геометрична оптика

Вправа 25

1. $\Delta = S_1 O - S_2 O = 0$.
2. 2,4 мм.
3. 600 нм.
4. Відстань між максимумами освітленості a, b, v збільшується.

Вправа 26

- $1,9 \cdot 10^{-3}$ м.
- 295 нм.
- Чорною; плівка буде здаватись то жовтою, то чорною.
- $5,13 \cdot 10^{-3}$ рад.
- $k = 5, k + 1 = 6, \lambda = 0,5$ мкм.
- 1,5 мкм.
- 675 нм.
- 1,56.

Вправа 27

- $1,5^\circ$.
- 0,17 мкм.
- 5 мкм.
- 3,9 мкм.

Вправа 28

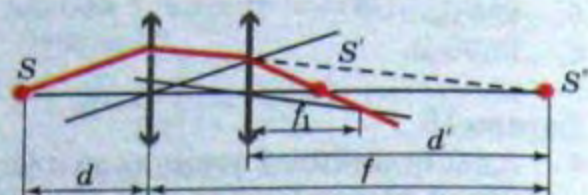
- 3,9 м.
- 97 см.
- 64° .
- $d = 2/\sin\phi$ Зображення монети повернеться на кут 2 навколо ребра двогранного кута, залишаючись на тій же відстані від нього.
- 0,6 м.
- 0,45 м.

Вправа 29

- $6 \cdot 10^{-2}$ м.
- 1,2 см; 1 см.
- На 1,6 см.
- Не може.
- Заломиться.
- 39° .
- 56° .
- а) На 13° вниз; б) на 20° вгору.
- $39^\circ 52'$.
- 0,026 рад.
- 1,3.
- $\pi/4$.

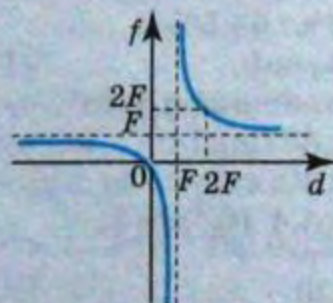
Вправа 30

- 0,78 м.
- $F = 2/9 L = 20$ см.



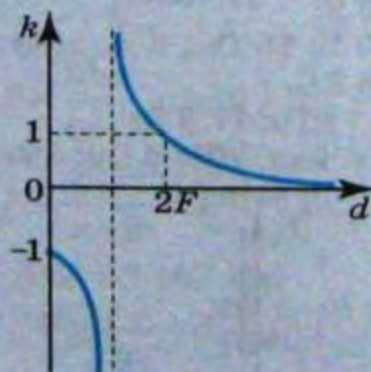
Мал. 308

- 2,25 см. Див. мал. 308.
- 60 см.
- $F = \frac{F_1 F_2 F_3}{F_1 F_2 + F_2 F_3 + F_1 F_3} = 5,5$ см.
- 0,5 см.
- 562.
- Графік залежності показано на мал. 309.



Мал. 309

- а) $k = \frac{F}{d-F}$; б) $|k| = \frac{F}{F-d}$. Графік залежності показано на мал. 310.



Мал. 310

Вправа 31

- 0,3 м.
- $8 \cdot 10^4$ лк.
- Стане в 3 рази більшим.
- 60° .

5. 12 лк.
6. 173 кд.
7. $15 \cdot 10^3$ лм.
8. 30 лк.
9. На відстані 1,4 м від лампи в 100 кд.
10. 50 см.

Розділ 6. Квантові властивості матерії

Вправа 32

1. $1,7 \cdot 10^{-5}$ Н.
2. $7 \cdot 10^{-7}$ Па; $3,5 \cdot 10^{-7}$ Па.
3. $2,8 \cdot 10^{-4}$ Н.
4. $2,9 \cdot 10^{21}$.
5. 12 мкПа.

Вправа 33

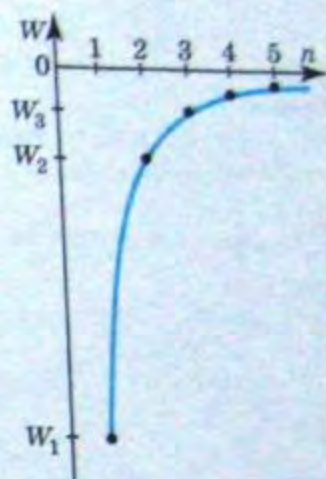
1. 94 нм.
2. $7,2 \cdot 10^{-19}$ Дж; $9,1 \cdot 10^5$ м/с;
 $3,8 \cdot 10^{-19}$ Дж.
3. $1,8 \cdot 10^{-7}$ м.
4. $6,4 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
5. 0,51 В.
6. $3,15 \cdot 10^{-9}$ К/с.
7. 3,1 В.
8. $3,45 \cdot 10^{-25}$ кг·м/с.
9. 5,7 см.

Вправа 34

1. а) 2,42 пм, 73,22 пм
б) 4,8 пм, 75,6 пм.
2. 24,2 пм.
3. 2,42 пм, 6,6 кеВ,
 $4,4 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с.
4. 0,26 МеВ, $9,3 \cdot 10^{-12}$ кг·м/с.
5. 0,1 МеВ.

Вправа 35

1. $3 \cdot 10^{-19}$ Дж.
2. На третій. Три лінії.
3. 3.
4. 81,7 нН, 511 ГВ/м; 5,11 нН, 31,9 ГВ/м.
5. 9 разів.
6. а) Зменшиться за модулем у n раз;
б) зменшиться за модулем в n^2 раз.
7. Див. мал. 311.



Мал. 311

8. Зменшиться (враховуючи її знак) в k^2 раз.
9. Більша у $(1 + n^{-1})^2$ раз.

Розділ 7. Фізика атомного ядра та елементарних частинок

Вправа 36

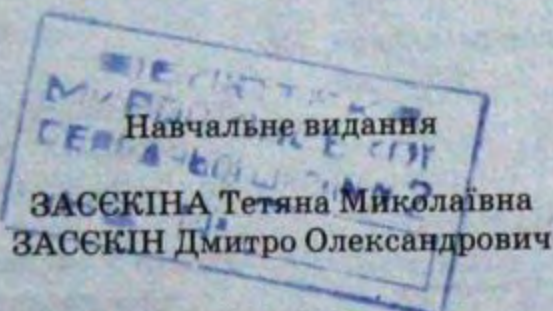
1. 8,48 МеВ.
2. 220 МеВ.
3. 5,6 МеВ; 8 МеВ.
4. 1,013; 235 а.о.м.

Вправа 37

1. 0,29.
2. Через 64,5 доби.
3. 10,7 МБк.
4. За 5 хв 5 с.
5. $3,3 \cdot 10^5$ с.
6. $9,3 \cdot 10^{18}$.
7. 0,26 кг.
8. 121 рік.
9. 25%.

Вправа 38

1. ${}^{24}_{11}\text{Na}$; ${}^0_{+1}e$; ${}^{26}_{12}\text{Mg}$; ${}^1_1\text{H}$; ${}^1_1\text{H}$.
2. Поглинається;
виділяється, поглинається.
3. 2,8 МеВ.
4. Ізотоп Оксигену ${}^{16}_8\text{O}$.
5. 161° .
6. 2,2 МеВ; $5,3 \cdot 10^{20}$ Гц.



Навчальне видання

ЗАСЕКІНА Тетяна Миколаївна
ЗАСЕКІН Дмитро Олександрович

ФІЗИКА

Підручник для 11 класу
загальноосвітніх навчальних закладів
(академічний рівень, профільний рівень)

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

ВИДАНО ЗА РАХУНОК ДЕРЖАВНИХ КОШТІВ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО

Редактори *Г. О. Калмикова, І. В. Луценко*

Художній редактор *Н. Г. Антоненко*

Художник обкладинки *Н. Г. Антоненко*

Технічний редактор *Ц. Б. Федосіхіна*

Коректори *Л. С. Бобир, Л. А. Еско*

Формат 70×100/16. Ум. друк. арк. 27,3.

Обл.-вид. арк. 28,5. Тираж 18 050 прим. Зам. № 12-05-1002.

ТОВ «Сиция»

61017, м. Харків, вул. Кокчетавська, 20

Свідоцтво ДК № 3363 від 30.12.2008 р.

Віддруковано з готових діапозитивів

ТОВ «ПЕТ»

Св. ДК № 3179 від 08.05.2008 р.

61024, м. Харків, вул. Ольмінського, 17.