

Міністерство освіти і науки України  
Відокремлений структурний підрозділ  
«Любешівський технічний фаховий коледж  
Луцького національного технічного університету»



## ***Фізика***

### ***Конспект лекцій***

*для здобувачів освіти освітньо-професійного ступеня*

*фаховий молодший бакалавр*

галузь знань 13 Механічна інженерія  
спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Любешів 2023

УДК 53(07)  
Л 95

До друку

Голова методичної ради ВСП «Любешівський ТФК ЛНТУ»  
\_\_\_\_\_ Герасимик-Чернова Т.П.

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій коледжу  
Бібліотекар \_\_\_\_\_ М.М. Демих

Затверджено методичною радою ВСП «Любешівський ТФК ЛНТУ»  
протокол № \_\_\_\_\_ від «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Рекомендовано до видання на засіданні циклової методичної комісії викладачів  
математичних та природничо-наукових дисциплін

протокол № \_\_\_\_\_ від «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Голова циклової методичної комісії \_\_\_\_\_ Остимчук А. В.

Укладач: \_\_\_\_\_ В.О. Люсік, викладач

Рецензент: \_\_\_\_\_

Відповідальний за випуск: \_\_\_\_\_ Остимчук А. В., викладач, голова циклової методичної  
комісії викладачів математичних та природничо-наукових дисциплін.

Фізика [Текст]: конспект лекцій для здобувачів освіти освітньо-професійного ступеня  
фаховий молодший бакалавр галузь знань 13 Механічна інженерія спеціальність 133  
Галузеве машинобудування денної форми навчання/уклад. В.О. Люсік. – Любешів: ВСП  
«Любешівський ТФК ЛНТУ», 2023. – 104 с.

Методичне видання складене відповідно до діючої програми курсу «Фізика» з метою  
організованого вивчення лекційного матеріалу здобувачами освіти.

©Люсік В.О., 2023

**Тема 1. Фізика, її зв'язок з іншими науками. Методи наукового пізнання. Міжнародна система одиниць.**

**Фізика** – це наука про найбільш загальні властивості і форми руху матерії. **Матерія** – це все, що нас оточує, існує незалежно від нашої свідомості і діє на наші відчуття.

Відомі два види матерії: речовина і поле. До першого відносять, наприклад, атоми, молекули і всі побудовані з них тіла. До другого – електромагнітні, гравітаційні та інші поля. Під рухом матерії розуміють будь-яку її зміну.

Фізичні закони – сконденсовані підсумки всіх знань про рух матерії. Під час вивчення навколишнього світу дослідники користуються такими методами фізики: розмірковуванням, спостереженням, дослідом. Все накопичене знання за допомогою спостереження вчені пояснюють за допомогою наукових гіпотез.

Гіпотеза – це наукове припущення, яке висувають для пояснення деякого явища. Вона потребує перевірки й доведення, щоб стати науковою теорією або законом.

Основним методом у фізиці є дослід, тобто спостереження досліджуваного явища в точно контрольованих умовах, які дозволяють слідкувати за перебігом явища й відтворити його кожного разу при повторенні цих умов.

Фізична теорія являє собою систему основних ідей, які узагальнюють дослідні данні та відбивають основні закономірності перебігу природних явищ.

Фізику підрозділяють на так звану класичну фізику й квантову. Класичною називається та фізика, створення якої було завершено на початку ХХ століття. Класична фізика базується на законах Ньютона й стала настільки плідною, що у фізиків склалося враження, що будь-яке явище можна пояснити за допомогою ньютонівських законів. Але ті ж самі вчені-фізики вказували на слабкі місця у класичній фізиці: невдалі спроби створення теорії випромінювання абсолютно чорного тіла, й дивна поведінка ефіру –

гіпотетичного середовища, в якому мали розповсюджуватися електромагнітні хвилі. Аналіз цих труднощів призвів до принципово нових уявлень про випромінювання: випромінювання електромагнітних хвиль окремими порціями – квантами, що надало поштовх до створення нової (квантової) фізики. А через протиріччя дослідних фактів щодо ефіру довелося переглянути загальноприйняті уявлення про простір та час. Це привело до виникнення теорії відносності.

Механіка, заснована на законах Ньютона, строго говорячи, невірна. Але для деякого кола явищ ця механіка цілком задовільна. Таким чином, розвиток науки, не перекреслив ньютонівську механіку, а тільки встановив межі, у яких вона справедлива. Ньютонівська механіка увійшла як складова частина в загальну будову фізичної науки.

Зародження квантової механіки проходило так. Спочатку була створена Нільсом Бором у 1913 р. теорії атома, яка поряд із підпорядкуванням руху електрона в атомі законам класичної механіки накладала на цей рух спеціальні квантові обмеження. Потім Луї де Бройль висунув у 1924 р. сміливу гіпотезу про те, що частинки речовини повинні виявляти за певних умов хвильові властивості. Гіпотеза де Бройля незабаром одержала блискуче експериментальне підтвердження – було доведено, що із частинками речовини пов'язаний якийсь хвильовий процес, що повинен бути врахований при розгляді механіки атома. Результатом цього відкриття було створення Ервіном Шредінгером і Вернером Гейзенбергом нової фізичної теорії – хвильової або квантової механіки. Квантова механіка досягла разючих успіхів у поясненні атомних процесів і будови речовини. В тих випадках, коли вдалося перебороти математичні труднощі, були отримані результати, що чудово узгоджуються з дослідом. Наступні десятиліття ознаменувалися чудовими досягненнями в області вивчення атомного ядра. Вчені й інженери в такій мірі опанували ядерними процесами, що стало можливим практичне використання ядерної енергії.

Фізика – найбільш фундаментальна з усіх наук, найбільш всеосяжна; величезним був її вплив на весь розвиток науки. Усі природничі науки відчують на собі вплив фізики. Так, наприклад, хімія виявила багато дивних зв'язків між різними елементами, які, по кінцевому рахунку, були пояснені квантовою механікою. Отже, насправді, теоретична хімія – це фізика. Якщо взяти біологію, то побачимо, що ця наука вивчає безліч фізичних явищ: циркуляцію крові, тиск, проходження електричних імпульсів по нервовим клітинам і т. д. Ось чому фізику вимушені вивчати студенти майже всіх спеціальностей.

Навчившись прогнозувати фізичні явища й керувати ними, людина стала «велетнем»: вона створила двигуни, у мільйони разів потужніші за людські руки, комп'ютери, які розширили можливості науки, техніки й мистецтва, об'єднала всіх жителів Землі надійними системами зв'язку. Відбулися глибокі, якісні зміни в багатьох галузях науки й техніки, пов'язані з важливими відкриттями в галузі фундаментальної фізики.

Відкриття радіоактивності, електромагнітних хвиль, ультразвуку, реактивного руху тощо сприяли тому, що людина, застосовуючи ці знання, просунула розвиток техніки далеко вперед. Людина навчилася передавати на відстань не лише звук, але й зображення. Людина вийшла в космос, висадила на Місяці, побачила його зворотний бік. За допомогою унікальних оптичних приладів можна дізнатися, з якої речовини складаються далекі планети. Отримані дані коли-небудь дозволять людині зробити нові надзвичайні відкриття, що приведуть до подальших досягнень у науці й техніці.

Наука стала безпосередньою продуктивною силою. Однак справа не лише в «практичній» цінності фізики: знання фізики необхідне кожному з нас, щоб задовольнити природну цікавість у розумінні навколишнього світу. Фізичні знання і методи народжують нові науки, наприклад, біофізику, геофізику, астрофізику.

**Фізична величина** — це характеристика, яка є спільною для багатьох матеріальних об'єктів або явищ у якісному відношенні, але може набувати індивідуального значення для кожного з них. Шлях, час, маса, густина, сила, температура, тиск, напруга, освітленість — це далеко не всі приклади фізичних величин, з якими ви вже познайомилися в ході вивчення фізики. Виміряти фізичну величину — це означає порівняти її з однорідною величиною, взятою за одиницю.

Завдання вибудувати систему одиниць на науковій основі було поставлене перед французькими вченими наприкінці XVIII ст., після Великої французької революції. У результаті було створено міжнародну систему одиниць СІ, яка згодом стала у світі основною. Еталоном для вимірювання відстаней обрали спеціальний відрізок, калібрований за довжиною. Довжину цього відрізка було визначено як 1 метр.

Час до 1960 р. вимірювали за допомогою еталонного годинника. За еталон був обраний маятниковий годинник, який зберігався в Палаті мір і ваг; у лабораторіях використовували його копії. За одиницю часу в СІ обрано інтервал часу 1 секунда.



Рис. 2.1. Стародавні терези для зважування тютюну (середина XIX ст.)



Рис. 2.2. Міжнародний еталон метра, що використовувався в 1899–1960 рр. і зараз зберігається в Палаті мір і ваг у м. Севрі (неподалік Парижа)

Масу тіла визначали порівнянням із масою еталонного зразка (платиново-іридієвого циліндра, що має діаметр і висоту 39 мм), який також зберігається в Палаті мір і ваг. Масу цього зразка визначено як 1 кілограм. Порівняння з еталоном здійснюється за допомогою терезів.

Наведемо сучасні означення деяких фізичних величин та їхніх одиниць.

**Час** — фізична величина, яка характеризує послідовну зміну явищ і станів матерії, їхню тривалість. Одиниця часу — секунда (с). Секунда дорівнює

9 192 631 770 періодам електромагнітного випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану ізотопу Цезію-133.

**Довжина** — фізична величина, яка характеризує протяжність простору. Одиниця довжини — метр (м). Метр дорівнює довжині шляху, який проходить світло у вакуумі за проміжок часу  $1/299\,792\,458$  секунди.

**Маса** — фізична величина, яка характеризує інертні та гравітаційні властивості матеріальних об'єктів. Одиниця маси — кілограм (кг). Кілограм дорівнює масі еталонного циліндра.

### Контрольні питання

1. Що вивчає фізика?
2. Що таке фізична величина?
3. Що означає вислів «виміряти фізичну величину»?
4. Назвіть основні одиниці СІ?
5. Чим відрізняється класична механіка від квантової?
6. Чому фізика перша серед інших наук почалась розвиватись?
7. Які ви знаєте методи наукового пізнання?
8. Що таке фізична теорія?
9. Яку роль відіграє гіпотеза у наукових дослідженнях?
10. Доведіть значення наукового експерименту?

## **Тема 2. Механічний рух. Фізичне тіло і матеріальна точка.**

### **Рівноприскорений прямолінійний рух.**

Механіка набула значного розвитку через те, що у повсякденному житті постійно спостерігаємо механічний рух.

**Механічний рух** – зміна положення одних тіл відносно інших.

Система відліку – це сукупність нерухомих одних відносно інших тіл, по відношенню до яких розглядають рух, і годинник (секундомір) для виміру часу.

**Поступальний рух** – це рух, при якому пряма, пов'язана з тілом не змінює своєї орієнтації відносно зовнішніх тіл (див. рис. 1). Інакше рух називається **обертальним**.

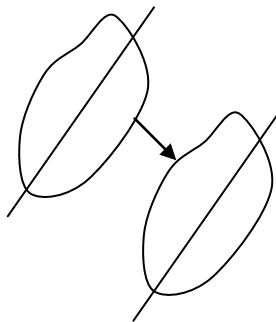


Рис. 1

**Матеріальна точка** – це тіло, розмірами якого можна знехтувати у даній задачі. Матеріальна точка здійснює лише поступальний рух, або покоїться.

**Абсолютно тверде тіло** – це тіло, відстані між будь-якими двома точками якого постійні. Іншими словами, розміри і форма абсолютно твердого тіла не змінюються при його русі. Часто абсолютно тверде тіло розглядають як систему матеріальних точок, які жорстко зв'язані між собою.

Розглянемо маятник: на підвішеній до скелі нитці коливається сферична посудина з водою всередині (див. рис. 2). Вода з посудини не може витікати.

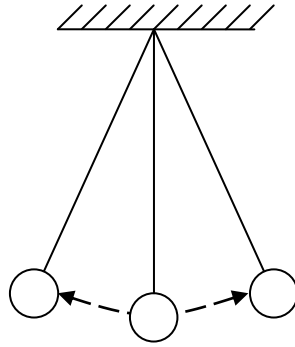


Рис. 2

Якщо температура ззовні досить висока – у середині кулі знаходиться вода, то кулю вважаємо матеріальною точкою. Дійсно, враховуючи слабку в'язкість води, ми відмічаємо, що вся маса води під час руху маятника не обертається (будь-яка пряма, пов'язана із водою залишається паралельною сама собі). А якщо вода внаслідок зниження температури перетвориться на лід, то рух посудини з льодом – обертальний рух твердого тіла.

**Траєкторія** – це лінія, вздовж якої рухається тіло. На рис. 3 показано приклад траєкторії тіла *ACB*.

**Шлях** – довжина траєкторії (довжина кривої *ACB*).

**Переміщення** – вектор, який з'єднує початок і кінець траєкторії.

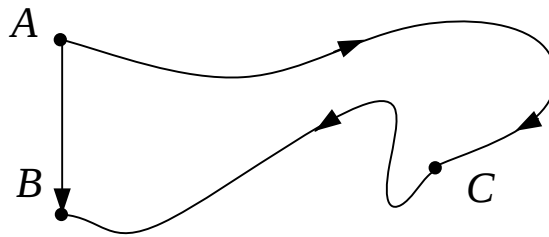
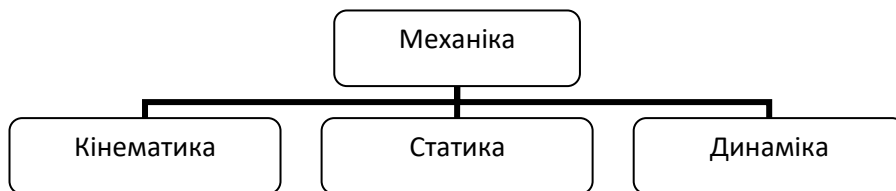


Рис. 3

Механіка поділяється на три розділи:



**Кінематика** займається описом руху тіл, не аналізуючи причини руху (сили). **Статика** вивчає умови рівноваги тіл. **Динаміка** вивчає сили.

**Рівномірний рух** – це рух при якому тіло за будь-які рівні проміжки часу проходить однакові шляхи. Механічний рух за формою траєкторії можна поділити на *прямолінійний* (коли траєкторія є прямою) та *криволінійний*.

Отримаємо рівняння рівномірного прямолінійного руху. Розглянемо рух візка. Перш за все пов'яжемо систему відліку з землею. Скористаємось означенням швидкості:

$$S = v \cdot t$$

$$S = x - x_0$$

$$x - x_0 = v \cdot t$$

$$x = x_0 + v \cdot t \quad (1)$$

Отримане рівняння є рівнянням руху для випадку рівномірного прямолінійного руху вздовж обраної осі координат, оскільки з часом координата тіла буде збільшуватись від  $x_0$  до деякого значення  $x$ .  $x_0$  називають **початковою координатою**.

**Початкова координата** – це координата тіла в момент часу  $t = 0$ . Іншими словами це координата тіла в той момент часу коли ми почали розглядати його рух. Початкова координата може набувати додатних або від'ємних значень та дорівнювати нулю для випадку, коло тіло в момент часу  $t = 0$  знаходиться в початку координат. Якщо напрям руху буде протилежним до обраного напрямку осі координат, то з часом координата тіла буде зменшуватись, і тоді рівняння руху (1) запишеться у вигляді:

$$x = x_0 - v \cdot t \quad (2)$$

Знак «мінус» перед швидкістю вказує на те, що тіло рухається проти осі координат.

Враховуючи всі можливі значення, яких можуть набувати коефіцієнти в рівнянні (1), в загальному вигляді його можна записати:

$$x = \pm x_0 \pm v_x \cdot t \quad (3)$$

Розв'язуючи задачі слід звернути уваги на вибір знаку «+» чи «-» перед коефіцієнтами рівняння руху. З вище сказаного можна сформулювати такі *правила розстановки знаків в рівнянні руху*:

1. Перед початковою координатою  $x_0$  ставиться знак
  - «+», якщо початкова координата додатня;
  - «-», якщо початкова координата від'ємна;
2. Перед модулем швидкості ставиться знак
  - «+», якщо тіло рухається вздовж обраної осі координат;
  - «-», якщо тіло рухається проти обраної осі координат;

Рух матеріальної точки, під час якого її швидкість за будь-які однакові проміжки часу збільшується або зменшується на ту саму величину, називається **рівнозмінним**. Такий рух є найпростішим нерівномірним рухом. Якщо в початковий момент часу  $t_0 = 0$ , тіло має початкову швидкість  $v_0$ , а через певний час  $t$  його швидкість дорівнює  $v$ , то вектор прискорення прямолінійного рівнозмінного руху можна визначити за формулою

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_t - \vec{v}_0}{t}. \quad (2.1.8)$$

***Прискорення - це векторна фізична величина, що дорівнює відношенню зміни швидкості до часу, протягом якого ця зміна відбулася.***

Якщо швидкість за будь-які однакові проміжки часу збільшується на ту саму величину, то такий рух називається **рівноприскоренням**. Якщо швидкість тіла зменшується згодом на ту саму величину, то рух називають **рівносповільненням**. У цілому рівнозмінним називають такий рух тіла, за якого прискорення є сталим.

Якщо рівнозмінний рух прямолінійний, то за одну з осей координат (наприклад,  $Ox$ ) зручно взяти пряму, по якій рухається матеріальна точка, а за її додатний напрям - напрям початкової швидкості  $v_0$ . Тоді прискорення обчислюють як скалярну величину - проекцію вектора прискорення - і формулу (2.1.8) можна записати в скалярній формі:

$$\alpha = \frac{v_t - v_0}{t} . \quad (2.1.9)$$

Проекція вектора прискорення буде мати знак "+", якщо напрям вектора прискорення збігається з напрямом вектора  $v_0$ , і знак "-" у випадку протилежного напрямку цих векторів.

### Контрольні питання

1. Що таке система відліку?
2. Що таке шлях і що таке переміщення? Який зв'язок існує між ними?
3. Які кінематичні величини використовують для опису руху матеріальної точки?
4. Які використовують способи опису руху?
5. Як треба розуміти відносність руху? Як пов'язані між собою швидкості точки у двох різних системах відліку?
6. Що таке прискорення і для чого його потрібно знати?
7. Під час будь-якого нерівномірного руху швидкість змінюється. Як характеризує цю зміну прискорення?
8. Чим відрізняється сповільнений прямолінійний рух від прискореного?
9. Що таке рівноприскорений рух?

### **Тема 3. Закони динаміки Ньютона. Інертність та інерція. Маса. Сила. Сили в природі. Види сил в механіці.**

Динаміка вивчає рух тіл в зв'язку з силами, що на них діють. Сила, яка діє на тіло, є мірою взаємодії його з оточуючими тілами чи полями.

Основна задача динаміки полягає у визначенні положення тіла в довільний момент часу за відомим початковим положенням тіла, його початкової швидкості та силам, що діють на нього. В основі динаміки лежать три закони, сформульовані І. Ньютоном у 1687 р.

Першим законом Ньютона називають закон інерції, який відкрив ще Г. Галілей. Згідно цього закону тіло, на яке не діють інші тіла, або перебуває в спокої, або рухається прямолінійно і рівномірно. Таке тіло називається вільним, а його рух - вільним рухом або рухом за інерцією.

Вільне тіло є фізичною абстракцією. На практиці розглядають тіла, поставлені в такі умови, коли зовнішні дії на них по можливості усунені або практично компенсують одна одну.

Результати експериментів Галілея свідчили про те, що чим менший опір рухові, тим менша зміна швидкості і тим довше рухається кулька. Розмірковуючи над цими результатами, Галілей дійшов геніального висновку: за повної відсутності сили тертя або опору швидкість тіла стає постійною, і для підтримання руху не потрібно прикладати жодної сили. Математично це можна записати так:  $\frac{dv}{dt} = 0$ , якщо  $F = 0$ . Явище збереження тілом швидкості за відсутності зовнішніх дій на нього з боку інших тіл, називають **інерцією**, а цю властивість тіла - **інертністю**.

Про те, що тілу властиво зберігати не будь-який рух, а саме прямолінійний, свідчить такий дослід. Кулька, що рухається прямолінійно по плоскій горизонтальній поверхні, стикаючись з перешкодою, яка має криволінійну форму, під дією цієї перешкоди змушена рухатися по дузі. Однак, коли кулька доходить до кінця перешкоди, вона перестає рухатися криволінійно і знову починає рухатися по прямій.

Ми живемо у світі різних тіл, які постійно діють одне на одне, в результаті їхня швидкість змінюється. Цю дію неможливо усунути, її можна лише скомпенсувати. Тоді тіло не буде змінювати свій рух, його швидкість залишатиметься незмінною. У цьому полягає явище інерції.

***I закон Ньютона:** існують такі системи відліку, відносно яких тіла, які рухаються поступально, зберігають свою швидкість незмінною, якщо на них не діють інші тіла, або дія інших тіл скомпенсована. Такі системи відліку називають інерціальними.*

Для розрахунку практично всіх рухів поблизу земної поверхні систему відліку, пов'язану з Землею, можна розглядати як інерціальну. Але при розгляді руху космічних тіл, інших планет вважати цю систему інерціальною не можна, тому що Земля обертається навколо своєї осі і рухається навколо Сонця.

Усі наші спостереження підтверджують, що зміна швидкості тіла завжди викликається дією на нього інших тіл. При взаємодії обидва тіла змінюють швидкість. І ця зміна залежить не тільки від умов та інтенсивності взаємодії, а й від властивостей самих тіл. При однаковій дії різні тіла змінюють свою швидкість по-різному.

Властивість тіла, яка полягає в тому, що тіло не може миттєво змінити швидкість, бо для цього потрібен час, називається ***інертністю тіла***. Чим менше змінюється швидкість тіла при взаємодії, тим тіло є більш інертним.

Величину, яка кількісно характеризує інертність тіла, називають ***масою тіла***. Чим більша маса тіла, тим воно інертніше. Маса тіла позначається літерою ***m*** та вимірюється в кілограмах у Системі Інтернаціональній. Приблизно можна вважати, що 1 кілограм дорівнює масі 1 літру чистої води за кімнатної температури. За еталон маси взято спеціальний циліндр, виготовлений зі сплаву платини та іридію. Цей еталон зберігається в Міжнародному бюро мір і ваги у місті Севр (Франція).

Масу тіла можна визначити за зміною його швидкості при взаємодії з тілом відомої маси. Якщо взяти тіло відомої маси і привести його у взаємодію з тілом невідомої маси, то за відношенням їх прискорень можна знайти невідому масу. Відношення модулів прискорень двох тіл, що взаємодіють, дорівнює оберненому відношенню їхніх мас.

Простішим способом визначення маси тіла є зважування.

При розв'язанні основного завдання механіки необхідно знати прискорення, яке набирає одне тіло, а не обидва. У такому випадку говорять, що на тіло діє сила.

**Сила** — це фізична величина, яка кількісно характеризує дію одного тіла на інше, в результаті якої воно набуває прискорення. Сила є векторною величиною. Тобто, крім числового значення, сила має напрямок. Сила позначається літерою  $F$  та в Системі Інтернаціональній вимірюється в ньютонах. **1 ньютон** — це сила, яка тілу масою 1 кг, що перебуває в стані спокою, надає за 1 секунду швидкість 1 метр за секунду при відсутності тертя. Виміряти силу можна за допомогою спеціального пристрою — *динамометра*.

В залежності від характеру взаємодії в механіці розрізняють три види сил:

- силу тяжіння,
- силу пружності,
- силу тертя.

Як правило, на тіло діє не одна, а декілька сил. У такому випадку розглядають рівнодійну сил. **Рівнодійною сил** називають таку силу, яка діє так само, як декілька сил, що одночасно діють на тіло. Користуючись результатами дослідів, можна зробити висновок: рівнодійна сил, спрямованих вздовж однієї прямої в один бік, спрямована в той же бік, а її значення дорівнює сумі значень цих сил. Рівнодійна двох сил, спрямованих вздовж однієї прямої в протилежні боки, спрямована в бік більшої сили та дорівнює різниці значень цих сил.

**II закон Ньютона:** сила, яка діє на тіло, дорівнює добутку маси тіла на прискорення, надане цією силою.

*Наслідки II закону Ньютона:*

1. Закон справедливий тільки в інерціальних системах відліку.
2. Сила — причина зміни швидкості. Напрямок прискорення завжди співпадає з напрямком сили.
3. Закон справедливий для сили будь-якої природи.

Дія тіл одне на одне має характер взаємодії. Кожне з тіл діє на друге та надає йому прискорення. Відношення модулів прискорень взаємодіючих тіл дорівнює оберненому відношенню їх мас прискорення обох тіл напрямлені в протилежні сторони. Математично це записується в такому вигляді :

$$F_1 = -F_2$$

Ця рівність виражає третій закон Ньютона.

***Тіла діють одне на одне з силами рівними за модулем та протилежними за напрямом.***

Цей закон нам показує що сили завжди з'являються парами.

Розглянемо дві системи відліку  $K$  і  $K'$  (див. рис. 3). Система  $K'$  рухається відносно системи  $K$  з постійною швидкістю  $V_0$ . Осі  $x$  і  $x'$  збігаються, а осі  $y$  і  $y'$  та  $z$  і  $z'$  паралельні між собою.

Зв'язок між координатами  $x, y, z$  деякої точки  $P$  і координатами  $x', y', z'$  тієї ж точки в системі  $K'$  такий:

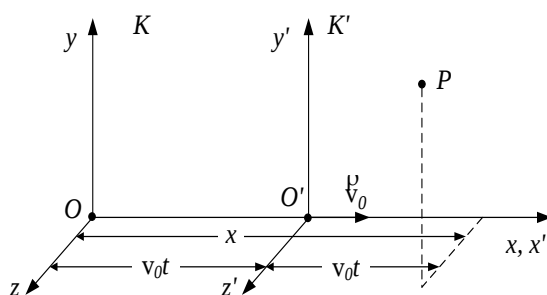


Рис. 3

$$x = x' + v_0 t, \quad y = y', \quad z = z'.$$

Продиференціювавши ці рівняння за часом, отримаємо зв'язок між швидкостями точки  $P$  у двох системах відліку:

$$\begin{cases} v_x = v'_x + v_0, \\ v_y = v'_y, \\ v_z = v'_z. \end{cases} \quad (2.4)$$

Ці три скалярні формули дають одну векторну:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{v}_0. \quad (2.5)$$

Формули (2.4) і (2.5) дають правило додавання швидкостей у класичній механіці. На відміну від системи (2.4) формула (2.4) справедлива для довільної орієнтації систем координат  $K$  і  $K'$ .

Якщо ми продиференціюємо (2.5) за часом ще раз, то отримаємо висновок, що прискорення будь-якого тіла в усіх інерціальних системах відліку залишається одним і тим же:  $\mathbf{a} = \mathbf{a}'$ .

Таким чином, рівняння динаміки не змінюються при переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої.

Твердження про те, що усі механічні явища в різних інерціальних системах відліку протікають однаковим чином, називається принципом відносності Галілея.

У фізиці розрізняють чотири фундаментальні взаємодії:

- 1) гравітаційна (обумовлена всесвітнім тяжінням);
- 2) електромагнітна (здійснюється за допомогою електромагнітного поля),
- 3) сильна (забезпечує зв'язок частин у атомному ядрі),
- 4) слабкі (відповідальне за процеси розпаду елементарних частинок).

Гравітаційні та електромагнітні сили є фундаментальними, оскільки їх не можна звести до інших, більш простих сил. Пружні сили та сили тертя не є фундаментальними. Закони фундаментальних сил дуже прості.

**Закон всесвітнього тяжіння** визначає силу  $F$  взаємного притягання між точковими масами  $m_1$  і  $m_2$ , які знаходяться на відстані  $r$ :

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

Гравітаційна стала  $G=6,670 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ . Направлена сила вздовж прямої, яка з'єднує точкові тіла  $m_1$  і  $m_2$ .

**Сила тяжіння**

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

– це сила, з якою Земля притягає до себе будь-яке тіло маси  $m$ . Усі тіла (які мають більш обтічну форму, щоб повітря діяло на тіло з найменшою силою тертя) біля поверхні Землі падають з однаковим прискоренням  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – прискоренням вільного падіння.

Сила, з якою тіло діє на опору чи підвіс, називається **вагою тіла**. Отже фізичні величини вага й маса тіла – зовсім різні величини й мають різні одиниці вимірювання: ньютон (для ваги), кілограм (для маси).

Сила, з якою діє опора чи підвіс на тіло, називається **силою реакції опори** й позначаються  $\vec{N}$ . Сила реакції опори завжди направлена по нормалі до поверхні, на якій знаходиться тіло.

**Сили тертя** виникають при переміщенні тіл (або їхніх частин), які дотикаються одне до одного.

Існує два види тертя: зовнішнє і внутрішнє. Зовнішнє тертя виникає між різними тілами, а внутрішнє – між частинами одного і того ж суцільного тіла (наприклад, рідини або газу), які дотикаються одне до одного і зміщуються одне відносно одного.

Тертя між поверхнями двох твердих тіл за відсутності будь-якого прошарку між ними (наприклад, мастила між ними) називається сухим. Вирізняють сухе тертя ковзання та кочення.

Модуль сили сухого тертя ковзання, яка діє на тіло, що знаходиться на плоскій гладкій поверхні, прямо пропорційний до величини сили реакції опори:

$$F_{тер} = kN.$$

Коефіцієнт пропорційності  $k$  називається коефіцієнтом тертя, який приймає значення  $0 < k < 1$ .

Сила тертя виникає не лише при ковзанні тіл одних відносно інших, а й при намаганнях викликати таке ковзання. У останньому випадку сила тертя називається силою тертя спокою.

За малих швидкостей сила в'язкого тертя прямо пропорційна швидкості тіла, яке рухається через в'язке середовище:

$$F_{\text{тер}} = k_1 v.$$

За великих швидкостей – пропорційна квадрату швидкості:

$$F_{\text{тер}} = k_2 v^2.$$

Величина коефіцієнтів залежить від форми та розмірів тіла.

**Сила пружності.** Під дією прикладених до тіла сил реальне тіло деформується, тобто змінює свою форму й об'єм. Якщо після припинення дії сили тіло приймає попередні розміри, деформація називається пружною. Пружні деформації спостерігаються у тому випадку, якщо обумовлююча деформація сила не перебільшує деякої, визначеної для кожного тіла межі (межі пружності).

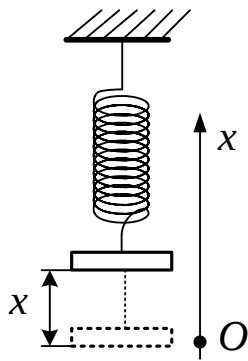


Рис. 4

Розглянемо пружину, верхній кінець якої закріплений, а до нижнього приєднано вантаж (див. рис. 4). Якщо вантаж змістити на невелику відстань  $x$ , то у пружині виникне пружна сила

$$F = -k x,$$

де  $k$  – коефіцієнт пружності пружини; знак мінус у правій частині формули вказує на те, що проекція пружної сили на вертикальну вісь і координата  $x$  мають різні знаки. Твердження про пропорційність між пружною силою та деформацією має назву **закону Гука**.

У системі СІ силу вимірюють у ньютонax ( $H$ ). Із рівняння другого закону Ньютона випливає, що  $1 H = kg \cdot m/s^2$ .

### Контрольні питання

1. Наведіть приклади, які свідчать, що швидкість довільного тіла змінюється тільки під дією інших тіл. Що називають інерцією?
2. У чому полягає властивість тіл, яку називають інертністю?
3. Як формулюється перший закон Ньютона?
4. Які системи відліку є інерціальними? Неінерціальними?
5. Чи можна вважати інерціальними системи відліку, які нерухомо пов'язані із Землею?
6. Сформулюйте принцип відносності Галілея.
7. Які види сил досліджує механіка?
8. Сформулюйте закон Гука?
9. Для яких тіл справедливий закон Всесвітнього тяжіння?

**Тема 4. Робота та енергія. Потужність. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу.**

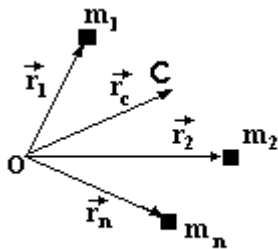


Рис. 4.1

Імпульсом  $\vec{P}$  тіла називається вектор, величина якого дорівнює добутку маси тіла на його швидкість. Напрямок вектора імпульсу співпадає з вектором швидкості

$$\vec{P} = m\vec{V}. \quad (4.1)$$

Імпульс системи тіл ( $\vec{P}_c$ ) – це векторна сума

Рисунок 4.1  
імпульсів тіл цієї системи

$$\vec{P}_c = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{V}_i. \quad (4.2)$$

Імпульс системи тіл можна знайти, ввівши поняття центра мас системи (рис.4.1) Радіус-вектор  $\vec{r}_c$  центра мас визначається рівнянням:

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{r}_i}{m} \quad (4.3)$$

Взявши похідну за часом, одержимо

$$\frac{d\vec{r}_c}{dt} = \vec{V}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot \frac{d\vec{r}_i}{dt}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{V}_i}{m} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{P}_i}{m} = \vec{P}_c,$$

звідки маємо, що імпульс системи тіл дорівнює добутку маси системи на швидкість руху її центра мас  $\vec{P}_c = m\vec{V}_c$ .

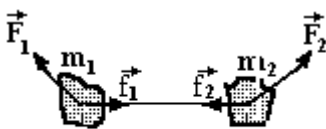


Рисунок 4.2

Нехай два тіла  $m_1$  і  $m_2$  взаємодіють з силами  $f_1$  і  $f_2$ . На них діють зовнішні сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  (рис.4.2). Позначимо

$\vec{V}_{10}$  і  $\vec{V}_{20}$  - швидкості тіл в момент часу  $t$ ,  $\vec{V}_1$  і  $\vec{V}_2$  -

швидкості в момент часу  $t+dt$ . Запишемо другий закон Ньютона для кожного тіла

$$\begin{cases} (\vec{F}_1 + \vec{f}_1)dt = m_1 \vec{V}_1 - m_1 \vec{V}_{10} \\ (\vec{F}_2 + \vec{f}_2)dt = m_2 \vec{V}_2 - m_2 \vec{V}_{20} \end{cases}$$

Додаємо ці рівняння

$$(\vec{F}_1 + \vec{F}_2)dt + (\vec{f}_1 + \vec{f}_2)dt = (m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2) - (m_1 \vec{V}_{10} + m_2 \vec{V}_{20}). \quad (4.4)$$

По третьому закону Ньютона  $(\vec{f}_1 + \vec{f}_2) = 0$  як внутрішні сили.

Якщо векторна сума зовнішніх сил дорівнює нулю  $(\vec{F}_1 + \vec{F}_2) = 0$ , система називається ізольованою, або замкнутою. Для такої системи із (4.4) одержуємо  $(m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2) = (m_1 \vec{V}_{10} + m_2 \vec{V}_{20}) = \text{const}$ , тобто **векторна** сума імпульсів замкнутої системи залишається незмінною. Це є закон збереження імпульсу. Якщо ж система не замкнута, то її імпульс змінюється на величину імпульсу зовнішніх сил  $(\vec{F}_1 + \vec{F}_2)dt$ .

В основі реактивного руху лежить закон збереження імпульсу. Від тіла з певною швидкістю відокремлюється деяка маса. У відповідності із законом збереження імпульсу, швидкість руху тіла теж буде змінюватись, тобто це рух тіла змінної маси. Типовим прикладом реактивного руху є рух ракети. Продукти згорання палива викидаються через сопло ракети, тоді її корпус рухається в протилежному напрямку (рис.4.3).

Знайдемо рівняння, яке описує рух ракети, та швидкість її руху.

Введемо позначення:

$m$  – маса ракети в момент часу  $t$ ;

$\vec{V}$  – миттєва швидкість корпусу ракети відносно вибраної системи координат  $x, y, z$ ;

$\vec{U}$  – швидкість продуктів згорання палива відносно цієї ж системи координат  $x, y, z$ ;

$d\vec{V}$  – зміна швидкості корпусу ракети;

$dm$  – маса викинутих за час  $dt$  продуктів згорання;

$\vec{F}$  – рівнодіюча зовнішніх сил.

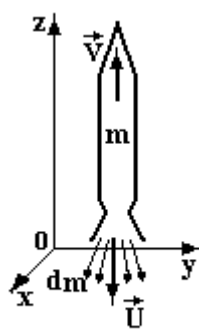


Рис. 4.3

Запишемо другий закон Ньютона: імпульс сили  $\vec{F}dt$  дорівнює зміні імпульсу системи „ракета-продукти згорання”

$$d\vec{P} = \vec{P}(t + dt) - \vec{P}(t) = (m - dm)(\vec{V} + d\vec{V}) - dm\vec{U} - m\vec{V}$$

$$\begin{aligned}\vec{F}dt &= \vec{P}(t+dt) - \vec{P}(t) = (m-dm)(\vec{V}+d\vec{V}) - dm\vec{U} - m\vec{V} \\ \vec{F}dt &= m\vec{V} + md\vec{V} - dm\vec{V} - dmd\vec{V} - dm\vec{U} - m\vec{V}\end{aligned}$$

Нехтуючи доданком  $dmd\vec{V}$ , який набагато менший, ніж інші, так як є добуток двох нескінченно малих величин, одержуємо

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} + (\vec{V} + \vec{U}) \frac{dm}{dt}. \text{ Векторна сума } \vec{V} + \vec{U} \text{ дає швидкість } \vec{W} \text{ витоку газів}$$

відносно корпусу ракети. Її величина залишається незмінною, так як вона визначається конструкцією сопла реактивного двигуна. Рівняння

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} + \vec{W} \frac{dm}{dt} \quad (4.5)$$

називається рівнянням І.В.Мещерського (російський вчений, 1859-1935). Другий доданок в рівнянні (4.5) має розмірність сили і називається реактивною силою, яка виникає за рахунок зміни маси тіла з часом

$$\vec{F}_{\text{реакт}} = \vec{W} \frac{dm}{dt}.$$

К.Е.Ціолковський (російський вчений, 1857-1935) розв'язав рівняння (4.5) Мещерського для випадку відсутності зовнішніх сил  $\vec{F} = 0$  з початковими умовами: при  $t = 0$   $V = 0$ ,  $m = m_0$  –стартова маса ракети. В скалярній формі рівняння (4.5) в проекції на вертикальну вісь  $z$  має вид  $dV = -W \frac{dm}{m}$ . Інтегрування дає

$$V = W \cdot \ln \frac{m_0}{m}. \quad (4.6)$$

Це рівняння К.Е.Ціолковського. Воно показує, що кінцева швидкість ракети пропорційна відносній швидкості витоку газів і тим більша, чим більше відношення стартової маси  $m_0$  до кінцевої маси  $m$ . Щоб збільшити це відношення, Ціолковський запропонував багатоступеневі реактивні двигуни. Конструктивно неможливо виготовити легкий корпус двигуна, заправивши в нього велику масу палива. Модульний же корпус дає можливість збільшити відношення  $m_0/m$ , а значить і кінцеву швидкість ракети.

## Механічна робота. Потужність

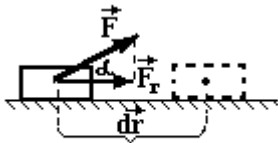


Рис. 4.3

Поняття механічної роботи пов'язане з переміщенням. Якщо під дією сили  $\vec{F}$  тіло переміщується на відстань  $d\vec{r}$  (рис.4.4), то елементарна механічна робота

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F \cdot dr \cdot \cos\alpha = F_r \cdot dr \quad (4.7)$$

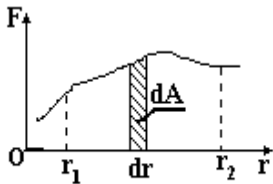


Рисунок 4.5

дорівнює скалярному добутку сили на переміщення. На графіку залежності сили від переміщення (рис.4.5) вона відповідає площі заштрихованої області. Вся робота змінної сили знаходиться як інтеграл

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_{r_1}^{r_2} F \cdot \cos\alpha \cdot dr = \int_{r_1}^{r_2} F_r \cdot dr$$

(4.8)

і чисельно дорівнює площі, обмеженій лініями  $r_1$ ,  $r_2$ , віссю  $Ox$  абсцис і кривою  $F(r)$ . Вимірюється робота в джоулях  $[A] = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$ .

Потужність – це швидкість виконання роботи, тобто це робота, виконана за одиницю часу

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{(\vec{F} \cdot d\vec{r})}{dt} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (4.9)$$

і дорівнює скалярному добутку сили і швидкості. Потужність вимірюється у ватах  $[P] = \text{Дж/с} = \text{Вт}$ . Позасистемною одиницею потужності є кінська сила  $1 \text{ к.с.} = 735 \text{ Вт}$ .

Фізична величина, яка характеризує здатність тіла виконувати роботу, називається **енергією** і вимірюється тією роботою, яку може виконати тіло. До механічної енергії відносяться два види енергії у відповідності з тим, за рахунок чого може бути виконана робота:

- **кінетична** енергія, коли робота виконується за рахунок руху тіла;
- **потенціальна** енергія, коли робота може бути виконана за рахунок положення тіл, або взаємного положення частин тіла (за рахунок деформації). Вимірюється енергія в одиницях роботи, в Дж.

Знайдемо вираз для кінетичної енергії, яка дорівнює роботі тіла за рахунок руху до зупинки. Враховуючи (3,3), одержуємо

$$A = \int_V^0 \vec{F} d\vec{r} = \int_V^0 m \frac{dV}{dt} d\vec{r} = \int_V^0 m dV \frac{d\vec{r}}{dt} = \int_V^0 m dV V = \int_V^0 m V dV = -\frac{mV^2}{2} \quad (4.10) \text{ Знак } (-) \text{ мінус}$$

показує, що кінетична енергія  $E_k = \frac{mV^2}{2}$  (4.11) при виконанні роботи зменшується. Звертає на себе увагу, що кінетична енергія не може бути від'ємною, тобто  $E_k \geq 0$ .

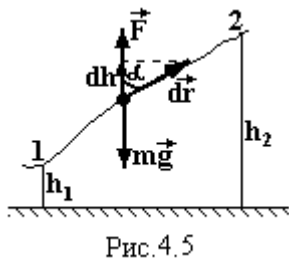


Рис. 4.5

### Потенціальна енергія (енергія положення)

вимірюється роботою, яку необхідно виконати зовнішнім силам, щоб перевести систему без зміни її кінетичної енергії із одного стану в інший.

Знайдемо потенціальну енергію тіла масою  $m$  в гравітаційному полі тяжіння Землі. Початкове і кінцеве положення тіла будемо задавати його висотами  $h_1$  і  $h_2$  над поверхнею Землі (рис.4.6). Для переміщення тіла без зміни його кінетичної енергії (без зміни швидкості), тобто для рівномірного переміщення із положення 1 в положення 2, до нього, у відповідності з першим законом Ньютона, необхідно прикласти силу  $\vec{F} = -m\vec{g}$ . Робота цієї сили

$$A = \int_{h_1}^{h_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} \cdot \cos\alpha = \int_{h_1}^{h_2} mg \cdot dh = mgh_2 - mgh_1 = E_{п2} - E_{п1}. \quad (4.12)$$

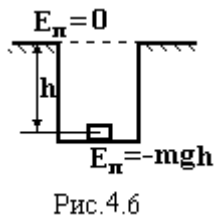


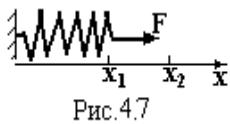
Рис. 4.6

Одержали, що робота дорівнює зміні потенціальної енергії  $\Delta E_{п} = mg\Delta h$ , а не самій потенціальній енергії.

На відміну від кінетичної, для потенціальної енергії необхідно задати її нульовий рівень, причому цей рівень задається довільно. Якщо потенціальна енергія на поверхні Землі

дорівнює нулю, то на висоті  $h$  вона буде становити

$$E_{п} = mgh. \quad (4.13)$$



Потенціальна енергія може, на відміну від кінетичної, бути від'ємною (рис.4.7).

Знайдемо роботу по розтягуванню пружини від  $x_1$  до  $x_2$  (рис.4.8). Сила пружності  $F = -kx$ .

$$A = \int_{x_1}^{x_2} F dx = - \int_{x_1}^{x_2} kx dx = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} = E_{п1} - E_{п2} \quad (4.14)$$

Прийнявши за нульовий рівень потенціальної енергії стан недеформованої пружини, одержуємо потенціальну енергію деформації

$$E_{п} = \frac{kx^2}{2}. \quad (4.15)$$

### Контрольні питання

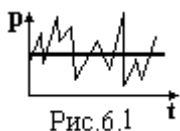
1. Коли тіло здатне виконати роботу?
2. Яка деталь у настільному і в наручному механічному годиннику має здатність виконати роботу?
3. Чи змінюється механічний стан тіла під час виконання роботи?
4. Як змінюється енергія пружини (збільшується чи зменшується), коли пружина повертається до недеформованого стану? Чи залежить відповідь від того, розтягнута це була пружина чи стиснута?
5. Чи можна вважати інерціальними системи відліку, які нерухомо пов'язані із Землею?
6. Сформулюйте принцип відносності Галілея.
7. Які види сил досліджує механіка?
8. Сформулюйте закон Гука?
9. Для яких тіл справедливий закон Всесвітнього тяжіння?

## **Тема 5. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії . Рівняння стану ідеального газу. Рівняння Менделєєва-Клапейрона. Ізопроцеси.**

Молекулярна фізика – це розділ, який вивчає фізичні властивості і агрегатні стани речовин в залежності від їх молекулярної будови і сил взаємодії між молекулами. Вона базується на трьох основних положеннях:

- всі тіла складаються з молекул і атомів;
- молекули і атоми хаотично рухаються;
- між молекулами і атомами існують сили взаємодії.

Молекулярно-кінетична теорія пояснює властивості тіл виходячи з характеру руху молекул і сил взаємодії між ними. Враховуючи, що кількість молекул дуже велика (в  $1\text{см}^3$  газу при нормальних умовах міститься  $2,69 \cdot 10^{19}$  молекул), вивчення систем такої великої кількості частинок не можна звести до вивчення руху кожної молекули. В таких системах проявляються специфічні статистичні закономірності. Наприклад, швидкості молекул можуть бути самими різними і знати всі їх значення неможливо, та і безкорисно, тим більше, що вони весь час змінюються при зіткненнях. А ось середнє значення швидкості залишається сталим і характеризує стан системи.



Наприклад, тиск газу зумовлений ударами молекул об стінки посудини зазнає флуктуацій з часом (рис.6.1), але його середнє значення не змінюється і його можна виміряти експериментально. Таким чином, задача молекулярно-кінетичної теорії – це знаходження середніх значень фізичних величин, які характеризують системи великої кількості частинок і які можна виміряти експериментально. Для цього використовується статистичні методи, в основі яких лежить теорія ймовірності.

Системи великої кількості частинок вивчає іще один розділ фізики – термодинаміка. Це вчення про зв'язок і взаємні перетворення енергії, теплоти і роботи. Термодинаміка наука феноменологічна (описова). Вона не дає

пояснення тих чи інших явищ, властивостей на молекулярному рівні, а встановлює зв'язок між параметрами системи, наприклад, тиском, об'ємом, температурою, кількістю теплоти, роботою, ентропією, вільною енергією і т.д.

**Ідеальний** – це газ, в якому нехтують власним об'ємом молекул і силами взаємодії між ними.

Стан газу характеризується такими величинами: **m** – маса, **P** – тиск, **V** – об'єм, **T** – абсолютна температура. Закони ідеального газу встановлюють зв'язок між цими параметрами.

**Ізотермічний** закон (закон Бойля-Маріотта) **m** = const, **T** = const: при незмінній масі і температурі добуток тиску на об'єм залишається незмінним

$$P \cdot V = \text{const.} \quad (6.1)$$

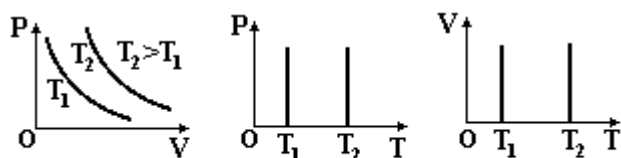


Рис.6.2

Графіки цього закону зображені на рис.6.2 в різних координатах.

**Ізобарний** закон (закон Гей-Люсака) **m** = const, **P** = const: при незмінній масі і тискові об'єм газу прямо пропорційний температурі

$$V_t = V_0(1 + \alpha \cdot t^0). \quad (6.2)$$

Тут  $V_0$  – об'єм газу при температурі  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 \cdot t^0}$  – температурний

коефіцієнт об'ємного розширення. Він показує відносну зміну об'єму при зміні температури на  $1^\circ$ . Вимірюється в  $1/\text{град}$ , і для всіх ідеальних газів величина однакова і дорівнює  $1/273$  ( $1/\text{град}$ ). Тому (6.2) набуває виду

$$V_t = V_0(1 + \frac{1}{273} \cdot t^0) = V_0 \frac{1}{273} (273 + t^0) = V_0 \alpha T,$$

де  $T = 273 + t^0$  – температура по абсолютній шкалі (шкала Кельвіна).

Графіки цього закону зображені на рис.6.3.

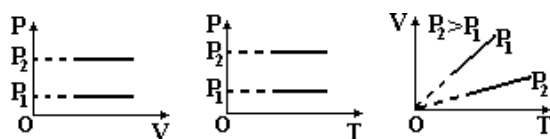


Рис.6.3

**Ізохорний** процес (закон Шарля)  $m = \text{const}$ ,  $V = \text{const}$ : при незмінній масі і об'ємі тиск газу прямо пропорційний температурі

$$P_t = P_o(1 + \beta \cdot t^0). \quad (6.3)$$

Тут  $P_o$  – об'єм газу при температурі  $0^\circ\text{C}$ ,  $\beta = \frac{P_t - P_o}{P_o \cdot t^0}$  – температурний коефіцієнт тиску. Він показує відносну зміну тиску при зміні температури на  $1^\circ$ . Вимірюється в  $1/\text{град}$ , і для всіх ідеальних газів величина однакова і дорівнює  $1/273$  ( $1/\text{град}$ ). Тому (6.3) набуває виду

$$P_t = P_o(1 + \frac{1}{273} \cdot t^0) = P_o \frac{1}{273} (273 + t^0) = P_o \beta T. \quad (6.4)$$

Графіки цього закону зображені на рис.6.4.

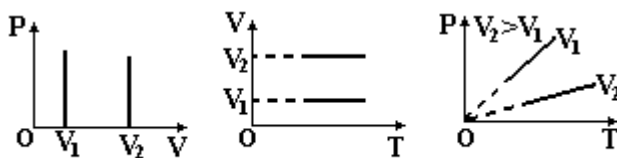


Рис.6.4

Зв'язок між усіма

чотирма параметрами дає рівняння стану ідеального газу – рівняння Клапейрона-Менделєєва:

$$P \cdot V = \frac{m}{\mu} R \cdot T. \quad (6.5)$$

Тут  $\mu$  – молярна маса газу,  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) – газова стала.

Основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії називається рівняння, яке дає зв'язок між тиском газу і енергією поступального руху молекул. Знайдемо це рівняння в таких припущеннях:

а) всі молекули рухаються з однаковими швидкостями;

б) так як рух молекул хаотичний, то всі напрямки руху рівно ймовірні, тобто можна вважати, що вздовж будь-якого напрям рухється однакова кількість молекул. Тому припустимо, що молекули рухаються тільки вздовж координатних осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Тоді можна вважати, що вздовж кожної осі рухається  $1/3$  частина всіх молекул.

Тиск газу пояснюється зміною імпульсу молекул при зіткненні і відбиванні їх із стінкою посудини. У відповідності з другим законом Ньютона на молекулу з боку стінки діє сила, а згідно з третім законом Ньютона, на стінку з боку молекули буде діяти така ж за величиною сила. Відношення сили до площі і є тиск.

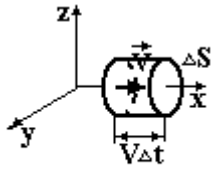


Рисунок 6.5

Виберемо на поверхні посудини малу плоску площадку  $\Delta S$ . Вісь  $ox$  направимо перпендикулярно до цієї площадки, осі  $oy$  і  $oz$  паралельні їй (рис.6.5). Знайдемо кількість молекул  $\Delta N$ , які за час  $\Delta t$  зіткнуться з цією площадкою. Це будуть молекули, які рухаються до площадки, а це половина тих молекул, які рухаються вздовж осі  $ox$ , і віддалені від неї на відстань, не більшу ніж  $V \cdot \Delta t$ .

$\Delta N = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot n \cdot V \cdot \Delta t \cdot \Delta S$ . При пружному ударі імпульс молекули змінюється на  $2mV$ . Якщо удар не пружний, тобто молекула прилипає до поверхні, то імпульс зміниться на  $mV$ . Але після встановлення динамічної рівноваги, кількість молекул, які прилипають до стінки і які її покидають стають однаковими. Молекула, покидаючи стінку, передає їй імпульс  $mV$ . Таким чином і в цьому випадку загальна зміна імпульсу теж буде дорівнювати  $2mV$ , тобто немає різниці, та ж молекула покинула стінку, чи інша. Запишемо другий закон Ньютона і знайдемо тиск

$$F \cdot \Delta t = \Delta N \cdot 2mV \Rightarrow P \cdot \Delta S \cdot \Delta t = \frac{1}{6} n \cdot V \cdot \Delta t \cdot \Delta S \cdot 2mV \Rightarrow$$

$$P = \frac{2}{3} \cdot n \cdot \frac{mV^2}{2} = \frac{2}{3} n E_{\text{пост.}} \quad (6.10) \quad \text{Реально швидкості}$$

молекул різні. Розбивши всі молекули на групи з однаковими швидкостями, парціальний тиск кожної групи молекул знаходиться по формулі (6.10). Скориставшись законом Дальтона, знайдемо загальний тиск

$$P = \frac{2}{3} \left( n_1 \cdot \frac{mV_1^2}{2} + n_2 \cdot \frac{mV_2^2}{2} + \dots + n_k \cdot \frac{mV_k^2}{2} \right). \quad \text{У дужках записана загальна}$$

енергія поступального руху всіх молекул. Її можна знайти ще як добуток

концентрації молекул  $n$  на середню енергію поступального руху

$E_{\text{пост}} = \frac{m\overline{V^2}}{2} = \frac{mV_{\text{ср.кв}}^2}{2}$ , де **середня квадратична** швидкість – це корінь квадратний із середнього значення квадратів швидкостей усіх  $N$  молекул (риска зверху означає середнє значення)

$$V_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\overline{V^2}} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_N^2}{N}}. \quad (6.11)$$

Таким чином, основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії має вид

$$P = \frac{2}{3} n \overline{E}_{\text{пост.}} = \frac{2}{3} n \frac{mV_{\text{ср.кв}}^2}{2} = \frac{1}{3} n \cdot m \cdot V_{\text{ср.кв}}^2. \quad (6.12)$$

### Контрольні питання

1. Сформулюйте основні властивості молекулярної фізики.
2. Який газ називають ідеальним?
3. Назвіть основні мікроскопічні параметри газу?
4. Назвіть основні макроскопічні параметри газу?
5. Що таке ізопроцес?
6. Сформулюйте закон Шарля?
7. Чим є особливим ізобарний процес?
8. Запишіть основне рівняння МКТ.

**Тема 6. Внутрішня енергія тіл. Два способи зміни внутрішньої енергії тіла. Робота газу. Закони термодинаміки.**

**Внутрішня енергія** – це сума кінетичної енергії атомів і молекул, потенціальної енергії їх взаємодії, атомна, ядерна енергія і т.д. за винятком кінетичної і потенціальної енергії системи як цілого. Внутрішня енергія є функцією стану системи. Це означає, що певному стану системи відповідає єдине значення внутрішньої енергії незалежно від того, як вона потрапила в цей стан. Внутрішню енергію можна змінити трьома процесами:

а) за рахунок виконання системою чи над нею роботи. Наприклад, при стискуванні газу в циліндрі від рухомого поршня молекули будуть відбиватись з швидкістю більшою на подвоєну швидкість поршня, ніж падають. А це означає збільшення кінетичної енергії хаотичного руху молекул, тобто внутрішньої енергії газу, при виконанні над ним роботи по його стисканню. Аналогічно при розширенні газу, тобто при виконанні ним роботи, молекули будуть відбиватись від поршні з меншою швидкістю, ніж падати. Отже, якщо система виконує роботу, її внутрішня енергія зменшується. Якщо над системою виконується робота, її внутрішня енергія зростає;

б) за рахунок теплообміну, тобто передачі або відбиранні теплової енергії без виконання механічної роботи. Цю енергію називають теплотою. Якщо тепло передається системі, її внутрішня енергія зростає, якщо ж забирається – зменшується;

в) за рахунок зміни кількості частинок системи. Цей процес поки що розглядати не будемо, тобто будемо вивчати системи незмінної кількості частинок.

Таким чином механічна робота і теплота являються мірою зміни внутрішньої енергії. Тому ці три фізичні величини мають однакову розмірність – джоуль (Дж). Одиницею теплоти являється позасистемна одиниця – калорія. Це кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1 г води від

19,5°C до 20,5°C. Еквівалентність теплоти і роботи експериментально встановив Джоуль по нагріванню ртуті при її перемішуванні лопатками, які приводились в рух падаючою гирею. Він встановив механічний еквівалент теплоти  $1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$ .

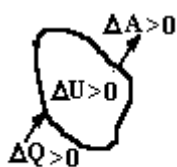


Рис. 6. 20

Таким чином із врахуванням знаків роботи, кількості теплоти і зміни внутрішньої енергії (рис.6.20), можна сформулювати закон збереження енергії (**перше начало термодинаміки**):

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A \quad (6.38)$$

Тепло  $\Delta Q$ , передане системі, іде на зміну  $\Delta U$  її внутрішньої енергії і на виконання системою роботи  $\Delta A$ .

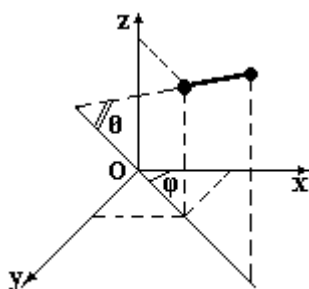


Рис. 6. 21

**Числом степеней вільності** називається мінімальна кількість незалежних величин, якими можна однозначно задати положення системи у просторі.

Для матеріальної точки (молекула одноатомного газу) у просторі достатньо задати три координати  $x, y, z$ . Ці координатні степені вільності називаються поступальними. Для двохатомної жорсткої молекули можна задати 6 координат її атомів. Але вимога мінімальності приводить до того, що положення такої молекули задають трьома координатами одного із атомів і два кути (рис.6.21): меридіальний  $\theta$  і азимутальний  $\phi$ . Ці кутові степені вільності називаються обертальними. Всього одержали

$n = n_{\text{пост.}} + n_{\text{об.}} = 3 + 2 = 5$ , а не 6 поступальних. Для двохатомної нежорсткої молекули, тобто коли відстань між атомами може змінюватись, що має місце при досить високих температурах, тобто атоми коливаються, потрібно задати ще одну степінь вільності. Ця степінь вільності називається коливальною. Одержуємо  $n = n_{\text{пост.}} + n_{\text{об.}} + n_{\text{кол.}} = 3 + 2 + 1 = 6$ .

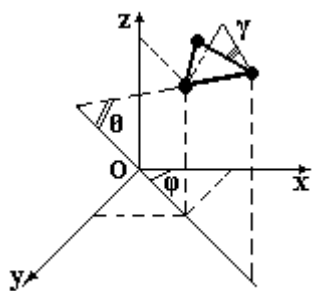


Рис.6.22

Для трьохатомної жорсткої молекули необхідно задати, як і для двохатомної жорсткої молекули, три координати одного атома і три кути (рис.6.22). Третій кут  $\gamma$  задає орієнтацію площини молекули. Одержуємо

$$n = n_{\text{пост.}} + n_{\text{об.}} = 3 + 3 = 6. \quad \text{У випадку нежорсткої}$$

трьохатомної молекули необхідно задати ще 3 відстані між атомами – 3 коливальні степені вільності. Всього буде 9. Із збільшенням кількості атомів буде зростати кількість коливальних степенів вільності, а поступальних і обертальних буде по 3. Таким чином, система із N частинок має

$$n = 3_{\text{пост.}} + 3_{\text{об.}} + (3N - 6)_{\text{кол.}} = 3N \text{ степеней вільності.}$$

Теплова енергія по степеням вільності розподіляється рівномірно, тобто на кожную поступальну і обертальну степінь припадає енергія  $\frac{1}{2}kT$ , а на коливальну  $kT$  ( $\frac{1}{2}kT$  на кінетичну енергію коливань атомів в молекулі,  $\frac{1}{2}kT$  на потенціальну енергію їх взаємодії). Кількість половинок  $kT$  теплової енергії молекули позначимо буквою  $i$ . Тоді

$$i = n_{\text{пост.}} + n_{\text{об.}} + 2n_{\text{кол.}}. \quad (6.39)$$

Досить часто мають справу з невисокими температурами, коли коливальні степені ще не збуджуються. Тоді число  $i$  дорівнює числу  $n$  кількості степеней вільності. Тому досить часто число  $i$  називають кількістю степеней вільності.

Середня теплова енергія молекули, яку розглядають не як матеріальну точку, включає не тільки поступальну енергію, а і обертальну та коливальну. Тому

$$\bar{E} = \frac{i}{2}kT. \quad (6.40)$$

Внутрішня енергія ідеального газу складається тільки із теплової енергії молекул, потенціальна енергія дорівнює нулю, так як молекули не взаємодіють між собою.

$$\text{Отже,} \quad U = N \cdot \bar{E} = \frac{m}{\mu} N_A \frac{i}{2} kT = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT, \quad (6.41)$$

де:  $N_A$  – число Авогадро,  $m$  – маса газу,  $\mu$  – молярна маса,  $k$  – стала Больцмана,  $R$  – газова стала,  $T$  – абсолютна температура.

Вираз (6.41) показує, що внутрішня енергія даної кількості газу залежить тільки від температури.

### Контрольні питання

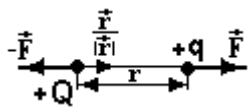
1. Що таке внутрішня енергія тіл?
2. Яким чином можна змінити внутрішню енергію?
3. Від яких макропараметрів системи залежить внутрішня енергія ідеального газу?
4. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії, якщо відбувається лише теплообмін?
5. Який важливий наслідок випливає з першого закону термодинаміки?
6. Як знайти число ступенів вільності молекули ідеального газу?

**Тема 7. Електричне поле. Напруженість електричного поля. Різниця потенціалів. Напруга. Зв'язок між напругою і напруженістю.**

Дослідами по взаємодії тіл встановлено, що деякі тіла взаємодіють з силами, набагато більшими (приблизно в  $10^{39}$  разів), ніж сила гравітаційної взаємодії. Таким тілам приписали властивість мати заряд. Всі заряди умовно поділені на позитивні і негативні у відповідності з двозначним характером їх взаємодії: однойменні заряди відштовхуються, різнойменні притягуються. Сучасній науці відомо, що носіями заряду являються електрони та іони. Елементарним (найменшим) зарядом є заряд електрона  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Кл (кулон) це одиниця заряду в системі одиниць СІ. У всіх електричних явищах має місце **закон збереження заряду** - алгебраїчна сума зарядів замкнутої (ізолюваної) системи не змінюється.

В основі електростатики, тобто вчення про взаємодію нерухомих

зарядів, лежить **закон Кулона** (1785р.) для точкових зарядів:



$$F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \cdot \frac{F}{|F|} \quad (7.1)$$

Сила  $F$ , з якою взаємодіють два точкових заряди  $Q$  і  $q$  прямо пропорційна добуткові цих зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані  $r$  між ними і направлена по лінії, що з'єднує ці заряди

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$  - діелектрична стала, яка не має фізичного змісту, а

введена для узгодження одиниць вимірювання в системі СІ;  $\epsilon$  - відносна діелектрична проникність середовища, яка показує у скільки разів сила взаємодії у вакуумі  $F_0$  більша, ніж сила взаємодії  $F$  в даному середовищі. Для повітря і вакууму  $\epsilon = 1$ .

По сучасним поглядам, взаємодія зарядів відбувається через особливу форму матерії – електричне поле. Кожний заряд утворює у навколишньому середовищі електричне поле, яке і діє на внесений у нього заряд.

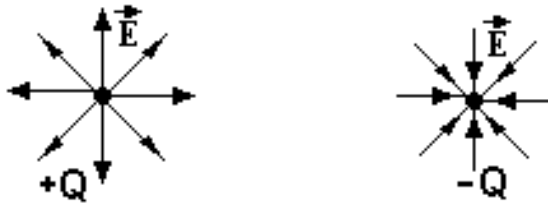
Силовою характеристикою електростатичного поля є **напруженість**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \left[ \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right] \quad (7.2)$$

Ця векторна величина дорівнює силі, яка діє з боку поля на одиничний позитивний пробний заряд. Для поля точкового заряду  $Q$  напруженість

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (7.3)$$

Вектор  $\vec{E}$  направлений по радіальним лініям від заряду  $Q$ , якщо він



позитивний, і до нього, якщо він негативний.

Вектор  $\vec{D} = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}$  називається вектором **індукції** електростатичного поля. Це теж силова, векторна характеристика поля, але на відміну від напруженості, вона не залежить від властивостей середовища. Дійсно, для точкового заряду, враховуючи (7.3), маємо

$$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (7.4)$$

Діелектричні властивості середовища ( $\epsilon$  і  $\epsilon_0$ ) в цій формулі відсутні.

Графічно електростатичне поле зображається **силовими лініями**. Це

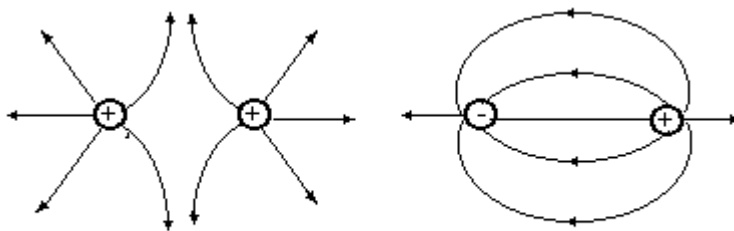


Рис.7.1

лінії, дотична до яких в кожній точці співпадає з вектором напруженості  $\vec{E}$  (індукції  $\vec{D}$ ) (рис.7.1). Силкові лінії починаються на позитивних і закінчуються на негативних зарядах. Вони не перетинаються, так як вектори напруженості і індукції однозначні. У точці ж перетину напрямків цих векторів не визначений.

По густині силових ліній можна судити про величину  $\vec{E}$ , або  $D$ . Вони більші там, де густина ліній більша.

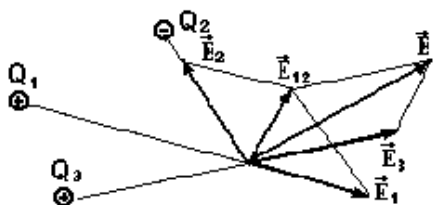


Рис.7.2

Якщо поле утворене декількома зарядами, то вектор напруженості результуючого поля знаходиться по **принципу суперпозиції**, як векторна сума напруженостей, утворених в даній точці кожним зарядом незалежно від інших

зарядів (рис.7.2).

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i, \quad D = D_1 + D_2 + \dots + D_n = \sum_{i=1}^n D_i. \quad (7.5)$$

Ступінь зарядженості тіл, які не можна вважати точковими, характеризуються такими величинами:

**лінійна густина заряду** – заряд одиниці довжини

$$\tau = \frac{q}{l} = \frac{dq}{dl} \quad \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}} \right]; \quad (7.6)$$

**поверхнева густина заряду** – заряд одиниці площі

$$\sigma = \frac{q}{s} = \frac{dq}{ds} \quad \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right]; \quad (7.7)$$

**об'ємна густина заряду** – заряд одиниці об'єму

$$\rho = \frac{q}{s} = \frac{dq}{dV} \quad \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3} \right]. \quad (7.8)$$

**Робота в електростатичному полі. Різниця потенціалів. Потенціал.**

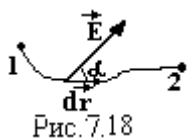


Рис.7.18

Нехай в деякому електростатичному полі переміщується заряд  $q$  із точки 1 в точку 2 (рис.7.18). На заряд діє сила  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ .

Тоді елементарна механічна робота

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{r} = q \cdot E \cdot \cos \alpha \cdot dr.$$

Загальна робота знаходиться шляхом інтегрування

$$A_{12} = \int_1^2 dA = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{r} = q \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} = q \int_1^2 E \cdot \cos \alpha \cdot dr, \quad (7.25)$$

де  $\alpha$  – кут між вектором  $\vec{E}$  і напрямком переміщення  $d\vec{r}$ .

$$\text{Для однорідного поля } A_{12} = qE\lambda \cos\alpha. \quad (7.26)$$

Покажемо, що робота в електричному полі не залежить від форми шляху, а визначається тільки зарядом  $q$  і положеннями початкової і кінцевої

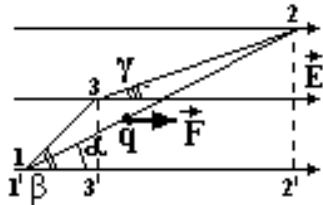


Рис. 7.19

точок та напруженістю електричного поля  $\vec{E}$ . Нехай в однорідному полі напруженістю  $\vec{E}$  переміщується заряд  $q$  двома способами (рис.7.19): по прямій 1-2 і по ломаній 1-3-2. Знайдемо роботу електричного поля в обох випадках.  $A_{12} = qE\lambda_{12} \cos\alpha = qE\lambda_{1'2'}$ .

$$A_{12} = A_{13} + A_{32} = qE\lambda_{13} \cos\beta + qE\lambda_{32} \cos\gamma = qE\lambda_{1'3'} + qE\lambda_{3'2'} = qE(\lambda_{1'3'} + \lambda_{3'2'}) = qE\lambda_{1'2'}$$

Одержали однакову роботу. А це й означає незалежність роботи від форми шляху. Якщо ж поле неоднорідне, то аналогічні міркування виконуються для нескінченно малих відрізків, на яких можна вважати поле однорідним. Загальна робота дорівнює сумі робіт на кожному із цих відрізків. Ясно, що якщо на кожному із них робота не залежить від форми шляху, то і сумарна робота не буде залежати від форми шляху.

Якщо в (7.25) віднести роботу до заряду  $q$ , то воно уже не буде залежати від величини заряду, а буде визначатись тільки положенням початкової і кінцевої точок та напруженістю поля. Це дає можливість ввести нову енергетичну характеристику поля: потенціал і різницю потенціалів. Із (7.25) одержуємо

$$\frac{A}{q} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_1^2 E \cos\alpha dr = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (7.27).$$

$\varphi_1 - \varphi_2$  - **різниця потенціалів**, дорівнює роботі, яку виконують сили електростатичного поля при переміщенні одиночного позитивного заряду із точки 1 в точку 2.

Отже робота в електростатичному полі дорівнює добуткові заряду на різницю потенціалів вихідної і кінцевої точок

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (7.28)$$

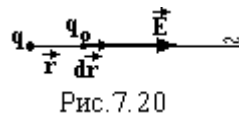
Якщо точку 2 віддалити у нескінченність, де поле відсутнє, одержуємо потенціал

$$\varphi = \int_r^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{A_{r,\infty}}{q} \quad (7.29).$$

**Потенціал** – це робота сил електричного поля по переміщенню одиничного позитивного заряду із даної точки поля  $r$  в нескінченність, де потенціал поля прийнятий за нуль. Потенціал і його різниця вимірюються у вольтах (В).  $1\text{В} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$ .

Криволінійний інтеграл по замкнутому контуру  $\oint_{\lambda} \vec{E} \cdot d\vec{r}$  називається циркуляцією вектора напруженості. Враховуючи (7.27), видно, що такий інтеграл дорівнює нулю (початкова і кінцева точки переміщення заряду співпадають  $\varphi_1 = \varphi_2$ ). Умова  $\oint_{\lambda} \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0$  є необхідною умовою потенціального характеру поля.

Знайдемо потенціал поля точкового заряду. За означенням



$\varphi = \int_r^{\infty} \vec{E} d\vec{r} = \int_r^{\infty} E \cos \alpha dr$ . Будемо переміщувати пробний заряд  $q_0$  по радіальній лінії (рис.7.20). Тоді кут  $\alpha = 0^\circ$  і з врахуванням (7.16) одержуємо

$$\varphi = \int_r^{\infty} E dr = \int_r^{\infty} \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}. \quad (7.30)$$

Для потенціалу, як і для напруженості (розділ 7.2), справедливий **принцип суперпозиції**:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n = \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (7.31)$$

потенціал поля, створеного декількома зарядами, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, створених у цій точці кожним зарядом. Якщо тіло не точкове, то сума (7.31) переходить в інтеграл.

### **Контрольні питання**

1. Як проявляється взаємодія заряджених тіл?
2. Сформулюйте закон Кулона?
3. Що є основною характеристикою електричного поля?
4. Що таке напруженість електричного поля?
5. У чому полягає принцип суперпозиції?
6. Які лінії називаються силовими?
7. Як визначити роботу сил електричного поля?
8. Дайте визначення потенціалу?
9. Які одиниці напруги в СІ?
10. Що таке різниця потенціалів в електричному полі?

**Тема 8. Постійний електричний струм. Умови його виникнення та існування. Одиниці їх вимірювання. Електричне коло.**

**Електричним струмом** називається всякий направлений рух зарядів. За напрямом струму прийнятий напрямок руху позитивних зарядів. Для його існування необхідні дві умови:

- наявність рухомих зарядів;
- наявність сили, яка приводить ці заряди в направлений рух.

Наприклад, заряджене тіло переміщуємо у просторі мускульною силою руки. Це струм? Так. є заряд і є сила, яка його переміщує.

Найчастіше силою, яка переміщує заряд, виступає сила електричного поля. Робота цього поля витрачається на переміщення зарядів, і тому його енергія зменшується. Для того щоб струм протікав тривалий час, потрібно

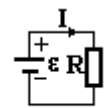


Рис.8.1

поповнювати енергію поля. Це відбувається в джерелах струму, або джерелах електрорушійної сили (е.р.с.). В них відбувається перетворення в електричну енергію різних видів енергії: механічної, оптичної, теплової, хімічної і т. ін., окрім електричної. Ці сили називаються сторонніми. Дійсно, в джерелах е.р.с. позитивні заряди рухаються проти електричного поля (від – до +) (рис.8.1). Такий їх рух не може здійснюватись силами електричного поля.

Робота по переміщенню заряду по ділянці кола, в якій є е.р.с., виконується силами електричного поля і сторонніми силами

$$A_{12} = q \int_1^2 (\vec{E} + \vec{E}_{\text{стор.}}) \cdot d\vec{r} = q \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} + q \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор.}} \cdot d\vec{r} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\varepsilon.$$

$$\text{Тут е.р.с. } \varepsilon = \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор.}} \cdot d\vec{r} = \frac{A_{\text{стор.}}}{q} - \text{це робота, яку виконують сторонні сили}$$

по переміщенню одиничного позитивного заряду в середині джерела.

$$\text{Величина } \frac{A_{12}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon = U \quad (8.1)$$

називається **напругою**. Це робота, яку виконують сили електричного поля і сторонні сили по переміщенню одиничного позитивного заряду із точки 1 в точку 2.

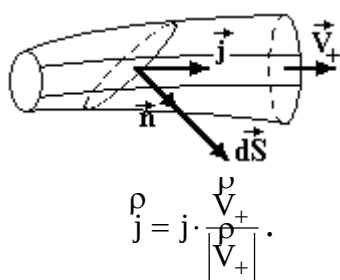
**Силою струму I** називається швидкість направленого переносу заряду

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{dQ}{dt} \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А} \right]. \quad (8.2)$$

Вимірюється струм у системі СІ в амперах (А). Це основна одиниця в цій системі і буде визначена по взаємодії провідників із струмом у розділі “електромагнетизм”.

Для характеристики розподілу струму по поперечному перетину провідника введена **густина струму j** – це струм, який протікає через одиницю поперечного перерізу

$$j = \frac{I}{S} = \frac{dI}{dS} \left[ \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right]. \quad (8.3)$$



Не дивлячись, що струм величина скалярна, густина струму – це вектор, напрямком якого збігається з напрямком руху позитивних зарядів, тобто

$$\vec{j} = j \cdot \frac{\vec{V}_+}{|\vec{V}_+|}. \quad (8.4)$$

Струм, через густину струму знаходять шляхом інтегрування по площі перерізу провідника  $I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \int_S j_n \cdot dS$ . (8.5)

Розглянемо положення електронної теорії Друде-Лоренца.

– Електронний газ в металах має властивості одноатомного молекулярного ідеального газу. Рухаючись хаотично, електрони зазнають зіткнень тільки з атомами кристалічної ґратки, а не між собою, так як розміри електронів набагато менші, ніж атомів. Тому вважається, що середня довжина вільного пробігу електронів дорівнює міжатомній відстані і складає декілька ангстремів ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ ).

– Так як теплові швидкості (середня арифметична, середня квадратична, найбільш ймовірна) із-за малої маси електронів дуже великі ( $\sim 100$  км/с), вважається що всі вони однакові. Тепловий хаотичний рух не приводить до направленої руху електронів, тобто струм не виникає.

– Під дією зовнішнього електричного поля виникає направлений рух

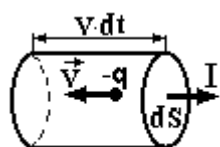


Рис. 8. 2

електронів із швидкістю  $V$ , яка направлена проти напруженості поля. Знайдемо силу струму і його густину (рис.8.2). За час  $dt$  через перпендикулярний до вектора

швидкості  $V$  переріз  $dS$  провідника перейдуть тільки ті носії,

які знаходяться від нього на відстані не більшій, ніж  $V \cdot dt$  і перенесуть свій заряд через цей переріз. Носії, які знаходяться далі, не встигнуть за цей час дійти до перерізу  $dS$  і внести вклад в електричний струм. Сумарний перенесений заряд дорівнює заряду носіїв, які знаходяться в зображеному циліндрі.  $dQ = q \cdot n \cdot V \cdot dt \cdot dS$  ( $n$  - концентрація вільних носіїв заряду).

Враховуючи (8.2) і (8.3), одержуємо струм  $I = q \cdot n \cdot V \cdot dS$  та густину струму  $j = qnV$ . (8.6)

Оцінка значення швидкості  $V$  із формули (8.6) дає  $\sim 0,8$  мм/с, що набагато менше, ніж теплова швидкість. Не дивлячись на це, струм у провіднику виникає практично миттєво, так як у направлений рух після вмикання електричного поля приходять усі електрони.

– Від зіткнення до зіткнення з атомами електрон рухається з середньою тепловою швидкістю. Вважається, що при зіткненні електрона з іоном кристалічної ґратки він повністю втрачає набуту швидкість направленої руху. Отже направлений рух електрона між зіткненнями рівноприскорений без початкової швидкості направленої руху.

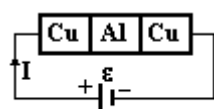
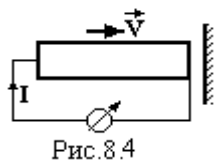


Рис.8. 3

Розглянемо досліди, які підтверджують електронну природу струму в металах:

– Через послідовно з'єднані мідь-алюміній-мідь (рис.8.3) приблизно протягом року пропускався електричний струм, після чого

досліджувались контакти на предмет взаємного проникнення металів. Не дивлячись на те, що в одному контакті струм протікав від міді до алюмінію, а в другому від алюмінію до міді, взаємне проникнення металів в обох контактах було однаковим. Стимульованої струмом дифузії виявлено не було. Це означає, що протікання струму в металах не супроводжується переносом речовини, а носіями струму являються загальні для всіх металів частинки – електрони.



– Металевий стержень, замкнутий чутливим гальванометром (рис.8.4), рухався, а потім різко зупинявся. Гальванометр фіксував імпульс струму, зумовлений тим, що в момент зупинки кристалічної ґратки металу електрони ще

продовжують рухатись по інерції в напрямку направленої руху.

– У 1913 році російські фізики Л.І.Мандельштам і М.Д.Папалексі вдосконалили вище розглянутий дослід. Вони замінили масивний провідник котушкою (довжина дроту  $\sim 500$  м), яку привели в обертальні коливання. В момент зміни напрямку руху котушки в ній виникав електричний струм, наявність якого фіксувалася телефоном, увімкнутим до кінців котушки (виникав характерний тріск). Тепер фіксувались уже не поодинокі імпульси струму.

– У 1916 році шотландський фізик Ч.Стюарт і американський Т.Толмен замінили в досліді Л.І.Мандельштама і М.Д.Папалексі телефон, чутливим гальванометром. Це дало можливість провести кількісні вимірювання, а саме визначити відношення заряду носіїв струму до їх маси (питомий заряд). Виявилось, що це відношення дорівнює питомому заряду електрона.

Отже струм у металах зумовлений направленим рухом електронів.

Запишемо другий закон Ньютона для направленої руху електрона

$$m \frac{dV}{dt} = qE \Rightarrow dV = \frac{qE}{m} dt. \text{ Інтегруємо це рівняння в межах швидкості від}$$

0 до  $V_{\text{макс}}$ , і в межах часу від 0 до  $\tau$ .  $\tau = \frac{\lambda}{V_{\text{с.ар.}}}$  – час вільного пробігу електрона

$$\int_0^{V_{\text{макс}}} dV = \int_0^{\tau} \frac{qE}{m} dt. \text{ Одержуємо}$$

$$V_{\text{макс}} = \frac{qE}{m} \tau = \frac{qE\lambda}{mV_{\text{с.ар.}}}. \quad (8.7)$$

Середня швидкість направленої руху  $V$  дорівнює півсумі початкової ( $V_0 = 0$ , див положення 4) і кінцевої  $V_{\text{макс}}$ . Враховуючи (8.6), густина струму

$$j = qnV = \frac{q^2 n \lambda}{2mV_{\text{с.ар.}}} E = \sigma E, \text{ або } \vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (8.8)$$

Це і є закон Ома в диференційній формі. Тут питома електропровідність

$$\sigma = \frac{q^2 n \lambda}{2mV_{\text{с.ар.}}}. \quad (8.9)$$

Величина обернена питомій електропровідності називається **питомим опором**  $\rho$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2mV_{\text{с.ар.}}}{q^2 n \lambda} [\text{Ом} \cdot \text{м}]. \quad (8.10)$$

Це опір суцільного куба з ребром 1м при протіканні струму між протилежними гранями.

Одержимо закон Ома в інтегральній формі. Для цього рівняння (8.8) домножаємо скалярно на вектор  $d\vec{r}$  переміщення вздовж провідника в напрямку протікання струму і інтегруємо в межах двох точок провідника

$$\int_1^2 \vec{j} \cdot d\vec{r} = \int_1^2 \sigma \cdot \vec{E} \cdot d\vec{r}. \text{ Врахуємо (7.27), 8.1) і що кут між векторами } \vec{j} \text{ і } d\vec{r} \text{ дорівнює}$$

$$\text{нулю, одержуємо } \int_1^2 \vec{j} \cdot \vec{r} \cdot dr = \varphi_1 - \varphi_2 = U.$$

$$j = \frac{I}{S}, \quad U = I \int_1^2 \frac{\rho \cdot dr}{S} = I \cdot R. \quad (8.11)$$

Тут  $U$  – напруга,  $R$  – опір провідника

$$R = \int_1^2 \frac{\rho \cdot dr}{S}, \text{ або для однорідного провідника } R = \frac{\rho \cdot \lambda}{S} \quad (8.12)$$

залежить від матеріалу і геометричних розмірів: площі перерізу  $S$  та довжини  $\ell$ .

**Закон Джоуля – Ленца** – це закон про теплову дію електричного струму: якщо електричний струм не виконує механічної роботи, то вся його енергія перетворюється в тепло. Який механізм нагрівання провідників електричним струмом? Електрон прискорюється електричним полем. Швидкість і кінетична енергія його поступального руху зростають за рахунок енергії електричного поля. При зіткненні з вузлом кристалічної ґратки він повністю втрачає набуту швидкість, а значить і кінетичну енергію направленого руху (див. положення 4, розділ 8.2). Ця енергія передається атому кристалічної ґратки, внаслідок чого він починає коливатись більш інтенсивно. А це і означає нагрівання кристалу.

Знайдемо питому потужність  $w$ , тобто енергію, яка виділяється в одиниці об'єму провідника за одиницю часу

$$w = \frac{dW}{dV_{об} \cdot dt} \left[ \frac{Дж}{м^3 \cdot с} = \frac{Вт}{м^3} \right]. \quad (8.15)$$

За час  $dt$  кожний електрон зазнає  $dZ = \frac{V_{с.ар.}}{\lambda} dt$  зіткнень, при кожному з яких кристалу буде передана енергія  $\frac{mV_{макс}^2}{2}$ . В об'ємі  $dV_{об}$  знаходиться  $dN = n \cdot dV_{об}$  електронів. Тоді

$$dW = \frac{mV_{макс}^2}{2} \cdot dZ \cdot dN = \frac{mV_{макс}^2}{2} \cdot \frac{V_{с.ар.}}{\lambda} dt \cdot n \cdot dV_{об}. \text{ Підставляємо в (8.15). З}$$

врахуванням (8.7) і (8.9), після спрощень, одержуємо

$$w = \frac{q^2 n \lambda}{2mV_{с.ар.}} E^2 = \sigma E^2. \text{ Якщо скористатися законом Ома (8.8), закон}$$

Джоуля-Ленца в диференційній формі запишеться так:

$$w = \sigma E^2 = jE = \frac{j^2}{\sigma}. \quad (8.16)$$

В інтегральній формі цей закон має вид

$$Q = I^2 R t = I U t = \frac{U^2}{R} t. \quad (8.17)$$

Для потужності електричного струму маємо

$$P = I^2 R = I U = \frac{U^2}{R} \quad (8.18)$$

### **Закони Кірхгофа для розгалужених електричних кіл**

Дамо означення декільком поняттям електричних схем:

**Вузол** електричної схеми – це точка, в якій сходяться більше двох провідників.

**Вітка** – ділянка схеми між двома сусідніми вузлами.

**Контур** - довільна замкнута дільниця схеми.

**Лінійно незалежні контури** – це такі, які відрізняються по крайній мірі однією віткою.

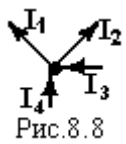


Рис.8.8

Одним із методів розрахунку розгалужених електричних кіл є метод законів Г.Кірхгофа (нім. фізик), сформульованих ним у 1847 р.

**Перший закон:** алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (8.23)$$

Струми, які направлені до вузла і від нього, беруться з протилежними знаками (рис.8.8).  $I_4 + I_3 - I_2 - I_1 = 0$

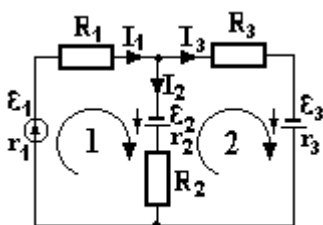


Рис.8.9

**Другий закон:** Алгебраїчна сума падінь напруг вздовж будь-якого контуру дорівнює алгебраїчній сумі е.р.с., які увімкнені в цей же контур.

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i \quad (8.24)$$

У цих сумах знак (+) береться тоді, коли з довільно вибраним напрямком обходу контура співпадає довільно вибраний напрямок струму у вітці, чи напрямок дії е.р.с. В протилежному випадку береться (–).

Для зображеної схеми (рис.8.9) рівняння 2-го закону Кірхгофа мають вид:

|               |                                                                    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------|
| для контура 1 | $I_1(R_1 + r_1) + I_2(R_2 + r_2) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$  |
| для контура 2 | $I_3(R_3 + r_3) - I_2(R_2 + r_2) = \varepsilon_3 - \varepsilon_2.$ |

### Контрольні питання

1. Що таке електричний струм?
2. Як визначають напрямок електричного струму?
3. Назвіть умови створення й існування електричного струму в колі?
4. Як можна визначити потужність електричного струму?
5. Що таке електрорушійна сила?
6. Чим можуть бути обумовлені сторонні сили?
7. Чому дорівнює робота всіх сил в електричному колі?
8. Сформулюйте закони Кірхгофа?
9. Що описує закон Джоуля-Ленца?
10. Назвіть основні положення електронної теорії Лоренца.

**Тема 9. Електрична і магнітна взаємодії. Магнітне поле. Сила Ампера. Сила Лоренца. Рух зарядів у магнітних полях.**

Магнітні явища були відомі ще в стародавньому світі. Компас був винайдений більше 4500 років тому. У Європі він з'явився приблизно в XII столітті нової ери. Проте тільки в XIX столітті був виявлений зв'язок між електрикою і магнетизмом і виникло уявлення про магнітне поле.

Першими експериментами (проведені в 1820 р.), які показали, що між електричними і магнітними явищами є глибокий зв'язок, були досліді данського фізика **Х. Ерстеда**. Ці досліді показали, що на магнітну стрілку, розташовану поблизу провідника із струмом, діють сили, які намагаються її повернути. У тому ж році французький фізик **А. Ампер** спостерігав силову взаємодію двох провідників із струмами і встановив **закон взаємодії струмів**.

За сучасними уявленнями провідники із струмом діють один на одного не безпосередньо, а через те, що їх оточують **магнітні поля**.

Джерелами магнітного поля є рухомі **електричні заряди (струми)**. Магнітне поле виникає в просторі, що оточує провідники із струмом, подібно до того, як в просторі, що оточує нерухомі електричні заряди, виникає електричне поле. Магнітне поле постійних магнітів також створюється електричними мікрострумами, циркулюючими усередині молекул речовини (гіпотеза **Ампера**).

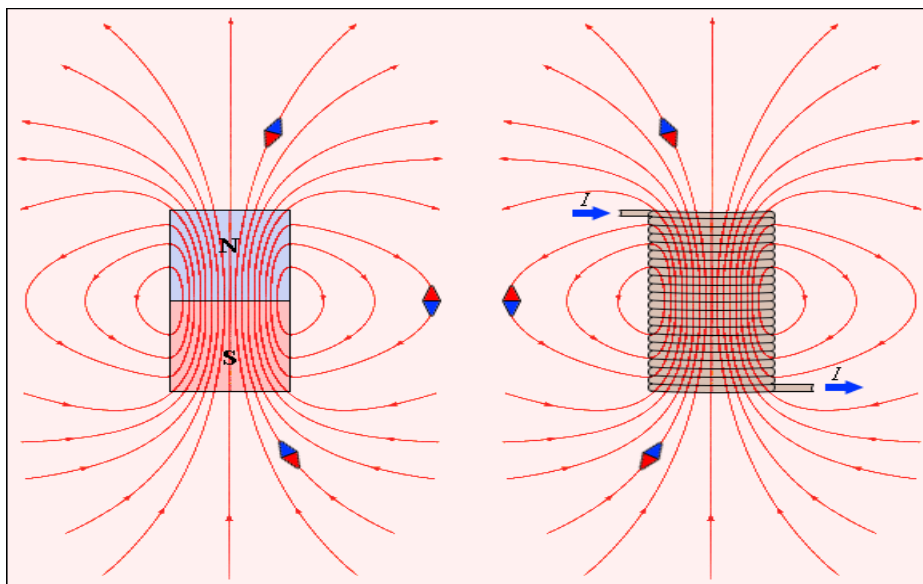
Учені XIX століття намагалися створити теорію магнітного поля по аналогії з електростатикою, вводячи в розгляд так звані магнітні заряди двох знаків (наприклад, північний **N** і південний **S** полюси магнітної стрілки). Проте дослід показує, що ізольованих магнітних зарядів не існує.

Магнітне поле струмів принципово відрізняється від електричного поля. Магнітне поле, на відміну від електричного, надає силову дію тільки на **рухомі заряди (струми)**.

Для опису магнітного поля необхідно ввести силову характеристику поля, аналогічну вектору **напруженості**  $E$  електричного поля. Такою характеристикою є **вектор магнітної індукції**  $B$  який визначає сили, що діють на струми або рухомі заряди в магнітному полі.

За позитивне напрям вектора  $B$  приймається напрям від південного полюса  $S$  до північного полюса  $N$  магнітної стрілки, що вільно орієнтується в магнітному полі.

Таким чином, досліджуючи магнітне поле, що створюється струмом або постійним магнітом, за допомогою маленької магнітної стрілки, можна в кожній точці простору визначити напрям вектора  $B$ . Таке дослідження дозволяє наочно представити просторову структуру магнітного поля. Аналогічно **силовим лініям** у електростатиці можна побудувати **лінії магнітної індукції** у кожній точці яких вектор  $B$  направлений по дотичній. Приклад ліній магнітної індукції полів постійного магніта і котушки із струмом наведений на мал. 1.



Малюнок 1.

Звернете увагу на аналогію магнітних полів постійного магніту і котушки із струмом. Лінії магнітної індукції завжди замкнуті, вони ніде не обриваються. Це означає, що магнітне поле не має **джерел** – **магнітних**

**зарядів.** Силкові поля, що володіють цією властивістю, називаються **вихровими.** Картину магнітної індукції можна спостерігати за допомогою дрібної залізної тирси, яка в магнітному полі намагнічується і, подібно до маленьких магнітних стрілок, орієнтуються уздовж ліній індукції.

Для того, щоб кількісно описати магнітне поле, потрібно вказати спосіб визначення не лише напрямку вектора ***B*** але і його модуля. Найпростіше це зробити, вносячи до досліджуваного магнітного поля провідник із струмом і вимірюючи силу, що діє на окрему прямолінійну ділянку цього провідника. Ця ділянка провідника повинна мати довжину ***Δl***, достатньо малу в порівнянні з розмірами областей неоднорідності магнітного поля. Як показали досліди Ампера, сила, що діє на ділянку провідника, пропорційна силі струму ***I*** довжині ***Δl*** цієї ділянки і синуса кута ***α*** між напрямками струму і вектора магнітної індукції:

Ця сила називається **силою Ампера.** Вона досягає максимального по модулю значення ***F<sub>max</sub>***, коли провідник із струмом орієнтований перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Модуль вектора ***B*** визначається таким чином:

**Модуль вектора магнітної індукції дорівнює відношенню максимального значення сили Ампера, що діє на прямий провідник із струмом, до сили струму *I* у провіднику і його довжині *Δl*:**

$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}.$$

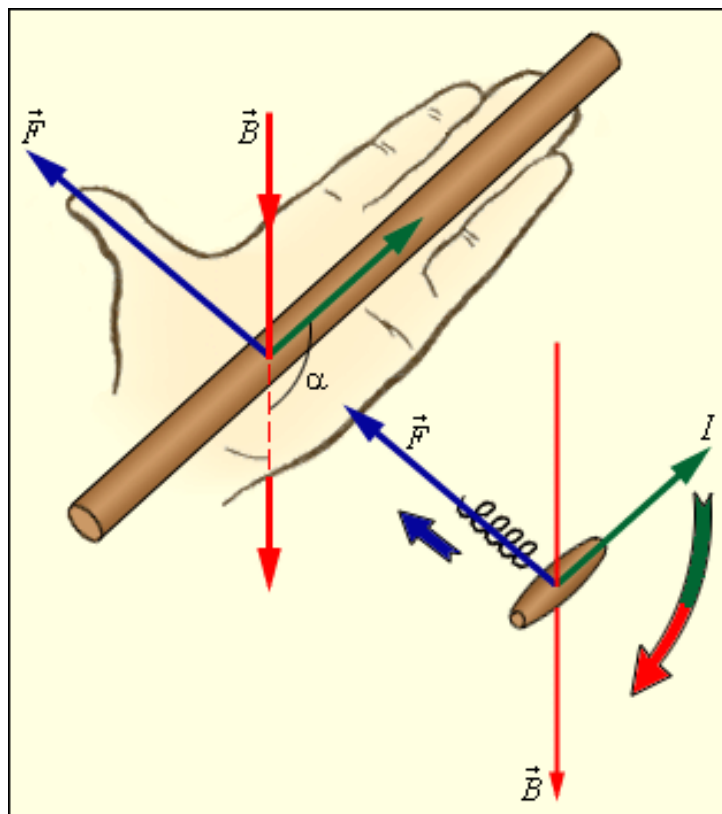
У загальному випадку сила Ампера виражається співвідношенням:

У системі одиниць СІ за одиницю магнітної індукції прийнята індукція такого магнітного поля, в якому на кожен метр довжини провідника при силі струму 1 А діє максимальна сила Ампера 1 Н. Ця одиниця називається тесла (Тл).

Тесла – дуже велика одиниця. Магнітне поле Землі приблизно рівне  $0,5 \cdot 10^{-4}$  Тл. Великий лабораторний електромагніт може створити поле не більш 5 Тл.

Сила Ампера направлена перпендикулярно вектору магнітної індукції  $\vec{B}$  і напрямку струму, що протікає по провіднику. Для визначення напрямку сили Ампера зазвичай використовують правило лівої руки: якщо розташувати ліву руку так, щоб лінії індукції  $\vec{B}$  входили в долоню, а витягнуті пальці були направлені уздовж струму, то відведений великий палець вкаже напрям сили, що діє на провідник (мал.2).

### Дія сили Ампера



Малюнок 2.

Якщо кут  $\alpha$  між напрямками вектора  $\vec{B}$  і струму в провіднику відмінний від  $90^\circ$  то для визначення напрямку сили Ампера зручніше користуватися правилом правого гвинта: уявний гвинт (свердлик) розташовується перпендикулярно площині, що містить вектор  $\vec{B}$  і провідник із

струмом, потім його ручка повертається від напрямку струму до напрямку вектора  $\mathbf{B}$ . Поступальне переміщення свердлика показуватиме напрям сили Ампера.

Одним з важливих прикладів магнітної взаємодії є взаємодія паралельних струмів. Закономірності цього явища були експериментально встановлені **Ампером**. Якщо по двом паралельним провідникам електричні струми протікають в одну і ту ж сторону, то спостерігається взаємне притягання провідників. У разі, коли струми течуть в протилежних напрямках, провідники відштовхуються.

Взаємодія струмів викликається їх магнітними полями: магнітне поле одного струму діє з силою Ампера на інший струм і навпаки.

Досліди показали, що модуль сили, що діє на відрізок завдовжки  $\Delta l$  кожного з провідників, прямо пропорційний силам струму  $I_1$  і  $I_2$  у провідниках, довжині відрізка  $\Delta l$  і назад пропорційний відстані  $R$  між ними:

$$F = k \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}.$$

Формула, що виражає закон магнітної взаємодії паралельних струмів, набирає вигляду:

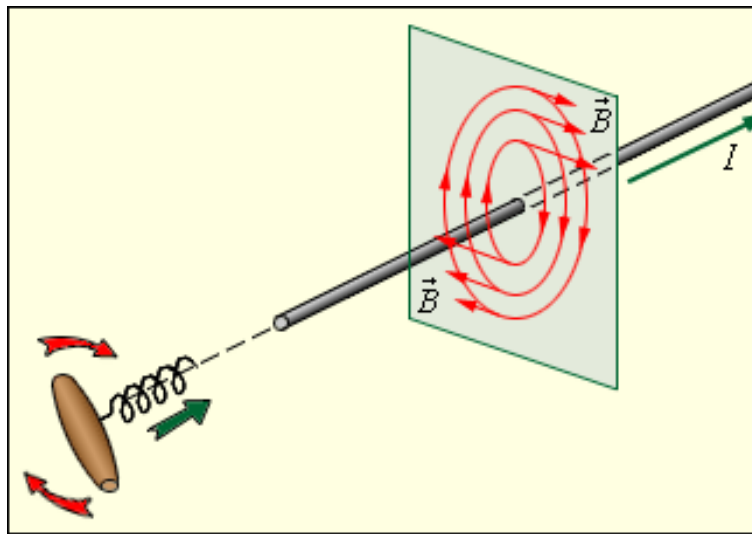
$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}.$$

Звідси неважко отримати вираз для індукції магнітного поля кожного з прямолінійних провідників. Магнітне поле прямолінійного провідника із струмом повинно мати осьову симетрію і, отже, замкнуті лінії магнітної індукції можуть бути тільки концентричними колами, розташованими в площині, що перпендикулярна провіднику. Це означає, що вектори  $\vec{B}_1$  і  $\vec{B}_2$  магнітної індукції паралельних струмів  $I_1$  і  $I_2$  лежать в площині,

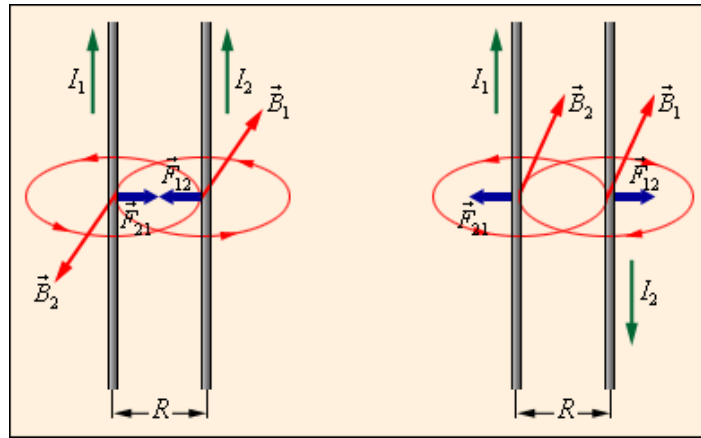
перпендикулярній обом струмам. Тому при обчисленні сил Ампера, що діють на провідники із струмом, в законі Ампера потрібно покласти  $\sin \alpha = 1$ . Із закону магнітної взаємодії паралельних струмів виходить, що модуль індукції  $B$  магнітного поля прямолінійного провідника із струмом  $I$  на відстані  $R$  від нього виражається співвідношенням

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

Для того, щоб при магнітній взаємодії паралельні струми притягувалися, а антипаралельні відштовхувалися, лінії магнітної індукції поля прямолінійного провідника мають бути направлені за годинниковою стрілкою, якщо дивитися уздовж провідника по напрямку струму.



Малюнок .3.



Малюнок 4.

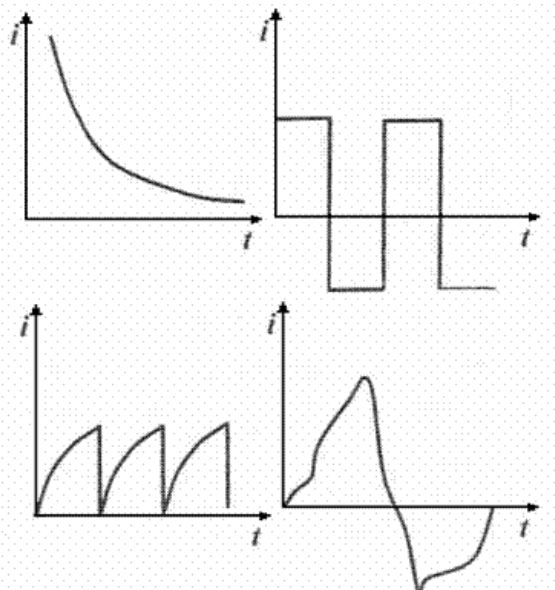
Магнітна взаємодія паралельних провідників із струмом використовується в Міжнародній системі одиниць (СІ) для визначення одиниці сили струму – ампера:

*Ампер – сила струму, який при проходженні по двох паралельним провідникам нескінченної довжини і малого перерізу, розташованим на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликав би між цими провідниками силу магнітної взаємодії, рівну  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на кожен метр довжини.*

### Контрольні питання

1. Які досліди підтверджують існування магнітного поля?
2. Які сили називають магнітними?
3. Що таке лінії магнітної індукції?
4. Дайте визначення сили Ампера?
5. Як визначається сила Лоренца?
6. Чи впливає магнітне поле на живі організми?
7. Фізичний зміст магнітної проникності середовища?
8. Що розуміють під одиницею вимірювання 1 ампер?

**Тема 10. Змінний струм. ЕРС рамки при обертанні. Миттєве, амплітудне та діюче значення ЕРС, сили струму, напруги.**



Мал.1.1.1. Приклади змінних струмів

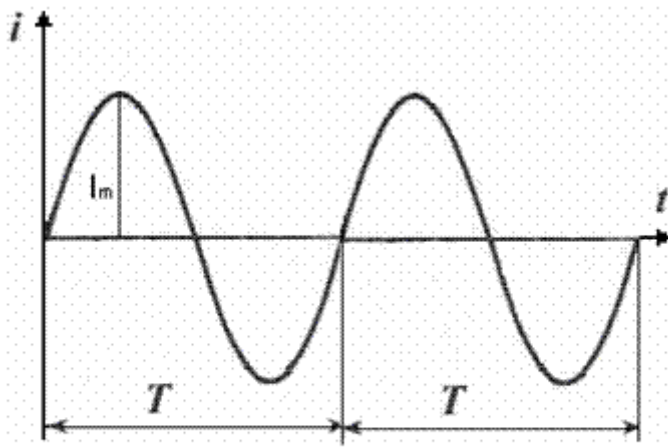
**Характеристики змінного струму.**

**Закон Ома для змінного струму.**

Змінним називають такий струм, який упродовж певного часу змінюється за величиною і напрямком. В теорії і практиці під змінним струмом розуміють вужчу і цілком певну категорію електричного струму — періодичний змінний синусоїдальний струм із частотою  $\nu = 50$  Гц. Змінний струм тривалий час не мав практичного застосування. Очевидно, це

пояснюється тим, що першими генераторами електричної енергії були генератори постійного струму, які повністю задовольняли протягом тривалого часу потреби споживачів. Впровадженню змінного струму значною мірою сприяв розвиток електроосвітлення.

У наш час централізоване виробництво і розподіл електроенергії здійснюється на змінному струмі. Використання електроенергії змінного струму замість постійного струму обумовлене багатьма техніко-економічними причинами, а саме: джерела енергії змінного струму - синхронні генератори - дешевші, надійніші та можуть бути виготовлені на значно більші потужності і напруги, ніж генератори постійного струму; електроенергія змінного струму легко та зручно перетворюється за допомогою трансформаторів з однієї напруги в іншу, що є дуже важливим при передачі електроенергії на відстань; основні споживачі електроенергії - двигуни змінного струму - дешевші та надійніші, ніж двигуни постійного струму.



Мал.1.2. Змінний синусоїдальний струм

Приклади змінних струмів показано на мал.1.1.

Розглянемо більш детально періодичний змінний синусоїдальний струм (мал.1.2.).

Математично в найбільш загальному випадку такий струм можна описати рівнянням

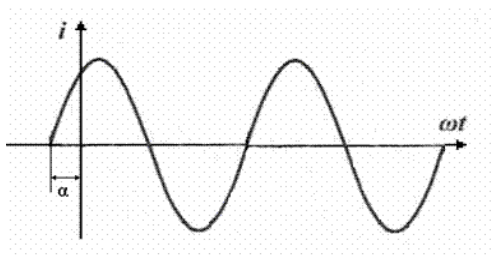
$$i = I_m \sin(\omega \cdot t + \alpha), \quad (1.1.)$$

де  $i$  - миттєве значення струму,  $I_m$  - амплітудне значення струму,  $(\omega \cdot t + \alpha)$  - фаза коливань в момент часу  $t$ ,  $\omega$  - циклічна частота,  $t$  - час,  $\alpha$  - початкова фаза.

Миттєве значення сили струму ( $i$ ) в момент часу  $t$  визначається за рівнянням (1.1.). Амплітудне значення сили струму ( $I_m$ ) – це найбільше значення, якого набуває струм з плином часу (мал.1.2.). Якщо в початковий момент часу графік залежності сили струму від часу такий як на мал.1.2., то початкова фаза буде також рівна нулю ( $\alpha = 0$ ). Рівняння для струму в такому випадку матиме вигляд

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t). \quad (1.2.)$$

При зсуві початку синусоїди струму вліво від початку координат (мал.1.3.) початкова фаза додатна ( $\alpha > 0$ ). Рівняння, що описує струм, буде таке саме, як і (1.1.). При зсуві початку синусоїди струму вправо від початку



Мал.1.3.

координат початкова фаза додатна ( $\alpha < 0$ ).

Рівняння, що описує струм, буде мати вигляд

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t - \alpha) \quad (1.3.)$$

Пригадаємо, що час, протягом якого здійснюється одне повне коливання періодичного процесу, називають періодом ( $T$ ), а кількість коливань протягом одиниці часу називають – частотою ( $\nu$ ). Зв'язок між періодом і частотою описується формулою

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1.4.)$$

Частоту вимірюють у герцах (Гц). Період в секундах. Кількість коливань за  $2 \cdot \pi$  секунди називають циклічною частотою ( $\omega$ ), вимірюють у (рад/с)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \nu = \frac{n \cdot \pi}{30}, \quad (1.5.)$$

де  $n$  - кількість коливань за одну хвилину.

Виробництво і розподіл енергії в енергосистемах України та країнах Європи здійснюють на частоті 50 Гц. У США, Канаді та Японії енергопостачання відбувається на частоті 60 Гц. Вибір значення частоти в енергосистемах визначається тим, що при низьких частотах стає помітним для ока мигання ламп розжарювання, а на більш високих частотах погіршуються умови передачі енергії на далекі відстані за рахунок впливу ємностей та індуктивностей лінії електропередачі. З ростом частоти зменшуються габарити і маса електрообладнання, тому в авіації широко використовують частоту 400 Гц.

Все, що було сказано відносно струмів, справедливо також і для синусоїдно змінних ЕРС і напруги.

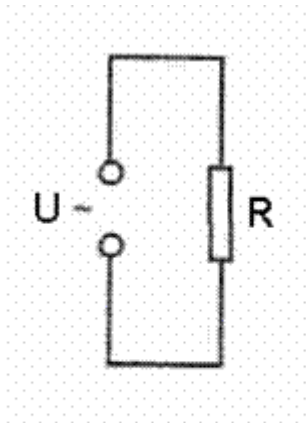
Діючим значенням струму називають такий незмінний в часі струм, який виділяє в резистивному опорі за період таку ж кількість енергії, що й синусоїдно змінний струм. Позначають діюче значення сили струму -  $I$ . Очевидно, що існує зв'язок між амплітудним та діючим значенням сили струму

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot I_m. \quad (1.6.).$$

Тобто, діюче значення струму менше амплітудного в  $\sqrt{2}$  разів. Аналогічно визначають та позначають діючі значення ЕРС і напруги:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad \text{та} \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (1.7.)$$

Всі електровимірювальні прилади змінного струму показують діюче значення синусоїдних величин.



Мал.1.4.Електричне коло змінного струму з резистивним елементом

Часто, при теоретичних розрахунках, зручно використовувати середнє значення струму, напруги або ЕРС, під яким розуміють середнє арифметичне відповідної величини за півперіод коливань.

$$I_c = \frac{2 \cdot I_m}{\pi}, \quad E_c = \frac{2E_m}{\pi} \quad \text{та} \quad U_c = \frac{2U_m}{\pi}.$$

На відміну від постійного струму, в колах змінного струму є три види опорів:

Розглянемо найпростіший випадок: **електричне коло змінного струму з резистивним елементом** (мал 1.4.). Коло з активним опором мусить мати значний опір і дуже малу індуктивність та ємність. Припустимо, що в даному електричному колі на резистивному елементі напруга змінюється з часом за законом

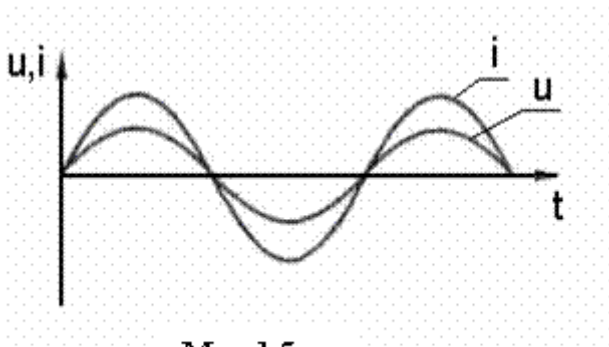
$$u = U_m \sin(\omega \cdot t) \quad (1.8.).$$

Тоді миттєве значення струму визначатиметься формулою  $i = \frac{u}{R}$ , тобто

$$i = \frac{U_m \sin(\omega \cdot t)}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega \cdot t).$$

Враховуючи, що  $\frac{U_m}{R} = I_m$  - амплітудне значення сили струму, отримаємо закон зміни струму в цьому ж колі

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t) \quad (1.9.)$$



Мал.1.5.

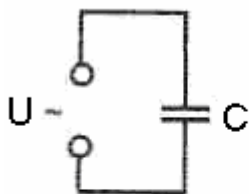
Порівнюючи формули (1.8.) та (1.9.), можна зробити висновок що у провіднику з активним опором коливання значення струму за фазою збігаються з коливаннями напруги (мал.1.5.), або, як часто кажуть, зміна струму і спаду напруги

на резистивному елементі відбуваються синфазно, а амплітуду струму визначають за формулою:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Розглянемо електричне коло змінного струму з ємнісним елементом (мал.1.6.). При розрахунку потрібно враховувати, що таке коло мусить мати велику ємність і порівняно дуже малу індуктивність. Припустимо, що струм в колі змінюється за законом  $i = I_m \sin(\omega \cdot t)$ , напругу в колі можна означити як різницю потенціалів на обкладинках конденсатора, тобто  $u = u_c$ ,

де  $u_c = \frac{q}{C}.$  (1.10.)



Мал.1.6. Електричне коло змінного струму з ємнісним елементом.

Для подальших розрахунків використаємо означення сили струму  $i = \frac{dq}{dt}$ , звідси,  $dq = I \cdot dt$ .

$$dq = I \cdot dt = I_m \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \quad (1.10.)$$

Для того, щоб визначити закон, за яким змінюється заряд, з часом на обкладинках конденсатора, рівність 1.10. потрібно проінтегрувати по часу

$$q = \int I_m \sin(\omega \cdot t) \cdot dt = -\frac{I_m}{\omega} \cos(\omega \cdot t) + q', \quad (1.11.)$$

$q'$  - стала величина, математично обумовлена тим, що ми маємо неозначений інтеграл, фізично це означає, що в початковий момент часу ( $t=0$ ) конденсатор був заряджений.

Будемо вважати, що в початковий момент часу (момент включення)  $q' = 0$ .

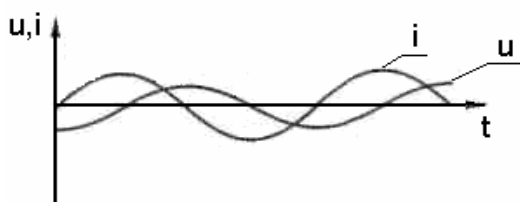
$$q = -\frac{I_m}{\omega} \cos(\omega \cdot t) = \frac{I_m}{\omega} \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}), \text{ підставимо це рівняння в (1.10.).}$$

$$u = u_c = \frac{q}{C} = \frac{I_m}{C\omega} \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}), \text{ або } u = U_{cm} \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}), \quad (1.12.)$$

де  $\frac{I_m}{C\omega} = U_m$  - амплітудне значення напруги в досліджуваному колі, також з цієї рівності, оперуючи розмінностями фізичних величин, можна помітити, що  $\frac{1}{C\omega}$  є опором.

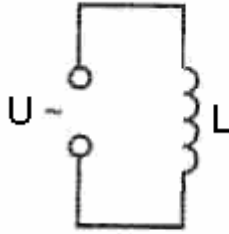
Величину  $R_c = X_c = \frac{1}{C\omega}$  називають ємнісним опором.

Порівнюючи закон зміни струму та (1.12.), можна зробити висновок що в колі з ємнісним елементом коливання сили струму випереджають коливання напруги на конденсаторі на  $\frac{\pi}{2}$  мал.1.7.



Мал.1.7.

Електричним колом змінного струму з індуктивним елементом називається коло, яке має індуктивність і дуже малі активний та ємнісний опори мал.1.7. Нехай, струм в такому колі змінюється за гармонічним законом



Мал.1.7. Електричне коло змінного струму з індуктивним елементом.

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t)$$

Оскільки при проходженні струму в котушці внаслідок явища самоіндукції виникатиме ЕРС  $\mathcal{E}_c$ , то таке коло можна вважати неоднорідним. Запишемо та проаналізуємо закон Ома для неоднорідної ділянки кола

$$i = \frac{u + \mathcal{E}_c}{R},$$

та враховуючи, що  $R = 0$ , отримаємо  $u = -\mathcal{E}_c$ , або

$$u = -\mathcal{E}_c = L \frac{di}{dt} \quad (1.13.)$$

де  $L$  - індуктивність котушки.

Підставимо закон зміни струму в колі в рівняння (1.13).

$$u = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin(\omega \cdot t))}{dt} = I_m L \frac{d(\sin(\omega \cdot t))}{dt} = I_m L \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$I_m L \omega = U_m$  - амплітудне значення напруги в розглядуваному колі.

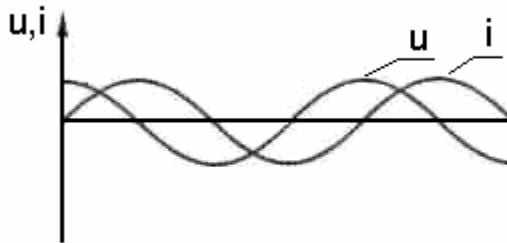
Як і в попередньому випадку, проаналізувавши розмінності фізичних величин, отримаємо, що  $L\omega$  є опором. Величину  $R_L = X_L = L\omega$  називають

індуктивним опором. Використовуючи це, та те, що  $\cos(\omega \cdot t) = \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2})$

, отримаємо, що напруга в досліджуваному колі змінюється за законом

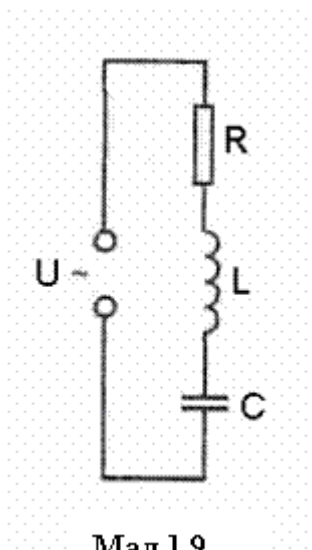
$$u = U_m \sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}) \quad (1.14.)$$

Порівнюючи рівняння струму та напруги, можна зробити висновок, що в колі з індуктивністю коливання напруги випереджають коливання сили струму на  $\frac{\pi}{2}$  мал.1.8.



Мал.1.8.

Індуктивний та ємнісний опори залежать від частоти. Якщо електричне поле містить ємнісний і індуктивний опори, то кажуть, що таке коло містить реактивний опір. Розглянувши електричне коло одночасно з омичним, ємнісним, індуктивним опорами, з'єднаними послідовно (мал.1.9.) та провівши більш детальний аналіз з використанням методу векторних діаграм, отримаємо, що повний опір



Мал.1.9.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (1.15.)$$

де  $R$  - активний опір,  $X$  - повний реактивний опір.

Повний реактивний опір визначається формулою

$$X = \frac{1}{\omega C} - \omega L. \quad (1.16.)$$

Підставивши (1.16.) в (1.15.), отримаємо, що

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}.$$

Визначивши повний опір кола для змінного струму, можна записати закон Ома для ділянки кола змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \quad (1.17.)$$

$I$  та  $U$  в (1.17.) - діючі значення струму та напруги. Використовуючи зв'язок між діючими та амплітудними значеннями цих величин (формули (1.6.), (1.7.)) отримаємо

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}.$$

У колах змінного струму спостерігається резонанс. **Резонанс-це явище різкого зростання коливань, коли частота власних коливань системи співпадає з частотою зовнішньої сили.**

Для вивчення резонансу розглянемо послідовно під'єднані до джерела змінного струму резистор з активним опором  $R$ , конденсатор з ємнісним опором  $X_C$  та котушку індуктивності з індуктивним опором  $X_L$  (мал.1.9.). Дане коло можна розглядати як своєрідний коливальний контур, який має власну частоту коливань. Якщо частота прикладеної змінної напруги збігається із власною частотою контуру, то в колі виникає резонанс. Тобто, в розглядуваному випадку **резонанс – це явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань струму у разі збігу частоти зовнішньої змінної напруги із власною частотою коливального контуру.** При цьому контур протягом всього періоду буде використовувати енергію від джерела, нічого не повертаючи йому. Це призведе до різкого збільшення струму і напруги.

Умову резонансу легко отримати із закону Ома для змінного струму (1.17.). Очевидно, що струм досягне свого найбільшого значення (мал.1.10.) тоді, коли знаменник у виразі (1.17.) буде найменшим, тобто реактивний опір дорівнюватиме нулю

$$\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2 = 0,$$

звідси умова резонансу:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L.$$

Провівши нескладні математичні перетворення в останній рівності, отримаємо формулу, за допомогою якої можна розрахувати резонансну частоту

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{CL}},$$

або

$$\nu_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$$

Як видно з рівняння (1.17.), якщо активний опір зменшувати, резонансне значення струму може зростати без обмежень і навпаки, при збільшенні активного опору струм зменшується і резонанс спостерігатиметься слабше ( $R_1 < R_2 < R_3$ ).

### Контрольні питання

1. Що таке змінний струм?
2. Як змінюється струм в колі з активним опором?
3. Що таке потужність кола синусоїдального струму?
4. Як визначити діюче значення сили струмів колі?
5. Що таке активна, реактивна і повна потужність?
6. Як підвищити коефіцієнт потужності?
7. Що таке резонанс напруг?
8. Яка умова виникнення резонансу?
9. Яка частота змінного струму в побутовій мережі?

## Тема 11. Коливальний контур. Гармонічні електромагнітні коливання.

### Рівняння електромагнітних гармонічних коливань.

Коливальним контуром називають електричне коло, складене із конденсатора та котушки індуктивності. У такому колі енергія електричного поля конденсатора може перетворюватись в енергію магнітного поля котушки. Одночасні зміни взаємозв'язаних між собою електричного і магнітного полів називаються *електромагнітними коливаннями*.

Щоб одержати електромагнітні коливання необхідно зарядити конденсатор та замкнути електричне коло (рис.12.9,а). Якщо конденсатор має електричну ємність  $C$ , а зарядили його до напруги  $U_0 = q_0/C$ , то між його обкладками наведеться електричне поле енергією. При замиканні ключа  $K$  конденсатор почне розряджатись через котушку, але розряд не буде миттєвим, оскільки, відповідно до закону Ленца, ЕРС, що збуджується, протидіятиме наростанню струму. Через  $t = T/4$  конденсатор повністю розрядиться, в котушці індуктивності буде наведене магнітне поле максимальної індукції  $\vec{B} = \max$

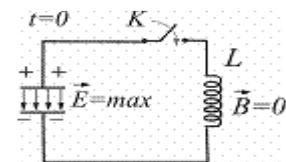


Рис. 12.9,а

(рис.12.8,б) та енергії  $W_L = \frac{LI_0^2}{2}$ . Якщо вважати, що енергія не втрачається на випромінювання та нагрівання

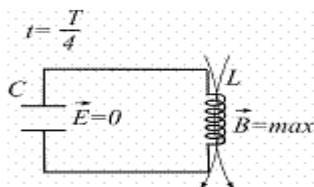


Рис. 12.9,б

провідників, то  $W_E = W_L$ , або  $\frac{q_0}{2C} = \frac{LI_0^2}{2}$ .

У момент часу  $t = T/2$  між обкладками конденсатора знову існуватиме електричне поле, але протилежного напрямку від початкового (рис.12.8,в).

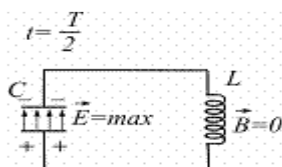


Рис. 12.9,в

Наступна розрядка проходитиме аналогічно до розглянутої. Так у колі відбуватиметься періодичний рух електронів від однієї обкладинки конденсатора до іншої із

частотою, що залежить від параметрів контуру  $L$ ,  $C$  і  $R$ .

Якщо зарядити конденсатор до різниці потенціалів  $U_m$ , то при відсутності струму в колі, енергія електричного поля, що зосереджене між обкладками конденсатора, дорівнює

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_m^2.$$

Під час розрядки конденсатора в колі виникає струм і енергія електричного поля поступово перетворюється в енергію магнітного поля котушки.

В момент, коли заряд конденсатора стає рівним нулю, струм у колі максимальний і енергія магнітного поля котушки стає рівною

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_m^2.$$

Після цього, внаслідок явища самоіндукції, струм продовжує йти у тому самому напрямі, конденсатор перезаряджається. Енергія магнітного поля поступово перетворюється в енергію електричного поля конденсатора.

В момент, коли струм в колі припиняється, енергія електричного поля стає знову рівною

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_m^2.$$

Після цього процес відбувається в зворотному напрямі.

### ***Рівняння гармонічних коливань у контурі***

1. В коливальному контурі, опір якого дорівнює нулю, відбуваються гармонічні електромагнітні коливання.

2. Під час гармонічних електромагнітних коливань заряд конденсатора змінюється за законом:

$$Q = Q_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi),$$

де  $Q_m$  – амплітуда коливань заряду конденсатора з циклічною частотою, що визначається за формулою:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}.$$

3. Усі величини і закономірності, встановлені для гармонічних коливань у механіці, зберігають свій зміст і в електромагнітних коливаннях. Зокрема, період коливань пов'язаний з циклічною частотою залежністю:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}.$$

Ця формула для періоду вільних електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі названа формулою Томсона.

4. Аргумент косинуса в формулі, що відображає закон зміни заряду конденсатора, називається фазою.

Знання фази дає можливість обчислювати миттєве значення заряду конденсатора і визначає стан коливального процесу.

5. Під час гармонічних електромагнітних коливань в коливальному контурі сила струму та напруга на конденсаторі змінюються за законами:

$$i = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi + \frac{1}{2}\pi), \text{ де } I_m = \omega \cdot Q_m;$$

$$u = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi), \text{ де } U_m = \frac{Q_m}{C}.$$

Коливання сили струму випереджають за фазою коливання заряду і напруги на  $\frac{1}{2}\pi$ , тобто коли сила струму досягає максимального значення  $I_m$ , заряд  $Q$  і напруга  $U$  перетворюються на нуль і навпаки.

### ***Автоколивання***

1. Електромагнітні автоколивання – незатухаючі коливання, які підтримуються в коливальній системі не за рахунок періодичного зовнішнього впливу, а в результаті здатності коливальної системи самій регулювати надходження енергії від постійного зовнішнього джерела.

2. Автоколивання виникають самодовільно під дією випадкових малих впливів, які виводять систему з рівноваги. Частота, амплітуда тощо

автоколивань визначаються властивостями самої системи і не залежать від початкових умов.

3. Електрична автоколивальна система містить коливальний контур, підсилювач коливань і джерело електричної енергії. Між коливальним контуром і підсилювачем має існувати зворотний зв'язок – коливання з контуру надходять у підсилювач, підсилюються за рахунок джерела енергії і повертаються назад у коливальний контур. Дуже важливо, щоб коливання, які надходять від підсилювача в контур, збігалися за фазою з коливаннями у самому контурі.

Коливання, які відбуваються в коливальному контурі без зовнішніх впливів і втрат енергії називаються *власними електромагнітними випромінюваннями*.

Миттєве значення розрядного струму можна оцінити із таких міркувань. Якщо у початковий момент напруга на конденсаторі  $U_0 = q_0/C$ , ЕРС

самоіндукції  $\mathcal{E}_a = -L \frac{di}{dt}$ , то відповідно до закону Ома:

$$I_0 = \frac{U_0 - L \frac{dI_0}{dt}}{R} \Rightarrow I_0 R = U_0 - L \frac{dI_0}{dt}.$$

Оскільки,  $I_0 = -\frac{dq_0}{dt}$ ,  $\frac{dI_0}{dt} = -\frac{d^2 q_0}{dt^2}$ , тоді після перетворень

одержимо  $L \frac{d^2 q_0}{dt^2} + R \frac{dq_0}{dt} + \frac{q_0}{C} = 0$ . Якщо коливання власні, то значить,

що  $R=0$  і тому кінцево маємо  $L \frac{d^2 q_0}{dt^2} + \frac{q_0}{C} = 0$ . Це і буде рівняння власних електромагнітних коливань в електричному коливальному контурі. Як бачимо, це рівняння подібне до рівняння власних механічних коливань.

Розв'язком такого рівняння є гармонічна функція:  $q = q_0 \sin(\omega_0 t - \varphi)$ ,

де  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – власна частота контура. Формула Томсона визначає період власних коливань, отже  $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ .

Під час розглянутих власних коливань на обкладках конденсатора змінюється напруга на конденсаторі за законом

$U = \frac{q_0}{C} \sin(\omega_0 t + \varphi) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$  а величина розрядного струму відповідно

до закону  $I = \frac{dq}{dt} = \omega_0 q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) = I_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$

### Контрольні питання

1. Що називають коливальним контуром?
2. Який прилад дає можливість спостерігати електромагнітні коливання?
3. Запишіть рівняння гармонічних коливань?
4. За якою формулою визначають власну частоту коливань системи?
5. Що таке автоколивання?
6. Які коливання називаються власними?
7. За якою формулою визначається енергія магнітного поля котушки?
8. За якою формулою визначається енергія електричного поля конденсатора?
9. Від чого залежить частота електромагнітних коливань?

## **Тема 12. Утворення і поширення електромагнітних хвиль. Швидкість поширення, довжина і частота електромагнітної хвилі.**

Численні явища в природі пов'язані з хвилями, які одержали назву електромагнітних. Поширюючись у просторі, вони взаємодіють з матеріальними об'єктами і спричиняють різноманітні зміни їх. Крім властивостей, притаманних будь-яким хвильовим процесам, електромагнітні хвилі мають і своєрідні властивості. Вивчення властивостей електромагнітних хвиль дало змогу пояснити багато природних явищ, розробити унікальні технологічні процеси, високоточні методи вимірювання, ефективні засоби зв'язку, складну медичну апаратуру тощо.

*Електромагнітна хвиля — це процес поширення електромагнітного поля*

Розглянемо природу і механізм утворення електромагнітних хвиль, особливості їх поширення і взаємодії з речовиною, зробимо ще один крок до пізнання особливостей електромагнітної взаємодії в природі.

У вченні про електромагнітні хвилі чільне місце посідає теорія електромагнітного поля, до якої фізика йшла тривалий час тернистим і складним шляхом, оскільки електричні й магнітні явища довго розглядали як специфічні й незалежні. Лише експериментальними дослідженнями таких визначних учених, як Г. Ерстед і М. Фарадей, було доведено органічний зв'язок електричних і магнітних явищ, електричних і магнітних полів, взаємообумовлене і взаємопов'язане їх існування. У дослідях Г. Ерстеда магнітне поле електричного струму не знищує електричне поле, яке викликало цей струм, а існує одночасно з ним, проявляючись як обов'язковий супровід електричного струму. Електричне поле, яке виявляється в дослідях М. Фарадея з електромагнітної індукції, не знищує змінне магнітне поле, яке є обов'язковою умовою існування явища електромагнітної індукції, а обов'язково супроводжує змінне магнітне поле.

Накопичення знань про електричне і магнітне поля, виявлення явищ, які засвідчують зв'язок магнітних і електричних явищ, спонукало вчених до пошуку їх пояснення з єдиних теоретичних позицій.

Найпліднішою спробою пояснення властивостей і походження електричних і магнітних полів з єдиних позицій виявилися теоретичні дослідження англійського фізика-теоретика Джеймса Клерка Максвелла, який у 1864 р. опублікував працю «Динамічна теорія електромагнітного поля». У ній він описав теорію, що ґрунтувалася на уявленнях про існування єдиного електромагнітного поля, прояви якого різні в різних системах відліку. Цим Д. К. Максвелл довів, що електричне і магнітне поля є проявом єдиного електромагнітного поля в різних системах відліку.



Розробляючи теорію електромагнітного поля, Д. К. Максвелл не тільки узагальнив результати експериментальних досліджень властивостей електричних і магнітних полів, а й зробив принципово важливі відкриття. Так, він установив, що в разі зміни електричного поля обов'язково спостерігатиметься магнітне поле. Магнітна індукція  $B$  цього поля залежить від швидкості зміни електричного поля:

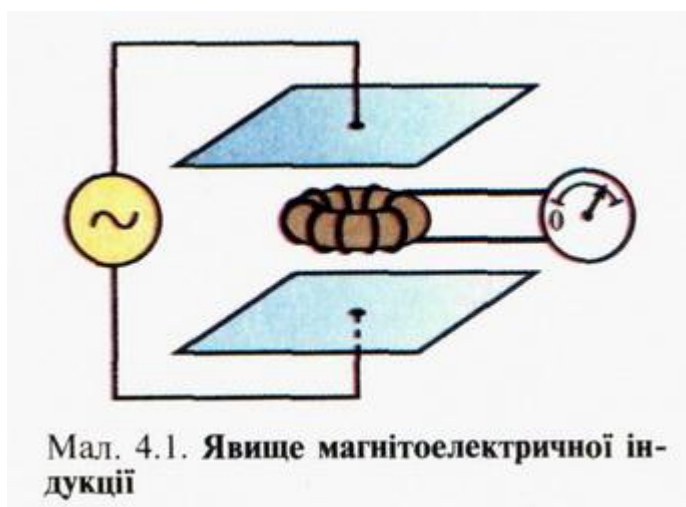
$$\vec{B} \sim \frac{\Delta \vec{E}}{\Delta t}.$$

Це передбачення згодом було підтверджене експериментально і стало

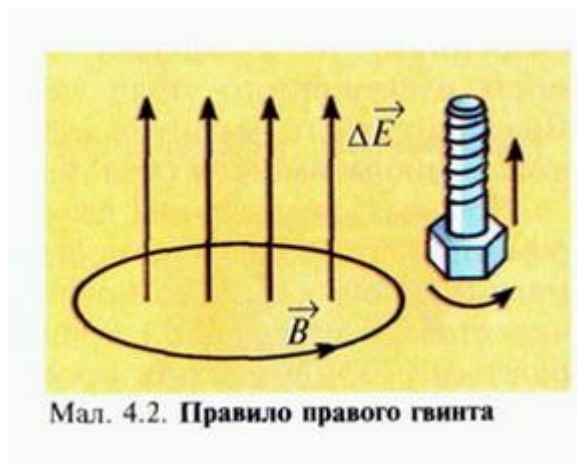
важливою ланкою теорії. Явище, за якого спостерігається магнітне поле в разі зміни електричного поля, дістало назву магнітоелектричної індукції.

Зв'язок магнітного поля зі змінним електричним полем можна спостерігати в дослідах за допомогою сучасних приладів.

Якщо в електричне поле між двома паралельними пластинками, приєднаними до генератора змінної напруги, внести тороїдальну котушку (мал. 4.1), то вимірювальний прилад, приєднаний до неї, виявить змінну ЕРС, частота якої відповідатиме частоті зміни електричного поля.



Якщо збільшити частоту зміни електричного поля, то й амплітуда ЕРС у котушці збільшиться. Це саме спостерігається і тоді, коли осердя котушки замінити на інше, з більшою магнітною проникністю. Лінії магнітної індукції поля за магнітоелектричної індукції охоплюватимуть лінії напруженості електричного поля. Це засвідчує положення тороїдальної котушки в електричному полі. Максимальне значення амплітуди ЕРС у котушці виявляється тоді, коли площа котушки перпендикулярна до ліній напруженості електричного поля. Напрямок ліній магнітної індукції у явищі магнітоелектричної індукції можна визначити за правилом правого гвинта: якщо поступальний рух правого гвинта збігається з напрямком вектора зміни напруженості електричного поля, то напрямок його обертання покаже напрямок ліній магнітної індукції (мал. 4.2).



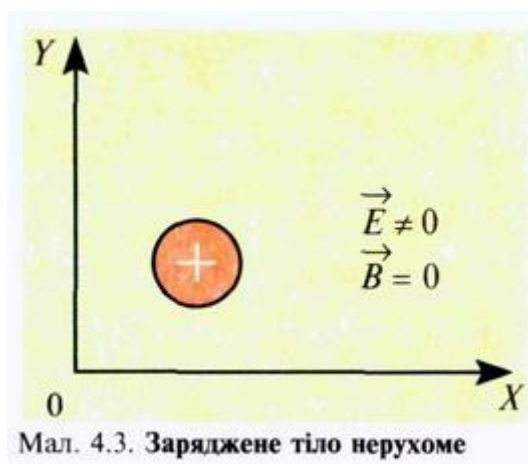
*Явище магнітоелектричної індукції — це поява магнітного поля при зміні електричного поля*

Фундаментальним висновком з теорії Максвелла є передбачення, що мають існувати електромагнітні хвилі, швидкість поширення яких дорівнює швидкості світла.

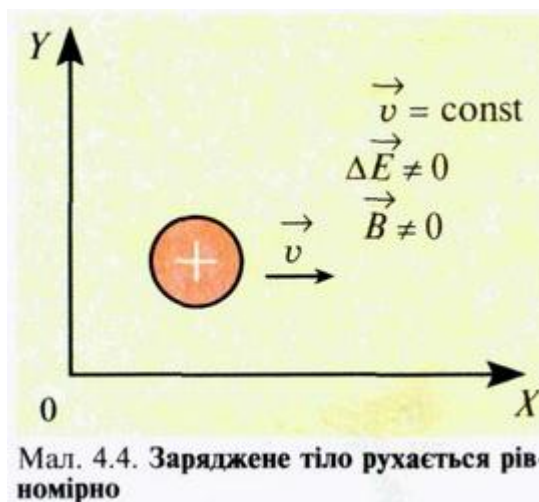
Основні положення теорії електромагнітного поля узагальнені у рівняннях Максвелла. Однак, щоб їх прочитати і зрозуміти, потрібні знання з вищої математики.

Теорія Максвелла дає змогу пояснити взаємозв'язок електричних і магнітних полів на основі теорії відносності.

1. Якщо в якійсь системі відліку знаходиться електрично заряджене тіло і його швидкість дорівнює нулю, то в цій системі можна виявити лише електричне поле. Властивості цього поля і явища, пов'язані з ним, ви вивчали у розділі «Електростатика» (мал. 4.3).



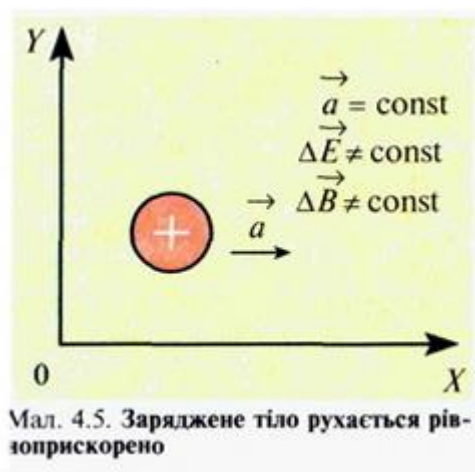
2. Якщо заряджене тіло в деякій системі рухається рівноприскорно, то в цій системі, крім електричного, спостерігається ще й магнітне поле (мал. 4.4).



При цьому напруженість електричного поля змінюватиметься лінійно, а індукція магнітного поля, буде сталою:

$$\vec{B} = k \frac{\Delta \vec{E}}{\Delta t}.$$

3. Якщо заряджене тіло рухається з прискоренням, то швидкість зміни напруженості електричного поля не буде сталою. Внаслідок цього магнітна індукція поля також змінюватиметься (мал. 4.5).



*Теорія Максвелла дає змогу пояснити взаємозв'язок електричних і магнітних полів на основі теорії відносності*

Подальші дослідження властивостей електромагнітного поля показали, що воно має масу й енергію, а зміна його характеристик, яка сталася в

довільній точці поля, поширюється до інших точок простору зі сталою швидкістю.

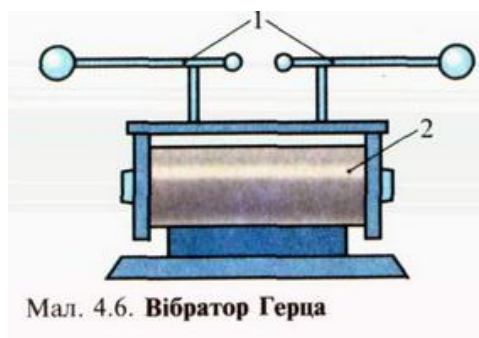
Узагальнивши результати досліджень своїх попередників, які вивчали електричні й магнітні явища, Д. К. Максвелл передбачив існування електромагнітних хвиль. Після цього вчені спрямували свої зусилля на пошуки електромагнітних хвиль.

Найбільш успішними були експериментальні дослідження талановитого німецького вченого-фізика Г. Р. Герца. Після багаторічних пошуків і досліджень він у 1888 р. опублікував результати своєї праці, де повідомляв, що експериментально підтвердив існування електромагнітних хвиль. Він також дослідив основні властивості електромагнітних хвиль.



Розглянемо зміст дослідів Герца, оскільки вони дають змогу зрозуміти механізм утворення і поширення електромагнітних хвиль.

Основною частиною експериментальної установки Г. Р. Герца був випромінювач у вигляді двох металевих стрижнів 1, з'єднаних із джерелом високої напруги 2. (мал. 4.6).



Між стрижнями виникав іскровий розряд. Оскільки напруга на стрижні подавалася окремими імпульсами, то між кульками на кінцях стрижнів періодично відбувалися іскрові розряди.

Якщо неподалік випромінювача знаходилася система з двох таких самих, як і у випромінювачі, стрижнів, то між їхніми суміжними кінцями пробігала іскра щоразу, коли відбувався розряд між стрижнями випромінювача.

Це явище засвідчує, що в просторі між двома системами відбувається процес, внаслідок якого передається енергія.

Дослідження цього процесу підтвердили, що він має всі ознаки хвилі. Для нього характерні явища інтерференції, дифракції, поляризації, які властиві лише хвильовим процесам. Г. Р. Герц навіть зміг виміряти довжину хвилі отриманого електромагнітного випромінювання, яка в дослідах приблизно дорівнювала 60 см.

Причиною виникнення електромагнітних хвиль, як і хвиль будь-якої іншої природи, був коливальний процес, що відбувався у системі з двох стрижнів. Ця система дістала назву вібратора Герца. Коливання у вібраторі з'являлися щоразу, коли відбувався іскровий розряд. Г. Р. Герцу було відомо, що 1862 р. датський фізик В. Федерсон установив коливальний характер електричної іскри. Отже, використання її ученим у дослідах було цілком усвідомленим і не випадковим. Інших джерел електромагнітних коливань у той час учені не знали.

З розвитком електроніки з'явилася можливість одержувати незатухаючі електромагнітні коливання за допомогою електронних генераторів.

Електромагнітні коливання поширюються у вигляді електромагнітних хвиль. У них відбуваються взаємні перетворення електричного і магнітного полів, які разом утворюють змінне електромагнітне поле.

*Процес поширення змінного електромагнітного поля у просторі називають електромагнітною хвилею.*

Для одержання електромагнітних хвиль, як і хвиль будь-якої природи, потрібна система, в якій відбуваються коливання. Для електромагнітних коливань такою системою може бути коливальний контур (мал. 4.7).



Сучасні електронні системи дають змогу підтримувати в ньому незатухаючі коливання протягом тривалого часу, що, у свою чергу, створює умови для тривалого випромінювання електромагнітних хвиль.

Однак сам по собі закритий коливальний контур не може випромінювати електромагнітні хвилі. Електромагнітні коливання відбуваються в самому коливальному контурі і зовні це практично нічим не проявляється. Його електричне поле зосереджене між обкладками конденсатора і поза його межами практично не виявляється. Змінні ж магнітні поля зосереджені в основному всередині котушки контура і не виходять за його межі. Коливання електромагнітного поля можуть поширюватися в просторі, якщо вони відбуваються в так званому відкритому контурі, який має два досить довгі провідники, з'єднані один з одним через котушку індуктивності (мал. 4.8).



Для збудження електромагнітних коливань у відкритому контурі є різні способи, але найпоширеніший з них, коли котушка індуктивності відкритого

коливального контура утворює індуктивний зв'язок з контуром генератора незатухаючих коливань (мал. 4.9).



*Закритий коливальний контур не випромінює електромагнітних хвиль*

Завдяки явищу електромагнітної індукції в котушці  $L_a$  з'являється змінна ЕРС, внаслідок чого в провідниках виникає змінний струм, а на провідниках — різнойменні заряди. Оскільки електрони, які утворюють змінний електричний струм у провідниках, рухаються прискорено, то провідники відкритого коливального контура матимуть змінне електромагнітне поле.

*Відкритий коливальний контур, у якому відбуваються електромагнітні коливання, має змінні магнітне й електричне поля.*

Кожне з цих полів індукуватиме поле-«супутник». Так, змінне електричне поле відкритого коливального контура індукуватиме «власне» змінне магнітне поле, вже не пов'язане із струмом у провідниках. Відповідно до теорії Максвелла, вектор магнітної індукції цього поля буде перпендикулярним до вектора напруженості електричного поля, а його значення залежатиме від швидкості зміни вектора напруженості електричного поля:

$$B \sim \frac{\Delta E}{\Delta t}.$$

Індуковане змінне магнітне поле, у свою чергу, спричинюватиме появу індукованого електричного поля, вектор напруженості якого буде перпендикулярним до вектора магнітної індукції, а його значення залежатиме від швидкості зміни магнітної індукції:

$$E \sim \frac{\Delta B}{\Delta t}.$$

Індукційні процеси захоплюють все нові й нові точки простору, і, таким чином, змінне електромагнітне поле поширюється у просторі зі швидкістю світла.

*Відкритий коливальний контур може бути джерелом електромагнітної хвилі*

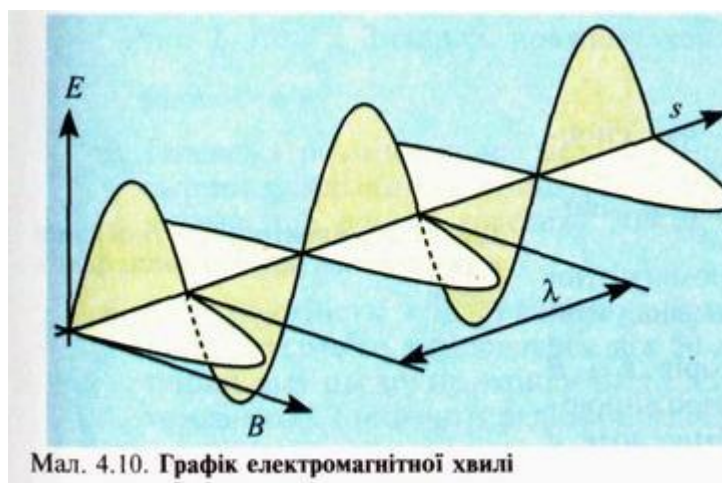
*Змінний струм у відкритому коливальному контурі породжує змінне електромагнітне поле*

*Зміни електромагнітного поля поширюються в просторі, як хвилі*

На відстані декількох довжин хвилі від відкритого коливального контура в просторі вже поширюється єдина електромагнітна хвиля, в якій відбуваються взаємозумовлені одночасні зміни електричного і магнітного полів — складових електромагнітного поля. Цю частину хвилі називають хвильовою зоною.

*У хвильовій зоні зміни вектора напруженості електричного поля і вектора магнітної індукції відбуваються одночасно*

Графічно електромагнітну хвилю можна зобразити у вигляді двох синусоїд, розміщених у взаємно перпендикулярних площинах (мал. 4.10).



Мал. 4.10. Графік електромагнітної хвилі

Цей графік показує функціональну залежність значень векторів  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  від відстані у напрямку поширення електромагнітної хвилі. За напрямком

вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  однозначно пов'язані між собою і вектором швидкості поширення хвилі. Їхні коливання відбуваються у взаємно перпендикулярних площинах, причому вектор  $\vec{E}$  завжди знаходиться в площині випромінюючого вібратора, а вектор швидкості завжди перпендикулярний до площини коливань векторів  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$ .

### Контрольні питання

1. Які явища засвідчують зв'язок між електричними і магнітними полями?
2. У чому суть явища магнітоелектричної індукції?
3. Які основні властивості електромагнітного поля?
4. За яких умов електромагнітне поле виявляється лише як електричне поле зарядженого тіла?
5. Коли можна одночасно виявити електричне і магнітне поля зарядженого тіла?
6. Яка мета досліджень Г. Р. Герца?
7. З яких частин складалася експериментальна установка Г. Р. Герца?
8. Чому в дослідах Г. Р. Герца було використано електричну іскру?
9. Які факти підтверджують хвильову природу випромінювання, відкритого Г. Р. Герцом?
10. Що називають електромагнітною хвилею?
11. Чому закритий коливальний контур не випромінює електромагнітних хвиль?
12. З якою метою застосовують відкритий коливальний контур?
13. Як випромінюється електромагнітна хвиля?
14. Як взаємно розміщені основні вектори в електромагнітній хвилі у хвильовій зоні?
15. Як розміщений вектор швидкості хвилі відносно векторів  $E$  і  $B$ ?

### **Тема 13. Розвиток уявлень про природу світла. Поширення світла в різних середовищах. Поглинання і розсіювання світла.**

Перші уявлення про природу світла були закладені ще з давніх-давен. Грецький філософ Платон (427–327 рр до н.е.) створив одну з перших теорій світла.

Евклід і Арістотель (300–250 рр до н.е.) дослідним шляхом установили такі основні закони оптичних явищ, як прямолінійне поширення світла й незалежність світлових пучків, відбиття й заломлення. Арістотель уперше пояснив сутність зору.

Незважаючи на те, що теоретичні положення древніх філософів, а пізніше й учених середніх століть були недостатніми й суперечливими, вони сприяли формуванню правильних поглядів на сутність світлових явищ і заклали підвалини для подальшого розвитку теорії світла й створення різноманітних оптичних приладів.

У міру накопичення нових відомостей про властивості світлових явищ змінилася точка зору на природу світла. Учені вважають, що історію вивчення природи світла варто починати з XVII століття.

У XVII столітті данський астроном Ремер (1644–1710) виміряв швидкість поширення світла; італійський фізик Гримальді (1618–1663) відкрив явище дифракції; геніальний англійський учений І. Ньютон (1642–1727) розвинув корпускулярну теорію світла, відкрив явища дисперсії й інтерференції, а Е. Бартолін (1625–1698) виявив подвійну променезаломлюваність в ісландському шпаті, заклавши тим самим основи кристалооптики.

На XVII століття припадають і перші спроби теоретичного обґрунтування спостережуваних світлових явищ. Корпускулярна теорія світла, розвинена Ньютоном, полягає в тому, що світлове випромінювання розглядається як безперервний потік дрібних частинок — корпускул, які,

випущені джерелом світла, з великою швидкістю летять в однорідному середовищі прямолінійно й рівномірно.

На основі корпускулярних уявлень Ньютон пояснив більшість відомих тоді оптичних явищ: прямолінійне поширення світла в однорідному середовищі, відбиття й заломлення світла.

З погляду хвильової теорії світла, основоположником якої є Х. Гюйгенс, світлове випромінювання являє собою хвильовий рух. Світлові хвилі Гюйгенс розглядав як пружні хвилі високої частоти, що поширюються в особливому пружному й густому середовищі — ефірі, який заповнює всі матеріальні тіла, проміжки між ними й міжпланетні простори.

Він строго математично описав явище відбиття й заломлення хвиль, причому з його міркувань випливало, що швидкість світла в густішому середовищі повинна бути менше, ніж у повітрі.

1801 р. Юнг на основі хвильових подань доволі просто й наочно роз'яснив інтерференцію світла й розвинув у такий спосіб хвильову теорію світла.

1818 р. Френель незалежно від Юнга докладно розвинув теорію дифракції й інтерференції світла, показавши при цьому, що інтерференція є прямим наслідком хвильової природи світла. Остаточний удар по корпускулярній теорії було завдано дослідями Фуко, що виміряв швидкість світла у воді, значення якої відповідало результатам, отриманим на основі хвильової теорії.

Хвильова теорія з єдиної точки зору пояснила всі відомі тоді явища й передбачила ряд нових.

Протягом понад сто років корпускулярна й хвильова гіпотези про природу світла існували паралельно. Жодна з них не могла здобути вирішальної перемоги. Лише авторитет Ньютонів змушував більшість учених віддавати перевагу корпускулярній теорії.

Досліди показує, що всі сильно нагріті тіла випромінюють світло. Нагріті тіла, що випромінюють світло, називають *тепловими джерелами світла*.

*Холодні джерела світла* — це тіла, які світяться за температури, наближеної до кімнатної.

Сонце, блискавка або світляки випромінюють світло без участі людини. Такі джерела світла, створені власне природою, називають *природними*.

Сьогодні людина вже створила багато джерел світла — їх називають *штучними*.

***Приймачами світла*** називають тіла й пристрої, у яких під дією світла, що падає на них, відбуваються помітні зміни.

Найважливішим для людини приймачем світла є око. Коли світло потрапляє на сітківку, що встеляє очне дно, воно спричиняє складні реакції, у результаті чого ми бачимо навколишній світ.

Оскільки світло — електромагнітне випромінювання і йому притаманні всі властивості електромагнітних хвиль, то всі завдання оптики можна розв'язати на основі хвильових уявлень. Але під час розв'язання задач на побудову зображень у дзеркалах і лінзах і проектування оптичних приладів учені користуються геометричними методами. Ці методи становлять зміст геометричної оптики, яку інакше називають променевою оптикою.

Основними поняттями геометричної оптики є *пучок* і *промінь*.

***Промінь*** — це лінія, що вказує напрямок перенесення світлової енергії.

У побуті ми часто називаємо світловим променем тонкий пучок світла. Не існує нескінченно вузьких світлових пучків; пучок світла завжди має кінцеву ширину. Промінь — це ніби вісь пучка, а не сам пучок.

*На практиці всі джерела світла мають розміри. Світна ж точка є найпростішим джерелом світла, яке може уявити собі людина. Промені світла, що виходять з неї, ніде не перетинаються і являють собою цілком упорядковану світлову картину.*

Джерело світла, розмірами якого в даних умовах можна знехтувати, називають точковим джерелом світла.

*Точкове джерело світла є фізичною моделлю джерела світла, відстань до якого в багато разів більше від розмірів джерела.*

Ще в Давній Месопотамії за 5000 років до нашої ери люди знали про прямолінійне поширення світла. Про це писав ще засновник геометрії Евклід (300 років до н.е.).

У Давньому Єгипті цю властивість світла використовували під час будівництва пірамід.

Якщо між оком і яким-небудь джерелом світла помістити непрозорий предмет, то джерело світла ми не побачимо. Пояснюється це тим, що

*світло в порожнечі або однорідному середовищі поширюється прямолінійно.*

Це один із законів геометричної оптики, що називається законом прямолінійного поширення світла.

Прямолінійність поширення світла підтверджується утворенням тіні. Якщо взяти точкове джерело світла, екран і між ними помістити непрозорий предмет, то на екрані з'явиться темне зображення його обрисів — тінь.

**Тінь** — ділянка простору, у яку не потрапляє світлова енергія від джерела світла (або інакше: ділянка простору, з якої не можна побачити джерело світла).

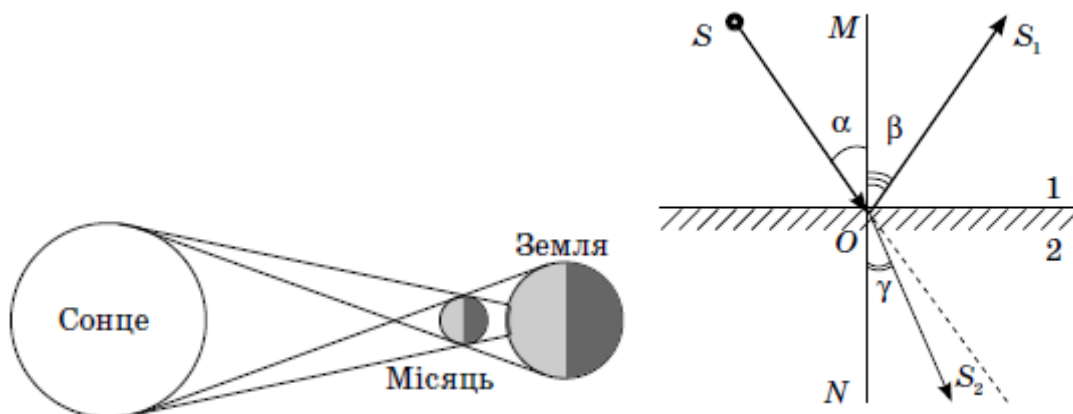
Якщо ж ми візьмемо протяжне джерело світла, то на екрані навколо тіні утворюється ще й півтінь.

**Півтінь** — ділянка простору, у яку світлова енергія від джерела світла потрапляє частково (або інакше: ділянка простору, з якої джерело світла можна побачити лише частково).

Утворенням тіні й півтіні пояснюють сонячні й місячні затемнення. Під час сонячного затемнення повна тінь від Місяця падає на

Землю. Із цього місця Землі Сонця не видно. Коли Місяць, обертаючись навколо Землі, потрапляє в її тінь, то спостерігаємо місячне затемнення.

У тих місцях Землі, куди впала тінь, буде спостерігатися повне затемнення Сонця. У місцях півтіні тільки частина Сонця буде закрита Місяцем, тобто відбудеться часткове затемнення Сонця.



Якщо направити вузький світловий пучок на поверхню води у великій посудині, то частина світла відіб'ється від поверхні води, інша частина пройде з повітря у воду.

Зобразимо розглянутий дослід графічно (див. рисунок). Лінія  $MN$  — перпендикуляр до межі розділу двох середовищ. Промінь  $S$  — падаючий промінь; промінь  $S_1$  — відбитий промінь; промінь  $S_2$  — заломлений промінь;  $\alpha$  — кут падіння;  $\beta$  — кут відбиття;  $\gamma$  — кут заломлення.

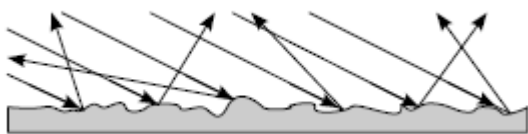
Для дзеркального відбиття світла виконуються закони відбиття світла, установлені ще в III ст. до н. е.

1. Промінь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до поверхні в точці падіння лежать в одній площині.

2. Кут відбиття дорівнює куту падіння.

Хід променів під час відбиття світла має властивість оборотності: якщо точковий об'єкт і його зображення поміняти місцями, то променева картина відбиття не зміниться; зміниться при цьому лише напрямки променів.

Світло, відбите від шорсткуватої поверхні, взагалі не утворює якогось пучка й не має певного напрямку: воно розсіюється й поширюється у всіх напрямках. Таке відбиття називається *розсіяним (дифузійним)*.

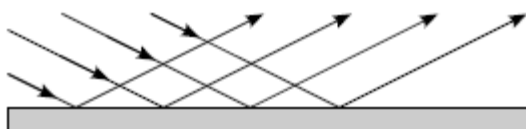


Саме так відбивається світло від більшості тіл, завдяки чому ми можемо бачити тіла навколо нас. Якщо ж поверхня гладка, то відбиття буде дзеркальним, тобто відбите світло утворить вузький пучок.

Наочною моделлю дзеркального й розсіяного відбиттів є відбиття Місяця у воді. Поверхня тихого озера відбиває світло дзеркально, тому ми бачимо в озері чітке зображення Місяця. А на поверхні моря завжди є хвилі, завдяки чому відбиття Місяця «розбивається» й перетворюється в «місячну доріжку».

Відбивну поверхню називають *плоским дзеркалом*, якщо пучок паралельних променів, що падають на неї, після відбиття залишається паралельним.

Відповідно до закону відбиття світла, кожний промінь пучка відбивається від плоского дзеркала під тим самим кутом, під яким падає.



Історики науки приписують експериментальне відкриття закону заломлення світла в його сучасному вигляді голландському вченому В. Снеллиусу (1621 р.), однак теоретичне обґрунтування цього закону було зроблено французьким фізиком і математиком Рене Декартом (1630 р.).

Використовуючи демонстраційний експеримент і креслення, формулюємо закони заломлення світла:

1) заломлений промінь лежить в одній площині з падаючим променем і перпендикуляром до межі розділу двох середовищ, поставленим у точці падіння променя;

2) відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величиною постійною для двох цих середовищ:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$$

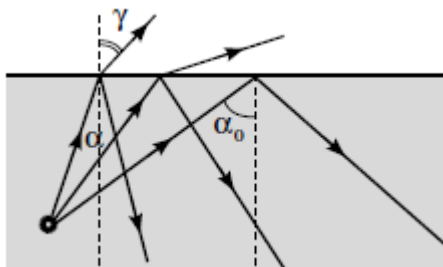
Величина  $n$  називається *відносним показником заломлення* двох даних середовищ.

Якщо промінь падає в дане середовище з вакууму, величина  $n$  називається **абсолютним показником заломлення** (або просто показником заломлення) цього середовища.

Показник заломлення повітря дуже мало відрізняється від одиниці, а показник заломлення води дорівнює приблизно 1,33.

Те із двох середовищ, у якого показник заломлення більше, називають **оптично густішим**.

Якщо падаючий промінь спрямований з оптично густішого середовища в оптично менш густе (наприклад, з води в повітря), то  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} < 1$ . Це означає, що в цьому випадку кут заломлення  $\gamma$  більше від кута падіння  $\alpha$ . У разі збільшення кута падіння інтенсивність відбитого променя збільшується, а інтенсивність заломленого променя зменшується. І за такого кута падіння  $\alpha_0$ , коли заломлений промінь повинен був би йти уздовж поверхні розділу двох середовищ, тобто за  $\gamma = 90^\circ$ , заломлений промінь повністю зникає.



Цей кут падіння  $\alpha_0$  називається *граничним кутом повного відбиття*, адже якщо кут падіння дорівнює цьому куту або є більшим за нього, промінь світла повністю відбивається від межі розділу двох середовищ. Це явище називається *повним відбиттям*:

*явище відбиття світла від оптично менш густого середовища, за якого заломлення відсутнє, а інтенсивність відбитого світла практично дорівнює інтенсивності падаючого.*

Явище повного відбиття використовують, наприклад, у світловодах під час передання світлових сигналів по тонких скляних нитках («волоконна оптика»). За рахунок багаторазового повного відбиття світло може бути напрямлене будь-яким (прямим або вигнутим) шляхом.

Волоконно-оптичні пристрої використовують у медицині *ендоскопи* — зонди, що вводять у внутрішні органи для безпосереднього візуального спостереження.

У цей час волоконна оптика витісняє металеві провідники в системах передавання інформації.

Повне відбиття використовують у призматичних біноклях, перископах, дзеркальних фотоапаратах, а також у світлообертачах (катафотах), що забезпечують безпечну стоянку й рух автомобілів.

### **Контрольні питання**

1. Які існують теорії світла і що вони пояснюють?
2. Хто є засновниками цих теорій?
3. Які явища можуть відбуватись на межі двох середовищ?
4. Сформулюйте закони відбивання і заломлення світла?
5. Опишіть явище повного внутрішнього відбивання?
6. Що таке світловоди і де вони використовуються?
7. Що таке абсолютний показник заломлення?

#### **Тема 14. Квантові властивості світла. Гіпотеза М.Планка. Рівняння фотоефекту. Застосування фотоефекту. Люмінесценція.**

Дата народження квантової теорії відома точно — це 14 грудня 1900 року. Цього дня німецький фізик М. Планк виступив на засіданні Німецького фізичного товариства з доповіддю, присвяченою проблемі розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла. Запропоноване ним розв'язання проблеми стало першим кроком у створенні сучасної фізики мікросвіту.

*Тіло, що за будь-якої температури, яка не руйнує його, цілком поглинає всю енергію падаючого світла будь-якої частоти, називається **абсолютно чорним тілом**.* Експериментальні дослідження показували, що розподіл енергії у спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла має вигляд, який теоретично бути не міг.

Улітку 1900 року англійський фізик Дж. Релей дійшов висновку, що енергія, яка припадає на певний інтервал частот, має зростати пропорційно квадрату частоти:  $E_\nu \sim \nu^2 T$ . Цей результат добре узгоджувався з експериментальними даними в галузі малих частот, але зовсім не відповідав їм за великих частот. Крім того, це означало б, що енергія абсолютно чорного тіла має майже цілком зосередитися в короткохвильовій частині спектра. Тоді будь-яка кімнатна піч була б нагромаджувачем смертоносного випромінювання. Миттєвого погляду у її відчинені дверцята було б достатньо, щоб допитливий потрапив на кладовище: він опинився б під дією небезпечних для життя ультрафіолетових, рентгенівських і у-променів. Сформовану ситуацію назвали «ультрафіолетовою катастрофою».

**Гіпотеза Планка.** Восени 1900 року, зіставивши всі здобуті до цього часу результати, М. Планк зумів «угадати» формулу, що цілком відповідала експериментальній кривій. Для того, щоб вивести цю формулу, йому довелося пожертвувати класичними уявленнями та припустити, що енергія

випромінювання складається у окремих малих і неподільних частин — квантів. Причому енергія такого кванта визначалася величиною  $E = h\nu$ , де  $h$  — стала Планка. За сучасними даними  $h = 6,626 \cdot 10^{-31}$  Дж-с.

Очевидно, що окремий квант має вкрай малу енергію. Не дивно, що у великих кількостях енергії її дискретна природа непомітна, оскільки невелика зміна кількості квантів виявляється замалою.

Однак у той час не було прямих експериментальних доказів існування квантів випромінювання. У результаті ідея Планка була сприйнята більшістю фізиків як спритний фокус, що не має серйозного наукового обґрунтування.

Після відкриття Планка почала розвиватися нова, найсучасніша та глибока фізична теорія — квантова теорія. Розвиток її не закінчився й дотепер.

Експериментальним підтвердженням гіпотези Ейнштейна став дослід, поставлений учнем Планка В. Боте. Якщо металеву фольгу опромінювати короткохвильовим електромагнітним випромінюванням, то фольга сама стане джерелом вторинного випромінювання. Як же поширюється це випромінювання? У вигляді неперервних хвиль чи квантів?

Тонку металеву фольгу розміщували на однаковій відстані від двох газорозрядних лічильників Гейгера. Під час опромінювання слабким рентгенівським джерелом фольга сама ставала ще більш слабким їх джерелом. Якби рентгенівське випромінювання поширювалося у вигляді сферичних хвиль, то така хвиля досягала б обох лічильників одночасно, й позначки розташовувалися б одна навпроти одної. Однак дослід показав, що позначки не збігалися й розташовувалися безладно. Отже, вторинне випромінювання фольги має квантовий характер і фотони, випромінювані фольгою, потрапляють то в один, то в інший лічильник.

**Енергія, маса, імпульс фотона.** Отже, дослід Боте експериментально довів існування особливих частинок електромагнітного поля — фотонів. Pozнайомимося з основними властивостями фотонів.

Фотон має енергію, оскільки має енергію світло, а світло — це потік фотонів. Отже, енергія фотона дорівнює  $E = h\nu$ .

Наявність у фотона маси впливає із загального взаємозв'язку між енергією та масою в теорії відносності: .

$$E = mc^2 \Rightarrow m = \frac{E}{c^2}, \text{ але } E = h\nu, \text{ тому } m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Фотон не має маси спокою, тобто фотон існує тільки в русі.

Крім маси й енергії, фотони мають імпульс:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c^2} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Наявність імпульсу підтверджується експериментально: існуванням світлового тиску.

Отже, квант світла — не хвиля, але й не корпускула в розумінні Ньютона. Фотони — особливі мікрочастинки, енергія й імпульс яких (на відміну від звичайних матеріальних точок) виражаються через хвильові характеристики — частоту й довжину хвилі.

### ***Явище зовнішнього фотоефекту.***

Фотоефект був відкритий 1887 року Г. Герцем, а потім досліджений експериментальне російським ученим А. Г. Столетовим.

**Фотоефект** — *явище виривання електронів із твердих і рідких речовин під дією світла.*

Якщо вирвані електрони вилітають за межі речовини, фотоефект називається зовнішнім.

Проробивши низку дослідів із фотоефекту (або переглянувши кадри відеофільму), можна дійти висновку: *явище фотоефекту практично безінерційне; інтенсивність фотоефекту залежить від виду металу, величини світлового потоку та спектрального складу випромінювання.*

**Закони фотоефекту.** Закони фотоефекту були експериментально встановлені професором Московського університету А. Г. Столетовим:

- сила фотоструму насичення прямо пропорційна інтенсивності світла,

що падає на катод;

- максимальна початкова швидкість фотоелектронів не залежить від інтенсивності падаючого світла, а визначається тільки його частотою;
- для кожної речовини існує мінімальна частота світла, називана червоною межею фотоефекту, нижче за яку фотоефект неможливий.

Закони фотоефекту прості за формою, але залежність кінетичної енергії електронів від частоти має загадковий вигляд.,

### ***Пояснення фотоефекту за допомогою хвильової теорії світла.***

Встановлені дослідним шляхом закони фотоефекту не вдалося пояснити на основі електромагнітної хвильової теорії світла. З точки зору цієї теорії електромагнітна хвиля, досягши поверхні металу, спричиняє вимушені коливання електронів, відкриваючи їх від металу. Але тоді потрібний час для «розгойдання» електронів, і за малої освітленості металу має виникнути помітне запізнення між початком освітлення і моментом вильоту електронів, а фотоефект практично безінерційний.

Крім того, кінетична енергія електронів, які залишають метал, має залежати від амплітуди змушуючої сили, а отже й від напруженості електричного поля в електромагнітній хвилі.

**Квантове пояснення фотоефекту.** У 1905 році А. Ейнштейн запропонував теорію, що давала пояснення відразу всій сукупності експериментальних фактів про фотоефект. Розвивши й поглибивши ідеї Планка, Ейнштейн дійшов висновку, що світло має не тільки випромінюватися й поглинатися, а також і поширюватися у вигляді окремих порцій енергії — квантів електромагнітного поля. Ці кванти інакше називаються фотонами.

Ейнштейн вважав, що під час взаємодії з речовиною фотон поводить себе подібно до частинки та передає свою енергію не речовині в цілому й навіть не атомові, а тільки окремим електронам. Під час поглинання фотона металом його енергія  $E = h\nu$  передається вільному

електрону. Вона витрачається на звільнення електрона з металу — на роботу виходу й на надання йому кінетичної енергії. При цьому енергія фотона передається електрону в металі тільки цілком, а сам фотон перестає існувати. Рівняння Ейнштейна для фотоефекту має вигляд:

$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$ , де  $h\nu$  — енергія поглиненого фотона;  $A$  — робота виходу електрона з металу;  $\frac{mv^2}{2}$  — кінетична енергія, з якою електрон залишає поверхню металу.

Рівняння Ейнштейна можна розглядати як вираження закону збереження енергії для одиничного акту взаємодії фотона з електроном.

Воно дозволяє пояснити всі закони фотоефекту. Кінетична енергія фотона може бути виражена так:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A, \text{ а його швидкість — } v = \sqrt{\frac{2(h\nu - A)}{m}}$$

Звідси випливає, що максимальна кінетична енергія фотоелектрона, а отже, і його максимальна початкова швидкість залежать від частоти світла й не залежать від інтенсивності світла.

При рівності  $h\nu = A$  кінетична енергія й швидкість фотоелектрона дорівнюють нулю. У цьому випадку електрон ніби «випадає» з металу з нульовою швидкістю. Має місце поріг фотоефекту:

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h} \text{ або } \lambda_{\max} = \frac{hc}{A}.$$

Інтенсивність світла прямо пропорційна числу фотонів  $n_{\text{ф}}$  та енергії кожного з них  $h\nu$ . Кожний фотон поглинається повністю тільки одним електроном. Тому кількість вирваних світлом фотоелектронів, а отже, й фотострум насичення пропорційні  $n_{\text{ф}}$ , тобто інтенсивності світла (перший закон фотоефекту)

**Зовнішній фотоефект** — випускання електронів із поверхні металів під дією світла. Прилади, в основі принципу дії яких лежить явище фотоефекту,

називаються фотоелементами. У фотоелементах енергія світла керує енергією електричного струму або перетворюється на неї.

Переваги фотоелементів: безінерційність, фотострум пропорційний світловому потоку.

Недоліки фотоелементів: слабкий струм, мала чутливість до довгохвильового випромінювання, складність у виготовленні, не використовуються в колах змінного струму.

Застосування зовнішнього фотоефекту в техніці:

- а) кіно (відтворення звуку) й телебачення;
- б) фототелеграф, фототелефон;
- в) фотометрія (вимірювання сили світла, яскравості, освітленості);
- г) керування виробничими процесами.

**Внутрішній фотоефект** — зміна концентрації носіїв струму в речовині та як наслідок зміна електропровідності даної речовини під дією світла. Це явище використовується у фоторезисторах — приладах, опір яких залежить від освітленості. Крім того, сконструйовані напівпровідникові, фотоелементи, які створюють ЕРС і безпосередньо перетворюють енергію випромінювання на енергію електричного струму.

Застосування внутрішнього фотоефекту в техніці:

- а) при автоматичному керуванні електричними колами;
- б) у колах змінного струму;
- в) у фотоекспонетрах;
- г) у сонячних батареях;
- д) при оптичному запису і відтворенні звуку.

***Пояснення тиску світла з погляду електромагнітної теорії.***

Припущення про існування світлового тиску було висловлене ще Дж. Кеплером, Максвелл, виходячи з хвильової теорії, пояснив природу світлового тиску та обчислив його величину. З точки зору електромагнітної теорії це явище пояснюється так: під час падіння електромагнітної хвилі на метал під

дією електричної складової ( $\vec{E}$ ) електрони металу будуть рухатися в напрямі, протилежному векторові  $\vec{E}$ . Магнітна складова електромагнітного поля ( $\vec{B}$ ) діє на електрони, що рухаються, з силою Лоренца в напрямі, перпендикулярному до поверхні металу, тобто тисне на його поверхню. Це і є причиною світлового тиску.

### ***Пояснення тиску світла з погляду квантової теорії світла.***

Під час пояснення тиску світла з погляду квантової теорії звертаємо увагу учнів на те, що фотони, потрапляючи на поверхню тіла, або поглинаються, передаючи імпульс  $\frac{h\nu}{c}$  речовині, або відбиваються, змінюючи свій імпульс на величину  $\Delta p = -\frac{h\nu}{c} - \frac{h\nu}{c} = -2\frac{h\nu}{c}$ . Отже, тіло, яке поглинає світло, дістає імпульс сили  $+\frac{h\nu}{c}$ , а тіло, яке цілком відбиває світло, — імпульс  $+2\frac{h\nu}{c}$ . Отже, потік випромінювання під час нормального падіння на ділянку  $S$  буде тиснути на неї з силою  $F$ , яка дорівнює добуткові  $\frac{h\nu}{c}$  або  $2\frac{h\nu}{c}$  на число фотонів  $N$ , які падають на тіло за одну секунду.

Для поглинаючого тіла  $F = \frac{h\nu}{c} N$  і  $p = \frac{h\nu}{Sc} N$ .

Для відбиваючого тіла  $F = 2\frac{h\nu}{c} N$  і  $p = 2\frac{h\nu}{Sc} N$ .

**Досліди П. М. Лебедева.** Передвіщене Дж. Максвеллом існування світлового тиску було експериментально підтверджене П. М. Лебедевим, який 1900 року виміряв тиск світла на тверді тіла, використовуючи чутливі крутильні ваги. Теорія й експеримент збіглися. Досліди Лебедева — експериментальний доказ на підтвердження факту: фотони мають імпульс. Слід розповісти про видатну роль П. М. Лебедева в розвитку вітчизняної та світової науки. Його роботи мають фундаментальне значення для сучасної

науки. Використання таблиці й відеофільму допомагає пояснити схема будови й принцип дії установки, за допомогою якої П. М. Лебедєву вдалося вперше здійснити вимірювання світлового тиску спочатку на тверді тіла, а потім і на гази.

Закінчуємо урок розповіддю про виявлення тиску світла в природі, показуємо кадри, що зображують хвости комет, і даємо пояснення їхнього походження.

**Фотографія.** Процес одержання фотознімка складається з чотирьох операцій: фотозйомки, проявлення фотоплівки, її закріплення (фіксування) та фотодруку.

**Фотозйомка** — одержання дійсного зображення об'єкта у світлочутливому шарі (емульсії) фотоплівки. Фотоемульсія: желатин і дрібні зерна  $\text{AgBr}$ . Квант енергії  $h\nu$  відриває електрони від деяких іонів Броду, що захоплюються іонами Аргентуму. У зернах  $\text{AgBr}$  утворюються нейтральні атоми, кількість яких пропорційна освітленості плівки. Ці атоми створюють приховане зображення об'єкта зйомки.

Проявлення фотоплівки полягає ось у чому: проявник (гідрохінон або метон) відновлює бромисте срібло до вільного металевого срібла.

У процесі закріплення в розчині натрій тіосульфату  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  відбувається видалення з фотошару всіх світлочутливих зерен солей Аргентуму, що не встигли розкластися. Закріплення завершується промиванням плівки у воді.

Фотодрук — перенесення зображення з фотоплівки на світлочутливий фотопапір. Негативне зображення з фотоплівки проектується на фотопапір, де утворюється приховане позитивне зображення. Потім цей фотопапір із зображенням проявляють, фіксують, промивають, сушать і одержують фотографію об'єкта.

## **Люмінесценція**

Люмінесценція – особливий вид світіння речовин без підвищення температури – відома ще з глибокої старовини. Однак пройшло багато століть, перш ніж людині вдалось цілком розкрити її природу.

Наукову розробку цього питання починають В. В. Петров, Стоці, Беккерель.

Термін "люмінесценція" і класифікацію типів світіння вперше запропонував німецький фізик Відеманн. Однак його визначення було неповним.

Отже, люмінесценцією називають світіння атомів чи молекул, яке виникає в результаті електронного переходу в частинках речовини при їх переході із збудженого стану в не збуджений.

Класифікують явища люмінесценції за часом та методом збудження. За часом післясвітіння розрізняють **два типи люмінесценції – флуоресценцію** – світіння яке миттєво зникає після припинення дії джерела збудження і **фосфоресценцію**, світіння, продовжується певний проміжок часу.

В залежності від методу збудження розрізняють:

**фотолюмінесценцію** – свічення, яке виникає при поглинанні світлової енергії; **катодолюмінесценцію** – основу на свіщенні речовин при поглинанні катодних променів (електронів);

**хемілюмінесценцію** – свічення, яке виникає при протіканні хімічних реакцій.

Всі люмінесціюючі речовини мають загальну назву – люмінофори.

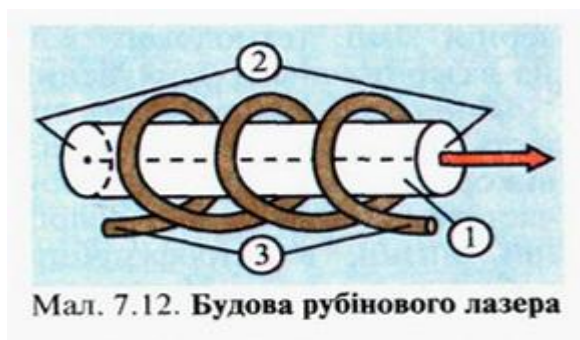
### **Квантові генератори та їх застосування.**

У 1954 р. російські вчені М. Г. Басов і О. М. Прохоров та незалежно від них у 1955 р. американський фізик Ч. Таунс створили перший квантовий підсилювач електромагнітного випромінювання в діапазоні радіохвиль так званий мазер.

У 1964 р. вони були удостоєні Нобелівської премії за фундаментальні праці в галузі квантової електроніки. У 1960 р. американський фізик Т.

Мейман створив на кристалі рубіна перший квантовий генератор оптичного діапазону, названий лазером.

Рубіновий лазер складається з кристала рубіна (оксид Алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з домішками Хрому), виготовленого у формі стрижня 1 з плоскопаралельними торцями 2 (мал. 7.12).



Лазер — абревіатура слів англійського виразу «*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*» (підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання)

За допомогою лазерів можна досягати інтенсивності короточасних імпульсів  $10^{14} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ , що перевищує інтенсивність випромінювання Сонця в  $10^{10}$  разів

Лазерне випромінювання характеризується певними властивостями, які вирізняють його серед інших джерел світла. Насамперед це вузькоспрямоване проміння з малим кутом розходження (до  $10^{-5}$  рад). Внаслідок цього можлива точна локалізація променя і його вибіркова дія на атоми, іони, молекули, яка викликає фотохімічні реакції, фотодисоціацію та інші фотоелектричні явища. Ця його властивість використовується в лазерній хімії, технологіях запису інформації на лазерних дисках, лікуванні зору тощо.

Вийняткова монохроматичність і когерентність лазерного випромінювання дає змогу використовувати його в побудові стандартів частоти, спектроскопії, голографії, волоконній оптиці, в астрофізичних дослідженнях небесних тіл, тощо. Наприклад, за допомогою лазерної локації вдалося уточнити параметри руху Місяця і Венери, швидкість обертання Меркурія, наявність атмосфер у планет.

Висока сконцентрованість енергії лазерного променя дає змогу досягти значної інтенсивності випромінювання, надвисоких температур і тисків. Це використовують у зварюванні і плавленні металів, для одержання надчистих матеріалів, у лазерній хірургії, під час термоядерного синтезу тощо.

Залежно від активної речовини лазери бувають газові, рідинні, напівпровідникові та твердотілі.

З появою лазерів започатковані такі нові розділи фізики, як нелінійна оптика і голографія.

### **Контрольні питання**

1. У чому полягає гіпотеза Планка?
2. Яка головна відмінність квантової теорії від класичної?
3. Які явища підтверджують гіпотезу квантів?
4. Які властивості має фотон?
5. Чи можна фотон зупинити?
6. Що таке фотоефект?
7. Де застосовується явище фотоефекту?
8. Що таке люмінесценція?
9. Яка природа люмінесценції?
10. Назвіть основні напрями в застосуванні лазерів?

## Література

1. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: Навчальний посібник: У 3 книгах. Книга 2. Електрика. Магнетизм. Електромагнітні коливання та хвилі. Оптика. – Суми, 2003.
2. Бушок Г.Ф. Курс фізики. У 2 книгах. Книга 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
4. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная. Физика. – М.: Физматлит, 2001.
5. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2003.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. – М: Наука, 1980.
7. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики. Том 3. Волновые процессы. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Высш. шк., 1977.
8. Дущенко В.П., Кучерук І.М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика та термодинаміка. – К.: Вища школа, 1993.
9. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М.: Наука, 1994. – Т. 1.
10. Дущенко В.П., Кучерук І.М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки, молекулярної фізики і термодинаміки. – К.: Вища школа, 1993.
11. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальна фізика. Електрика і магнетизм. К.: Вища школа, 1995.

## Зміст

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Тема 1. Основи будівельної фізики, її зв'язок з іншими науками. Методи наукового пізнання. Міжнародна система одиниць .....               | 3  |
| Тема 2. Механічний рух. Фізичне тіло і матеріальна точка. Рівноприскорений прямолінійний рух.....                                         | 8  |
| Тема 3. Закони динаміки Ньютона. Інертність та інерція. Маса. Сила. Сили в природі. Види сил в механіці.....                              | 13 |
| Тема 4. Робота та енергія. Потужність. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу.....                                                       | 21 |
| Тема 5. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії . Рівняння стану ідеального газу. Рівняння Менделєєва-Клапейрона. Ізопроцеси..... | 27 |
| Тема 6. Внутрішня енергія тіл. Два способи зміни внутрішньої енергії тіла. Робота газу. Закони термодинаміки .....                        | 32 |
| Тема 7. Електричне поле. Напруженість електричного поля. Різниця потенціалів. Напруга. Зв'язок між напругою і напруженістю.....           | 36 |
| Тема 8. Постійний електричний струм. Умови його виникнення та існування. Одиниці їх вимірювання. Електричне коло .....                    | 42 |
| Тема 9. Електрична і магнітна взаємодії. Магнітне поле. Сила Ампера. Сила Лоренца. Рух зарядів у магнітних полях.....                     | 50 |
| Тема 10. Змінний струм. ЕРС рамки при обертанні. Миттєве, амплітудне та діюче значення ЕРС, сили струму, напруги .....                    | 57 |
| Тема 11. Коливальний контур. Гармонічні електромагнітні коливання. Рівняння електромагнітних гармонічних коливань.....                    | 67 |
| Тема 12. Утворення і поширення електромагнітних хвиль. Швидкість поширення, довжина і частота електромагнітної хвилі .....                | 72 |
| Тема 13. Розвиток уявлень про природу світла. Поширення світла в різних середовищах. Поглинання і розсіювання світла.....                 | 83 |
| Тема 14. Квантові властивості світла. Гіпотеза М.Планка. Рівняння фотоефекту. Застосування фотоефекту. Люмінесценція.....                 | 91 |

Фізика [Текст]: конспект лекцій для здобувачів освіти освітньо-професійного ступеня фаховий молодший бакалавр галузь знань 13 Механічна інженерія спеціальність 133 Галузеве машинобудування денної форми навчання/уклад. В.О. Люсік. – Любешів: ВСП «Любешівський ТФК Л НТУ», 2023. – 104 с.

Комп'ютерний набір і верстка :           В.О. Люсік  
Редактор:                                       В.О. Люсік

Підп. до друку \_\_\_\_\_2023 р. Формат А4.

Папір офіс. Гарн. Таймс. Умов. друк. арк. 3,5

Обл. вид. арк. 3,4. Тираж 15 прим.