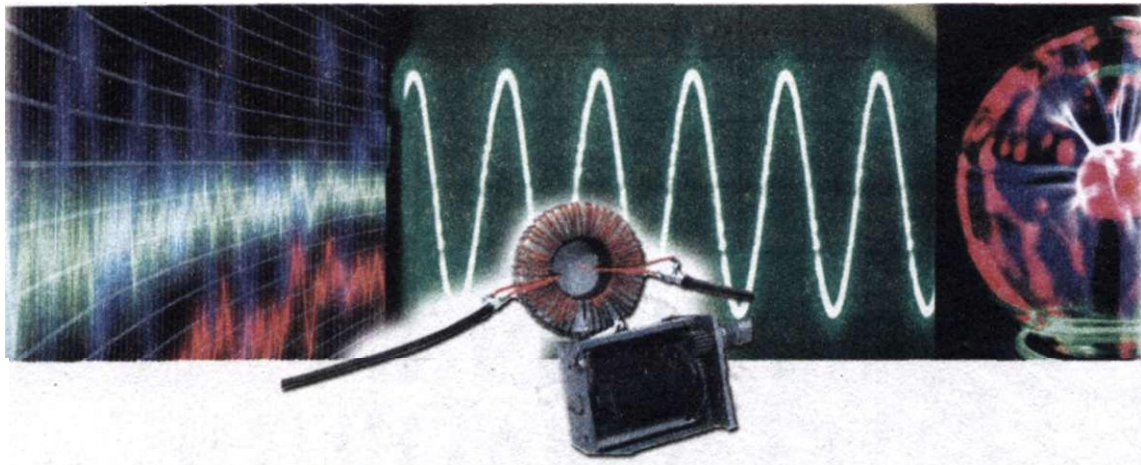


МЕХАНІЧНІ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ





Розділ 3 Колювання і хвилі

- Колювальний рух. Період і частота колювань
- Гармонічні колювання
- Математичний маятник.
Період колювань математичного маятника
- Вільні колювання. Вимушені колювання.
Резонанс
- Поширення механічних колювань у пружному середовищі. Поперечні та поздовжні хвилі.
Довжина хвилі
- Колювальний контур. Виникнення електромагнітних колювань у колювальному контурі
- Гармонічні електромагнітні колювання.
Частота власних колювань контуру
- Затухаючі та вимушені електромагнітні колювання. Резонанс
- Електромагнітне поле. Електромагнітні хвилі
- Швидкість поширення, довжина, частота електромагнітної хвилі.
Шкала електромагнітних хвиль
- Властивості електромагнітних хвиль та їх застосування

§ 20. КОЛИВАЛЬНИЙ РУХ. ПЕРІОД І ЧАСТОТА КОЛИВАНЬ

Як вам вже відомо з попередніх класів, коливаннями або коливальними рухами називають такі види механічного руху чи зміни стану системи, які періодично повторюються в часі, наприклад, механічні коливання тіла на пружині, коливання маятників, коливання струн, вібрації фундаментів будівель, електромагнітні коливання в коливальному контурі.

За фізичною природою коливання поділяють на механічні та електромагнітні, за характером коливань — на вільні, вимушені та автоколивання. Хоча коливання досить різноманітні за своєю фізичною природою, але вони мають спільні закономірності й описуються однотипними математичними методами.

Коливання притаманні всім явищам природи. Пульсують зорі і обертаються планети Сонячної системи, у земній атмосфері та іоносфері циркулюють потоки заряджених і нейтральних частинок, вітри збуджують коливання і хвилі на поверхні водойм. Всередині будь-якого живого організму безперервно відбуваються процеси, які ритмічно повторюються, наприклад биття серця.

Світло — це також коливання, але електромагнітні. За допомогою електромагнітних коливань, які поширюються в просторі, можна здійснювати радіозв'язок, радіолокацію, передавати телевізійні передачі, а також лікувати деякі хвороби. Перелічити всі види коливань неможливо.

Наведені приклади механічних і електромагнітних коливань з першого погляду мають мало спільного. Проте під час їх дослідження було виявлено цікаву закономірність: різні за фізичною природою коливання описуються однаковими математичними рівняннями, що значно полегшує їх вивчення.

Пристрої, в яких можуть здійснюватися коливання, називають коливальними системами. Будь-яка коливальна система має положення рівноваги. Нерухома система обов'язково перебуває в такому положенні. Сама по собі система не може вийти з положення рівноваги; для цього необхідний вплив зовнішньої сили.

Важлива особливість коливальних рухів — їх періодичність, тобто точна або наближена повторюваність руху тіл через рівні інтервали часу.

Мінімальний інтервал часу, через який відбувається повторення руху тіла, називають періодом коливань.

Період коливань позначають літерою T . Його одиницею в СІ є одна секунда (1 с).

Кількість коливань, здійснених за одиницю часу, називають частотою коливань ν .

Одиницею частоти в СІ є один герц (1 Гц). $1 \text{ Гц} = 1 \frac{1}{\text{с}}$. Вона названа так на честь відомого німецького фізика Г. Герца. Якщо частота коливань $\nu = 1 \text{ Гц}$, то це означає, що відбувається одне коливання за секунду. Приблизно з такою частотою б'ється людське серце. Якщо $\nu = 50 \text{ Гц}$, то відбуваються 50 коливань за секунду.

Частота коливань — це величина, обернена до періоду: $\nu = \frac{1}{T}$.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають коливальним рухом?
2. Яким явищем природи притаманні коливальні рухи?
3. Що таке частота та період коливань?

§ 21. ГАРМОНІЧНІ КОЛИВАННЯ

Серед усіх різноманітних форм коливань важливе місце належить гармонічним коливанням. Гармонічні коливання — це найпростіші періодичні коливання. Більшість коливань, які трапляються на практиці, складні. З курсу математики відомо, що будь-яке складне періодичне коливання є сумою найпростіших гармонічних коливань (гармонік). Гармонічні коливання — єдиний тип коливань, форма яких не спотворюється у процесі відтворення.

Коливання, під час яких величини, що їх описують, змінюються з часом за законом синуса або косинуса, називають гармонічними.

Переконаємося в цьому за допомогою коливання кульки, яка ковзає вздовж осі Ox , під дією сили пружності пружини $F = -kx$.

Коливання кульки можна розглядати як проекцію колового руху кульки (мал. 100) на вісь Ox . Нехай A — рухомий радіус допоміжного кола, що відповідає найбільшому відхиленню кульки від положення рівноваги x_{\max} . Якщо обертати кульку по колу з такою кутовою швидкістю ω , щоб проекція її руху збігалася з рухом кульки під дією сили пружності пружини, то її миттєве положення буде визначатися рівністю

$$x = x_{\max} \cos \varphi.$$

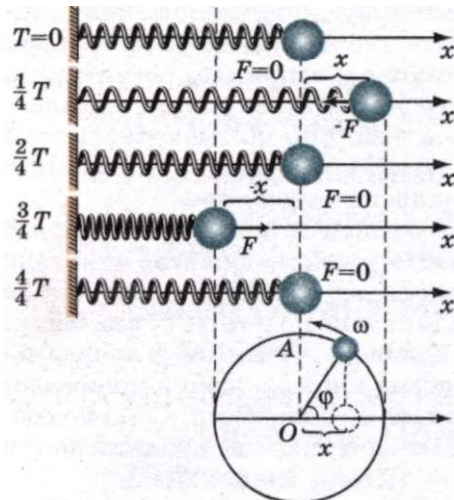
Під час обертання рухомого радіуса зі сталою кутовою швидкістю ω кут φ між радіусом і віссю Ox зростає прямо пропорційно часу:

$$\varphi = \omega_0 t.$$

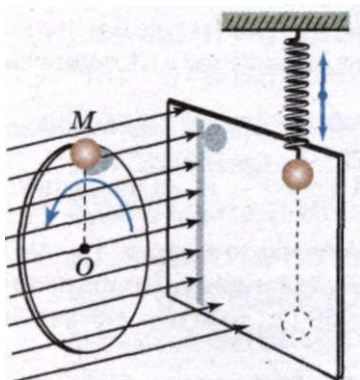
Проекція x рухомого радіуса на вісь Ox змінюватиметься за законом:

$$x = x_{\max} \cos \varphi = x_{\max} \cos \omega_0 t.$$

Аналогічно можна також порівняти коливання тіні кульки, закріпленої на



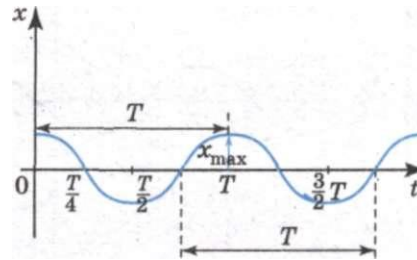
Мал. 100



Мал. 101

диску, який обертається зі сталою кутовою швидкістю ω^0 , і кульки пружинного маятника (мал. 101). Можна підібрати таку швидкість обертання диска, що рух тіні кульки на екрані повністю збігатиметься з рухом кульки пружинного маятника. Так само можна показати, що проекція рухомого радіуса OM на вертикальний діаметр змінюватиметься за законом:

$$x = x_{\max} \sin \varphi = x_{\max} \sin \omega_0 t.$$



Мал. 102

Проекції рухомого радіуса в обох описаних випадках можна розглядати як координати кульки, яка обертається по колу.

Таким чином, у зазначених випадках координата тіла, яке здійснює вільні коливання, змінюється з часом за законом синуса або косинуса. Графік залежності координати тіла від часу відповідно до $x = x_{\max} \cos \omega_0 t$ є косинусоїда, зображена на мал. 102.

Важливою характеристикою коливального руху є амплітуда.

Амплітудою гармонічних коливань називають модуль найбільшого зміщення тіла (коливальної системи) від положення рівноваги.

Амплітуда може мати різні значення залежно від того, наскільки ми зміщуємо тіло від положення рівноваги в початковий момент часу, і від того, яка швидкість надається при цьому тілу. Іншими словами, амплітуда визначається початковими умовами і дорівнює множнику при синусоїдальній чи косинусоїдальній функції, який відповідає даному коливальному процесу.

Через інтервал часу T , що дорівнює періоду T , тобто зі збільшенням аргументу косинуса на $\omega_0 T$, рух повторюється і косинус набуває попереднього значення. Проте з математики відомо, що найменший період косинуса дорівнює 2π . Отже, $\omega_0 T = 2\pi$, звідки

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

Таким чином, величина ω_0 — це кількість коливань тіла, але не за одну секунду, а за 2π секунд. Вона називається циклічною або коловою частотою.

При заданій амплітуді гармонічних коливань координата коливного тіла в будь-який момент часу однозначно визначається аргументом косинуса (або синуса) $\varphi = \omega_0 t$.

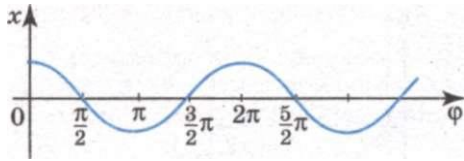
Величину φ , яка стоїть під знаком косинуса або синуса, називають фазою коливань, що описуються цими функціями.

Одиницею фази є радіан або градус.

Від фази залежить значення не лише координати, а й швидкості, й прискорення, що змінюються також за гармонічним законом. Тому можна сказати, що при заданій амплітуді фаза визначає стан коливальної системи у будь-який момент часу.

Оскільки $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, то $\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}$. Відношення $\frac{t}{T}$ показує, яка частина

періоду пройшла від початку коливань.



Мал. 103

Будь-якому значенню часу, вираженому в частинах періоду, відповідає значення фази, виражене в радіанах.

Наприклад, коли пройде час $t = \frac{T}{4}$

(чверть періоду), $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

На графіку можна зобразити залежність координати коливної точки не від часу, а від фази. На мал. 103 показано ту саму косинусоїду, що й на мал. 102, але на горизонтальній осі замість часу відкладено різні значення фази φ .

Вам вже відомо, що для гармонічних коливань координата тіла змінюється з часом відповідно до закону косинуса або синуса. Проте при цьому слід врахувати поняття фази.

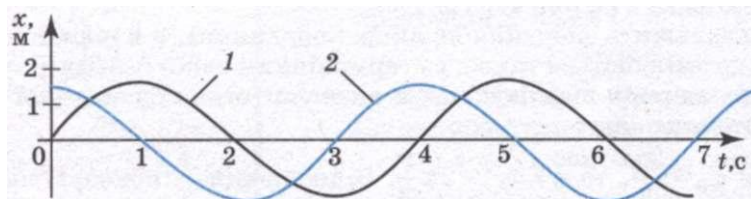
Синус відрізняється від косинуса лише зсувом аргументу на чверть періоду, тобто на $\frac{\pi}{2}$: $\cos \varphi = \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right)$. Тому для опису гармонічних коливань за-

мість формули $x = x_{\max} \cos \omega_0 t$ можна використати формулу $x = x_{\max} \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right)$.

Проте при цьому початкова фаза, тобто значення фази в момент $t = 0$, дорівнюватиме не нулю, а $\frac{\pi}{2}$. Звичайно коливання тіла на пружині (або маятнику) збуджують, виводячи його з положення рівноваги, а потім відпускаючи. У початковий момент зміщення від положення рівноваги є максимальне, тому описувати коливання зручніше формулою $x = x_{\max} \cos \omega_0 t$, використовуючи косинус.

Інша річ, коли коливання тіла, що перебуває у стані спокою, збуджують короткочасним поштовхом. Тоді в початковий момент координата дорівнює нулю, і коливання зручніше описувати формулою з використанням синуса $x = x_{\max} \sin \omega_0 t$, тому що при цьому початкова фаза дорівнює нулю.

Коливання, описані рівняннями $x = x_{\max} \sin \omega_0 t$ і $x = x_{\max} \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right)$, різняться між собою лише фазами. Різниця фаз (зсув фаз) цих коливань дорівнює $\frac{\pi}{2}$. На мал. 104 показано графіки залежності координат від часу для



Мал. 104

двох гармонічних коливань, зсунутих за фазою на $\frac{\pi}{2}$. Графік 1 відповідає коливанням, що відбуваються відповідно до закону синусоїди $x = x_{\max} \sin \omega_0 t$, а графік 2 — коливанням, що відбуваються відповідно до закону косинусоїди $x = x_{\max} \cos \omega_0 t = x_{\max} \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right)$.

Щоб визначити різницю фаз двох коливань, обидва ці коливання треба записати через одну і ту саму тригонометричну функцію (косинус або синус).

У гармонічних коливаннях координати тіла, його швидкість і прискорення також змінюються гармонічно. Проекція швидкості на вісь Ox має такий вигляд:

$$v_x = -\omega_0 x_{\max} \sin \omega_0 t = \omega_0 x_{\max} \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Швидкість під час гармонічних коливань змінюється з часом гармонічно, але коливання швидкості випереджають за фазою коливання координати на $\frac{\pi}{2}$.

У момент, коли координата дорівнює нулю (момент проходження положення рівноваги), модуль швидкості максимальний, і, навпаки, швидкість дорівнює нулю, коли координата максимальна за модулем (мал. 105, а, б). Максимальне значення швидкості за модулем, тобто амплітуду v_{\max} коливань швидкості можна записати через амплітуду зміщення у вигляді

$$v_{\max} = \omega_0 x_{\max}.$$

Проекція прискорення на вісь Ox така:

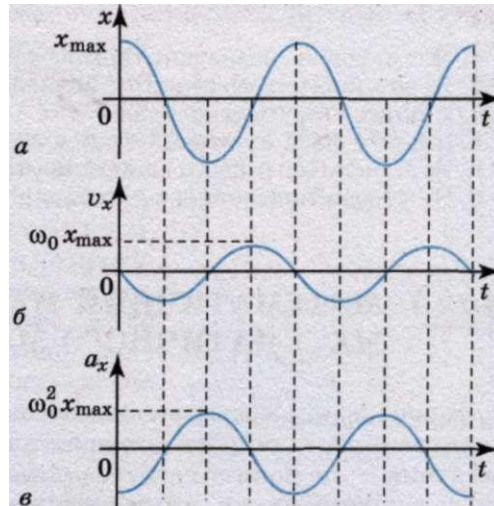
$$a_x = -\omega_0^2 x_{\max} \cos(\omega_0 t + \pi).$$

Під час гармонічних коливань прискорення змінюється гармонічно. Амплітуда прискорення

$$a_{\max} = \omega_0^2 x_{\max}.$$

За фазою коливання прискорення випереджають коливання координати на π .

Прискорення і координата за модулем набувають максимального значення одночасно, але мають протилежні знаки. У такому разі кажуть, що коливання відбуваються у протифазі (мал. 105, а, в).



Мал. 105

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які коливання називають гармонічними?
2. Як зв'язана циклічна частота коливань з періодом?
3. Що таке амплітуда коливань?
4. Що таке фаза коливань? Різниця фаз?
5. Як змінюється з часом швидкість у гармонічних коливаннях?
6. Як зв'язані прискорення й координата у гармонічних коливаннях?

§ 22. МАТЕМАТИЧНИЙ МАЯТНИК. ПЕРІОД КОЛИВАНЬ МАТЕМАТИЧНОГО МАЯТНИКА

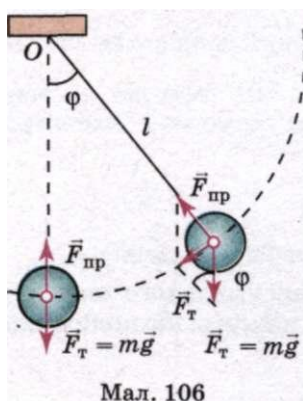
З попередніх класів ви знаєте, що математичним маятником вважають точкове тіло, підвішене до нерозтяжної і невагомої нитки. Математичний маятник — це поняття абстрактне, тому що: розміри кульки набагато менші за довжину нитки, цими розмірами можна нехтувати і розглядати кульку як матеріальну точку. Розтягом нитки також можна нехтувати, оскільки він дуже малий. Можна нехтувати і масою нитки порівняно з масою кульки.

Отже, з певним наближенням математичним маятником можна вважати кульку, підвішену на нитці (мал. 106). Рівняння руху математичного маятника має вигляд $a = -\frac{g}{l}x$. Разом з цим, розглядаючи рух проекції тіла, яке

рівномірно обертається по колу, можна записати $a = -\omega^2 x$. Прирівнюючи ці рівняння, отримаємо $\omega^2 = \frac{g}{l}$. Проте $\omega = \frac{2\pi}{T}$, тоді $\omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{g}{l}$, звідки

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

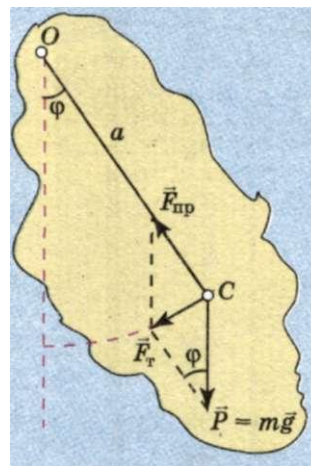
Ця формула для визначення періоду коливань математичного маятника була виведена і перевірена на дослідах голландським фізиком К. Гюйгенсом (1629—1695), тому її часто називають формулою Гюйгенса.



Період коливань математичного маятника залежить лише від прискорення вільного падіння в даному місці Землі і від довжини маятника. Період не залежить від амплітуди коливань і від маси підвішеного тягарця, що легко перевірити на дослідах з різними маятниками. Слід лише пам'ятати, що розміри тягарця мають бути малими порівняно з довжиною підвісу і що малим має бути також кут відхилення маятника від вертикалі. З наведеної залежності періоду коливань математичного маятника можна легко експериментально визначити прискорення вільного падіння. Для цього треба виміряти довжину маятника і період його коливань.

Залежність періоду колювань математичного маятника від Прискорення вільного падіння використовується для точних вимірювань прискорення вільного падіння на поверхні Землі. Річ у тому, що прискорення вільного падіння в різних точках земної поверхні на одній і тій самій географічній широті є неоднаковим і залежить, хоча й незначно, від густини порід, з яких складаються верхні шари земної кори.

Усяке тіло, що має вісь обертання, яка не проходить через центр мас, здатне здійснювати колювання. Такі тіла називають фізичними маятниками. Нехай ми маємо тіло довільної форми, закріплене на осі обертання O (мал. 107). Центр мас цього тіла — точка C . Відстань від осі обертання до центра мас позначимо a . Якщо таке тіло вивести зі стану рівноваги і відпустити, то воно здійснюватиме колювання під дією рівнодійної сили тяжіння та сили пружності, що виникає в самому тілі. У будь-який момент часу рівнодійна сил напрямлена до положення рівноваги. Отже, маємо необхідні умови для виникнення колювань, як у разі колювань тягарця на пружині та математичного маятника. Формула для визначення періоду колювань фізичного маятника за аналогією з формулою для математичного маятника матиме такий вигляд:



Мал. 107

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}},$$

де m — маса фізичного маятника; g — прискорення вільного падіння; a — відстань від осі обертання до центра мас маятника.

У формулу входить величина I , що характеризує інертні властивості тіл, які обертаються. Цю величину називають моментом інерції тіла відносно осі обертання.



ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

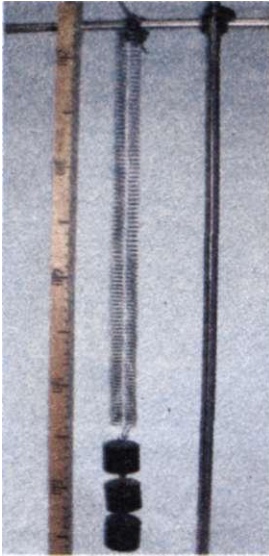
1. Яка колювальна система називається математичним маятником?
2. Від чого залежить період колювань математичного маятника?
3. Як і чому зміниться період колювання залізної кульки, підвішеної на нитці, якщо під нею помістити магніт?
4. Яка колювальна система називається фізичним маятником?

Лабораторна робота № 4

ВИГОТОВЛЕННЯ МАЯТНИКА І ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ЙОГО КОЛІВАНЬ

Мета роботи: виготовити пружинний маятник і визначити період його колювань.

Обладнання: набір тягарців з механіки НГМ-100, тримач зі спіральною пружиною, штатив для фронтальних робіт, метр демонстраційний, секундомір або годинник із секундною стрілкою.



Мал. 108

Хід роботи

1. Закріпити пружину з тримачем у лапці штатива і підвісити до неї тягарець масою 100 г. Поряд з тягарцем закріпити вертикально вимірювальну лінійку і позначити початкове положення тягарця.

2. Підвісити до пружини ще два тягарці масою по 100 г (мал. 108) і виміряти її видовження Δx , спричинене дією сили $F = 2$ Н. За вимірним видовженням і відомою силою обчислити жорсткість пружини:

$$k = \frac{F}{\Delta x}.$$

3. Знаючи жорсткість пружини, обчислити період T пружинного маятника масою 200 і 400 г за формулою

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

4. Залишити на пружині два тягарці масою по 100 г, вивести пружинний маятник з положення рівноваги, змістивши його на 5–7 см униз, і експериментально визначити період коливань маятника. Для цього,

вимірявши інтервал часу Δt , протягом якого маятник здійснює 20 повних

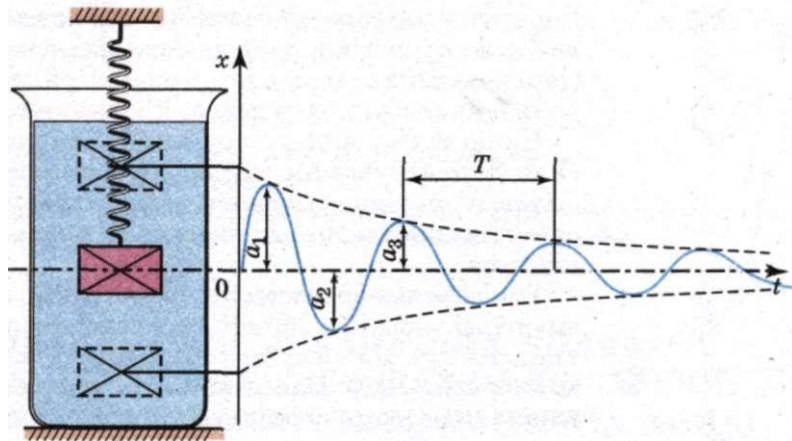
коливань, визначити період коливань за формулою $T = \frac{\Delta t}{N}$.

5. Такі самі вимірювання і обчислення виконати з маятником масою 400 г.
6. Скласти таблицю і внести у неї результати.
7. Порівняти результати і зробити висновки.

§ 23.

ВІЛЬНІ КОЛИВАННЯ. ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС

При розгляді гармонічних коливань ми нехтували втратами механічної енергії у коливальних системах, тобто розглядали ідеальні випадки. Проте, в реальних системах втрати механічної енергії завжди існують. Вони викликані наявністю тертя, опору середовища, утворенням механічних хвиль тощо. Тому амплітуда коливань у реальних системах з часом зменшується, і коливання, зрештою, припиняються. Наприклад, з часом припиняються коливання тягарця на пружині чи гойдалці, якщо їх час від часу не підштовхувати. Якщо в коливальній системі тіло вивести зі стану рівноваги і відпустити, то воно здійснюватиме так звані вільні коливання, які завжди є затухаючими. У розглянутих випадках вільних коливань тіла: математичного маятника, тягарця на пружині тощо припускалося, що тіло, яке коливається, не зустрічає на своєму шляху жодних перешкод. За таких ідеальних умов його гармонічні коливання можуть тривати необмежено довго. За реальних умов руху тіла, яке здійснює вільні коливання, завжди перешкоджають різні опо-



Мал. 109

ри, які сповільнюють коливання і сприяють їх затуханню. Наприклад, тертя коливного тіла по інших тілах, до яких воно дотикається внаслідок нерівності поверхонь. Затухання коливань настає також через опір повітря, води чи іншого середовища, в якому здійснюються коливання. Тертя між частинками пружного тіла (пружин, ресор), яке є джерелом відновлювальної сили пружності, також сприяє затуханню вільних коливань.

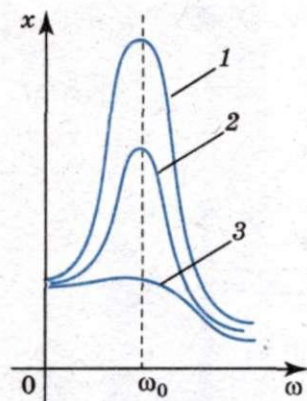
Розглянемо докладніше випадок, коли тіло коливається в середовищі, що чинить протидію його руху. На тіло з боку середовища діє сила, що залежить від швидкості тіла і напрямлена в бік, протилежний напрямку руху тіла. Прикладом може бути тягарець, підвішений на пружині в посудині з рідиною (мал. 109).

Якщо опір рідини великий порівняно з відновлювальною силою пружності, то коливальний рух тіла в такому середовищі взагалі неможливий. Тіло, виведене з положення рівноваги, прагне зайняти положення спокою, підходячи до цього положення поступово, без коливань. Якщо ж сила опору мала порівняно з силою пружності, то тіло, виведене з положення рівноваги, почне здійснювати в рідині затухаючий коливальний рух. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що амплітуда затухаючих коливань з часом зменшується. Важливо зауважити, що невеликий опір середовища мало змінює період власних коливань тіла, однак інтенсивно гасить ці коливання.

Затухання коливань у багатьох випадках — бажане і корисне явище, в інших — небажане й шкідливе. У першому випадку затухання коливань намагаються створити і підтримувати за допомогою відповідних механізмів і пристосувань. У другому випадку, навпаки, усувають затухання засобами, які зменшують вплив тертя й опору середовища, використанням змащення, заміни тертя ковзання тертям кочення за допомогою роликових підшипників тощо.

Вимушеними коливаннями вважають коливання, що відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили.

Наприклад, можна взяти в руку книжку і здійснювати нею вимушені коливання. На книжку з боку руки буде діяти зовнішня періодична сила. Однак, у таких вимушених коливаннях немає нічого особливого і цікавого.



Мал. 110

Інша річ, коли зовнішня періодична сила діє на тіло, яке може самостійно здійснювати вільні коливання (такі коливання завжди згасають). Прикладом цих коливань можуть бути дерева під дією вітру.

Якщо тіло в момент початку дії змусувальної сили було нерухомим, то спочатку амплітуда його коливань поступово зростає, а через певний час досягає максимального значення і далі вже не збільшується.

Важливе явище спостерігається у разі, коли частота змусувальної сили збігається з частотою коливань тіла, на яке ця сила діє. При цьому амплітуда коливань досягає максимального значення, яке у багато разів може перевищувати амплітуду вільних коливань. Таке явище називають резонансом. В ідеальному випадку, коли в системі немає опору,

резонанс настає, якщо частоти змусувальної сили і вільних коливань системи збігаються. Амплітуда коливань при цьому нескінченно зростає.

Пояснити явище резонансу найпростіше на основі таких міркувань. Під час резонансу створюються найсприятливіші умови для передавання енергії від зовнішнього джерела періодично змінної сили до коливальної системи, в якій можуть виникати вільні коливання. У коливальній системі, де не виникають вільні коливання, резонанс не спостерігається.

Амплітуда вимушених коливань під час резонансу залежить не лише від значення зовнішньої змусувальної сили, а й від тертя у коливальній системі. Із збільшенням зовнішньої сили, природно, зростає і амплітуда вимушених коливань. Вона набуває під час резонансу такого значення, для якого додатна робота зовнішньої сили повністю компенсує втрати енергії системою внаслідок тертя. Очевидно, що чим менше тертя в коливальній системі, тим більшою буде амплітуда вимушених коливань для однієї й тієї самої зовнішньої сили. Залежність амплітуди вимушених коливань від частоти для трьох коливальних систем з різними силами тертя і для однієї й тієї самої амплітуди зовнішньої сили показано на мал. 110. Тут крива 1 відповідає системі з мінімальною силою тертя, крива 2 — з середньою, а крива 3 — з максимальною. З цих графіків видно, що чим менше тертя в системі, тим сильніше зростає амплітуда вимушених коливань з наближенням системи до резонансу. Якщо тертя мале, то резонанс чітко виражений, а якщо велике, то нечітко. Коли частота змін змусувальної сили в системі далека від резонансної, в цьому разі амплітуда коливань мала і майже не залежить від сили опору в системі. Якщо ж тертя таке велике, що не виникають вільні коливання, то резонанс взагалі не спостерігається.

У багатьох випадках резонанс є корисним явищем. Резонанс ми використовуємо в різноманітних типах частотомірів. Особливо важливу роль він відіграє у радіотехніці. Однак трапляються випадки, коли резонанс треба не допускати, оскільки його неврахування може призводити до певних ускладнень, навіть до катастроф. Так, у Манчестері 60 осіб зруйнували міст через річку Ірвель, в якому виникли резонансні коливання під дією вітру. У 1850 р. зруйнувався Анжерський підвісний міст, коли по ньому крокував батальйон французької піхоти чисельністю 500 осіб, при цьому 226 осіб загинуло.

Наведені приклади засвідчують важливість дослідження коливань і необхідність урахування їх у техніці.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яка різниця між вільними і вимушеними коливаннями?
2. У чому полягає явище резонансу?
3. Накресліть і поясніть графіки залежності амплітуди вимушених коливань від частоти змін змушувальної сили для двох значень сили опору.

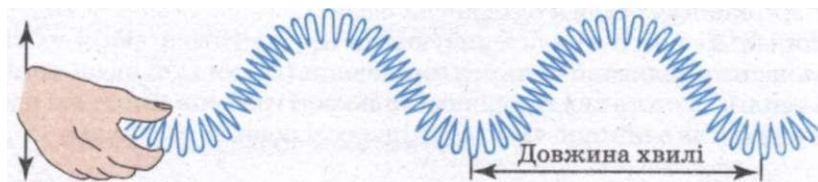
§ 24. ПОШИРЕННЯ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ У ПРУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ. ПОПЕРЕЧНІ ТА ПОЗДОВЖНІ ХВИЛІ. ДОВЖИНА ХВИЛІ

Поширення коливань у середовищі називають хвильовим процесом. Важливо зазначити, що поширення хвиль не супроводжується перенесенням частинок середовища, — вони лише коливаються навколо положень рівноваги. Проте з хвилею переноситься енергія, яка поширюється у просторі від джерела коливань.

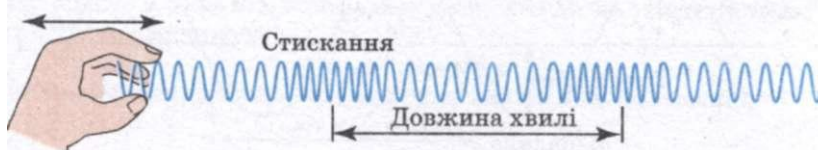
Напрямок поширення хвилі називають променем. Залежно від напрямку коливань частинок щодо напрямку поширення хвилі розрізняють хвилі поперечні й поздовжні.

Коли хвиля рухається по пружині, припустимо, зліва направо, ділянки пружини коливаються вгору і вниз, тобто в напрямі, перпендикулярному (або поперечному) до руху самої хвилі (мал. 111). Така хвиля називається поперечною.

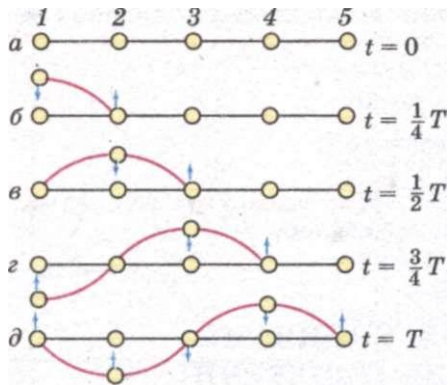
Однак не всяка хвиля є поперечною. Коливання можуть відбуватися і вздовж напрямку поширення хвилі. Тоді хвиля називається поздовжньою. У поздовжній хвилі частинки середовища коливаються в тому самому напрямі, в якому поширюється хвиля. Поздовжні хвилі легко спостерігати в м'якій розтягнутій пружині, почергово стискаючи і розтягуючи один її кінець (мал. 112). Розглянемо процес утворення поперечної хвилі (мал. 113). Першій точці надається коливальний



Мал. 111



Мал. 112



Мал. 113

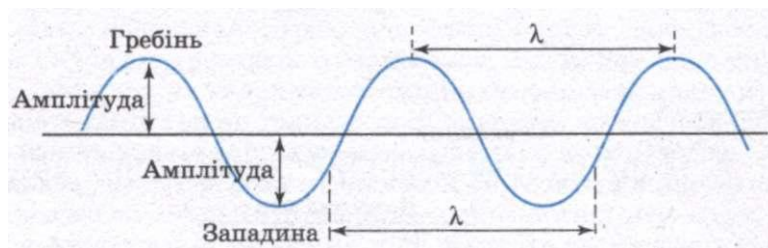
ним, а точка 3 почне рухатися вгору (мал. 113, в). Точка 1 у цей момент досягне положення рівноваги, набуде максимальної швидкості і продовжуватиме рухатися вниз. Наступні фази процесу за один період ілюструє мал. 113, г, д. Якщо енергія коливань не зменшуватиметься, то й коливання поширюватимуться далі.

У разі поширення поздовжньої хвилі точки пружного середовища також здійснюють коливання щодо своїх положень рівноваги, але при цьому коливання їх відбуваються у тому самому напрямку, в якому поширюється хвиля, тому під час поширення поздовжньої хвилі спостерігаються згущення й розрідження частинок середовища, в якому хвиля поширюється.

На мал. 114 показані основні параметри, якими характеризують періодичну синусоїдальну хвилю. Вищі точки хвильового руху називають гребенями, а нижчі — западинами. Амплітуда — це максимальна висота гребеня чи глибина западини, виміряна відносно нульового рівня (або положення рівноваги); повний розмах коливань від гребеня до западини дорівнює подвійній амплітуді.

Відстань між двома сусідніми гребенями називають довжиною хвилі λ . Довжина хвилі дорівнює відстані між будь-якими двома послідовними однаковими за висотою точками хвилі (або відстані між найближчими точками, які коливаються в однакових фазах).

Синусоїдальні хвилі характеризуються ще частотою хвилі ν , під якою розуміють частоту коливань частинок середовища (частота коливань поплавця на поверхні хвилі). Частота хвилі дорівнює кількості гребенів хвилі, які проходять через дану точку за одиницю часу (або кількості повних коливань).



Мал. 114

рух зовнішньою періодичною силою, що має період коливань T . Усі точки середовища зв'язані між собою пружними силами. Тому коливання точки 1 спричиняє коливання точки 2, що, у свою чергу, спричиняє коливання точки 3 і т. д. — у пружному середовищі поширюватиметься хвиля. Під час коливань у середовищі, наприклад у твердому тілі, виникають пружні сили (відбувається деформація зсуву). Через чверть періоду точка 1 відхилиться на максимальну відстань від положення рівноваги і почне рухатися вниз. У цей час точка 2 починає рухатися вгору (мал. 113, б). Ще через чверть періоду зміщення точки 2 буде максималь-

Швидкістю хвилі v називають швидкість, з якою переміщається гребінь хвилі.

Швидкість хвилі слід відрізнити від швидкості частинок самого середовища. За період, протягом якого хвиля здійснює одне колювання, тобто опускається з гребеня в западину і знову піднімається на гребінь, хвиля просується на відстань λ , і її швидкість дорівнює $v = \frac{\lambda}{T}$.

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яка хвиля називається поперечною, яка поздовжньою?
2. Що називають довжиною хвилі?
3. Чи однакою є довжина хвиль однієї й тієї самої частоти в різних середовищах?

Задачі та справи

Розв'язуємо разом

1. Як зміниться період вертикальних колювань тягарця, що висить на двох однакових пружинах, якщо послідовне з'єднання пружин замінити паралельним?

Розв'язання

Період колювань тягарця на пружині $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, де k — жорсткість пружини, яка визначається відношенням сили, що зумовила видовження пружини, до цього видовження: $k = \frac{F}{x}$.

Якщо послідовно з'єднані дві однакові пружини, які розтягуються силою $F_1 = F$, то жорсткість системи $k_1 = \frac{F_1}{x_1} = \frac{F}{2x} = \frac{k}{2}$, оскільки довжина кожної з пружин збільшується на x . При паралельному з'єднанні однакових пружин сила F_2 , потрібна для збільшення довжини обох пружин на x , має бути в два рази більша від F , отже, $k_2 = \frac{F_2}{x} = \frac{2F}{x} = 2k$.

У випадку послідовного з'єднання пружин $T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_1}} = 2\pi\sqrt{\frac{2m}{k}}$, а у випадку паралельного — $T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{2k}}$.

Звідси $\frac{T_1}{T_2} = 2$. Період зменшиться у два рази.

2. Матеріальна точка масою 5 г виконує гармонічні колювання частотою 0,5 Гц. Амплітуда колювань 0,03 м. Визначте: а) швидкість точки в момент часу, коли її зміщення дорівнює 1,5 см; б) максимальну силу, яка діє на точку; в) повну енергію точки, яка здійснює колювання.

Розв'язання

А. Рівняння зміщення точки, яка здійснює колювання, має вигляд

$$x = x_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

Швидкість руху точки змінюється за гармонічним законом $v = x_{\max} \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$. Знаючи, що $\varphi = 0$, отримаємо $x = x_{\max} \sin \omega_0 t$; $v = x_{\max} \omega_0 \cos \omega_0 t$.

Щоб виразити швидкість через зміщення, потрібно виключити з цих рівнянь час. Для цього піднесемо ці рівняння до квадрата, перше рівняння поділимо на x_{\max}^2 , друге — $x_{\max}^2 \omega_0^2$ і додамо їх. Тоді отримаємо

$$\frac{x^2}{x_{\max}^2} + \frac{v^2}{x_{\max}^2 \omega_0^2} = 1 \quad \text{або} \quad \frac{x^2}{x_{\max}^2} + \frac{v^2}{4\pi^2 \nu^2 x_{\max}^2} = 1.$$

З отриманого рівняння визначимо $v = \pm 2\pi\nu \sqrt{x_{\max}^2 - x^2}$. Підставивши значення фізичних величин, одержимо $v = \pm 0,082$ м/с. Знак «+» відповідає випадку, коли точка віддаляється від положення рівноваги, знак «-» відповідає руху точки до положення рівноваги.

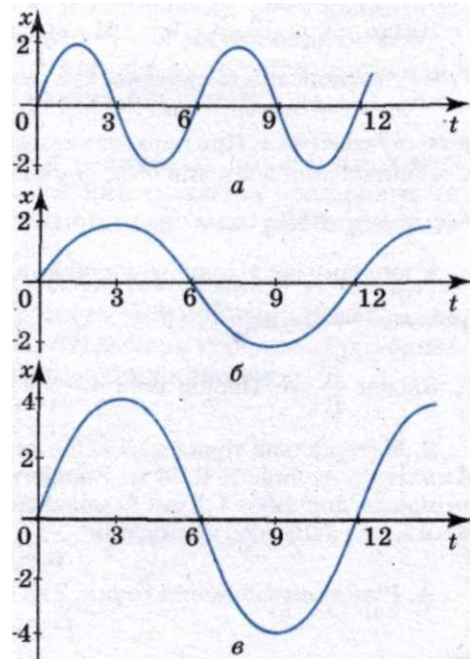
Б. Силу, яка діє на точку, визначимо за другим законом Ньютона $F = ma$. Прискорення точки, яка коливається, дорівнює $a = -x_{\max} \omega_{\max}^2 \sin(\omega_0 t + \varphi) = -4\pi^2 \nu^2 x_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi)$. Тоді силу, яка діє на точку, визначимо за формулою $F = -4\pi^2 \nu^2 x_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi)$, звідки $F_{\max} = -4\pi^2 \nu^2 x_{\max}$. Підставивши значення фізичних величин, отримаємо $F_{\max} = 1,48 \cdot 10^{-3}$ Н.

В. Повна енергія точки, що коливається, дорівнює сумі кінетичної і потенціальної енергій, які має точка у довільний момент часу. У момент часу, коли кінетична енергія досягає максимального значення, потенціальна енергія дорівнює нулю. Тому повна енергія точки дорівнює максимальній кінетичній енергії $W_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$.

Максимальна швидкість визначається за формулою $v_{\max} = 2\pi\nu x_{\max}$, тоді повна енергія буде дорівнювати $W = W_{\max} = 2\pi^2 m \nu^2 x_{\max}^2$. Підставивши значення фізичних величин, отримаємо: $W_x = 2,22 \cdot 10^{-5}$ Дж.

Рівень А

208. Є камертони на 50,126 і 440 Гц. Визначте період коливань кожного камертона.
209. Яку амплітуду, період, частоту і початкову фазу мають гармонічні коливання, задані рівнянням $x = \sin(628t + 2)$?
210. Маятник здійснює коливання з частотою 4 Гц. Визначте кількість коливань, які зробить маятник за 8 с, а також період коливань.
211. Визначте зміщення кульки за 0,05 с, яка здійснює коливання за законом $x = 5 \sin 600t$?
212. Чим відрізняються один від одного коливальні рухи, графіки яких зображено на мал. 115?
213. Маятник має довжину 9,8 м. Який період коливань цього маятника, якщо його можна вважати математичним?
214. Маятник завдовжки 150 см за 300 с робить 125 коливань. Чому дорівнює прискорення вільного падіння?
215. Який період вільних коливань пружинного маятника, якщо маса вантажу 0,8 кг, а жорсткість пружини 20 Н/м?



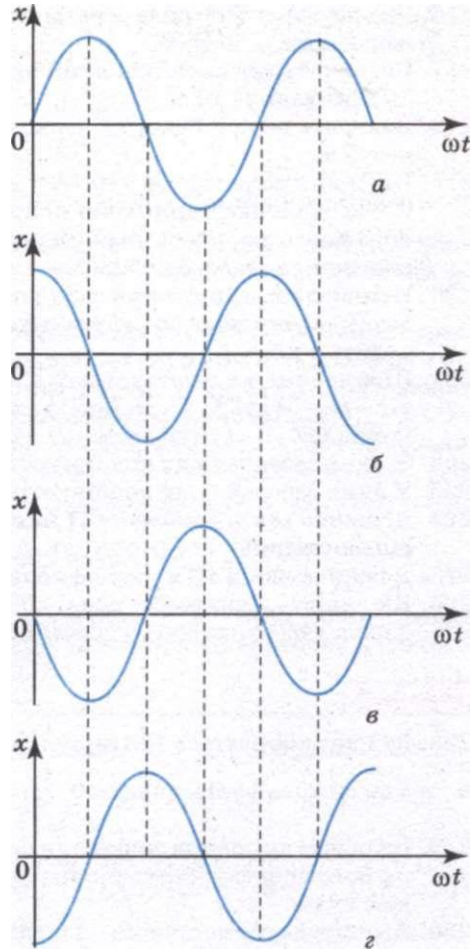
Мал. 115

216. Визначте частоту коливань вантажу масою 400 г, який підвішено до пружини жорсткістю 160 Н/м.
217. Визначте масу вантажу, який на пружині, що має жорсткість 250 Н/м, робить 20 коливань за 16 с.
218. Визначте період і частоту вільних коливань математичного маятника довжиною 5 м.
219. Пружина жорсткістю 110 Н/м під дією прикріпленого до неї вантажу масою 0,7 кг здійснює гармонічні коливання. Який період коливань цього пружинного маятника і його повна енергія, якщо максимальне зміщення вантажу від положення рівноваги 5 см?
220. Причеплена до пружини гири коливається вертикально з амплітудою 4 см. Визначте повну енергію коливань гирі, якщо коефіцієнт жорсткості пружини становить 1 кН/м.
221. Щоб допомогти водію вивести автомобіль, який застряг у багнюці, кілька чоловік «розгойдують» автомобіль, причому поштовхи, як правило, виконують за командою. Чи байдуже, через які інтервали часу подається команда?
222. У яких середовищах поширюються поздовжні хвилі? Чому?
223. У яких середовищах поширюються пружні поперечні хвилі і чому?
224. Довжина хвилі дорівнює 0,1 м, а швидкість її поширення 0,5 м/с. Визначте період коливань.
225. Довжина хвилі 10 м, період коливань 2,5 с. Яка швидкість поширення хвилі?
226. Швидкість поширення хвилі 20 м/с, її довжина 40 м. Яка частота коливань?
227. Хвиля з частотою 600 Гц поширюється зі швидкістю 320 м/с. Яка довжина хвилі?

Рівень В

228. За 1 хв виконується 180 гармонічних коливань, амплітуда яких становить 7 см, а початкова фаза дорівнює $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3}{2}\pi, 2\pi$. Запишіть рівняння таких коливань.
229. Визначте зміщення точки при гармонічному коливанні через 0,25 періоду після його початку; через 0,6 періоду після його початку. Початкова фаза дорівнює нулю.
230. Амплітуда гармонічного коливання точки становить 4 см. Яке зміщення точки відповідає фазі $0, 2\pi$, коли початкова фаза дорівнює нулю?
231. Амплітуда гармонічного коливання точки дорівнює 10 см, а частота 20 Гц. Визначте швидкість і прискорення точки в момент часу $\frac{1}{120}\text{ с}; \frac{1}{80}\text{ с}; \frac{1}{40}\text{ с}$.
232. Маленьке тіло робить коливання, що описуються рівнянням $x = 2\sin(\omega t + 0,5)$. Визначте амплітуду, період, початкову фазу коливань, а також максимальні значення швидкості і прискорення тіла.
233. Визначте за графіками (мал. 116, а—г) початкову фазу кожного коливального руху. Запишіть рівняння кожного руху, якщо $x_{\max} = 5\text{ см}; v = 10\text{ Гц}$.
234. Амплітуда коливань 10 см, а частота 0,5 Гц. Запишіть рівняння залежності $x = x(t)$ і побудуйте його графік. Визначте фазу і зміщення через 1,5 с. Через який час зміщення буде 7,1 см?
235. Частинка здійснює гармонічні коливання за законом синуса з періодом 3 с, амплітудою 2 см і початковою фазою, що дорівнює 0. Запишіть рівняння коливань і побудуйте його графік. Встановіть, у які моменти часу протягом першого коливання точка може знаходитись на відстані 1 см від положення рівноваги.
236. Годинник, довжина маятника якого дорівнює 1 м, поспішає за добу на 15 хв. Як треба змінити довжину маятника, щоб годинник показував точний час?

237. До динамометра причепили вантаж, і покажчик опустився на 2,5 см. Після цього вантаж трохи відтягнули донизу і відпустили. Утворилися коливання навколо положення рівноваги. Яка частота коливань?
238. Вантаж масою 0,2 кг, що висить на пружині, здійснює коливання з амплітудою 5 см. Визначте період коливань вантажу, якщо для видовження пружини на 1 см потрібна сила 2 Н. Запишіть рівняння цього гармонічного коливання, якщо вантаж починає коливатися з крайнього положення.
239. Щоб відвести гойдалку з людиною, яка сидить на ній, на великий кут, необхідно прикласти значну силу. Чому розгойдати гойдалку до того ж відхилення значно легше?
240. Хлопчик несе на коромислі відра з водою, період власних коливань яких 0,8 с. При якій швидкості руху вода почне особливо сильно вихлюпуватись, якщо довжина кроку хлопчика дорівнює 60 см?
241. Повз спостерігача, що стоїть на березі річки, за 6 с пройшло 4 гребені хвиль. Відстань між першим і четвертим гребнем 12 м. Визначте період коливань частинок води, швидкість поширення та довжину хвилі.
242. Рибалка помітив, що за 10 с поплавок здійснив на хвилях 20 коливань, а відстань між сусідніми гребнями хвиль 1,2 м. Яка швидкість поширення хвиль?
243. Від падіння каменя на поверхні води виникли хвилі. Як далеко від спостерігача впав камінь, якщо хвиля дійшла до нього за 5 с, відстань між сусідніми гребнями 0,5 м, і за 5 с до спостерігача дійшло 20 хвиль?
244. Хлопчик, знаходячись на березі моря, визначив, що відстань між гребнями хвиль 12 м. Крім того, він підрахував, що за 75 с повз нього пройшло 16 гребнів. Визначте швидкість поширення хвиль.
245. Визначте відстань між сусідніми точками хвилі, що знаходяться в однакових фазах, якщо швидкість хвилі 330 м/с, а частота коливань 256 Гц.
246. По поверхні води поширюється хвиля зі швидкістю 2,4 м/с при частоті коливань 2 Гц. Яка різниця фаз у точках, що лежать на одному промені і віддалені одна від одної на 90 см?
247. Коли вітер попутний, звук поширюється зі швидкістю 380 м/с, а коли зустрічний — зі швидкістю 320 м/с. Яка швидкість вітру і швидкість звуку в тиху погоду?



Мал. 116

§ 25. КОЛИВАЛЬНИЙ КОНТУР. ВИНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ У КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

Змінні електричні і магнітні поля не можуть існувати окремо одне від одного, оскільки в просторі, де існує змінне магнітне поле, збуджується електричне поле, і навпаки. Одночасні періодичні зміни зв'язаних між собою електричного і магнітного полів називають електромагнітними коливаннями. Таким чином, щоб одержати електромагнітні коливання, треба мати електричне коло, в якому енергія електричного поля могла б перетворюватися на енергію магнітного поля, і навпаки. Оскільки магнітне поле зосереджене переважно в котушках, а електричне — в конденсаторах, найпростіше коло для утворення електромагнітних коливань має складатися з конденсатора і котушки. Таке коло називають коливальним контуром. Активний опір провідників, з яких виготовлено коливальний контур, має бути малим, інакше електромагнітні коливання не виникатимуть у контурі.

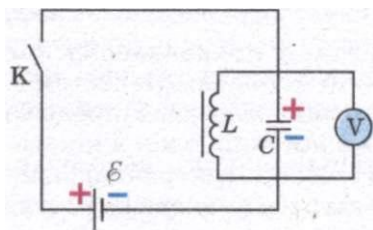
Найпростішою установкою, в якій досить просто можна створювати електромагнітні коливання, є електричне коло, до складу якого входить котушка індуктивністю L та конденсатор ємністю C (мал. 117).

Щоб можна було легко спостерігати за змінами напруги на обкладках конденсатора, до них приєднано вольтметр V . Коливання мають бути досить повільними. Тому в такій установці використовують котушку значної індуктивності і конденсатор великої ємності, вольтметр з нульовою поділкою посередині шкали.

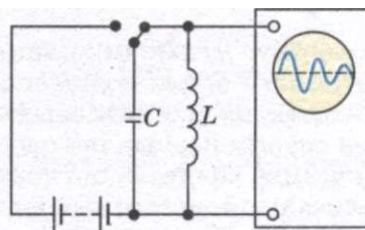
Якщо замкнути ключ, то конденсатор C зарядиться від джерела постійного струму \mathcal{E} і вольтметр покаже напругу на його обкладках. Після від'єднання джерела живлення від досліджуваного кола, вольтметр показує наявність коливань напруги, які швидко припиняються. Значення і знак напруги на обкладках конденсатора змінюються, що свідчить про періодичну перезарядку обкладок конденсатора.

Таким чином, можна зробити висновок, якщо систему вивести з стану рівноваги (зарядити конденсатор від стороннього джерела), то після від'єднання джерела в колі відбуватимуться коливання напруги U і зв'язаного з напругою простим співвідношенням заряду $q = CU$.

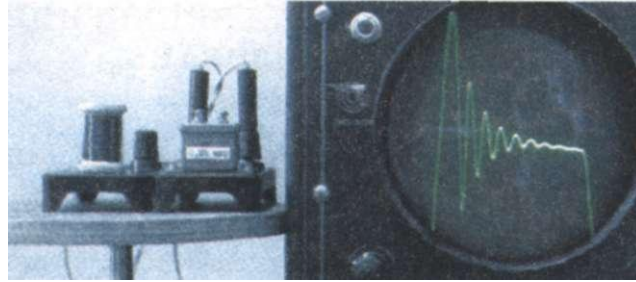
Якщо електромагнітні коливання можна одержати просто, то спостерігати їх значно складніше. Адже безпосередньо не видно ні перезарядки кон-



Мал. 117



Мал. 118



Мал. 119

денсатора, ні зростання сили струму в котушці, ні виникнення магнітного чи електричного поля. До того ж відбуваються електромагнітні коливання з дуже великою частотою, яка значно перевищує частоту механічних коливань.

Спостерігати і досліджувати електромагнітні коливання зручно за допомогою електронного осцилографа (мал. 118). Зарядимо конденсатор C від джерела постійного струму і замкнемо його на котушку індуктивності L , паралельно якій увімкнено електронний осцилограф. На екрані дістанемо криву залежності заряду (або сили струму в колі) від часу — осцилограму коливань заряду (або сили струму). Амплітуда цих коливань швидко зменшується, тобто коливання швидко затухають (мал. 119).

Розглянуті електромагнітні коливання отримали назву власних (вільних) коливань, оскільки вони здійснюються вільно, тобто без впливу зовнішньої сили. Частоту вільних коливань називають власною частотою коливального контуру. Власні коливання є затухаючими; амплітуда їх з часом зменшується. Причиною затухання є те, що енергія струму перетворюється у внутрішню енергію проводів (оскільки вони мають опір) і витрачається на випромінювання електромагнітних хвиль.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що називають коливальним контуром?
2. Намалуйте схему установки, в якій можна спостерігати електромагнітні коливання.
3. Який прилад дає можливість спостерігати електромагнітні коливання?

§ 26.

ГАРМОНІЧНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. ЧАСТОТА ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ КОНТУРУ

Розглянемо механізм виникнення коливань у коливальному контурі. Щоб отримати вільні коливання в механічній коливальній системі, необхідно надати цій системі енергію від зовнішнього джерела. У процесі коливань ця енергія періодично перетворюється з потенціальної в кінетичну, і навпаки. Щоб коливальний контур вивести зі стану електричної рівноваги, цій коливальній системі необхідно також надати певну енергію. Розглянемо послідовні стадії коливального процесу в ідеалізованому контурі, опір якого нехтовно малий $R \sim 0$. Для виникнення в контурі коливань конденсатор

попередньо заряджають, надаючи його обкладкам заряди $\pm q$. Тоді у початковий момент часу $t = 0$ (мал. 120, а) між обкладками конденсатора виникає електричне поле, енергія якого

$$W_e = \frac{q^2}{2C}.$$

Якщо конденсатор замкнути на котушку індуктивності, то він почне розряджатися й у контурі виникне зростаючий з часом струм I . Отже, енергія електричного поля конденсатора буде зменшуватися, а енергія магнітного поля котушки — зростати.

Вважаючи, що $R \approx 0$, то відповідно до закону збереження енергії, повна енергія контуру буде мати вигляд

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const},$$

тому що енергія на нагрівання провідників у такому коливальному контурі не витрачається. У момент часу $t = \frac{T}{4}$, коли конденсатор повністю розрядиться, енергія електричного поля зменшиться до нуля, а енергія магнітного поля, а отже, і сила струму досягне найбільшого значення (мал. 120, б). Починаючи з цього моменту часу сила струму у контурі буде зменшуватися, отже, почне слабшати магнітне поле котушки й індукований у ній струм, який тече (відповідно до правила Ленца) у тому ж напрямі, що й струм розрядки конденсатора. Конденсатор почне перезаряджатися, при цьому виникне електричне поле, яке намагатиметься послабити силу струму, який зрештою зменшиться до нуля, а заряд на обкладках конденсатора досягне максимуму (мал. 120, в). Далі ті ж процеси почнуть відбуватися в зворотному напрямі (мал. 120, г) і система до моменту часу $t = T$ повернеться в початковий стан (мал. 120, а). Після цього розглянутий цикл розрядки і зарядки конденсатора почне повторюватися.

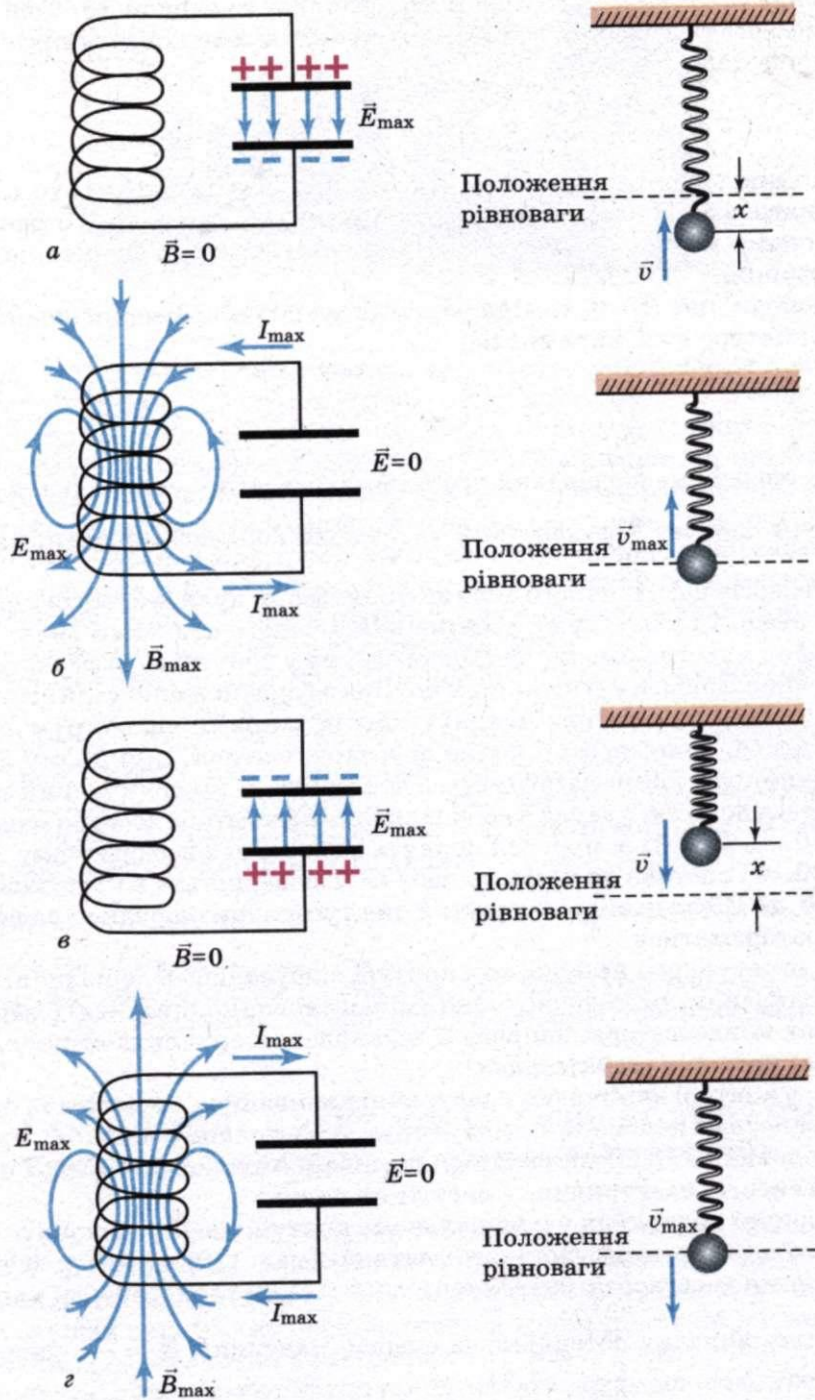
Якби втрат енергії не було, то в контурі відбувалися б періодичні незатухаючі коливання, тобто періодично змінювалися (коливалися) б заряд q на обкладках конденсатора, напруга U на конденсаторі і сила струму I , який тече через котушку індуктивності.

Отже, у контурі виникають електричні коливання з періодом T , причому протягом першої половини періоду струм тече в одному напрямі, протягом другої половини — у протилежному. Коливання супроводжуються перетвореннями енергій електричних і магнітних полів.

Електричні коливання у коливальному контурі можна порівняти з механічними коливаннями пружинного маятника (мал. 120), які супроводжуються взаємними перетвореннями потенціальної і кінетичної енергії маятника.

У даному випадку потенціальна енергія маятника $E_n = \frac{kx^2}{2}$ аналогічна

енергії електричного поля конденсатора $W_e = \frac{q^2}{2C}$, кінетична енергія маят-



Мал. 120

ників $E_k = \frac{mv^2}{2}$ — енергії магнітного поля котушки $W_m = \frac{LI^2}{2}$, а швидкість руху маятників — силі струму в контурі.

Роль інерції маятника буде зводитися до самоіндукції котушки, а роль сили тертя, яке діє на маятник — до опору контуру.

Перейдемо тепер до кількісної теорії процесів у коливальному контурі.

Наше завдання насамперед полягатиме у визначенні періоду (або частоти) вільних електричних коливань. Дійсно, виходячи з аналогії між вільними механічними і електричними коливаннями, можна відразу записати вираз для частоти і періоду вільних електричних коливань. Оскільки у формулі циклічної частоти вільних коливань тягарця на пружині $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ — величина k аналогічна $\frac{1}{C}$, m — індуктивності L , то і частота вільних електричних коливань повинна дорівнювати

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Для періоду вільних коливань у контурі можна записати

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Формула $T = 2\pi\sqrt{LC}$ називається **формулою Томсона** на честь англійського фізика, який її вперше вивів.

Отримані результати правильні. Проте вважати їх строго доведеними не можна. Треба показати, що рівняння, яке описує електричні коливання в контурі, з математичного боку не відрізняється від рівняння, яке описує вільні механічні коливання. Лише після цього можна з цілковитою певністю твердити, що механічні й електричні коливання підпорядковані одним й тим самим кількісним законам.

Як відомо, координата в механічних коливаннях, коли в початковий момент ($t = 0$) відхилення від положення рівноваги максимальне, змінюється з часом за гармонічним законом:

$$x = x_{\max} \cos \omega_0 t.$$

За таким самим законом змінюється з часом заряд конденсатора:

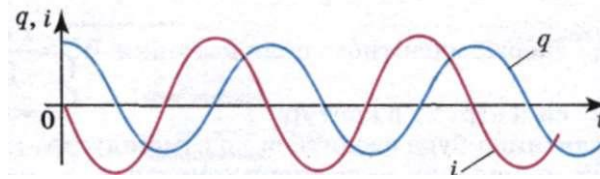
$$q = q_{\max} \cos \omega_0 t,$$

де q_{\max} — амплітуда коливань заряду.

Гармонічно коливається і сила струму:

$$i = I_{\max} \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right),$$

де $I_{\max} = q_{\max} \omega_0$ — амплітуда коливань сили струму. Коливання сили струму зміщені за фазою на $\frac{\pi}{2}$ щодо коливань заряду (мал. 121), і, подібно до коли-



Мал. 121

вань швидкості руху тягарця на пружині, випереджають за фазою на $\frac{\pi}{2}$ коливання координати.

Дійсно, внаслідок енергетичних втрат коливання будуть згасаючими. Чим більший опір R , тим більшим буде період коливань. Коливання напруги будуть описуватись за таким законом:

$$u = U_{\max} \cos \omega_0 t.$$

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Проведіть аналогію між електромагнітними і механічними коливаннями.
2. Запишіть рівняння гармонічного коливання заряду, сили струму і напруги в коливному контурі.
3. За якою формулою визначають власну частоту вільних електромагнітних коливань?

§ 27.

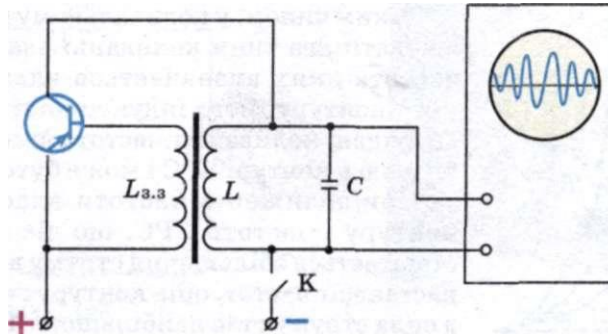
ЗАТУХАЮЧІ ТА ВИМУШЕНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС

Вільні коливання, які ми вже розглянули, є певною ідеалізацією. Реальний коливальний контур завжди чинить певний опір електричному струму. Тому частина наданої контуру енергії безперервно перетворюється у внутрішню енергію проводів, а частина енергії випромінюється в навколишній простір. Це означає, що вільні електромагнітні коливання в контурі практично завжди є згасаючими. Чим більший опір контуру, тим швидше відбувається згасання. Якщо опір контуру дуже великий, коливання можуть і не виникнути — конденсатор розрядиться, а перезарядження його не відбудеться.

З метою технічного використання електромагнітних коливань необхідно, щоб ці коливання існували тривалий час, тобто потрібно зробити їх незгасаючими. Для цього енергію, яку втрачає контур, слід увесь час поповнювати від зовнішнього джерела.

Особливо важливі і широко застосовуються автоколивання — незгасаючі коливання, які підтримуються у коливальній системі завдяки постійному зовнішньому джерелу енергії, причому властивості цих коливань визначаються самою системою.

Електричні автоколивальні системи надзвичайно широко використовуються в сучасній техніці для отримання незгасаючих електромагнітних коливань високої частоти. Принцип дії цих систем значною мірою збігається



Мал. 122

ся з принципом дії механічних автоколивальних систем. Електрична автоколивальна система містить коливальний контур, підсилювач коливань і джерело електричної енергії (батарею). 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.

Існує багато автоколивальних систем як з електронними лампами, так і з транзисторами. На мал. 122 показано спрощену схему електричної автоколивальної системи — автогенератора електромагнітних коливань на транзисторі. Коливальний контур LC увімкнено до джерела постійної ЕРС послідовно з транзистором. В емітер — базове коло транзистора — увімкнута котушка $L_{з.з.}$, індуктивно зв'язана з коливальним контуром. Цю котушку називають котушкою зворотного зв'язку. Паралельно коливальному контуру увімкнено електронний осцилограф для спостереження електромагнітних коливань. Генератор живиться від джерела постійної напруги.

Розглянуті вище коливання відбувалися з частотами, які визначаються параметрами самої коливальної системи. Щоб у реальній коливальній системі отримати незатухаючі коливання, треба компенсувати втрати енергії.

Коливання, що виникають під дією зовнішньої ЕРС, яка періодично змінюється, називають **вимушеними електромагнітними коливаннями**.

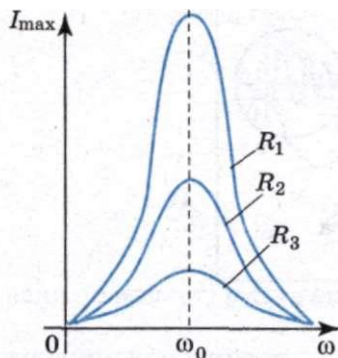
Для того, щоб у коливальному контурі виникали вимушені коливання, треба до контуру підвести зовнішню ЕРС, яка періодично змінюється за гармонічним законом:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} \cos \omega_0 t.$$

Якщо в якому-небудь коливальному контурі весь час діє генератор змінного струму, то ЕРС генератора збуджуватиме в цьому контурі змінний електричний струм з частотою коливання ЕРС генератора.

Частота цих вимушених коливань взагалі не збігається з частотою власних (вільних) коливань контуру.

Якщо ця зовнішня змінна ЕРС має постійну амплітуду, то і вимушені коливання в контурі відбуватимуться з постійною амплітудою, тобто будуть незатухаючими.



Мал. 123

Таким чином, у коливальному контурі можуть існувати два типи коливань: власні коливання, частота яких визначається властивостями самого контуру, його індуктивністю і ємністю, та вимушені коливання, частота яких визначається діючою в контурі ЕРС і може бути довільною.

При зближенні частоти власних коливань контуру і частоти ЕРС, що діє в контурі, спостерігається збільшення струму в контурі, а коли настає збіг частот, опір контуру стає найменшим, а сила струму стає найбільшою. Такий випадок є особливо важливим, він називається резонансом.

Явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, коли частота їх наближається до частоти власних коливань системи, називається резонансом:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Залежність амплітуди сили струму від частоти для різних опорів показано на мал. 123. Одночасно із зростанням сили струму під час резонансу різко зростають напруги на конденсаторі і котушці індуктивності, які при малому активному опорі у багато разів перевищують зовнішню напругу.



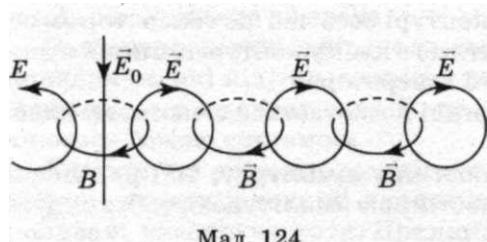
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. За яких умов в електричному колі виникають вимушені електричні коливання?
2. Що таке автоколивання?
3. За яких умов виникає електричний резонанс?
4. У чому відмінність автоколивань від вимушених коливань і вільних?

§ 28.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

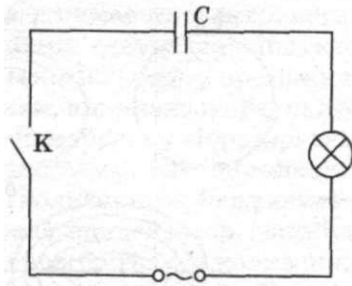
У 60-х роках XIX ст. Дж. Максвелл розробив теорію електромагнітного поля, за якою змінне електричне поле породжує змінне магнітне. Ці поля мають вихровий характер: силові лінії поля, яке породжує, концентрично охоплені силовими лініями поля, що породжується.



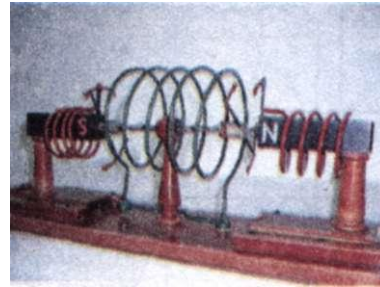
Мал. 124

Внаслідок цього утворюється система «переплетених» між собою електричних і магнітних полів. Деяке уявлення про характер змінного електромагнітного поля може дати мал. 124, який є ніби миттєвим знімком цього поля.

Пряма лінія \vec{E}_0 відображає первинне змінне електричне поле, кола \vec{B} у горизонтальній площині — це вторинні



Мал. 125



Мал. 126

змінні магнітні поля, а кола \vec{E} у вертикальній площині — вторинні змінні електричні поля.

Магнітне поле виникає навколо провідників, по яких проходять струми. Силіві лінії магнітного поля завжди замкнені, звідси випливає, що електричні струми, які породжують магнітне поле, також мають бути замкненими.

Щоб переконатись у цьому, розглянемо випадок, коли в електричне коло ввімкнено конденсатор. Між обкладками конденсатора заряди перемішуватись не можуть. Це призводить до того, що лінії струму обриваються біля поверхні обкладок конденсатора, струм провідності, який проходить по провіднику, що з'єднує обкладки конденсатора, роз'єднується. Якщо напруга джерела струму змінна, то при замиканні ключа К (мал. 125) конденсатор поперемінно заряджається і розряджається, у колі проходить струм, лампочка, увімкнена в це коло, світиться. Це свідчить про те, що лінії струму замкнені.

Між обкладками конденсатора змінний електричний заряд створює змінне електричне поле, яке Максвелл назвав струмом зміщення.

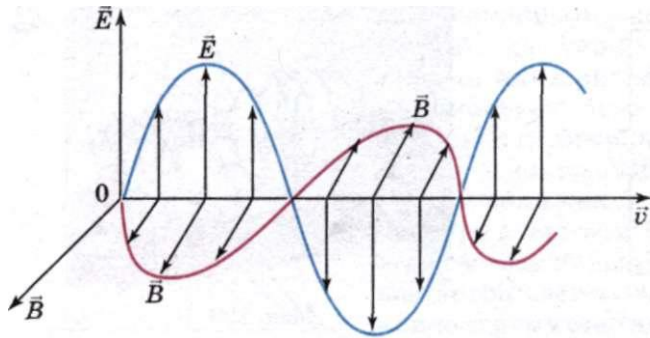
Струм зміщення — змінне електричне поле, як і струм провідності, породжує магнітне поле, силіві лінії якого завжди замкнені.

Отже, електричне і магнітне поля взаємозв'язані. Зміна одного з них породжує друге. Ці поля — прояв єдиного електромагнітного поля.

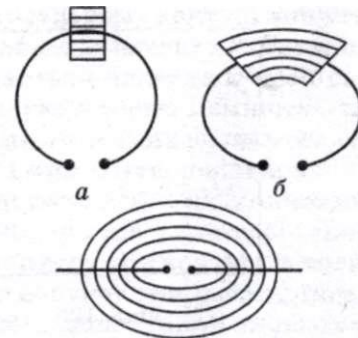
Взаємозв'язок електричного і магнітного полів обумовлює поширення електромагнітного поля в просторі. Уявімо собі, що по провіднику тече змінний електричний струм. Тоді навколо цього провідника існує змінне магнітне поле B (мал. 126). Це поле, у свою чергу, створює змінне електричне поле \vec{E} в сусідніх ділянках простору. Потім змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле, яке знову викликає появу змінного електричного поля тощо. Отже, поширюючись на все нові ділянки простору, електромагнітне поле переміщається з областей, де воно щойно існувало. Швидкість поширення електромагнітного поля дорівнює приблизно 300 000 км/с.

Таким чином, електромагнітне поле може існувати самостійно, не будучи зв'язаним із зарядами і струмами. А це є переконливим доказом матеріальності електромагнітного поля. У матеріальності електромагнітного поля переконує і той факт, що воно має певну енергію.

Поширення у просторі електромагнітного поля, в якому напруженість електричного й індукція магнітного полів змінюються періодично, називається електромагнітною хвилею.



Мал. 127



Мал. 128

Вектори напруженості \vec{E} і магнітної індукції \vec{B} в електромагнітній хвилі у будь-якій точці простору завжди взаємно перпендикулярні, оскільки лінії напруженості електричного поля охоплюють лінії індукції магнітного поля.

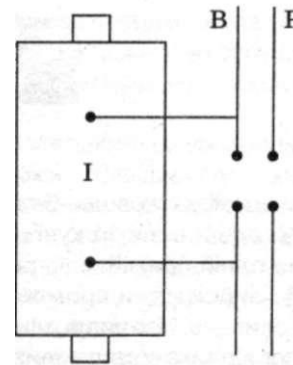
Крім того, вони перпендикулярні й до напрямку поширення хвиль. Отже, електромагнітні хвилі — поперечні. Гармонічна електромагнітна хвиля графічно зображається у вигляді двох синусоїд, які лежать у взаємно перпендикулярних площинах (мал. 127). Одна синусоїда відображає коливання вектора напруженості E електричного поля, а друга — вектора індукції B магнітного поля (обидва вектори коливаються в однаковій фазі).

Як уже зазначалось раніше, джерелом електромагнітних хвиль може бути будь-який електричний коливальний контур або провідник, по якому тече змінний електричний струм, оскільки для утворення електромагнітних хвиль необхідно створити в просторі змінне електричне поле (струм зміщення), або відповідно змінне магнітне поле. Випромінююча здатність джерела електромагнітних хвиль визначається його формою, розмірами і частотою коливань. Щоб випромінювання було помітним, необхідно збільшити об'єм простору, в якому створюється змінне електромагнітне поле. Тому для одержання електромагнітних хвиль не придатні закриті коливальні контури, оскільки в них електричне поле зосереджене між обкладками конденсатора, а магнітне — усередині котушки індуктивності.

Г. Герц у своїх дослідах, зменшуючи число витків котушки і площу пластин конденсатора, а також розсовуючи їх (мал. 128, *a*, *б*), здійснив перехід від закритого коливального контуру до відкритого коливального контуру (вібратор Герца), який складається з двох стержнів, розділених іскровим проміжком (мал. 128, *в*). Якщо в закритому коливальному контурі змінне електричне поле зосереджене усередині конденсатора (мал. 128, *a*), то у відкритому воно заповнює навколишній простір (мал. 128, *в*), що істотно підвищує інтенсивність електромагнітного випромінювання.

Колівання в такій системі підтримуються за рахунок джерела ЕРС, увімкненого до обкладок конденсатора, а іскровий проміжок застосовується для того, щоб збільшити різницю потенціалів, до якої в початковий момент часу заряджаються обкладки конденсатора.

Для отримання електромагнітних хвиль вібратор Герца B під'єднували до індуктора I (мал. 129). Коли напруга на іскровому проміжку досягала пробивного значення, виникала іскра, яка замикала обидві половини вібратора, і у вібраторі виникали вільні затухаючі коливання. При зникненні іскри контур розмикався і коливання припинялися. Потім індуктор знову заряджав конденсатор, виникала іскра й у контурі знову спостерігалися коливання і т.д. Для реєстрації електромагнітних хвиль Герц використовував інший вібратор, який назвав резонатором P , що мав таку ж частоту власних коливань, як і випромінювальний вібратор. Коли електромагнітні хвилі досягали резонатора, то в його зазорі виникала електрична іскра.



Мал. 129

Для одержання незатухаючих коливань необхідно створити автоколивальну систему, яка б забезпечувала подачу енергії з частотою, що дорівнює частоті власних коливань контуру. Тому в 20-х роках минулого сторіччя перейшли до генерування електромагнітних хвиль за допомогою електронних ламп. Лампові генератори дозволяли одержувати коливання заданої (практично будь-якої) потужності і синусоїдальної форми.

Приймання електромагнітних хвиль здійснюється за допомогою таких самих відкритих коливальних контурів — вібраторів або антен, подібних до випромінювального контуру. Під дією змінного електричного поля електромагнітної хвилі у приймальному контурі виникають електромагнітні коливання. Для їх якісного приймання необхідно, щоб приймальний коливальний контур був настроєний у резонанс з передавальним контуром, тобто щоб власна частота коливань контуру приймальної антени була близькою до частоти коливань контуру передавальної антени. Настроювання приймального контуру в резонанс здійснюється конденсатором змінної ємності або котушкою змінної індуктивності.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

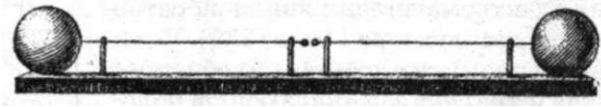
1. Що називають електромагнітним полем? Чи можуть електричні і магнітні поля існувати відокремлено одне від одного?
2. Що називають електромагнітною хвилею?
3. Як орієнтовані вектори \vec{E} і \vec{B} один відносно одного в електромагнітній хвилі?
4. Що є джерелом електромагнітних хвиль?
5. Як побудовано вібратор Герца, який принцип його дії?
6. Як здійснюється приймання електромагнітних хвиль?



Це цікаво знати

Відкриття Герца. Г. Герц народився в Гамбурзі 22 лютого 1857 року. Тут, у рідному місті, він здобув середню освіту. З жовтня 1878 року Герц почав слухати лекції **Гельмгольца і Кірхгофа**. Через два роки Герц виконав першу наукову працю і став асистентом у Гельмгольца. З 1883 року Герц працював викладачем теоретичної фізики в університеті міста Кіль. Тут Герц старанно вивчив електромагнітну теорію Максвелла.

У 1879 р. одна з європейських наукових академій оголосила премію за експериментальне доведення існування електромагнітних хвиль. На пропозицію Гельмгольца у 1886 р. Герц розпочав свої знамениті досліді. Він узяв два мідні



Мал. 130

стержні завтовшки 5 мм, на їх кінці насадив по одній маленькій (діаметром 3 см) і по одній великій кулі (діаметром 30 см). Ці стержні Герц закріпив горизонтально на одній прямій лінії, розмістивши маленькі кулі поблизу одна від одної, на відстані 7 мм (іскровий проміжок). Такий апарат Герц назвав **вібратором**, тобто джерелом коливань, або випромінювачем електромагнітних хвиль (мал. 130). Два прямолінійних провідника з'єднувалися з однією обмоткою індукційної котушки, в якій збуджувалася змінна ЕРС. Якщо значення амплітуди ЕРС, прикладеної до вібратора, досягало визначеного значення, то в іскровому проміжку вібратора виникала іскра і в провідниках виникали коливання електричного струму з дуже малим періодом. У проміжку між маленькими кулями виникали іскри, отримані за допомогою котушки Румкорфа. Внаслідок цього в навколишнє середовище випромінювались електромагнітні хвилі. Герц так підібрав розміри частин свого апарату, що час одного коливання в колі вібратора становив одну шестидесятимільйонну частку секунди. При цьому виникали хвилі завдовжки 5 м. Але як «зловити» цю електромагнітну хвилю? Як виявити її існування?

Учитель Герца, великий фізик Гельмгольц, зробив багато цінних досліджень у галузі науки про звук. Знайомство з цими працями допомогло Герцу розв'язати й другу частину завдання.

Звук, як і світло, відбивається від поверхні, на яку він падає. Цим пояснюється, наприклад, таке явище, як луна.

Герц знав також, що кілька звукових або світлових хвиль, поширюючись в одному і тому самому напрямі, взаємодіють між собою. Від складання кількох хвиль можна одержати одну хвилю. Це явище накладання хвиль називається **інтерференцією**. Якщо у двох хвиль збігаються їх гребені, то як результат накладання виходить хвиля, ще вища за першу.

У тому разі, коли в одному напрямі поширюються дві хвилі — одна рухається вперед, а друга, відбита, рухається назад, — можуть виникнути особливого роду **стоячі хвилі**. Такі хвилі легко отримати, якщо взяти довгу мотузку, прикріпити її за один кінець, а з другого надіслати поштовх. Хвиля, що виникне на мотузці, побіжить до упору і відіб'ється від нього. Якщо посылати по мотузці такі поштовхи один за одним, то внаслідок взаємодії прямих хвиль, що ідуть до упору, і зустрічних, відбитих хвиль, виникнуть стоячі хвилі.

У так званих **вузлах** взаємодіючі хвилі ніби знищують одна одну. Навпаки, в інших місцях, що називаються **видугами** виявляється найбільший результат взаємодії прямої і відбитої хвилі.

Пригадаємо ще одне явище. Якщо взяти два однакові камертони і примусити один з них звучати, то і другий камертон, розміщений поряд, також почне звучати, ніби відгукуючись. Це явище називається **резонансом**.

Виходячи з цих явищ, Герц розраховував, що приймачем — резонатором для електричних променів — може бути шматок дротини, зігнутої по колу діаметром у 70 см. В одному місці це дротяне кільце має бути перерізане — для утворення іскрового проміжку (мал. 131).

На відстані 13 м від випромінювача хвиль Герц установив вертикальну металеву стінку для відбивання електромагнітних хвиль. Потім він увімкнув джерело струму і почав досліджувати простір між місцем коливного розряду та металевою стінкою. *Чому саме так зробив Герц?*

Він хотів виявити електромагнітну хвилю завдовжки 5 м, яка утворюється коливним розрядом від великих куль. На взятому проміжку цього цілком можна було досягти. Крім того, Герц намагався довести, що електромагнітні хвилі, як і звукові, при відбиванні взаємодіють між собою (пряма з відбитою) і при цьому виникають стоячі хвилі з вузлами і видугами. І дійсно, коли Герц переміщував свій резонатор уздовж згаданого напрямку поширення хвилі, то іскри виникали тільки в строго певних місцях резонатора. При переміщенні резонатора праворуч і ліворуч іскор вже не було помітно.

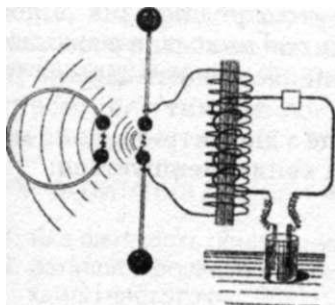
Біля вібратора Герца розміщували резонатор, який являв собою провідник, зігнутий у вигляді кола чи прямокутника, кінці якого теж утворювали іскровий проміжок. Спочатку суть дослідів Герца полягала в тому, що він спостерігав вплив іскри, що виникала у вібраторі, на резонатор. При цьому він помітив, що при появі іскри у вібраторі у резонаторі також виникає іскра.

Спочатку Герц думав, що він спостерігає випадок електромагнітної індукції, коли при зміні сили струму у вібраторі створюється струм у резонаторі. Але продовжуючи досліди, Герц помітив, що в кімнаті, де він працював, є місця, перебуваючи у яких резонатор не реагує на іскру вібратора. Тоді вчений доходить висновку, що спостережуване явище не можна пояснити електромагнітною індукцією. У кімнаті виникали стоячі електромагнітні хвилі — в одних місцях були вузли, а в інших — пучності.

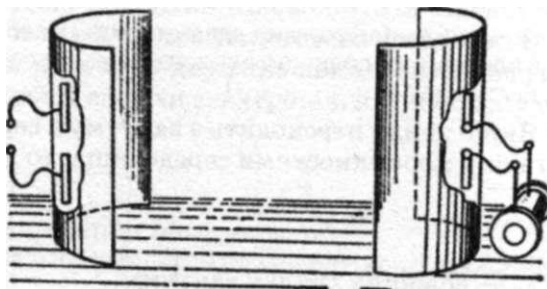
Герц, захоплений своїм відкриттям, писав: «Я думаю, що хвильова природа звуку в порожньому просторі спостерігається не так ясно, як хвильова природа цього електродинамічного процесу».

Цими надзвичайними дослідями Герц довів існування стоячих електромагнітних хвиль. Подальші експерименти Герца показали подібність властивостей світлових променів і так званих електричних променів (так спочатку Герц назвав електромагнітні хвилі). Свої досліди над електричними променями він виконував на обладнанні, подібному до того, на якому демонстрували властивості світлових променів.

У ряді дослідів Герц застосовував відбивні поверхні з металевих стінок, так звані дзеркала Герца, за допомогою яких досліджувалися властивості електромагнітних хвиль (мал. 132), при цьому електричні промені підлягали загальновідомому закону оптики (кут падіння дорівнює куту відбивання) і, відбиваючись, викликали в резонаторі іскру. Нарешті, Герц пропустив електричні промені через тригранну смоляну при-



Мал. 131



Мал. 132

зму, в цьому разі промені заломлювались. Він помітив, що електричні промені легко проходили крізь дерев'яні стіни й двері та взагалі через непровідники електрики (діелектрики). Електричні промені проходили і крізь дуже тонкі листочки металів.

Досліди Герца було відтворено у багатьох наукових лабораторіях. Таким чином було підтверджена теорія Максвелла.

§ 29. ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ, ДОВЖИНА, ЧАСТОТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ. ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

За теорією Максвелла, швидкість поширення електромагнітних хвиль — величина скінченна, вона визначається електричними і магнітними властивостями середовища, в якому поширюється електромагнітна хвиля:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}},$$

де ϵ_0 і μ_0 — електрична і магнітна сталі; ϵ і μ — відносні діелектрична і магнітна проникності середовища. Якщо електромагнітна хвиля поширюється у вакуумі, то $\epsilon = 1$, $\mu = 1$.

Обчислимо швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює швидкості світла у вакуумі: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Відстань, на яку переміщується електромагнітна хвиля за час, що дорівнює одному періоду коливання, називають **довжиною хвилі**.

Якщо v — швидкість поширення електромагнітної хвилі в однорідному середовищі, T — її період, ν — частота, а λ — довжина, то $\lambda = \nu T$, або $\lambda = \frac{v}{\nu}$.

Для вакууму $\lambda = cT$, або $\lambda = \frac{c}{\nu}$.

Оскільки швидкість хвилі залежить від ϵ і μ середовища, тоді, якщо хвиля переходить з одного середовища в інше, то змінюються v і λ , а частота коливань залишається тією самою.

Якщо хвиля переходить з вакууму в середовище з діелектричною ϵ і магнітною μ проникностями середовища, то довжина хвилі зменшується:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

де λ_0 — довжина хвилі у вакуумі.

Електромагнітні хвилі, які мають досить широкий діапазон частот (або довжин хвиль $\lambda = cT$, де c — швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі), від-

різняються одна від одної за способами їх генерації і реєстрації, а також за своїми властивостями. Тому електромагнітні хвилі поділяються на кілька видів: радіохвилі, світлові хвилі, рентгенівське і у-випромінювання (табл. 1). Слід зазначити, що межі між різними видами електромагнітних хвиль досить умовні.

Таблиця 1

Види електромагнітних хвиль

Випромінювання	Довжина хвилі, м	Частота, Гц	Джерело випромінювання
Радіохвилі	$10^3 - 10^4$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$	Коливальний контур, вібратор Герца, ламповий генератор
Світлові хвилі: інфрачервоне випромінювання	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{11} - 3,7 \cdot 10^{14}$	Лампи, нагріті тіла
видиме світло	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	Лазери
ультрафіолетове випромінювання	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	Лампи, Сонце
Рентгенівське випромінювання	$2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$	Рентгенівські трубки
Гамма-випромінювання	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$	Космічне випромінювання

Радіохвилі поділяють за довжиною хвилі на довгі (понад 10 км), середні (сотні метрів), короткі (десятки метрів). Усі вони переважно використовуються у радіозв'язку. Ультракороткі радіохвилі поділяють на метрові, дециметрові та міліметрові. Перші використовують у телебаченні, другі і треті — у радіолокації. Діапазон радіохвиль частково перекривається з інфрачервоними променями, які широко застосовують у техніці. У цьому діапазоні працюють лазери.

Ультрафіолетові промені використовують для знезаражування приміщень у лікарнях, стимуляції хімічних реакцій, утворення потрібних генних мутацій та ін. Поверхня Землі захищена від шкідливих складових ультрафіолетових променів Сонця озоновим шаром. Його збереження — це одна з важливих екологічних проблем.

Рентгенівське випромінювання отримують під час гальмування електронів, які прискорюються напругою в десятки кіловольт. На відміну від світлового проміння видимого спектра й ультрафіолетового проміння, воно має значно меншу довжину хвилі. Причому довжина хвилі рентгенівського проміння є тим меншою, чим більша енергія електронів, які бомбардують перешкоду.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яка швидкість поширення електромагнітних хвиль у повітрі?
2. Запишіть формулу, що виражає зв'язок швидкості поширення хвилі з довжиною хвилі і частотою.
3. Що дозволяє об'єднати всі види електромагнітного випромінювання в одну шкалу електромагнітних хвиль?

§ 30.

**ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ
ХВИЛЬ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ**

Електромагнітні хвилі поглинаються, відбиваються і заломлюються, як і всі інші види хвиль. Це легко спостерігати.

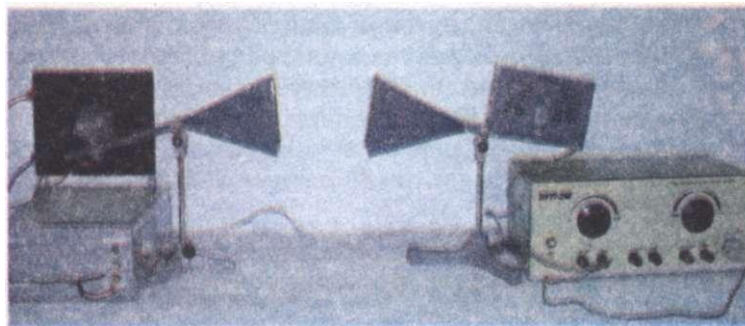
Сучасні радіотехнічні пристрої дають змогу провести наочні досліди з метою виявлення властивостей електромагнітних хвиль. При цьому найкраще користуватися хвилями сантиметрового діапазону, що їх випромінює спеціальний генератор надвисокої частоти (НВЧ).

Електромагнітні хвилі випромінює рупорна антена в напрямі осі рупора. Приймальна антена, яка має вигляд такого самого рупора, вловлює хвилі, що поширюються вздовж осі рупора. Загальний вигляд установки показано на мал. 133. Рупори розміщують один проти одного і, добившись того, щоб з гучномовця добре було чути звук, між рупорами розміщують різні діелектричні тіла. При цьому помічають зменшення гучності. Це свідчить про те, що електромагнітні хвилі поглинаються.

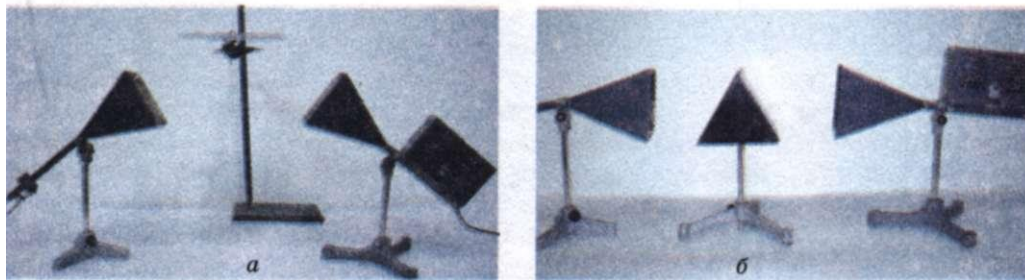
Якщо діелектрик замінити металевою пластинкою, то хвилі не досягнуть приймача внаслідок відбивання. Звуку не буде чути. Відбивання відбувається під кутом, що дорівнює куту падіння, як і для випадку світлових і механічних хвиль. Щоб переконатися в цьому, рупори розміщують під однаковими кутами до великого металевого листа (мал. 134, а). Звук зникає, якщо забрати лист або повернути його. Електромагнітні хвилі відбиваються.

Електромагнітні хвилі змінюють свій напрям (заломлюються) на межі діелектрика. Це можна виявити за допомогою великої трикутної призми з парафіну. Рупори встановлюють під кутом один до одного, як і тоді, коли демонстрували відбивання. Металевий лист замінюють призмою (мал. 134, б). Забираючи призму або повертаючи її, спостерігають зникнення звуку. Електромагнітні хвилі заломлюються.

Електромагнітні хвилі — поперечні. Це означає, що вектори E і B електромагнітного поля хвилі перпендикулярні до напрямку її поширення. Коливання напруженості електричного поля хвилі, яка виходить з рупора, відбуваються у певній площині, а коливання вектора магнітної індукції — в перпендикулярній до неї площині. Хвилі з певним напрямом коливань називаються поляризованими. На мал. 127 показано саме поляризовану



Мал. 133



Мал. 134

хвилю. Приймальний рупор з детектором приймає тільки поляризовану в певному напрямі хвилю. Це можна виявити, повернувши передавальний або приймальний рупор на 90° . Звук при цьому зникне.

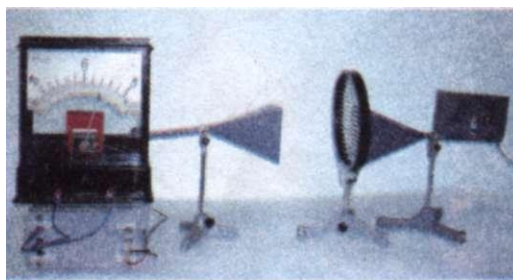
Поляризацію спостерігають, розмішуючи між генератором і приймачем решітку з паралельних металевих стержнів (мал. 135). Решітку ставлять так, щоб стержні були горизонтальні або вертикальні. В одному з положень, коли електричний вектор паралельний стержням, у них збуджуються струми, внаслідок чого решітка відбиває хвилі подібно до суцільної металевої пластини. Якщо вектор E перпендикулярний до стержнів, то струми в них не збуджуються й електромагнітна хвиля проходить.

Ми описали не всі основні властивості електромагнітних хвиль. Повніші відомості одержимо під час вивчення оптики.

Сучасне суспільство не можна уявити без телебачення. Воно міцно ввійшло в наш побут, медицину, астрономію, системи автоматизованого керування та інші галузі діяльності людини.

Схема телебачення в основному збігається зі схемою радіомовлення. Відмінність у тому, що в передавачі коливання модулюються не тільки звуковими сигналами, а й сигналами зображення. Зображення предметів перетворюються в електричні сигнали за допомогою електронно-променевої трубки, які називають іконоскопами. Електричні коливання від іконоскопа надходять до радіо-передавача і модулюють випромінювану ним радіохвилю подібно до того, як змінний струм у колі мікрофона модулює радіохвилю при передаванні звуку.

У приймачі вакуумна електронно-променева трубка — кінескоп — одержаний сигнал перетворює у видиме зображення. Електронний пучок у приймачі рухається по екрану точно синхронно з рухом електронного пучка в передавачі. Телевізійні сигнали передаються в діапазоні ультракоротких хвиль (УКХ). Ці сигнали приймаються в межах прямої видимості. Щоб передавати телепередачі на великі відстані, застосовують ретранслятори (мал. 136). За допомогою супутників зв'язку можна приймати і передавати телепрограми практично з будь-якої точки земної кулі.



Мал. 135



Мал. 136

Радіолокація — це виявлення різних предметів і вимірювання відстані до них за допомогою радіохвиль.

В основу радіолокації покладено явище відбивання УКХ від предметів. Радіолокатор (радар) — це радіопередавач і радіоприймач, які мають спільну антену, що містить перемикач з приймання на передавання. Ця антена створює гостронаправлене випромінювання — радіопромінь — короткими імпульсами тривалістю 10^{-6} с. Між двома послідовними імпульсами антена автоматично перемикається на приймання електромагнітної хвилі, відбитої від досліджуваного об'єкта.

У момент посилення радіосигналу датчик часу починає зміщувати електронний промінь. Радіосигнал надходить у антену, випромінюється у простір і одночасно створює на екрані електронно-променевої трубки відхилення електронного променя вздовж вертикалі. Радіосигнал, відбитий від предмета, приймає та сама антена, потім він проходить через приймач і на екрані електронно-променевої трубки дає вертикальне відхилення променя на деякій відстані від першого відхилення. Знаючи час руху променя по горизонталі, відстань між вертикальними відхиленнями можна проградуювати в кілометрах. Напрямок, в якому перебуває виявлений об'єкт, визначається положенням антени радіолокатора, за якого на екрані електронно-променевої трубки з'являється відбитий радіосигнал (мал. 137).



Мал. 137

Радіолокацію і її методи широко застосовують як для воєнних, так і для мирних цілей. За її допомогою розв'язують завдання повітряної і морської навігації, визначено відстань до Місяця і планет, спостерігають за метеоритами.

На відміну від радіолокації, яка досліджує тіла за допомогою відбитих ними радіохвиль, радіоастрономія досліджує небесні тіла за їх власним радіовипромінюванням. Радіоастрономічні спостереження здійснюють радіотелескопами, пристроями, що складаються з антенної системи і чутливого радіоприймача з підсилювачем. Найбільший телескоп у світі — РАТАН-600 (діаметр 600 м).

Джерела випромінювання в радіоастрономії — галактики, міжзоряне галактичне середовище, зорі, Сонце, планети, Місяць тощо.

Радіовипромінювання зір — це електромагнітне випромінювання їх у діапазоні радіохвиль.

Радіовипромінювання в основному відбувається від нейтрального водню на довжині хвилі 0,21 м, а також від йонізованого гарячого водню світлих туманностей. Крім того, галактики є джерелами нетеплового радіовипромінювання, причиною якого є гальмування електронів магнітним полем галактик. Таке випромінювання називають синхротронним.

У 1963 р. радіоастрономи відкрили нові зіркоподібні об'єкти — квазари (від англ. *quasar* — джерело радіовипромінювання), а у 1967 р. було відкрито нові космічні джерела електромагнітного імпульсного випромінювання — нейтронні зорі — пульсари.

Сучасні дослідження дали можливість не тільки виявити тисячі космічних радіоджерел (Сонце, нейтронні зорі, квазари і т. д.), а й дослідити їх спектри. Було відкрито спектральні лінії багатьох хімічних елементів неорганічних і органічних молекул, що дало можливість підняти завісу над процесами утворення зір і планетних систем. Відкриття фонового (реліктового) випромінювання було підтвердженням моделі «гарячого» Всесвіту.



ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Назвіть відомі вам властивості електромагнітних хвиль.
2. Яка схема лежить в основі телебачення?
3. Що називають радіолокацією?
4. Які радіохвилі (за довжиною і частотою) використовують у радіолокації?
5. Що досліджує радіоастрономія?

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Коливальний контур, що складається з повітряного конденсатора з двома пластинами по 200 см^2 кожна і котушки індуктивністю 10^{-6} Гн , резонує на довжині хвилі 40 м. Визначте відстань між пластинами конденсатора.

Розв'язання

Скориставшись формулою ємності плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$, визначи-

мо $d = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C}$. Невідому ємність C визначимо з формули Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$, де T

виразимо через довжину хвилі λ і швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі c : $T = \frac{\lambda}{c}$.

Враховавши попередні співвідношення, отримаємо

$$d = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C} = \frac{4\pi^2 \epsilon\epsilon_0 L S}{T^2} = \frac{4\pi^2 \epsilon\epsilon_0 L S c^2}{\lambda^2}.$$

Підставляючи значення відомих фізичних величин, маємо $d = 4 \cdot 10^{-4}$ м.

2. Різниця потенціалів на обкладках конденсатора в коливальному контурі змінюється за законом $u = 80 \cos 10^4 \pi t$, В. Ємність конденсатора дорівнює 10^{-8} Ф. Визначте період коливань контуру, індуктивність контуру, довжину хвилі, що відповідає цьому контуру.

Розв'язання

У загальному вигляді закон зміни різниці потенціалів на обкладках конденсатора можна записати так: $u = U_{\max} \cos \omega t$. Порівнюючи з умовою задачі $u = 80 \cos 10^4 \pi t$, маємо $\omega = 10^4 \pi$. Тоді $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{10^4 \pi}$; $T = 2 \cdot 10^{-4}$ с. Індуктивність визначимо з формули

$$\text{Томсона: } T = 2\pi \sqrt{LC}, \quad L = \frac{T^2}{4\pi^2 C}. \quad L = 0,1 \text{ Гн.}$$

А довжину хвилі, що відповідає цьому контуру, визначимо із співвідношення $\lambda = cT$, $\lambda = 6 \cdot 10^4$ м.

Рівень А

248. Коливальний контур містить конденсатор ємністю 800 пФ і котушку індуктивністю 2 мкГн. Який період власних коливань контуру?
249. Коливальний контур складається з лейденських банок загальною електроємністю $6 \cdot 10^{-3}$ мкФ та котушки індуктивності в 1 мкГн. Визначте частоту електромагнітних коливань у контурі.
250. У радіотехніці застосовують струми частотою від $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^9$ нГц. Обчисліть період цих струмів.
251. Заряд конденсатора коливального контуру змінюється за законом $q = 2 \sin 2 \cdot 10^3 a > t$, мкКл. Визначте частоту і період електромагнітних коливань у контурі. Яка амплітуда значення заряду конденсатора?
252. Сила струму в коливальному контурі змінюється за законом $i = 0,25 \sin 10^5 \pi t$, А. Визначте амплітудне значення сили струму та період електромагнітних коливань у контурі.
253. Напряга на конденсаторі коливального контуру змінюється за законом $u = 50 \cos 10^5 \pi t$, В. Визначте амплітудне значення сили струму та періоду коливань у контурі.
254. Як зміниться період вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, якщо індуктивність котушки зменшити у 2 рази й у стільки ж разів збільшити ємність контуру?
255. Коли автомобіль проїжджає під залізобетонним мостом, його радіоприймач реєструє слабкий сигнал. Чому?
256. Чому для зв'язку з космічними станціями використовують ультракороткохвильове (УКХ) радіовипромінювання?
257. Чому радіолокатор випромінює радіохвилі не неперервно, а у вигляді коротких імпульсів?

258. Генератор УВЧ працює на частоті 150 МГц. Яка довжина хвилі електромагнітного випромінювання?
259. На якій частоті судна передають сигнал біди, коли за міжнародною угодою радіохвиля повинна мати довжину 600 м?
260. Ємність коливального контуру радіоприймача 20 пФ, а індуктивність його котушки 350 нГн. На яку довжину хвилі настроєний радіоприймач?
261. У момент, коли відстань між Землею і Марсом була найменшою, на Марс із Землі було послано радіосигнал. Цей сигнал, відбившись від поверхні Марса, повернувся назад через 0,37 с. Яка мінімальна відстань між Землею і Марсом?

Рівень В

262. Увімкнений у коливальний контур повітряний конденсатор заповнений парафіном, діелектрична проникність якого дорівнює 2. У скільки разів змінилась частота вільних електромагнітних коливань у контурі?
263. Яка причина затухання вільних електромагнітних коливань, збуджених у коливальному контурі?
264. Як зміниться частота вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, якщо ємність конденсатора збільшити в 10 разів, а індуктивність котушки зменшити у 5 разів?
265. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 10 мГн і плоского конденсатора з обкладками площею 5 см^2 кожна, розділених парафіновим папером завтовшки 100 мкм. Яка частота вільних електромагнітних коливань у контурі? Діелектрична проникність парафінового паперу дорівнює 2,2.
266. У коливальному контурі ємність конденсатора 4 мкФ, індуктивність котушки 1,6 Гн. Конденсатор зарядили до напруги 100 В. Знайти максимальну енергію електричного поля конденсатора та амплітудне значення сили струму в контурі під час вільних електромагнітних коливань.
267. Напруга на конденсаторі коливального контуру під час вільних електромагнітних коливань змінюється за законом $u = 50 \cos 10^3 \cos \omega t$, В. Ємність конденсатора 1 мкФ. Яке амплітудне значення заряду конденсатора? Який період коливань у контурі? Яка індуктивність котушки?
268. Сила струму в коливальному контурі під час вільних електромагнітних коливань змінюється за законом $i = 0,2 \sin 10^3 \cos \omega t$, А. Індуктивність котушки 0,15 Гн. Визначте період коливань у контурі, ємність конденсатора та амплітудне значення напруги на конденсаторі.
269. У коливальному контурі індуктивність котушки становить 0,2 Гн, а амплітуда сили струму дорівнює 40 мА. Визначте енергію електричного поля конденсатора і магнітного поля котушки в той момент, коли миттєве значення сили струму в 2 рази менше, ніж амплітудне значення.
270. Чому електромережа змінного струму практично не випромінює електромагнітних хвиль (випромінювання можна вловити лише безпосередньо біля проводів мережі)?
271. Ручним настроюванням радіоприймача змінюють площу перекривання пластин конденсатора змінної ємності у його коливальному контурі. Як змінюється площа перекривання пластин при переході на приймання станції, що здійснює передачу на довших хвилях?
272. У якому діапазоні довжин хвиль працює радіопередавач, коли ємність його коливального контуру можна змінювати від 60 до 240 пФ, а індуктивність становить 50 мкГн?
273. Котушка коливального контуру радіоприймача має індуктивність 200 мкГн. Приймач настроєний на хвилю довжиною 250 м. Яка ємність конденсатора коливального контуру радіоприймача?

274. Коливальний контур радіоприймача настроєний на довжину хвилі 300 м. Яка індуктивність коливального контуру, якщо його ємність 500 пФ?
275. Космонавт із космічного корабля послав два радіосигнали з перервою 4 год. На Землі сигнали було прийнято з перервою 14401 с. З якою середньою швидкістю космонавт віддаляється від Землі?
276. Радіолокатор працює на хвилі завдовжки 20 см і випромінює імпульси тривалістю 20 нс кожний. Максимальна дальність виявлення цілі локатором 60 км. Скільки імпульсів упродовж 1 с випромінює локатор? Скільки електромагнітних коливань в одному імпульсі?

ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

Контрольні запитання

1. Чи змінюється напрям сили пружності під час невеликих вертикальних коливань пружинного маятника? Поясніть.
2. Математичний маятник здійснює гармонічні коливання в якійсь інерціальній системі відліку (ІСВ). Чи будуть ці коливання гармонічними у будь-якій іншій ІСВ?
3. Обґрунтуйте твердження: затухаючі коливання не гармонічні.
4. За рахунок яких сил — зовнішніх чи внутрішніх — відбувається коливання системи під час резонансу? Чи одних і других?
5. У які моменти першого півперіоду коливань у контурі ЕРС самоіндукції в ньому досягає максимальних значень?
6. Виходячи з аналогії механічних і електромагнітних коливань, назвіть електричну величину, еквівалентну силі пружності пружинного маятника.
7. Конденсатор електричного контуру зарядили від джерела більшої напруги. Що зміниться в коливаннях аналогічної механічної системи?
8. У яких середовищах можливе поширення електромагнітних хвиль?
9. Яка характерна для електромагнітних хвиль величина залишається незмінною при проходженні світла через середовище?



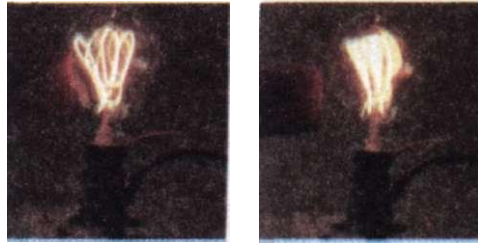
Що я знаю і вмю робити

Я знаю, якими фізичними величинами описуються коливання

1. Яку амплітуду, період, частоту і початкову фазу мають гармонічні коливання, задані рівнянням $x = \sin(628t + 2)$?
2. Яка довжина математичного маятника, період коливань якого 1 с?
3. Заряд конденсатора коливального контуру змінюється за законом $q = 2 \sin 2 \cdot 10^5 a > f$, мкКл. Визначте частоту і період електромагнітних коливань у контурі. Яка амплітуда значення заряду конденсатора?
4. Сила струму у відкритому коливальному контурі змінюється із часом за законом $i = 100 \cos 6 \cdot 10^5 f$, мА. Яка довжина хвилі його випромінювання?

Я вмю пояснювати фізичні явища і процеси

5. Як слід змінити індуктивність котушки коливального контуру для збільшення періоду вільних електромагнітних коливань?
6. У чому відмінність поширення радіохвиль на Місяці й на Землі?
7. Де зосереджена енергія електричного поля під час електромагнітних коливань у коливальному контурі?



Мал. 138

Я знаю, що таке коливальний контур і для чого він призначений

8. Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 400 пФ і котушки індуктивністю 10 мГн. Визначте амплітудне значення сили струму під час вільних електромагнітних коливань, якщо амплітудне значення напруги дорівнює 500 В.

9. Параметри двох коливальних контурів такі: $C_1 = 160$ пФ, $L_1 = 5$ мГн і $C_2 = 100$ пФ, $L_2 = 4$ мГн. На скільки слід змінити ємність C_2 , щоб частота вільних електромагнітних коливань у них стала однаковою?

Я знаю, що таке радіозв'язок і радіолокація

10. Телевізійний ретранслятор встановлено на супутнику, який рухається по коловій орбіті на висоті 36000 км над поверхнею Землі. Супутник розташований на одній вертикалі з приймальною антеною, яка, у свою чергу, розміщена поблизу антени передавача. За який інтервал часу сигнал поширюється від телецентру до телевізора?

11. Радіолокатор працює на хвилі довжиною 15 см. Він випромінює щосекунди 4000 імпульсів, кожен з яких містить 4000 електромагнітних коливань. Яка тривалість імпульсу? Яка найбільша дальність локаційної розвідки?

Я знаю, що таке електромагнітні коливання

12. Чому спіраль електричної лампи (мал. 138) здійснює коливання?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант I

1. Математичний маятник має період коливань 2ш с. Визначте його довжину.
А. 1 м. Б. 2 м. В. 5 м. Г. 9,8 м. Д. 11,2 м.
2. Під час вітру гілка дерева здійснює гармонічні коливання з періодом 2 с. Амплітуда коливань 10 см. Визначте зміщення гілки через 0,2 с після її проходження через положення рівноваги. Початок коливань збігається з положенням рівноваги.
А. 0,059 м. Б. 0,5 м. В. 1 м. Г. 2 м. Д. 1,2 м.
3. Як зміниться хід (період і частота) годинника з маятником на металевому стержні при значному підвищенні температури?
А. Збільшиться період, зменшиться частота. Б. Збільшиться період і частота. В. Зменшиться період і частота. Г. Зменшиться період, збільшиться частота. Д. Правильної відповіді немає.

4. Рівняння коливань тягарця на пружині має вигляд $x = 0,1 \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Визначте амплітуду, початкову фазу, власну частоту, період коливань.

А. 0,1 м; $\omega/2$; 1 Гц; 1 с. Б. 0,2 м; $\omega/2$; 1 Гц; 1 с. В. 0,1 м; $\omega/4$; 2ω Гц; 2 с.
Г. 0,15 м; $\omega/3$; 1 Гц; 1 с. Д. 0,1 м; $\omega/3$; 1 Гц; 1 с.

5. Визначте максимальне значення швидкості і прискорення, якщо рівняння коливань має вигляд: $x = 0,2 \cos\left(3t + \frac{\pi}{2}\right)$.

А. 0,6 м/с; 0,2 м/с². Б. 0,2 м/с; 1,8 м/с². В. 0,6 м/с; 1,8 м/с². Г. 1,8 м/с; 1,8 м/с². Д. 0,6 м/с; 2 м/с².

6. Запишіть закон зміни прискорення, якщо координата змінюється за законом $x = 1 \cos\left(10t + \frac{\pi}{4}\right)$.

А. $a = -100 \cos\left(10t + \frac{\pi}{4}\right)$. Б. $a = -10 \cos\left(10t + \frac{\pi}{4}\right)$. В. $a = -100 \cos\left(10t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Г. $a = -10 \sin\left(10t + \frac{\pi}{4}\right)$. Д. $a = \sin\left(10t + \frac{\pi}{2}\right)$.

7. Жорсткість пружини 100 Н/м, маса тягарця 1 кг. Яка повна енергія коливальної системи, якщо максимальне зміщення дорівнює 10 см?

А. 1 Дж. Б. 0,5 Дж. В. 2 Дж. Г. 1,5 Дж. Д. 0,25 Дж.

8. Як зміниться частота і період електромагнітних коливань, якщо індуктивність збільшиться у 2 рази, а ємність зменшиться у 2 рази?

А. Збільшиться у 2 рази, зменшиться у 2 рази.

Б. Збільшиться у 4 рази, збільшиться у 2 рази.

В. Залишиться незмінною, зменшиться у 2 рази.

Г. Залишаться незмінними.

Д. Збільшиться у 2 рази, збільшиться у 2 рази.

9. Сила струму в котушці індуктивності змінюється за законом $i = 0,01 \cos\left(6\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$. Визначте період коливань у цьому контурі.

А. 6ω с. Б. 1 с. В. 0,33 с. Г. 0,66 с. Д. ω с.

10. Циклічна частота коливань, які виникають у коливальному контурі, 10⁶ Гц. Визначте індуктивність котушки, якщо ємність конденсатора 1 мкФ.

А. 10⁶ Гн. Б. 1 мкГн. В. 10⁻⁵ Гн. Г. 10⁻⁴ Гн. Д. 1 Гн.

11. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А. $T = 2\pi\sqrt{LC}$. 1. Закон Ома для змінного струму.

Б. $\omega = \frac{1}{LC}$. 2. Період коливань.

В. $W = \frac{LI^2}{2}$. 3. Циклічна частота коливань.

Г. $W = \frac{q^2}{2C}$.

4. Енергія магнітного поля.

Д. $I_d = \frac{U_d}{Z}$.

5. Енергія електричного поля.

12. В один ящик поклали реостат, у другий — конденсатор, а в третій — котушку індуктивності. Виводи приєднали до зовнішніх затискачів. Як, не заглядаючи в ящик, довідатись, де знаходиться реостат? Використовуються джерела постійної та змінної напруги і лампа розжарювання.

- А. Лампа світиться лише при змінній напрузі.
 Б. Розжарення лампи однакове при постійній та змінній напрузі.
 В. Лампа світиться лише при постійній напрузі.
 Г. Лампа при постійній напрузі не світиться.

13. Миттєве значення ЕРС $\varepsilon = 100 \sin 800\pi t$, В. Чому дорівнює амплітуда, частота, період і фаза коливань, якщо $E = 50$ В?

А. $\varepsilon_{\max} = 100$ В, $\nu = 800$ Гц, $T = 1/800$ с, $\varphi = 8\pi t$.

Б. $\varepsilon_{\max} = 50$ В, $\nu = 400$ Гц, $T = 1/400$ с, $\varphi = \pi t$.

В. $\varepsilon_{\max} = 100$ В, $\nu = 400$ Гц, $T = 1/400$ с, $\varphi = \frac{\pi t}{6}$.

Г. $\varepsilon_{\max} = 50$ В, $\nu = 800$ Гц, $T = 1/800$ с, $\varphi = \frac{\pi t}{12}$.

14. Незатухаючі вільні коливання характеризуються такими фізичними величинами, як: 1) зміщення, 2) амплітуда, 3) період, 4) частота. Які з цих величин стали?

- А. 1 і 2. Б. 2, 3 і 4. В. 1, 2, 3 і 4. Г. 1 і 4. Д. 3 і 4.

15. Можна встановити режим резонансу в колі змінного струму, не змінюючи індуктивність та ємність у ньому. Для цього потрібно встановити таку частоту струму, яка задовольняє рівняння

А. $\nu = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Б. $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. В. $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L}{C}}}$. Г. $\nu = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$. Д. $\nu = \sqrt{LC}$.

16. Усім добре відомі параболічні антени радіотелескопів та станцій зв'язку із супутниками. Ці великі споруди досягають ста метрів у діаметрі. А яку властивість електромагнітних хвиль покладено в основу фокусування радіохвиль такою антеною?

- А. Поглинання в діелектрику.
 Б. Відбивання від провідника.
 В. Заломлення на межі двох середовищ.
 Г. Поляризація при проходженні крізь речовину.

17. Антена (диполь), що випромінює електромагнітні хвилі, являє собою вертикально натягнутий дріт. Як мають бути розміщені приймальні антени, щоб найкраще приймати сигнал, який передається?

- А. Вертикально. Б. Горизонтально. В. Орієнтація не має значення.
 Г. Правильної відповіді немає.

Варіант II

1. Маса тягарця 100 г, а рівняння його коливального руху

$$x = 0,25 \sin\left(10t + \frac{\pi}{6}\right).$$

Визначте жорсткість пружини і зміщення в момент часу $t = 0$ с.

- А. 100 Н/м; 0,125 м. Б. 10 Н/м; 0,125 м. В. 10 Н/м; 0,25 м. Г. 100 Н/м; 0,25 м. Д. 25 Н/м; 0,1 м.

2. У скільки разів зміниться частота коливань математичного маятника, якщо його довжину збільшити у 2 рази?

- А. Збільшиться у 2 рази. Б. Зменшиться у 2 рази. В. Збільшиться в 1,4 рази. Г. Зменшиться в 1,4 рази. Д. Залишиться без змін.

3. Під час виконання лабораторної роботи з визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника учень зафіксував, що маятник довжиною 1 м за 200 с зробив 100 коливань. Визначте, яке значення прискорення вільного падіння отримав при цьому учень.

- А. 9,86 м/с. Б. 9,86 м/с². В. 9,83 м/с². Г. 10 м/с². Д. 9,79 м/с².

4. Як зміниться період коливань секундного маятника годинника, якщо годинник за допомогою космічного корабля перемістити на Місяць?

- А. Не зміниться. Б. Період зменшиться. В. Період збільшиться. Г. Правильної відповіді немає.

5. Запишіть закон зміни швидкості, якщо координата змінюється за законом $x = 0,3 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$.

- А. $v = 1,5 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$. Б. $v = 1,5 \cos\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$. В. $v = 0,5 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$.
Г. $v = 1,5 \sin\left(5t - \frac{\pi}{2}\right)$. Д. $v = 0,5 \cos\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$.

6. Рівняння руху тягарця на пружині $\vec{x} = 0,1 \sin^4 t + \hat{j}$, маса $m = 1$ кг. Визначте повну енергію коливальної системи.

- А. 0,16 Дж. Б. 0,8 Дж. В. 0,08 Дж. Г. 1,6 Дж. Д. 0,24 Дж.

7. Яка частота і період коливань у коливальному контурі, якщо індуктивність його котушки 0,1 Гн, а ємність конденсатора 10^{-5} Ф?

- А. 0,15 кГц; 6,28 мс. Б. 2 кГц; 3,14 мс. В. $5 \cdot 10^3$ Гц; $0,2 \cdot 10^{-3}$ мс. Г. $6 \cdot 10^3$ Гц; $0,3 \cdot 10^{-2}$ мс. Д. 1,5 кГц; 6,28 мс.

8. Заряд на конденсаторі коливального контуру змінюється за законом $q = 10^{-5} \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$. Визначте закон зміни струму в котушці.

- А. $i = 3,14 \cdot 10^{-5} \cos\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$. Б. $i = 10^{-5} \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$. В. $i = 6,28 \cdot 10^{-5} \cos\left(2\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$.
Г. $i = 6,28 \cdot 10^{-5} \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$. Д. $i = 6,28 \cdot 10^{-5} \cos\left(2\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$.

9. Визначте власну частоту коливань у контурі, в якому заряд змінюється за законом $q = 10^{-6} \sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$.

- А. 300 Гц. Б. 3 Гц. В. 2,5 Гц. Г. 1,5 Гц. Д. 3,5 Гц.

10. Визначте період зміни струму в колі при резонансі, якщо $L = 1$ Гн, $C = 10^{-6}$ Ф.

- А. 6,28 с. Б. 6,28 см. В. 628 с. Г. 0,628 с. Д. 5 с.

11. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і фізичними величинами.

- | | |
|--------------------|-----------|
| А. Електроємність. | 1. Герц. |
| Б. Індуктивність. | 2. Фарад. |
| В. Сила струму. | 3. Генрі. |
| Г. Заряд. | 4. Ампер. |
| Д. Частота. | 5. Кулон. |

12. Як відомо, графік залежності ЕРС від часу при рівномірному обертанні рамки в однорідному магнітному полі є синусоїдою. Як зміниться графік, якщо частота обертання рамки збільшиться у 2 рази?

- А. Період та амплітудне значення ЕРС зменшаться у 2 рази.
 Б. Період та амплітудне значення не зміняться.
 В. Період зменшиться у 2 рази, амплітудне значення збільшиться у 2 рази.
 Г. Період збільшиться у 2 рази, амплітудне значення зменшиться у 2 рази.
 Д. Правильної відповіді немає.

13. Яка характерна для електромагнітних хвиль величина залишається незмінною при проходженні світла через середовище?

- А. Частота хвилі.
 Б. Довжина хвилі.
 В. Швидкість поширення хвилі.
 Г. Всі величини суттєво змінюються.

14. Через яку частку періоду після того, як конденсатор почав розряджатись, енергія в контурі розподілиться порівну між конденсатором і котушкою?

- А. Через $1/2 T$.
 Б. Через $1/4 T$.
 В. Через $1/8 T$.
 Г. через $2/3 T$.
 Д. Правильної відповіді немає.

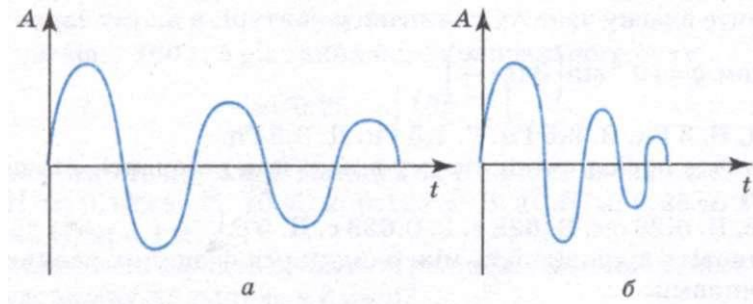
15. У колі змінного струму частотою 50 Гц послідовно ввімкнено котушку і конденсатор C . Чому має дорівнювати добуток LC , щоб режим резонансу?

- А. $1 \cdot 10^{-5}$ Гн · Ф.
 Б. $3 \cdot 10^{-3}$ Гн · Ф.
 В. 314 Гн · Ф.
 Г. $2 \cdot 10^{-2}$ Гн · Ф.

Д. Правильної відповіді немає.

16. Дано графіки (мал. 139, а, б) затухаючих коливань. Який з них відповідає дійсності і чому?

- А. Обидва графіки вірні, тому що змінюються i_A і i_B .



Мал. 139

- Б. Правильний графік *б*, тому що змінюється A .
- В. Правильний графік *а*, тому що змінюється A , а t — стала.
- Г. Обидва графіки неправильні.

17. Електричне коло складається з послідовно з'єднаних конденсатора C , котушки індуктивності L та вимикача, що дозволяє замкнути коло. Конденсатор зарядили до напруги U . Що буде відбуватись у колі, якщо вимикач замкнути?

- А. Конденсатор плавно розрядиться.
- Б. Виникнуть незатухаючі електромагнітні коливання.
- В. Виникнуть електромагнітні коливання, амплітуда і період яких поступово зменшуються.
- Г. Виникнуть електромагнітні коливання, амплітуда яких поступово зменшується, а період залишається сталим.
- Д. Правильної відповіді немає.