

Тема 10: Випромінювання електромагнітних хвиль

Питання лекції:

1. Досліди Герца. Генерування електромагнітних хвиль.
2. Діапазон електромагнітних хвиль.
3. Випромінювання хвиль елементарним електричним диполем.

1. Досліди Герца. Генерування електромагнітних хвиль

Електричне поле, яке змінюється, викликає змінне магнітне поле, яке в свою чергу викликає електричне поле і т.д. Викликати змінне електричне поле можна, наприклад, у коливальному контурі. В коливальному контурі енергія електричного поля переходить у енергію магнітного поля, однак в оточуючий простір поширюється слабо. Такий контур називається закритим (рис. 10.1а).

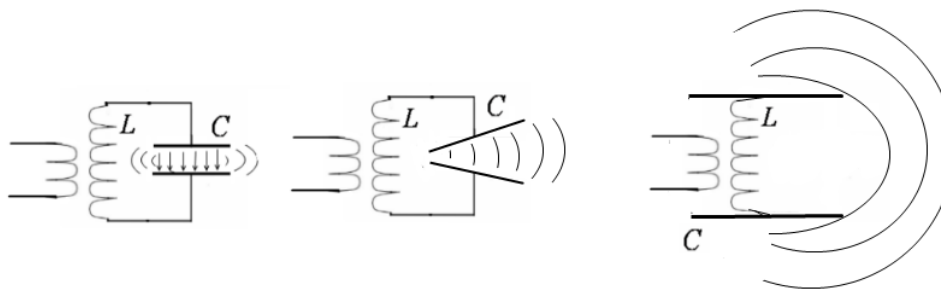


Рис. 10.1

Тому для генерування електромагнітних хвиль використовується **відкритий коливальний контур – антена** (рис. 10.1б).

Відкритий коливальний контур відрізняється від закритого тим, що L і C розподілені по довжині проводу. В такому коливальному контурі зміна електричного поля відбувається у відкритому просторі і він таким чином є випромінювачем електромагнітних хвиль. На створення хвиль витрачається енергія контура, тому для підтримки коливань до нього треба підводити енергію від зовнішнього джерела.

Розглянемо спосіб збудження коливань в електричному контурі, за допомогою якого Герц у 1886 р. вперше одержав електромагнітні хвилі. **Вібратор Герца** складався



із ємності C , індуктивності L і розрядного проміжку S (рис. 10.2). Коливання в контурі збуджувалися за допомогою індуктора T , який являв собою котушку із залізним осердям і обмотками 1 і 2. В обмотці 1 за допомогою механічного переривача Π створювався пульсуючий струм з частотою $\sim 10^3$ Гц, який в обмотці 2 з великим числом витків індуктував е.р.с. високої напруги (~ 10000 В).

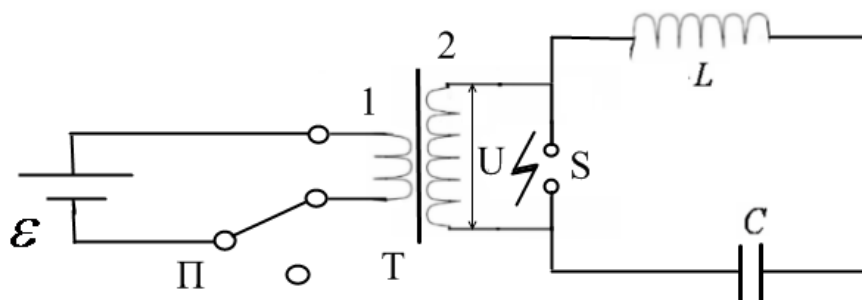


Рис. 10.2

При замиканні кола переривачем Π напруга U у вторинній обмотці зростає і при цьому заряджається конденсатор C . Якісно залежність $U(t)$ має вигляд, зображений на рис. 10.3а.

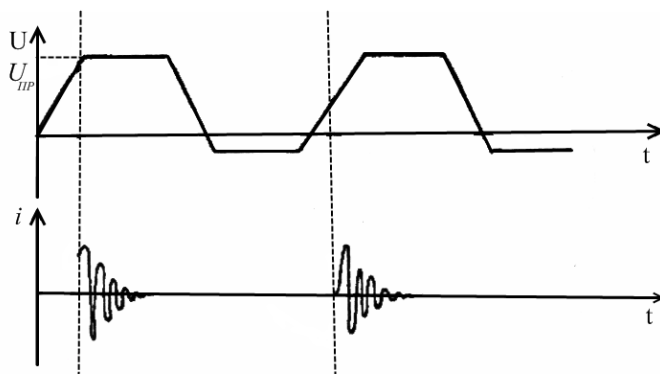


Рис. 10.3

Коли напруга U досягає деякого значення $U_{пр}$, настає пробій розрядного проміжку S , відбувається іонізація повітря і воно стає провідним. При цьому опір коливального контура різко зменшується і в ньому виникають високочастотні коливання, які є згасаючими. Такі коливання періодично повторюються з пульсацією напруги U . Частота коливань залежить від параметрів контура

L і C (рис. 10.4в):

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (1)$$

Зменшуючи L і C , Герц одержував хвилі вищої частоти (рис. 10.4). Йдучи цим шляхом, залишив у контурі один виток, а далі став зменшувати площу пластин конденсатора і розсувати їх. Таким чином вібратор Герца дістав форму у вигляді двох стерженьків з розрядним проміжком S , до якого підводились провідники від індуктора (рис. 10.4в).

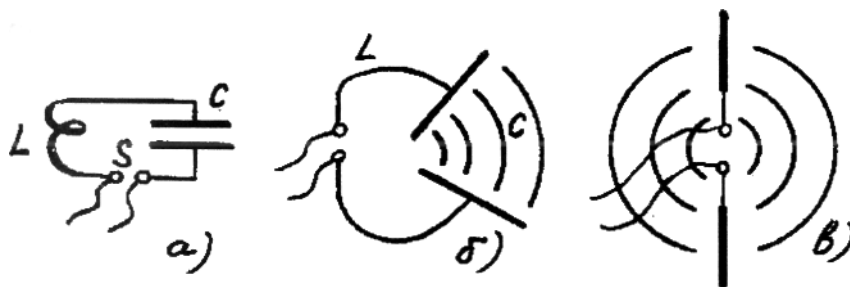


Рис. 10.4

Принципово важливим для збільшення інтенсивності випромінювання було те, що контур став **відкритим**. Електричне поле у такому вібраторі уже не зосереджувалось всередині конденсатора, а оточувало вібратор іззовні. Використовуючи відкритий вібратор, Герц створював електромагнітні хвилі з частотою $f \approx 10^8$ Гц. Пізніше Лебедев сконструював вібратор з частотою 10^{10} Гц. Для порівняння відмітимо, що частоти власних коливань електричних зарядів в атомах $\sim 10^{12} \div 10^{15}$ Гц.

В розглянутому способі генерування електромагнітних хвиль у коливальному контурі виникали згасаючі коливання. Однак для техніки особливий інтерес являє контур, в якому могли б підтримуватись незгасаючі коливання. Такий контур здатний випромінювати незгасаючі електромагнітні хвилі. Незгасаючі коливання можна одержати тільки за рахунок періодичного притоку енергії в коливальний контур.

Схема найпростішого генератора незгасаючих коливань на тріоді має вигляд, зображений на рис. 10.5.



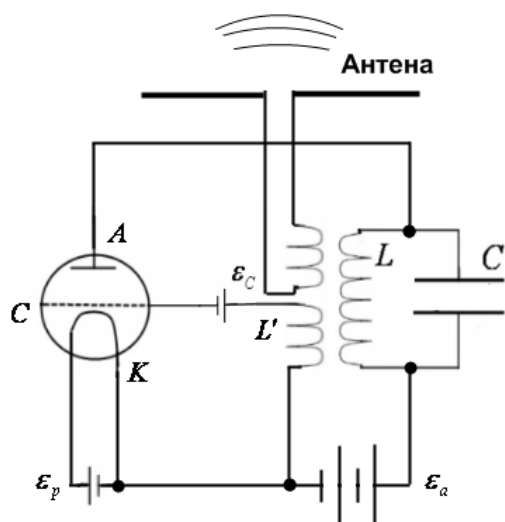


Рис. 10.5

Незгасаючі коливання в контурі підтримуються за рахунок енергії джерела е.р.с.

\mathcal{E}_a , від якого відбувається періодична зарядка конденсатора C . Процес подавання енергії в контур здійснюється автоматично за допомогою котушки зворотного зв'язку L , яка змінює напругу на сітці і автоматично відкриває і замикає лампу.

Описаний спосіб одержання незгасаючих електромагнітних коливань використовується у сучасній радіотехніці в області довжин хвиль від 30 см до 3 км. Радіохвилі сантиметрового діапазону генеруються за допомогою клістронів, магнетронів, ламп біжучих хвиль, тріодів надвисоких частот.

2. Діапазон електромагнітних хвиль

Однакова швидкість поширення світла і електромагнітних хвиль дозволила Максвеллу висловити припущення про спільну природу цих явищ, тобто електромагнітну природу світла. Пізніше було встановлено, що характерні особливості світла відбивання, заломлення, інтерференція, дифракція, поляризація властиві і для електромагнітних хвиль. Отже електромагнітні хвилі слід розглядати в якнайширшому діапазоні: радіохвилі, інфрачервоне випромінювання, видиме світло, ультрафіолетові промені, X -випромінювання, γ -випромінювання. Збуджуються хвилі різних довжин різними способами. Наприклад, коливання в інфрачервоному діапазоні можна одержати при тепловому збудженні, а також радіотехнічними методами, γ -випромінювання – результат ядерних процесів.

На рис. 10.6 дано якісне представлення шкали електромагнітних хвиль.



Рис. 10.6

3. Випромінювання хвиль елементарним електричним диполем

Найпростішою системою, що випромінює електромагнітні хвилі, є електричний диполь. Прикладом такого диполя може бути нерухомий точковий заряд $+q$, навколо якого коливається точковий заряд $-q$ (рис. 10.7).

Електричний момент диполя $p = ql$ при цьому змінюється:

$$\begin{aligned}
 p &= ql = \\
 &= ql_m \cos \omega t = \\
 &= p_m \cos \omega t.
 \end{aligned}$$

Рис. 10.7

Змінне електричне поле диполя зумовлює електромагнітну хвилю:

$$E = E_m \cos(\omega t - kr), \quad (4)$$

$$H = H_m \cos(\omega t - kr) \quad (5)$$

Якщо хвиля поширюється в ізотропному середовищі,

то хвильовий фронт буде сферичним. Амплітуди E_m і H_m залежать від відстані r до випромінювача, а також від кута ϑ між віссю диполя і \vec{r} (рис. 10.8):

$$E_m \approx H_m \approx \frac{1}{r} \sin \vartheta. \quad (6)$$

Інтенсивність хвилі дорівнює усередненому в часі значенню вектора Умова-Пойнтінга:

$$I = \langle \Pi \rangle = \left\langle \frac{dW}{dt \Delta S} \right\rangle. \quad (7)$$

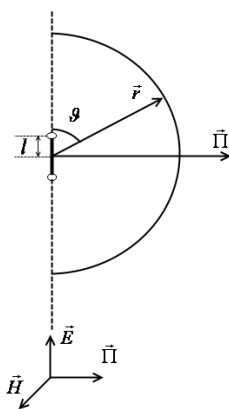


Рис. 10.8

Оскільки $\Pi = EH$, то, враховуючи (6), можемо записати:

$$I \propto \frac{1}{r^2} \sin^2 \vartheta. \quad (8)$$

Таким чином, інтенсивність хвилі залежить від кута ϑ і найсильніше диполь випромінює в напрямку, перпендикулярному до його осі, тобто при $\vartheta = \pi/2$.

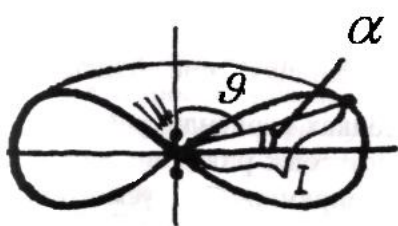


Рис. 10.9

Побудуємо в полярних координатах залежність інтенсивності від кута ϑ . Це так звана **діаграма напрямленості диполя** (рис. 10.9).

Розрахунки показують, що енергія, яка випромінюється диполем в усіх напрямках за одиницю часу (інтенсивність), пропорційна другій похідній дипольного моменту по часу в квадраті:

$$I = \left\langle \frac{dW}{dt \Delta S} \right\rangle \approx \left(\frac{d^2 p}{dt^2} \right)^2 \quad (9)$$

Оскільки згідно з (3) $p = p_m \cos(\omega t)$, то

$$\frac{d^2 p}{dt^2} = -p_m \cos(\omega t). \quad (10)$$

і (9) можемо записати:

$$I \square p_m^2 \omega^4 \cos^2 \omega t. \quad (11)$$

Усереднене в часі значення $\cos^2 \omega t = const$, тому

$$I \square \left\langle \frac{dW}{dt \Delta S} \right\rangle \square p_m^2 \omega^4 - \quad (12)$$

– середня потужність випромінювання диполя пропорційна квадрату амплітуди електричного дипольного моменту і четвертій степені частоти.

Так як електричне поле E хвилі перпендикулярне до напрямку її поширення, то вектор \vec{E} в різних точках перпендикулярний до радіус-векторів. Але при переміщенні вздовж радіуса будемо знаходити поля взаємно протилежних напрямків. Врахуємо також, що у відповідності з вихорним характером поля, силові лінії є замкненими. Відповідно можна зобразити характер випромінюваних диполем хвиль (рис. 10.10).

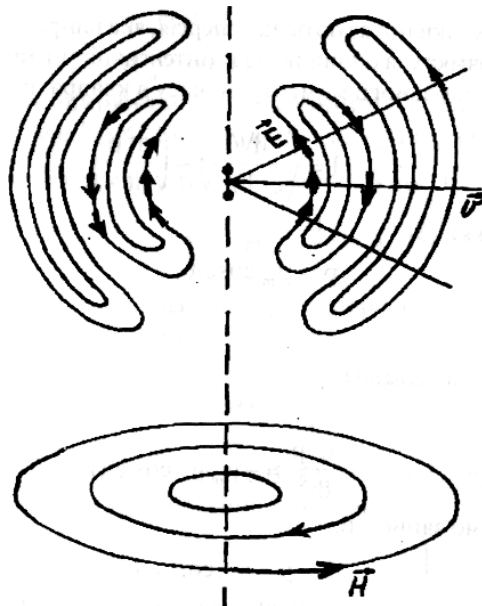
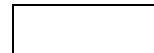


Рис. 10.10

Напрямок магнітного поля в кожній точці перпендикулярний до E і до напрямку поширення, тому магнітні силові лінії являють собою концентричні кола в площинах, перпендикулярних до осі диполя.



Питання для контролю

1. Який коливальний контур використовується для генерування електромагнітних хвиль ?
2. Зобразити електричну схему вібратора Герца та пояснити, як за допомогою цієї схеми одержувалось випромінювання електромагнітних хвиль.
3. Як Герц одержував електромагнітні хвилі все більшої частоти ?
4. Зобразіть та поясніть електричну схему найпростішого генератора незгасаючих коливань на тріоді.
5. Який діапазон електромагнітних хвиль ?
5. Пояснити, як відбувається випромінювання електромагнітних хвиль електричним диполем.
7. Пояснити діаграму напрямленості диполя.
8. Від чого залежить середня потужність випромінювання диполя ?

Допоміжна література

1. *Ионушас К.К., Малинко В.Н.* Курс фізики, т. 2, ч. I. – Київ: КВВИУС, 1987. – §§ 49-51.
2. *Савельев Й.В.* Курс общей фізики, т. 2. – М.: Наука, 1978. – §§ 106,109.
3. *Савельев Й.В.* Курс общей фізики, т. 2. – М.: Наука, 1970. – §§ 111-114.
4. *Калашников С.Г.* Электричество. 1985. – §§ 241, 243, 247.
5. *Зисман Г.А., Тодес О.М.* Курс общей фізики, т. 2, 1969. – §§ 52-54.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Рівняння незгасаючих коливань має вигляд:

$$y = 10 \sin 0,5\pi t \text{ м.}$$

- а) Знайти рівняння хвилі, якщо швидкість поширення коливань 300 м/с.
- б) Написати рівняння коливань для точки, що знаходиться на відстані 600 м від джерела коливань.
- в) Знайти зміщення точок при поширенні хвилі в момент

часу $t = 4$ с після початку коливань.

Відповідь:

$$\text{а) } y = 10 \sin \frac{\pi}{2} \left(t - \frac{x}{300} \right), \text{ м};$$

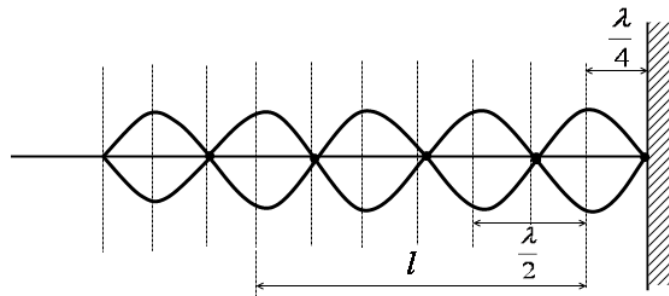
$$\text{б) } y = 10 \sin \left(\frac{\pi}{2} t - \pi \right), \text{ м};$$

$$\text{в) } y = 10 \sin \left(2\pi - \frac{\pi x}{600} \right), \text{ м)}$$

2. Рівняння незгасаючих коливань має вигляд: $x = 4 \sin 600\pi t$. Знайти зміщення точки від положення рівноваги, що знаходиться на відстані 75 см від джерела коливань через 0,01 с після початку коливань. Швидкість поширення коливань 300 м/с. Відповідь: $x \approx 0,04$ м.

3. Знайти довжину хвилі коливання, період якого дорівнює 10^{-14} с. Швидкість поширення коливань $3 \cdot 10^8$ м/с. Відповідь: $\lambda = 3 \cdot 10^{-6}$.

4. Визначити довжину хвилі коливань, якщо відстань між 1-ю і 4-ю пучностями "стоячої хвилі" дорівнює 15 см.



Відповідь: $\lambda = 10$ см.

5. Довжина плоскої хвилі у вакуумі $\lambda_0 = 1$ м. Чому дорівнює довжина хвилі тієї ж частоти в чистій воді? ($\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 81$, $\mu = 1$). Відповідь: $\lambda = 0,1$ м.

Рекомендації для розв'язку.

Використати висновки із теорії Максвелла про поширення електромагнітних хвиль у середовищах, а саме зв'язок між довжиною хвилі, швидкістю її поширення в середовищі та показником заломлення середовища.

6. Два паралельні провідники, занурені в бензол, індуктивно з'єднані з генератором G височастотних електромагнітних коливань. При частоті $\nu = 1,00 \cdot 10^{12}$ МГц у системі встановлюються "стоячі" електромагнітні хвилі. Переміщуючи вздовж провідників газорозрядну трубку A (див. рис. 12), за її

свіченням визначають положення пучностей напруженості електричного поля. Відстань між сусідніми пучностями виявилась рівною $l = 1$ м. Знайти діелектричну проникність бензолу. Відповідь: $\varepsilon = 2,2$.

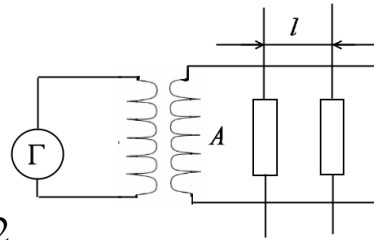


Рис. 12

Рекомендації для розв'язку. Використати явище інтерференції електромагнітних хвиль ("стоячі хвилі"), а також висновки із теорії Максвелла про поширення електромагнітних хвиль у середовищах.

7. Два паралельні провідники, занурені в гліцерин, індуктивно з'єднані з генератором електромагнітних коливань частотою $\nu = 4,2 \cdot 10^8$ Гц. Відстань між пучностями "стоячих хвиль" на проводах $l = 7$ см. Знайти діелектричну проникність гліцерину. Відповідь: $\varepsilon = 26$.

8. Плоска електромагнітна хвиля поширюється в повітрі вздовж осі x . Амплітуда напруженості електричного поля $E_m = 2$ мкВ/м. Довжина хвилі $\lambda = 60$ м. Визначити: а) напруженість електричного і магнітного поля в момент часу $t = 0$ в точці $x_1 = 0$; б) на відстані $x_2 = 6$ м. Відповідь: а) $E = 0$; $H = 0$; б) $E = -1,2$ мкВ/м, $H = -3,1 \cdot 10^{-3}$ мкА/м.

Рекомендація для розв'язку. Використати формулу, що пов'язує амплітудні значення напруженостей електричного та магнітного полів із рівнянь Максвелла.

9. Знайти середнє значення енергії, що переноситься плоскою електромагнітною хвилею $E = E_m \cos(\omega t - kx)$ за час $t = 1$ хв. Через площину $S_{\perp} = 10$ см², розміщену у вакуумі перпендикулярно до поширення хвилі. Амплітуда напруженості електричного поля $E_m = 2$ мВ/м.

Відповідь: $\langle w \rangle = 3,2 \cdot 10^{-10}$ Дж.

Рекомендації для розв'язку. Енергія, яка переноситься через перпендикулярну площину, пропорційна вектору Умова-Пойнтінга. Однак, вектор Умова-Пойнтінга $\vec{P} = [\vec{E} \cdot \vec{H}]$ змінюється в часі, оскільки змінюються вектори \vec{E} і \vec{H} . Тому, якщо

взяти великий проміжок часу $t \ll T$, то перенос енергії можна характеризувати деяким середнім значенням вектора $\langle \Pi \rangle$. Врахувавши це, можна знайти середню енергію, що переноситься електромагнітною хвилею через площину S_{\perp} за час t .

10. Напруженість електричного і магнітного полів змінюється за законом:

$$E(t) = 10 \cos(10^9 t - 3,14x + \pi/4), \text{ В/м} ,$$

$$H(t) = 5 \cos(10^9 t - 3,14x + \pi/4), \text{ А/м} .$$

Визначити миттєве значення вектора густини потоку потужності.