

## Тема 3.3 Електромагнітні хвилі

### План

1. Електромагнітні хвилі і їх властивості
2. Енергетичні характеристики електромагнітної хвилі
3. Принципи радіозв'язку
4. Розвиток мобільного зв'язку

#### 1. Електромагнітні хвилі і їх властивості

Згідно з Максвеллом, усяке змінне магнітне поле збуджує в навколишньому просторі вихрове електричне поле, а всяке змінне електричне поле збуджує в навколишньому просторі вихрове магнітне поле. Початий процес взаємного збудження електричного й магнітного полів, триваючи, охоплює всі нові й нові області навколишнього простору.

Таким чином, змінне магнітне поле завжди пов'язане з породжуваним ним електричним полем, а змінне електричне поле завжди пов'язане з породжуваним ним магнітним полем. Сукупність мінливих електричного й магнітного полів, «зчеплених» одне з одним, являє собою електромагнітне поле. Електромагнітне поле може існувати не тільки в речовині, але й вакуумі.

Електромагнітні хвилі - електромагнітне поле, що поширюється в просторі з кінцевою швидкістю, яка залежить від властивостей середовища. Максвелл показав, що швидкість електромагнітних хвиль у речовині

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad (3.1)$$

де  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  - швидкість поширення світла у вакуумі;

$\epsilon_0$  і  $\mu_0$  - відповідно електрична й магнітна постійна;

$\epsilon$  і  $\mu$  - відповідно електрична й магнітна проникність середовища.

У вакуумі ( $\epsilon = 1$  і  $\mu = 1$ ) швидкість поширення електромагнітних хвиль збігається зі швидкістю  $c$ . В речовині  $\epsilon \mu > 1$ , тому швидкість поширення електромагнітних хвиль у речовині завжди менше, чим у вакуумі. Для всіх речовин (за винятком феромагнетиків) магнітна проникність  $\mu$  мало відрізняється від одиниці ( $\mu \approx 1$ ), тому швидкість електромагнітної хвилі

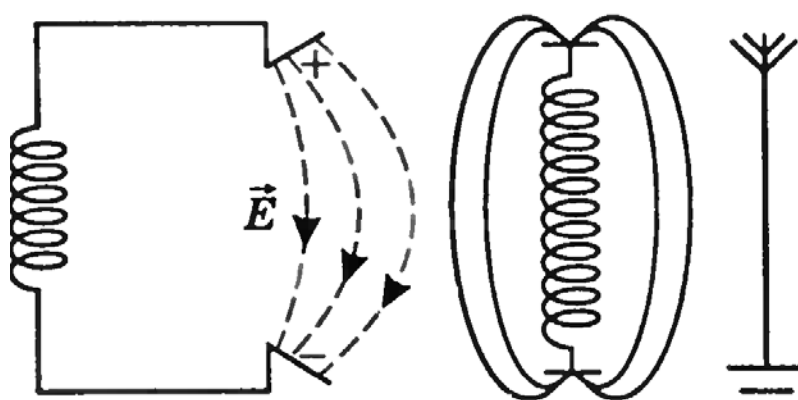
$$v \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}.$$

Збіг розмірного коефіцієнта у формулі (3.1) зі швидкістю поширення світла у вакуумі вказує на глибокий зв'язок між електромагнітними й оптичними явищами, що дозволила Максвеллу створити електромагнітну теорію світла, згідно з якою світло являє собою електромагнітні хвилі.

Електромагнітні хвилі вперше в 1887 г. експериментально виявив Г. Герц. Джерелом електромагнітних хвиль може бути будь-який електричний коливальний контур або провідник, по якому тече змінний електричний струм, тому що для збудження електромагнітних хвиль необхідно створити в просторі змінне електричне поле або відповідно змінне магнітне поле.

Випромінююча здатність джерела визначається його формою, розмірами й частотою коливань. Щоб випромінювання відіграло помітну роль, необхідно збільшити обсяг простору, у якому створюється змінне електромагнітне поле. Тому для одержання електромагнітних хвиль непридатні закриті коливальні контури, бо в них електричне поле зосереджене між обкладинками конденсатора, а магнітне - усередині котушки індуктивності.

Для збільшення потужності випромінювання Герц сконструював відкритий коливальний контур (збільшив частину контуру, що безпосередньо випромінює електромагнітні хвилі).



Мал. 3.1. Відкритий коливальний контур

Надалі (20-і роки ХХ в.) перейшли до збудження електромагнітних хвиль за допомогою лампових генераторів і генераторів незатухаючих коливань на транзисторах.

З теорії Максвелла випливало й дослідним шляхом було доведено, що електромагнітні хвилі є поперечними - коливання векторів напруженості  $\vec{E}$  змінного електричного поля й індукції  $\vec{B}$  змінного магнітного поля взаємно перпендикулярні (на мал. 3.2 наведена моментальна «фотографія» плоскої електромагнітної хвилі) і лежать у площинах, перпендикулярних вектору швидкості поширення хвилі  $\vec{v}$ . Вектори  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  і  $\vec{v}$  утворюють правої гвинтову систему: напрямок поширення електромагнітної хвилі збігається з поступальним рухом вістря гвинта, який обертається по напрямкові найкоротшого повороту від вектору  $\vec{E}$  до вектору  $\vec{B}$ .

З мал. 3.2 випливає, що взаємно перпендикулярні вектори  $\vec{E}$  й  $\vec{B}$  в електромагнітній хвилі коливаються в однакових фазах - вони одночасно обертаються в нуль.

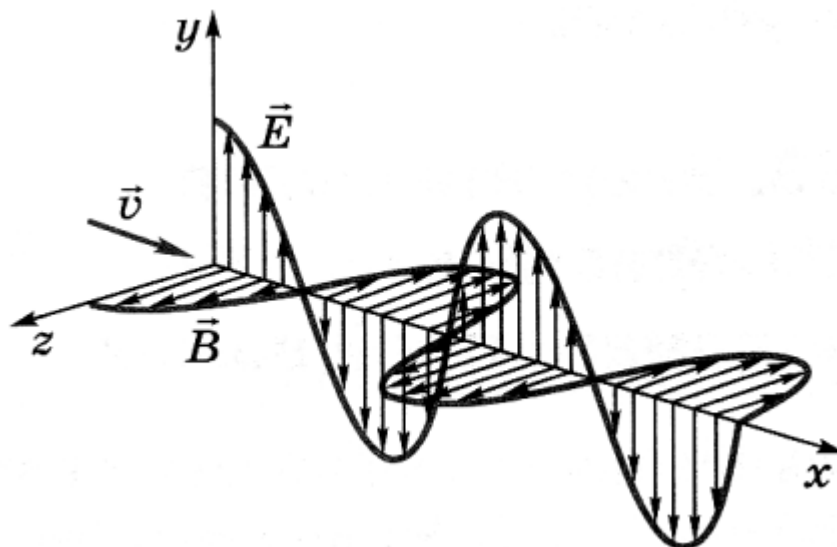


Рис. 3.2. Електромагнітна хвиля

Відзначимо ще раз, що електромагнітні хвилі можуть поширюватися не тільки в різних середовищах, але й у вакуумі, причому швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі рівна  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Герц експериментально довів, що електромагнітні хвилі, подібно іншим видам хвиль, поглинаються, відбиваються й переломлюються. Для них закони відбиття й переломлення збігаються із законами відбиття й переломлення механічних хвиль.

Електромагнітні хвилі, володіючи широким діапазоном довжин хвиль (частот), відрізняються способом їх генерації, а також своїми властивостями.

## 2. Енергетичні характеристики електромагнітної хвилі

Можливість виявлення електромагнітних хвиль доводить, що вони переносять енергію. У якості енергетичної характеристики електромагнітної хвилі розглядають потік випромінювання й поверхневу щільність потоку випромінювання.

Нехай на якусь поверхню за час  $t$  падає випромінювання, енергія якого  $W$ . Поток випромінювання  $\Phi$  називають фізичну величину, обумовлену середньою потужністю випромінювання за час, який значно перевищує період коливань електромагнітної хвилі:

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \langle P \rangle. \quad (3.2)$$

Таким чином, потік випромінювання характеризує повну енергію, що переноситься електромагнітною хвилею через поверхню за одиницю часу. Одиниця потоку випромінювання - ват (Вт).

Часто при вимірах важливо знати не тільки величину потоку, але й поверхневу щільність потоку випромінювання  $I$  - фізичну величину,

обумовлену потоком випромінювання через одиницю площі поверхні, яка розташована перпендикулярно напрямку поширення хвилі:

$$I = \frac{\Phi}{S} = \frac{\langle P \rangle}{S} = \frac{\Delta W}{S \Delta t}. \quad (3.3)$$

З формули (3.3) випливає, що поверхнева щільність енергії визначається середньою енергією, що переноситься електромагнітною хвилею через одиницю площі поверхні, розташованої перпендикулярно напрямку поширення хвилі, за одиницю часу.

Одиниця поверхневої щільності потоку випромінювання - ват на квадратний метр (Вт/м<sup>2</sup>).

Припустимо, що через поверхню площею  $S = 1\text{ м}^2$  за час  $\Delta t$  електромагнітна хвиля переносить у середньому енергію, що втримується в паралелепіпеді обсягом  $\Delta V = Sc\Delta t$  (мал. 2). Енергія електромагнітного поля усередині паралелепіпеда

$$\Delta W = \langle w \rangle \Delta V = \langle w \rangle Sc\Delta t \quad (3.4)$$

де  $\langle w \rangle$  - середня об'ємна щільність енергії електромагнітної хвилі.

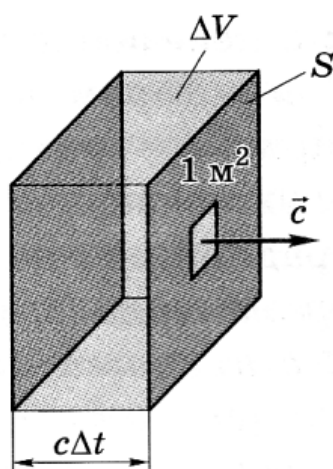


Рис. 3.3. До розрахунків інтенсивності випромінювання

Тоді поверхнева щільність потоку випромінювання, згідно з формулами (3.3) і (3.4):

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t} = \langle w \rangle c. \quad (3.5)$$

Відзначимо, що термін «поверхнева щільність потоку випромінювання» є синонімом термінів «інтенсивність хвилі» або «інтенсивність випромінювання».

### 3. Принципи радіозв'язку

Для здійснення радіозв'язку в пункті, з якого ведеться радіопередача, розміщують радіопередавальне обладнання, що містить радіопередавач і передавальну антену, а в пункті, у якому здійснюється радіоприймання, - радіоприймальне обладнання, що включає прийомну антену й радіоприймач. Генеровані в передавачі гармонійні коливання з несучою частотою, що належить якому-небудь діапазону радіочастот, зазнають модуляції відповідно до переданого повідомлення. Модульовані радіочастотні коливання являють собою радіосигнал. Від передавача радіосигнал надходить у передавальну антену, за допомогою якої в навколишньому просторі збуджуються модульовані електромагнітні хвилі.

Поширюючись, радіохвилі досягають прийомної антени й збуджують у ній електричні коливання, які надходять далі в радіоприймач. Прийнятий у такий спосіб радіосигнал дуже слабкий, тому що в прийомну антену попадає лише незначна частина випромєненої енергії. Тому радіосигнал у радіоприймачі надходить в електронний підсилювач, після чого піддається демодуляції, або детектуванню. У результаті виділяється сигнал, аналогічний сигналу, яким були модульовані коливання з несучою частотою в радіопередавачі. Далі цей сигнал (звичайно додатково посилений) перетворюється за допомогою відповідного відтворюючого обладнання в повідомлення, адекватне вихідному.

Поширення радіохвиль у відкритому просторі уможлиблює приймання радіосигналів, переданих по лініях радіозв'язку, особами, для яких вони не призначені (радіоперехоплення, радіопідслухування), - у цьому полягає недолік радіозв'язку в порівнянні з електрозв'язком по кабелях, радіохвилеводах і інших закритих лініях. Таємниця телефонних переговорів і телеграфних повідомлень, що передбачається відповідними правилами й міжнародними угодами, забезпечується в необхідних випадках застосуванням автоматичних засобів засекречування радіосигналів (кодування й ін.).

Спроби здійснити радіозв'язок робив ще Т. Едісон у 80-і роки ХІХ в. до відкриття в 1887 р. електромагнітних хвиль Г. Герцом. Розвиток радіозв'язку почався після того, як у 1895 р. О. С. Попов (а через рік і Г. Марконі) створив чутливий приймач, цілком придатний для здійснення сигналізації без проводів, тобто для радіозв'язку. У тому ж році відбулася перша публічна демонстрація роботи радіоапаратури й бездротової передачі сигналів з її допомогою. Приймач Попова виявився придатним не тільки для радіозв'язку, але й успішно застосований (1895 р.) для автоматичного запису грозових розрядів, чим був покладений початок радіометеорології. В 1901 р. Марконі здійснив радіотелеграфну передачу через Атлантичний океан. Очевидне величезне значення радіозв'язку для військового флоту й морського транспорту, а також гуманітарна роль (при порятунку людей з кораблів, що терплять нещастя) стимулювали його розвиток в усьому світі. У країнах Західної Європи й США радіозв'язок активно використовували в комерційних цілях.

З 1915 р. до 50-х років в апаратурі для радіозв'язку застосовували в основному електронні лампи, потім були впроваджені транзистори й інші напівпровідникові прилади.

Спочатку для радіозв'язку використовувалися переважно хвилі довжиною від сотень метрів до десятків кілометрів. В 1922 р. радіоаматорами була відкрита властивість коротких хвиль поширюватися на будь-які відстані завдяки переломленню у верхніх шарах атмосфери й відбиттю від них. Незабаром такі хвилі стали основним засобом здійснення далекого радіозв'язку.

Передача на значні відстані досягається застосуванням багаторазової ретрансляції (приймання й передачі сигналів на проміжному пункті) у лініях радіорелейного зв'язку або за допомогою супутників зв'язку, що перебувають на великій висоті (до 40 тис. км) над Землею.

Лінії радіозв'язку використовуються для передачі телефонних повідомлень, телеграм, потоків цифрової інформації й факсиміле, також і для передачі телевізійних програм (звичайно на метрових й більш коротких хвилях).

#### 4. Розвиток мобільного зв'язку

Бажання зробити зв'язок повсюдно доступним привело до створення й еволюції стільникового (мобільного) зв'язку. Перша спроба реалізувати мобільний зв'язок була почата в 1946 р. у Сент-Луїсі (США). Тоді був створений простий шестиканальний прийомопередавач. Тільки через 24 роки вчені знову зайнялися розробкою бездротового зв'язку. Принципи побудови й функціонування стільникової мережі були чітко намічені в 1975 р.

Мобільні телефони першого покоління (розміром трохи менше валізи) використовували аналогові сигнали й склалися з бази й окремої трубки, яку практично неможна було носити із собою. Зараз важко уявити, що таке «чудо» техніки масою кілька кілограмів випромінювало сигнал потужністю 20 - 30 Вт і мало антену довжиною 30 - 40 см. Максимальна швидкість передачі голосу становила 9,6 Кбіт/с, швидкість передачі даних - 1,9 Кбіт/с (біт - одиниця кількості інформації). Недоліки аналогового стандарту полягають у високому рівні випромінювання, чутливості до інтерференції сигналу й низькому рівні конфіденційності переданих даних.

Новий стандарт GSM передбачає використання цифрової стільникової системи замість аналогової. Застосування GSM почалося в 1991 р. Швидкість передачі даних у мережі підвищилася від 1,9 до 14 Кбіт/с, що дозволило використовувати мобільний телефон, модем, факс, а згодом і бездротовий зв'язок (Wap-Сервіси).

Завдяки новому стандарту з'явився сервіс коротких повідомлень - SMS (обмін текстовими повідомленнями довжиною до 160 символів). На основі протоколу SMS виник broadcasting - розсилання новин або іншої інформації всім абонентам мережі. Додаткову гнучкість додало використання Sim-Карт (Subscriber Identity Module), що дозволило прив'язати до мережі не сам телефонний апарат, а невеликий модуль, що містить міжнародний ідентифікатор користувача мобільних послуг.

Збільшення кількості і якості інтерактивних (таких, що припускають зворотний зв'язок між абонентом і постачальником послуг) сервісів припускає одночасне розширення каналів зв'язку, які зв'язують користувача із всесвітньою павутиною (www). Сучасні технології (при швидкості передачі даних,

вимірюваної мегабайтами й гігабайтами в секунду) дозволяють об'єднати всі обладнання й управляти ними централізовано. Такі сервіси, як онлайн-віщання популярних теле- і радіоканалів, *VoIP*-телефонія, що зв'язує телефон з Інтернетом, стають усе доступніше. Офіційні результати досліджень доводять швидку динаміку росту мережі Інтернет.

За останні 20 із зайвим років стільниковий зв'язок із примітивного засобу зв'язку перетворилася у високошвидкісну технологію, здатну значно спростити й поліпшити життя людей. Прихід мереж четвертого покоління можна вважати новою віхою в еволюції не тільки стільникового зв'язку, але й життя багатьох людей, які здобувають новий рівень мобільності й доступності.

Розвиток індустрії стільникового зв'язку приводить до екологічних проблем. У першу чергу тому що мобільних телефонів випускають багато (більш 500 млн у рік), а термін служби (життєвий цикл) у них короткий (у середньому, 8-10 міс.). У підсумку використані мобільники тонами відправляються на смітник, а це вимагає наявності вільних територій і вирішення проблем їх утилізації. Також не цілком вивчене дуже важливе питання впливу цифрового сигналу на здоров'я людини.

#### Питання для самоконтролю

1. Поясніть природу електромагнітного поля; електромагнітних хвиль.
2. Чому при замиканні ланцюга електричний струм на будь-якій її ділянці виникає практично миттєво?
3. Яка швидкість поширення електромагнітних хвиль?
4. Може електромагнітна хвиля поширюватися у вакуумі?
5. Які характеристики електричного й магнітного полів періодично змінюються в електромагнітній хвилі? Яким чином?
6. Назвіть енергетичні характеристики електромагнітних хвиль.
7. Який принцип лежить в основі цифрових методів передачі інформації?
8. У чому перевага стандарту GSM? Коли введений цей стандарт?
9. Який вплив на життя людини виявляє мобільний зв'язок?
10. Які екологічні проблеми пов'язані з появою мобільного зв'язку?

#### Список літератури

1. Трофимова Т.И. Физика: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Т.И.Трофимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 352 с. (§§ 116-118)
2. Фирсов А.В. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / А.В.Фирсов; под ред. Т.И.Трофимовой. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 352 с. (§§ 162-166)

3. Трофимова Т.И. Курс физики. Учеб. пособие для вузов / Т.И.Трофимова. – Изд. 9-е, перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 560 с. (§§ 161-164)