

§ 22. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ. ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ДОСЛІДИ Г. ГЕРЦА



Зараз нікого не дивує той факт, що навколишній простір пронизаний електромагнітними хвилями. Ці хвилі пов'язані не лише з мобільним зв'язком, телебаченням і радіомовленням. Електромагнітні хвилі випромінюють і різноманітні космічні об'єкти (зорі, туманності, планети тощо), і будь-яке макротіло, зокрема людина. Деякі з цих хвиль виникли мить тому, а деякі існують від початку існування Всесвіту. Згадаємо, хто передбачив існування електромагнітних хвиль і якими є властивості цих хвиль.



Рис. 22.1. Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) — британський фізик і математик. Створив теорію електромагнітного поля, передбачив існування електромагнітних хвиль, установив електромагнітну природу світла



Рис. 22.2. Генріх Рудольф Герц (1857–1894) — німецький фізик. Експериментально довів існування електромагнітних хвиль, дослідив їхні властивості

1 Як утворюється електромагнітна хвиля

Електромагнітна хвиля — це поширення в просторі коливань електромагнітного поля.

Електромагнітні хвилі теоретично передбачив *Дж. Максвелл* (рис. 22.1) у 1873 р. Проаналізувавши всі відомі на той час закони електродинаміки, він суто математично дійшов висновку, що в природі мають існувати електромагнітні хвилі. На жаль, Максвелл не довів до експериментального підтвердження своїх розрахунків. Тільки через 9 років після його смерті німецький фізик *Г. Герц* (рис. 22.2) продемонстрував випромінювання і прийом електромагнітних хвиль.

Згадаємо, як утворюється та поширюється електромагнітна хвиля.

Візьмемо провідник, у якому тече змінний струм. Біля будь-якого провідника зі струмом існує магнітне поле. Магнітне поле, створене змінним струмом, теж є змінним. Згідно з теорією Максвелла, змінне магнітне поле має створити електричне поле, яке теж буде змінним; змінне електричне поле створить змінне магнітне, і т. д. Отже, одержимо *поширення коливань електромагнітного поля — електромагнітну хвилю* (рис. 22.3). Частота ν цієї хвилі дорівнює частоті, з якою змінюється сила струму в провіднику, а *провідник зі змінним струмом є джерелом електромагнітної хвилі*.

За теорією Максвелла, *джерелом електромагнітної хвилі може бути будь-яка заряджена частинка, що рухається з прискоренням*. Якщо ж частинка нерухома або рухається з незмінною швидкістю, біля неї існує електромагнітне поле, проте електромагнітну хвилю частинка

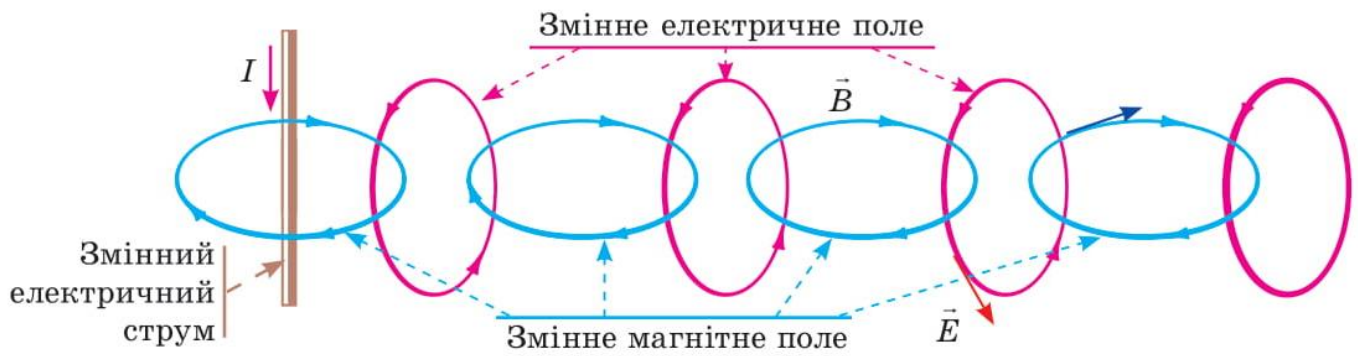


Рис. 22.3. Схематичне зображення механізму поширення електромагнітної хвилі

не випромінює. Випромінюванням електромагнітних хвиль супроводжуються й деякі процеси, що відбуваються всередині молекул, атомів, ядер атомів (теорія таких процесів — *квантова теорія* — була створена у ХХ ст.).

Аналогічно тому як механічна хвиля може відірватися від свого джерела (згадайте поширення звукової хвилі та відлуння), електромагнітна хвиля теж може відірватися від свого джерела і почати самостійно «подорожувати» простором.

2 Які фізичні величини характеризують електромагнітну хвилю

- Електромагнітна хвиля як процес поширення електромагнітного поля насамперед характеризується вектором напруженості $\vec{E}$ і вектором магнітної індукції $\vec{B}$. Будь-яка хвиля періодична і в часі, і в просторі, тому зазначені величини періодично змінюються і з часом, і зі зміною відстані від джерела хвилі. За теорією Максвелла вектори $\vec{E}$ і $\vec{B}$ одночасно сягають максимального значення й одночасно перетворюються на нуль, при цьому вони перпендикулярні як один до одного, так і до напрямку поширення хвилі (рис. 22.4). Отже, електромагнітна хвиля — це поперечна хвиля:

$$\vec{E} \perp \vec{B}, \quad \vec{E} \perp \vec{v}, \quad \vec{B} \perp \vec{v}$$

Зверніть увагу! Те, що електромагнітна хвиля є поперечною, не означає, що в просторі існують якісь «горби» та западини. Уздовж напрямку поширення хвилі та в даній точці простору відбуваються лише плавні зміни напруженості та магнітної індукції електромагнітного поля.

- Електромагнітна хвиля, як і механічна, характеризується частотою (ν), довжиною (λ) і швидкістю поширення (v). Як і у випадку з механічними хвилями, зазначені величини пов'язані формулою хвилі:

$$v = \lambda \nu$$

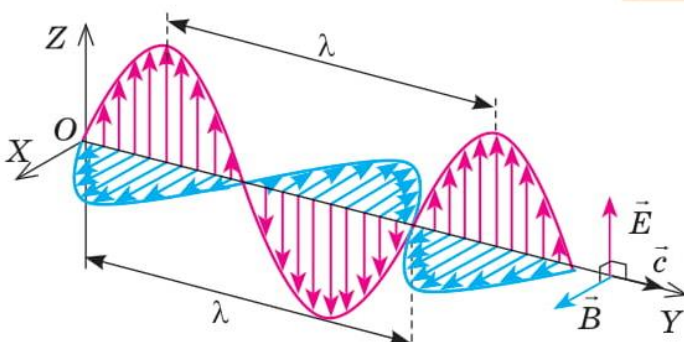


Рис. 22.4. Періодичні зміни вектора напруженості $\vec{E}$ електричного поля і вектора магнітної індукції $\vec{B}$ магнітного поля під час поширення електромагнітної хвилі в напрямку осі OY

На відміну від механічних хвиль, для поширення електромагнітних хвиль не потрібне середовище. Навпаки: найкраще і найшвидше електромагнітні хвилі поширюються у вакуумі. Дж. Максвелл теоретично обчислив швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі та виявив, що отримане значення збігається зі значенням швидкості світла у вакуумі (воно вже було виміряне експериментально): $v = c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Дж. Максвелл висунув сміливе для свого часу припущення: *світло є різновидом електромагнітних хвиль*. Учений не лише виявив природу світла, а й передбачив існування та властивості різних видів електромагнітних хвиль.

У вакуумі — і тільки в ньому — всі електромагнітні хвилі поширюються з однаковою швидкістю (c), тому для вакууму довжина і частота електромагнітної хвилі пов'язані формулою: $c = \lambda \nu$.

Під час переходу з одного середовища в інше швидкість поширення електромагнітної хвилі змінюється, змінюється і довжина хвилі, а от її частота залишається незмінною.

У повітрі швидкість поширення електромагнітних хвиль майже та сама, що й у вакуумі.

? Згадайте, як називають явище, пов'язане зі зміною швидкості світла під час переходу з одного середовища в інше. А чи буде це явище спостерігатися для будь-якої електромагнітної хвилі?

• Електромагнітні хвилі, як і механічні, *переносять енергію*. Енергія W електромагнітної хвилі прямо пропорційна її частоті ν в четвертому степені:

$$W \sim \nu^4$$

3 Як вивчали властивості електромагнітних хвиль

Першим електромагнітні хвилі отримав і дослідив Г. Герц у 1888 р. Він сконструював випромінювач, який згодом отримав назву *вібратор Герца* (рис. 22.5, а). Коли обидві латунні кульки заряджались до високої різниці

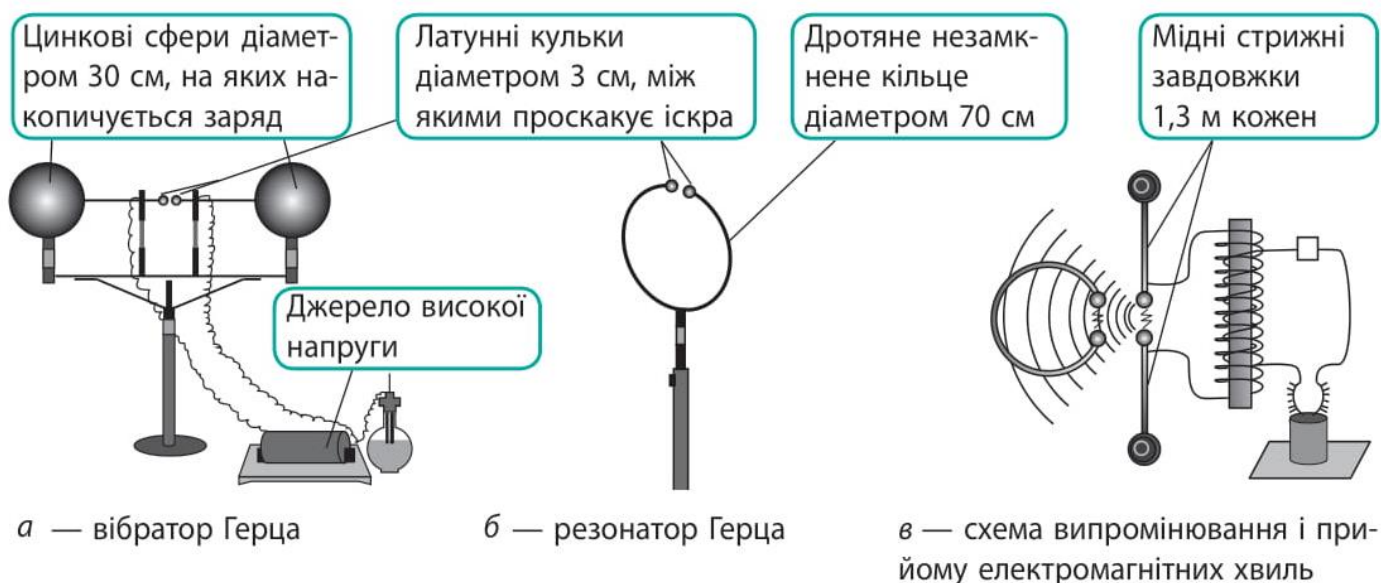


Рис. 22.5. Схема досліду Герца з одержання та реєстрації електромагнітних хвиль

потенціалів, між ними проскакувала іскра і в довкілля випромінювалась електромагнітна хвиля (у дослідах Г. Герца частота хвиль сягала 500 МГц).

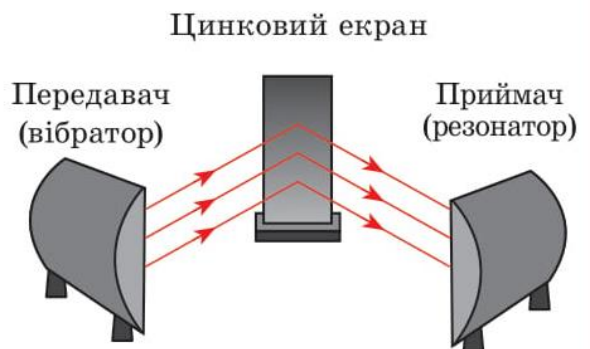
Щоб уловлювати випромінювані хвилі, Г. Герц зробив *резонатор* (рис. 22.5, б). Змінюючи розмір іскрового проміжку між кульками резонатора, вчений настроював його на частоту коливань вібратора. Під дією змінного електричного поля електромагнітної хвилі, створеної вібратором, у резонаторі виникали коливання струму. Під час резонансу напруга на кульках резонатора різко зростала, тому в ті моменти, коли між кульками вібратора відбувався розряд, в іскровому проміжку резонатора теж проскакували ледь помітні іскорки (рис. 22.5, в), які можна було побачити тільки в лупу і тільки в темряві.

Герц не тільки одержав електромагнітні хвилі, а й експериментально підтвердив їхні властивості, передбачені свого часу Дж. Максвеллом.

Властивості електромагнітних хвиль і досліди Г. Герца з вивчення цих властивостей

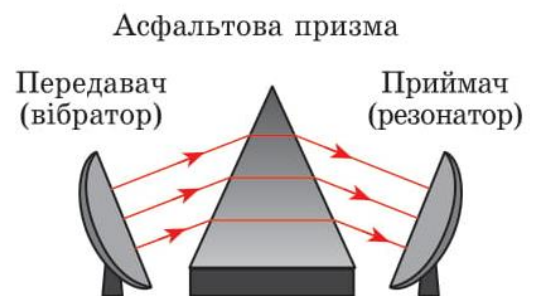
Електромагнітні хвилі відбиваються від провідних предметів.

На стіні лабораторії Г. Герц закріпив цинковий екран розміром 4×2 м. За допомогою вібратора і параболічного дзеркала, виготовленого з листа заліза розміром $2 \times 1,5$ м, створив пучок електромагнітних хвиль і спрямував їх під кутом до екрана. Виявилось, що *кут відбивання електромагнітної хвилі дорівнює куту її падіння*.



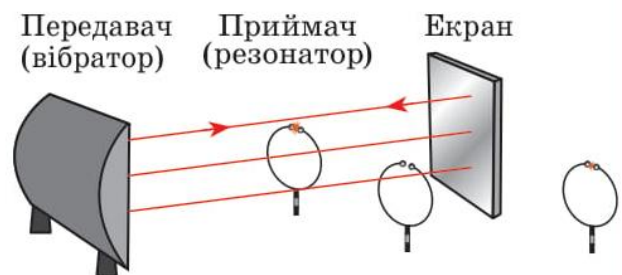
Електромагнітні хвилі заломлюються на межі з діелектриком.

Для вивчення заломлення електромагнітних хвиль Г. Герц виготовив асфальтову призму заввишки 1,5 м і масою 1200 кг. Помістивши призму між вібратором і резонатором, учений помітив, що іскра в резонаторі зникла. Іскроутворення відновлювалося, коли резонатор переміщували до основи призми.



Електромагнітні хвилі обгинають перешкоди, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі (явище дифракції); накладаючись, електромагнітні хвилі можуть як посилювати, так і послаблювати одна одну (явище інтерференції).

Для спостереження цих явищ Г. Герц переміщував резонатор відносно вібратора й екрана та спостерігав посилення, послаблення або зникнення іскри в резонаторі.



Підсумовуючи свої досліди, Г. Герц писав: «...описані досліди доводять ідентичність світла, теплових променів і електродинамічного хвильового руху».



Підбиваємо підсумки

- Поширення в просторі коливань електромагнітного поля називають електромагнітною хвилею.
- Електромагнітна хвиля — це поперечна хвиля: вектор напруженості $\vec{E}$ електричної складової і вектор магнітної індукції $\vec{B}$ магнітної складової електромагнітного поля завжди перпендикулярні один до одного і до напрямку поширення хвилі; вони одночасно досягають максимального значення й одночасно перетворюються на нуль.
- Швидкість поширення електромагнітної хвилі, її довжина і частота пов'язані формулою хвилі: $v = \lambda \nu$. Найкраще й найшвидше електромагнітні хвилі поширюються у вакуумі. Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі є однаковою для будь-яких електромагнітних хвиль і дорівнює швидкості світла: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Для вакууму формула хвилі має вигляд: $c = \lambda \nu$.
- Досліди Герца показали, що електромагнітні хвилі відбиваються від провідників, заломлюються на межі з діелектриками, можуть обгинати перешкоди (дифракція) і накладатися одна на одну (інтерференція). При цьому відбивання, заломлення, інтерференція і дифракція електромагнітних хвиль відбуваються за законами, що справджуються для світла.



Контрольні запитання

1. Дайте означення електромагнітної хвилі.
2. Як утворюється електромагнітна хвиля? Які об'єкти можуть її випромінювати?
3. Доведіть, що електромагнітна хвиля — це поперечна хвиля.
4. Як пов'язані між собою довжина, частота і швидкість поширення електромагнітної хвилі?
5. Як енергія електромагнітної хвилі залежить від її частоти?
6. Опишіть будову пристроїв, за допомогою яких Г. Герц створював і реєстрував електромагнітні хвилі.
7. Які властивості електромагнітних хвиль було встановлено в ході дослідів Г. Герца? Опишіть ці досліди.



Вправа № 22

1. У яких випадках рухома заряджена частинка випромінює електромагнітну хвилю?
 - а) Частинка рухається рівномірно прямолінійно.
 - б) Частинка різко гальмує, зіткнувшись із перешкодою.
 - в) Частинка рухається рівномірно по колу в магнітному полі.
 - г) Частинка набирає швидкості під дією електричного поля.
2. Заповніть таблицю, вважаючи, що хвилі поширюються у вакуумі.

Джерело хвилі	Довжина хвилі	Частота хвилі	Швидкість хвилі
Лінія електропередачі		50 Гц	
Великий Вибух (реліктове випромінювання)	1,9 мм		
Ультрафіолетова лампа бактерицидної установки	264 нм		

3. Під час переходу електромагнітної хвилі з вакууму в середовище довжина хвилі зменшилась у 3 рази. У скільки разів і як змінилась швидкість поширення хвилі?

4. Скориставшись рис. 22.2, зазначте на рис. 1 напрямки векторів $\vec{E}$, $\vec{B}$ і $\vec{v}$ електромагнітної хвилі, яких бракує. *Підказка:* спрямуйте великий палець правої руки за напрямком поширення хвилі (напрямком вектора $\vec{v}$), тоді чотири зігнуті пальці вкажуть напрямок від вектора $\vec{E}$ до вектора $\vec{B}$.

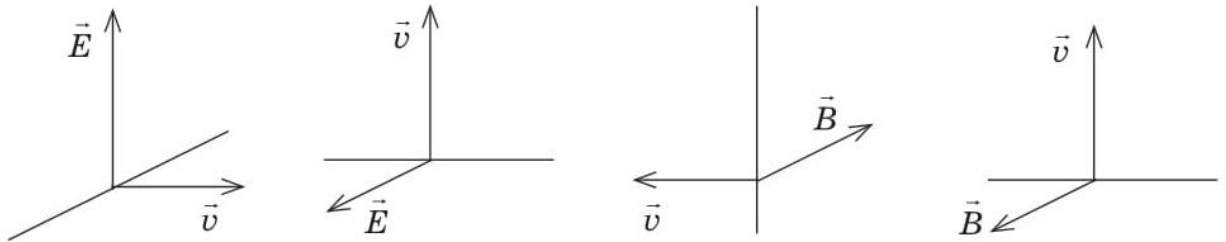


Рис. 1

5. Сигнал радіолокатора повернувся від об'єкта через 30 мкс після відправлення. На якій відстані від радіолокаційної установки розташований об'єкт?
6. Скільки коливань відбудеться в електромагнітній хвилі довжиною 20 мм за час, що дорівнює періоду звукових коливань частотою 100 Гц? Вважайте, що електромагнітна хвиля поширюється у вакуумі.
7. Коли над будинком пролітає літак, на екранах телевізорів інколи виникає подвійне зображення. Чому?
8. Під час яких природних явищ випромінюються електромагнітні хвилі? Обґрунтуйте свою відповідь.
9. Відбиває чи заломлює електромагнітні хвилі поверхня Землі? Обґрунтуйте свою відповідь. Які факти доводять вашу думку?
10. Дізнайтесь, чому провідні тіла відбивають і поглинають електромагнітні хвилі.
11. Зараз астрономи у своїх спостереженнях дедалі ширше використовують *радіотелескопи* – астрономічні інструменти для прийому і дослідження електромагнітних хвиль радіодіапазону (рис. 2). Якщо оптичні телескопи уловлюють видиме світло, ультрафіолетове й інфрачервоне випромінювання, то радіотелескопи приймають і записують невидимі оком радіохвилі, які випромінюють планети, зорі, туманності тощо. Найбільший у світі радіотелескоп — УТР-2, розташований на Харківщині (рис. 3). Він працює в декаметровому діапазоні, і за його допомогою українські астрономи «слухають» шум Всесвіту. Дізнайтесь, які відкриття в астрономії відбулися саме завдяки радіотелескопам.



Рис. 2



Рис. 3

ПРОФЕСІЇ МАЙБУТНЬОГО

Будівельник розумних будинків



На Енциклопедичній сторінці наприкінці розділу II ви можете прочитати про звичайне житло майбутнього — розумний дім. Будувати такі оселі будуть фахівці, які мають глибокі знання термо- та електродинаміки, програмування, електроніки. Елементи цього будинку друкуватимуть на 3D-принтерах, оператори яких — це фахівці в програмуванні. Тож будівельник розумних будинків — це, безумовно, професія майбутнього.