Індивідуальне заняття № 4і (D1)

Тема: Електромагнітні хвилі. Властивості електромагнітних хвиль

Мета заняття:

- **Навчальна:** вивчити фізичну сутність електромагнітної хвилі як процесу поширення змінного електромагнітного поля у просторі, засвоїти гіпотезу Д. Максвелла та досліди Г. Герца, вивчити фундаментальні властивості електромагнітних хвиль (поперечність, швидкість поширення у вакуумі та середовищі, відбивання, заломлення, інтерференцію, дифракцію, поляризацію), формулу зв'язку довжини, частоти та швидкості хвилі, а також поняття густини енергії та тиску хвилі.
- **Розвивальна:** розвивати аналітичне, причинно-наслідкове та просторове мислення, вміння будувати та інтерпретувати векторні діаграми коливань векторів напруженості електричного поля E та магнітної індукції B, розраховувати параметри бездротових сигналів передачі даних.
- **Виховна:** формувати науковий світогляд, екологічну культуру, розуміння практичного значення електромагнітного випромінювання в сучасних цифрових технологіях, супутниковому зв'язку, радіотелекомунікаціях, обліково-аналітичних та банківських системах.

Література: Бар’яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О. Фізика (рівень стандарту): підруч. для 11 кл. закл. загал. серед. освіти. Харків: Вид-во «Ранок», 2019. § 22, с. 122–126.

Ключові компетентності:

- **Обов'язкові:**
  - Предметна компетентність у галузі природничих наук, техніки і технологій: розуміння фізичних механізмів випромінювання та поширення електромагнітних хвиль, їх взаємодії з речовиною та принципів радіозв'язку.
  - Математична компетентність: застосування співвідношень між довжиною хвилі, частотою та швидкістю ($\upsilon = \lambda \cdot \nu$), тригонометричних рівнянь синусоїдальної хвилі та розрахунку часу затримки сигналу.
  - Навчання впродовж життя: навички самостійного опрацювання наукової літератури, систематизації інформації та використання графічних моделей хвиль.
- **Варіативні (за контекстом заняття):**
  - Підприємливість та фінансова грамотність (спеціальність D1 «Облік і оподаткування»): оцінка економічної ефективності використання бездротових технологій передачі даних (Wi-Fi 6, 4G/5G, супутниковий зв'язок Starlink), розрахунок часу затримки при обміні даними між філіями підприємства, калькуляція витрат на побудову мережевої інфраструктури та аналіз ризиків втрати даних через радіозавади чи згасання сигналу.

Актуалізація опорних знань:

1. Тестове завдання: Хто з учених теоретично передбачив існування електромагнітних хвиль у 1873 році? а) Майкл Фарадей. б) Джеймс Клерк Максвелл. в) Генріх Герц. г) Олександер Попов.

   Ключ / Відповідь: **б)**. Д. Максвелл математично довів, що змінне електричне поле створює змінне магнітне поле, і навпаки, що приводить до виникнення електромагнітної хвилі.

2. Експрес-запитання: За якої умови рухома заряджена частинка випромінює електромагнітну хвилю?

   Ключ / Відповідь: Електромагнітна хвиля випромінюється зарядженою частинкою **тільки тоді, коли вона рухається з прискоренням** (наприклад, здійснює коливання, гальмує або рухається по колу). При рівномірному прямолінійному русі випромінювання відсутнє.

3. Тестове завдання: Чому дорівнює швидкість поширення будь-яких електромагнітних хвиль у вакуумі? а) 340 м/с. б) $3 \cdot 10^5$ м/с. в) $3 \cdot 10^8$ м/с. г) Нескінченно великій величині.

   Ключ / Відповідь: **в)**. У вакуумі всі електромагнітні хвилі поширюються з однаковою швидкістю $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (швидкість світла).

4. Експрес-запитання: Як змінюються частота та довжина електромагнітної хвилі під час її переходу з вакууму в прозорий діелектрик?

   Ключ / Відповідь: **Частота хвилі ν залишається незмінною**, а **довжина хвилі λ зменшується** у n разів (де n — абсолютний показник заломлення середовища), оскільки зменшується швидкість поширення хвилі ($\upsilon = c / n$).

Мотивація навчальної діяльності:

Професійно-орієнтований кейс для фахівця з обліку й оподаткування (D1): Агрохолдинг із центральним офісом у Дніпрі підключає видалений зерновий термінал до єдиної хмарної системи обліку 1С/BAS. Для зв'язку використовуються два бездротові канали:

1. Основний канал Wi-Fi 5 ГГц: частота $\nu_1 = 5{,}2$ ГГц ($5{,}2 \cdot 10^9$ Гц), довжина траси $l_1 = 15$ км.
2. Резервний супутниковий канал Starlink: частота $\nu_2 = 12$ ГГц ($1{,}2 \cdot 10^{10}$ Гц), геостаціонарна/низькоорбітальна відстань ретрансляції $l_2 = 600$ км (туди й назад). Під час проведення фінансового аудиту кошторису ІТ-департаменту бухгалтер виявив пункт про закупівлю додаткового бездротового мосту вартістю 42 000 грн через скарги операторів на «затримку відгуку системи». Бухгалтеру-аналітику необхідно:

3. Обчислити довжину електромагнітної хвилі λ_1 та λ_2 для обох частотних діапазонів у повітрі (вважати $c = 3 \cdot 10^8$ м/с).
4. Розрахувати теоретичний час затримки поширення сигналу t_1 та t_2 для обох каналів зв'язку.
5. Обґрунтувати фінансову доцільність інвестиції 42 000 грн: чи є затримка наслідком фізичної швидкості світла, чи проблема полягає в недостатній пропускній здатності обладнання? Аналіз цього кейсу доводить, що фахівець з обліку повинен розуміти фізичні властивості та швидкість поширення електромагнітних хвиль для обґрунтованої оцінки ІТ-кошторисів, договорів зв'язку та проектів автоматизації.

Короткий конспект (тези) лекції:

1. Теоретичні основи випромінювання та поширення електромагнітних хвиль

Гіпотеза Д. Максвелла (1865–1873 рр.): Змінне магнітне поле створює у просторі вихрове електричне поле, а змінне електричне поле створює вихрове магнітне поле. Оскільки джерела цих полів взаємопов'язані, виникає єдиний процес поширення коливань електромагнітного поля у просторі — **електромагнітна хвиля (ЕМХ)**.

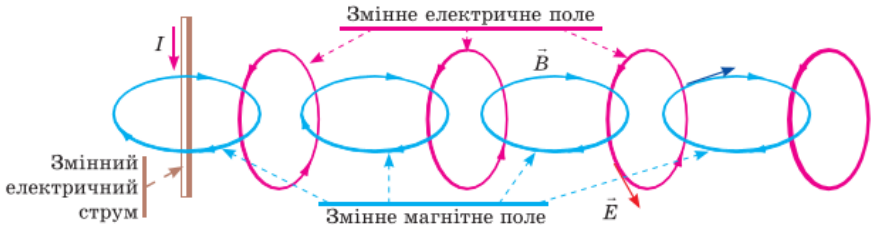


Рис. 22.3. Схематичне зображення механізму поширення електромагнітної хвилі

Умови випромінювання ЕМХ: Електромагнітні хвилі випромінюються тільки **прискорено рухомими електричними зарядами**. Чим більшим є прискорення частинки a, тим більшою є інтенсивність випромінювання.

Джерелами ЕМХ є: відкриті коливальні контури (вібратори Герца), антени радіопередавачів, прискорені електрони в атомах та молекулах.

Досліди Г. Герца (1888 р.): Німецький фізик Генріх Герц експериментально одержав та зареєстрував електромагнітні хвилі за допомогою відкритого коливального контуру (вібратора Герца) та резонатора, підтвердивши теорію Максвелла.

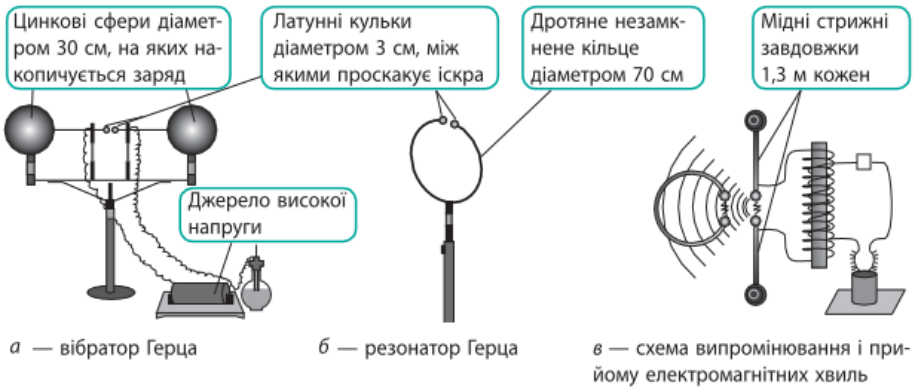


Рис. 22.5. Схема досліду Герца з одержання та реєстрації електромагнітних хвиль

2. Властивості та фундаментальні характеристики електромагнітних хвиль

Поперечність електромагнітної хвилі: Вектор напруженості електричного поля E, вектор магнітної індукції B та вектор швидкості поширення хвилі v є взаємно перпендикулярними:

$E \perp B, E \perp \upsilon, B \perp \upsilon$

Вектори E та B коливаються в однаковій фазі(одночаснодосягають максимумів та нулів).

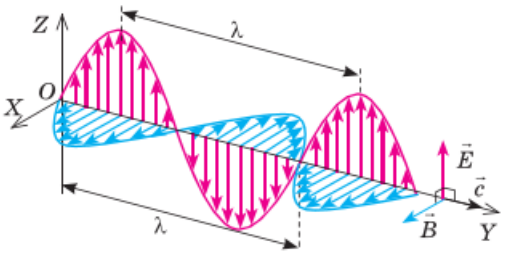


Рис. 22.4. Періодичні зміни вектора напруженості $\vec{E}$ електричного поля і вектора магнітної індукції $\vec{B}$ магнітного поля під час поширення електромагнітної хвилі в напрямку осі OY

Швидкість поширення хвилі: У вакуумі швидкість є абсолютною константою для всього спектра: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. У речовині швидкість поширення υ менша за c і визначається діелектричною epsilon та магнітною mu проникностями середовища: $\upsilon = c / \sqrt{(\varepsilon \cdot \mu)} = c / n$ де n — абсолютний показник заломлення середовища.

Формула хвилі: Швидкість поширення v, довжина хвилі λ та частота ν пов'язані співвідношенням: $\upsilon = \lambda \cdot \nu$

Для вакууму: $c = \lambda \cdot \nu \Rightarrow \lambda = c / \nu$

Хвильові явища (підтверджені дослідами Герца):

- Відбивання ЕМХ: відбуваються від провідних поверхонь за законом: кут відбивання дорівнює куту падіння ($\beta = \alpha$).
- Заломлення ЕМХ: відбуваються на межі поділу двох діелектриків за законом Снелліуса: $\sin \alpha / \sin \gamma = n_{21} = \upsilon_1 / \upsilon_2 = n_2 / n_1$
- Інтерференція ЕМХ: додавання когерентних хвиль, при якому виникає перерозподіл енергії (максимуми та мінімуми).
- Дифракція ЕМХ: обгинання хвилями перешкод, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі λ.
- Поляризація ЕМХ: впорядкованість коливань вектора E у певній площині (доводить поперечність хвилі).

3. Енергетичні характеристики та шкала електромагнітних хвиль *

Густина енергії електромагнітної хвилі (w): Електромагнітна хвиля переносить енергію, яка складається з енергії електричного w_e та магнітного w_m полів:

$w = w_e + w_m = (\varepsilon_0 \cdot E^2) / 2 + (B^2) / (2 \cdot \mu_0)$

Густина потоку випромінювання (інтенсивність I): Енергія, яка переноситься хвилею за одиницю часу через одиничну площу, перпендикулярну до напрямку поширення:

$I = w \cdot \upsilon$. Інтенсивність пропорційна четвертому степеню частоти: $I \sim \nu^4$.

Тиск електромагнітної хвилі: Відбиваючись або поглинаючись поверхнею, ЕМХ чинить тиск, що доводить наявність в електромагнітного поля **імпульсу** $p = W / c$.

Загальна шкала електромагнітних хвиль: Усі види випромінювання мають єдину фізичну природу і відрізняються частотою ν та довжиною хвилі λ:

1. Радіохвилі: $\lambda > 10^{-4}$ м (наддовгі, довгі, середні, короткі, ультракороткі / мікрохвилі).
2. Інфрачервоне випромінювання (ІЧ): 10^{-4} м > λ > 780 нм.
3. Видиме світло: 780 нм (червоне) – 380 нм (фіолетове).
4. Ультрафіолетове випромінювання (УФ): 380 нм > λ > 10 нм.
5. Рентгенівське випромінювання: 10 нм > λ > 10^-3 нм.
6. Гамма-випромінювання (γ): λ < 10^-3 нм.

4. Приклад розрахунково-економічної задачі (професійний кейс для фахівця з обліку D1)
Умова задачі: Агрохолдинг тестує два бездротові канали зв'язку між центральним сервером і зерновим терміналом:

1. Канал №1 (Wi-Fi 5 ГГц): $\nu_1 = 5{,}2$ ГГц $= 5{,}2 \cdot 10^9$ Гц, відстань траси $l_1 = 15$ км $= 15\,000$ м. Сигнал йде в повітрі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).
2. Канал №2 (Супутниковий Starlink): $\nu_2 = 12$ ГГц $= 1{,}2 \cdot 10^{10}$ Гц, загальна відстань траси (до супутника й назад) $l_2 = 600$ км $= 600\,000$ м. Завдання аудитора: а) Обчислити довжини хвиль λ_1 та λ_2. б) Обчислити фізичний час затримки поширення сигналу t_1 та t_2 для обох каналів. в) Оцінити доцільність купівлі мережевого обладнання вартістю С = 42 000 грн.

Розв'язання:

Обчислення довжини хвилі: для Каналу №1 (Wi-Fi 5,2 ГГц):

$\lambda_1 = c / \nu_1 = (3 \cdot 10^8) / (5{,}2 \cdot 10^9) = 3 / 52 \approx 0{,}0577$ м = 5,77 см

Для Каналу №2 (Starlink 12 ГГц): $\lambda_2 = c / \nu_2 = (3 \cdot 10^8) / (1{,}2 \cdot 10^{10}) = 3 / 120 = 0{,}025$ м = 2,5 см

Обчислення часу затримки поширення ЕМХ: час поширення для Каналу №1 (Wi-Fi 15 км):
$t_1 = l_1 / c = 15\,000 / (3 \cdot 10^8) = 1{,}5 \cdot 10^4 / (3 \cdot 10^8) = 0{,}5 \cdot 10^{-4}$ с = 0,00005 с = 0,05 мс

Час поширення для Каналу №2 (Starlink 600 км):
$t_2 = l_2 / c = 600\,000 / (3 \cdot 10^8) = 6 \cdot 10^5 / (3 \cdot 10^8) = 2 \cdot 10^{-3}$ с = 0,002 с = 2 мс

Економічний та фізичний висновок аудитора: Фізична затримка поширення радіохвилі на відстань 15 км становить всього $t_1 = 0{,}05$ мс (мікросекунди), а через супутник — 2 мс. Якщо оператори скаржаться на затримку системного відгуку в 3–5 секунд (3000–5000 мс), вона

зумовлена не швидкістю світла чи довжиною хвилі, а недостатньою оперативною пам'яттю сервера або застарілими маршрутизаторами (пропускною здатністю). Рекомендація аудитора: Замість купівлі нової зовнішньої антени за 42 000 грн доцільніше спрямувати 15 000 грн на модернізацію оперативної пам'яті сервера 1С/BAS, зберігши 27 000 грн бюджету підприємства.

Нотатка для здобувача освіти:

Обов'язковий конспект (тези) за результатами даного індивідуального заняття повинен містити:

1. Занотовані номер, тему, та дату виконання індивідуального заняття.
2. Короткий конспект (тези) заняття (визначення електромагнітної хвилі, умови її випромінювання та опис дослідів Г. Герца; умови поперечності хвилі $E \perp B \perp \upsilon$, формулу швидкості у вакуумі $c = 3 \cdot 10^8$ м/с та середовищі $\upsilon = c / n$; формулу хвилі $\upsilon = \lambda \cdot \nu$, $c = \lambda \cdot \nu$ та опис 5 основних хвильових явищ (відбивання, заломлення, інтерференція, дифракція, поляризація)).
3. Повний розв'язок прикладу розрахунково-економічної задачі з лекційного блоку.
4. Письмові відповіді на 4 запитання з блоку «Підведення підсумків та рефлексія».

Підведення підсумків та рефлексія:

1. Що називають електромагнітною хвилею та за яких умов рухомий електричний заряд випромінює таку хвилю?
2. Якими є фундаментальні властивості електромагнітних хвиль та якими формулами пов'язані їх швидкість, довжина та частота?
3. Чому поляризація світла є беззаперечним доказом поперечності електромагнітних хвиль?
4. Як знання фізичних властивостей бездротових сигналів допомагає фахівцеві з обліку оцінювати обґрунтованість ІТ-кошторисів та оптимізувати витрати на цифровізацію підприємства?

Критерії оцінювання теоретичних знань:

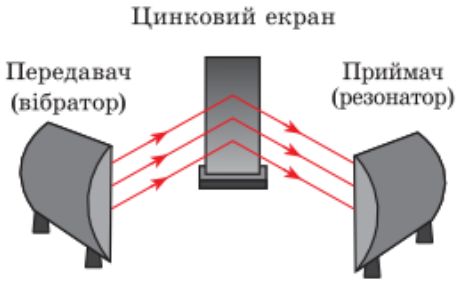
Бал	Рівень	Критерії оцінювання навчальних досягнень здобувача освіти
1	Початковий	Здобувач освіти розпізнає поняття електромагнітної хвилі на рівні «так / ні», з допомогою викладача згадує значення швидкості світла ($3 \cdot 10^8$ м/с).
2	Початковий	Називає прості поняття (радіохвиля, світло), за допомогою викладача відтворює окремі фрагменти матеріалу без пояснень.
3	Початковий	За допомогою викладача записує базові позначення величин (c, λ, ν, E, B), розрізняє механічні та електромагнітні хвилі.
4	Середній	Відтворює значну частину теоретичного матеріалу (поперечність хвилі, досліди Герца), але допускає помилки у формулах.
5	Середній	Знає формули $c = \lambda \cdot \nu$ та $\upsilon = c / n$, одиниці вимірювання, називає основні властивості хвиль (відбивання, заломлення).

6	Середній	Самостійно відтворює навчальний матеріал, пояснює умови випромінювання ЕМХ, але має утруднення у розрахунку часу затримки сигналу.
7	Достатній	Пояснює фізичну сутність ЕМХ, вільно застосовує формули зв'язку довжини та частоти хвилі, виправляє поодинокі власні неточності.
8	Достатній	Повно викладає теорію, вміє описувати явища інтерференції, дифракції та поляризації, аналізувати зміну параметрів хвилі в діелектриках.
9	Достатній	Вільно володіє вивченим матеріалом, наводить прикладні приклади (Wi-Fi, 4G/5G, Starlink, RFID), розраховує параметри сигналів у стандартних ситуаціях.
10	Високий	Досконало володіє теоретичним матеріалом, вільно оперує векторними співвідношеннями (E ⊥ B ⊥ υ), густиною енергії та інтенсивністю випромінювання.
11	Високий	Самостійно аналізує та розв'язує комплексні професійно-орієнтовані кейси (розрахунок фізичних затримок сигналу, обґрунтування доцільності закупівлі мережевого обладнання для D1), володіє математичним апаратом.
12	Високий	Демонструє системний науково-прикладний підхід, виявляє дослідницькі здібності, проводить глибокий фізико-економічний аналіз телекомунікаційних витрат підприємства, розробляє власні алгоритми оптимізації.

** Додаткова інформація*

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

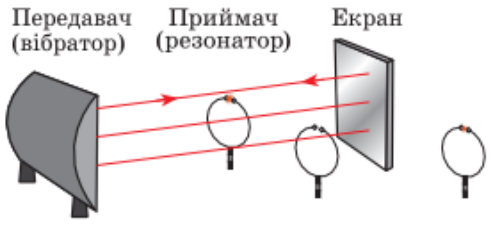
Електромагніті хвилі **відбиваються від провідних предметів.**
На стіні лабораторії Г. Герц закріпив цинковий екран розміром 4×2 м. За допомогою вібратора і параболічного дзеркала, виготовленого з ліста заліза розміром 2×1,5 м, створив пучок електромагнітних хвиль і спрямував їх під кутом до екрана.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



Електромагніті 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*».