

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ**

Кафедра інформаційних технологій факультету №4

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни Фізика обов'язкової компоненти
освітньої програми першого рівня вищої освіти

125 Кібербезпека (безпека інформаційних та комунікаційних систем)

за темою – (Електромагнітні хвилі)

Харків 2018

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від _____ № _____

СХВАЛЕНО

Вченою радою факультету № 4
Протокол від _____ № _____

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від _____ № _____

Розглянуто на засіданні кафедри інформаційних технологій
протокол від _____ № _____

Розробники:

1. доцент кафедри, кандидат технічних наук Світличний В.А.

Рецензенти:

1. доцент кафедри кібербезпеки факультету №4 ХНУВС, к.т.н., доцент Носов В.В.,
2. професор кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів ХНУРЕ, к.т.н., доцент Хорошайло Ю.С.

План лекції

1. Вступ.
2. Рівняння електромагнітної хвилі. Енергія та імпульс електромагнітної хвилі. Випромінювання електромагнітних хвиль. Шкала електромагнітних хвиль. Застосування та властивості радіохвиль.
3. Висновки.

Основна література

1. Трофимова Т.И. Курс физики – М.: "Высшая школа", 1999.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том. 3. Электричество – М.: Высшая школа", 1979, 703 с.
3. Бланк А.Я. Физика. – Харьков, "Каравелла", 1996.
4. Лопатинський Є.І., Зачек І.Р., Лільчук Г.А., Романишин Б.М. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2005. 394 с.

Додаткова література:

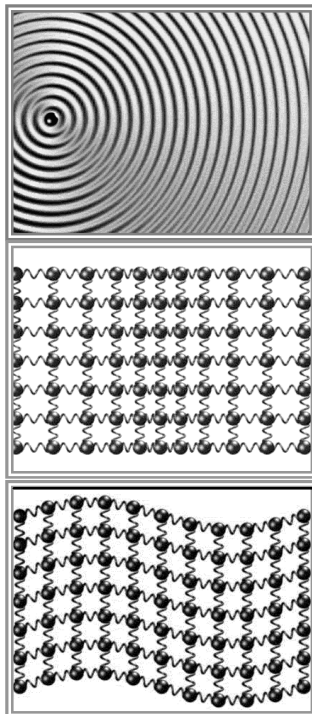
1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики \в 3-х томах\ - Киев, "Дніпро", 1994.
2. Савельев И.В. Курс физики \в 3-х томах\ - М: Наука, 1989.
3. Айзензон А.Е. Курс физики – Москва, "Высшая школа", 1996.
4. Детлаф А.А., Яворський В.М. Курс общей физики \ в 3-х томах\ – М.: Высшая школа, 1983.
5. Богацька І.Г., Головка Д.Б., Малярєнко А.А., Ментковський Ю. Л., Загальні основи фізики \ у двох книгах\ – К: Либідь, 1998.
6. Орір Дж. Фізика в 2-х томах. – М: Мир, 1981.
7. Біленко І.І. Фізичний словник. К: Вища школа, 1993.

Текст лекції

1. Вступ.

Мета лекції полягає в ознайомленні курсантів з такими фізичними поняттями і явищами як: рівняння електромагнітної хвилі; енергія та імпульс електромагнітної хвилі; випромінювання електромагнітних хвиль; шкала електромагнітних хвиль; застосування та властивості радіохвиль.

2. Рівняння електромагнітної хвилі. Енергія та імпульс електромагнітної хвилі. Шкала електромагнітних хвиль Випромінювання електромагнітних хвиль. Застосування та властивості радіохвиль



2.1. Рівняння електромагнітної хвилі. Енергія та імпульс електромагнітної хвилі.

Хвилю у фізиці розглядають як періодичний у часі та просторі процес розповсюдження деякого збурення (наприклад, коливань) від точки до точки. Розповсюдження хвиль супроводжується характерними для хвильових процесів явищами: відбиттям, заломленням, інтерференцією, дифракцією, дисперсією, тощо.

Хвильове збурення завжди є періодичною функцією (рис. 1) просторових координат точки та часу:

$$\xi = \xi(\vec{r}, t) = \xi(x, y, z, t) \quad (1)$$

Всі точки, для яких в один і той самий момент часу ($t = t_0$) величина збурення $\xi(\vec{r}, t)$ має однакове значення $\xi(\vec{r}, t) = \xi_0 = const$, лежать на одній поверхні, яку називають хвильовою поверхнею.

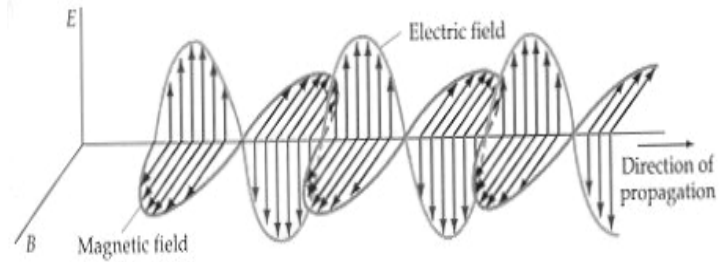
Розрізняють два головних типи хвиль:

Поздовжні хвилі — напрям коливань величини $\xi(\vec{r}, t)$ співпадає з напрямом розповсюдження хвилі \vec{k}

Поперечні хвилі — напрям коливань $\xi(\vec{r}, t)$ нормальний до хвильового вектора \vec{k}

Відомо, що змінне вихрове магнітне поле породжує таке саме вихрове електричне поле, яке своєю чергою, породжує змінне, вихрове магнітне поле і так далі. Процес розповсюдження коливань електромагнітного поля у просторі називатимемо надалі електромагнітною хвилею. Електромагнітні хвилі можуть розповсюджуватися як у середовищах, так і у вакуумі, оскільки там можуть існувати змінні електромагнітні поля. Електромагнітні хвилі — типовий приклад поперечних хвиль: вектори напруженості магнітного поля $\vec{H}(\vec{r}, t)$, напруженості електричного поля $\vec{E}(\vec{r}, t)$, та вектор напрямку розповсюдження хвилі \vec{k} складають правоовинтову трійку векторів. Звичайно для характеристики електромагнітної хвилі обирають напруженість її змінного, вихрового електричного поля, тобто $\xi(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t)$, пам'ятаючи, що вектор $\vec{H}(\vec{r}, t)$ коливається синхронно до вектору $\xi(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t)$, але у нормальному до нього напрямі.

Особливості хвильового руху залежать від окремих, частинних різновидів цього явища і від властивостей середовища, де відбувається хвильовий рух. Проте, поміж характеристикою коливань $\xi(\vec{r}, t)$ тобто поміж просторовими та часовими змінами цієї функції з одного боку та властивостями середовища з іншого боку існує дуже загальний зв'язок у вигляді диференціального рівняння (так званого хвильового рівняння). Хвильове рівняння грає в теорії розповсюдження хвиль таку ж важливу роль як ньютоніві рівняння руху для матеріальних частинок у механіці.



Для незгасаючої хвилі, яка рухається у напрямку однієї з координатних осей, (припустимо, осі Ox) **хвильове рівняння** виглядає так:

$$\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2} = (v^2) \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

де v - швидкість (точніше так звана фазова швидкість) розповсюдження хвилі уздовж обраного напрямку. Розв'язком одновимірного хвильового рівняння є будь-яка функція f аргументу $x - vt$:

$$\xi(x, t) = f(x - vt) \quad (3)$$

якою б не була функція в правій частині (23.3) вона задовольняє рівнянню (23.2).

Для більш загального випадку тривимірного незгасаючого хвильового руху у просторі хвильове рівняння має складніший вигляд:

$$\frac{\partial^2 \xi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = v^2 \left(\frac{\partial^2 \xi(\vec{r}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi(\vec{r}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi(\vec{r}, t)}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

рішенням якого є довільна функція f векторного аргументу $\vec{r} - \vec{v}t$:

$$\xi(\vec{r}, t) = f(\vec{r} - \vec{v}t) \quad (5)$$

Для електромагнітних хвиль, зрозуміло, всюди треба покласти, що $\xi(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t)$.

Якщо хвильові поверхні ЕМХ є необмеженими паралельними площинами, то такі хвилі називають плоскими хвилями. Якщо хвильові поверхні є концентричними сферами – хвилі мають назву сферичних. Зрозуміло також, що можуть існувати хвилі з іншими хвильовими поверхнями: еліптичними, циліндричними, тощо. Форма хвильової поверхні, вочевидь, залежить від конкретного вигляду функції f в правій частині рішень хвильового рівняння. Зокрема, якщо це гармонічна функція (типу синуса, або косинуса), то вона описує гармонічну електромагнітну хвилю. Припустимо, що в точці $x = 0$ відбуваються коливання електромагнітного поля, причому вектор вихрового електричного поля змінюється за гармонічним законом в цій точці:

$$\vec{E}(0, t) = \vec{E}_m \cos(\omega t) \quad (6)$$

тоді в довільній точці x коливання відбуваються з такою ж частотою ω , але з певним запізненням за часом

$\tau = \frac{x}{v}$ (отже, й за фазою на $\omega\tau$):

$$\vec{E}(0, t) = \vec{E}_m \cos(\omega(t - \frac{x}{v})) = \vec{E}_m \cos(\omega t - \frac{\omega x}{v}) = \vec{E}_m \cos(\omega t - kx) \quad (7)$$

тут ми позначили через

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

модуль хвильового вектора, а через $\lambda = vT$ - відстань, яку хвиля проходить за період коливань (так звану довжину хвилі).

Для тривимірного випадку і з урахуванням того, що початкова фаза хвилі не завжди є нульовою, рівняння хвилі можна переписати у вигляді:

$$\vec{E}(0, t) = \vec{E}_m \cos(\omega t - (\vec{k}, \vec{r}) + \varphi_0) \quad (9)$$

Косинус є періодичною (з основним періодом 2π) функцією, причому для обох змінних (часу та координати) від яких залежить фаза хвилі:

$$\varphi(x, t) + 2\pi = \varphi(x + \lambda, t) = \varphi(x, t + T) \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} k\lambda &= 2\pi \\ \omega T &= 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Перше з цих рівнянь співпадає з (23.8), а з другим ви знайомі ще з теорії коливань. Їх зміст у тому, що період хвилі у часі дорівнює T , а у просторі - λ .

2.2. Шкала електромагнітних хвиль

Електромагнітні хвилі займають надзвичайно широкий діапазон частот та довжин хвиль поміж котрими існує обернений зв'язок, що впливає з (23.11):

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} = 2\pi\nu \quad (12)$$

де c - швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі.

Низькочастотна (довгохвильова) частина діапазону ЕМ-хвиль. Простягається у межах частот від одиниць герц (10^0) до 10^{10} Гц, що відповідає довжинам хвиль від 10^8 до 10^{-2} метра. Ця частина діапазону зайнята електромагнітними хвилями, які випромінюються змінними струмами (наприклад, струмами електричних мереж, де частота 50 Гц), дуже довгими хвилями частоти $10^2 - 10^3$ Гц ($\lambda \sim 10^6$ м.), на яких здійснюється зв'язок з підводними човнами, нарешті звичайними радіохвилями. Радіохвилі займають широкий діапазон частот, який прийнято ділити наступним чином:

- Довгі хвилі (ДХ): 150-408 КГц;
- Середні хвилі (СХ): 525-1605 КГц;
- Короткі хвилі (КХ): 3.95-26 МГц
- Ультракороткі хвилі (УКХ): 66-108 МГц

Вище за частотами простягається *теледіапазон* (частоти $10^8 - 10^9$ Гц, що відповідає довжинам хвилі метрового та дециметрового діапазону), який використовується для ефірних телепередач. У цьому ж інтервалі знаходиться стільниковий зв'язок (мобільна телефонія) на частотах 900 МГц.

Ще вище за частотами лежать електромагнітні хвилі, які використовують мікропроцесори, мікрохвильові пічки (частоти порядку 1-3 ГГц) та супутникове телебачення та зв'язок (10-15 ГГц). Приблизно у цьому ж діапазоні знаходяться частоти електромагнітного випромінювання молекул та атомів, які збуджені тепловим рухом, або електричними полями.

Оптична частина діапазону ЕМ-хвиль. Вона простягається умовно від частот 10^{12} Гц, що відповідає довжинам хвиль порядку 10^{-4} м, до частот приблизно у 10^{16} Гц (довжини хвиль порядку 10^{-8} м.). Оптичний діапазон звичайно поділяють на три нерівні частини:

Інфрачервона область частот (ІЧ-діапазон). Від 10^{12} Гц до приблизно $3 \cdot 10^{14}$ Гц, що відповідає довжинам хвиль від 100 до 1 мкм ($10^{-4} - 10^{-6}$ м.). В цій області лежать теплове випромінювання Землі, теплове випромінювання людського тіла ($\lambda \approx 10$ мкм), в цій області працюють всі прилади нічного бачення.

Видиме світло. Вузький діапазон частот та довжин хвиль, який сприймається людським оком. Довжини хвилі цього діапазону простягаються лише від $0.3 \cdot 10^{-6}$ м, тобто від 0.3 мкм до приблизно 0.9 мкм. Щоправда саме на цей діапазон припадає довжина хвилі, що відповідає максимальній випромінювальній здатності Сонця ($\lambda \approx 0.55$ мкм.)

Ультрафіолетове випромінювання (УФ-діапазон). Лежить у межах приблизно до $2 \cdot 10^{16}$ Гц, що відповідає довжинам хвиль до 10^{-8} м.

Закінчується оптичний діапазон ЕМ-випромінюванням прискорювачів заряджених частинок (циклотронне, синхротронне випромінювання, тощо). Це випромінювання займає досить вузький інтервал частот поміж ультрафіолетовим та рентгенівським.

Рентгенівська частина діапазону ЕМ-хвиль. Ця частина короткохвильового електромагнітного спектру починається з довжин хвиль порядку 10^{-9} м., що відповідає приблизно частотам з 10^{17} Гц і вище. В цьому діапазоні лежать електромагнітні хвилі, які випромінюються рентгенівськими трубками, атомними ядрами, під час радіоактивного розпаду та ядерних реакцій; а також космічними тілами, наприклад, під час вибуху супернових зірок; таке випромінювання приходить з космосу і може бути отримане у потужних прискорювачах заряджених частинок.

Швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у вакуумі та речовині. Показник заломлення

З рівнянь Максвелла випливає, що швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у вакуумі повинна бути пов'язана зі сталими ϵ_0, μ_0 наступним чином:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 2.997 \cdot 10^8 \quad (13)$$

яку у фізиці називають швидкістю світла. Оскільки світло є електромагнітною хвилею певних частот, як це викладено у попередньому параграфі, фізичний зміст такої назви для константи c виявляється доволі прозорим. Фізичний вакуум не має дисперсії – електромагнітні хвилі різної довжини та частоти розповсюджуються в ньому з однаковою швидкістю (4.4.13).

Швидкість світла у середовищі відрізняється від швидкості у вакуумі. Згідно з електромагнітною теорією світла маємо для швидкості у середовищі:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{n} \quad (14)$$

де через n ми позначили величину, яка визначається електричною та магнітною проникливостями середовища, тобто його реакцією на зовнішнє електромагнітне поле:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \geq 1 \quad (15)$$

Безрозмірний показник заломлення n , з одного боку показує відношення швидкості світла у вакуумі до швидкості світла у середовищі, а з іншого — характеризує електромагнітні властивості середовища розповсюдження. Зауважимо, що цей показник точно дорівнює одиниці лише для вакууму, а для реальних середовищ він завжди більший одиниці. Що означає, що швидкість розповсюдження ЕМ-хвиль у середовищах (речовині) завжди менша від швидкості у вакуумі. Реальні середовища демонструють дисперсію: швидкість розповсюдження ЕМ-хвиль, отже, й показник заломлення залежить від їх довжини: $n = n(\lambda)$, на відміну від вакууму.

Еволюція уявлень про природу світла. Поняття про корпускулярно-хвильовий дуалізм

Якщо не згадувати доквантових, корпускулярних теорій світла, прихильниками яких були такі відомі вчені як Ньютон та Ломоносов, то треба визнати, що у класичній фізиці на час її розквіту панувала хвильова теорія світла, яку обстоювали зокрема такі авторитети як Гельмгольц, Гюйгенс, Френель, Юнг та Максвел. Класична електромагнітна теорія світла, яка розглядає світло як електромагнітну хвилю, тобто як можливі рішення рівнянь Максвелла, досить повно та вичерпно окреслює розповсюдження світла у вакуумі, його інтерференцію та дифракцію. Якщо хвильова теорія світла доповнюється електронною теорією речовини, то вона здатна охопити також широкі коло явищ радіофізики, тобто теорії взаємодії світла з речовиною, зокрема: поглинання світла, його розсіяння, відбиття, заломлення, дисперсію.

А втім, придатність хвильової теорії світла у питаннях взаємодії світла з речовиною має певну межу. Наприклад, у явищі фотоефекту спостерігається локалізація обмеженої порції енергії світла на окремому електроні. Така поведінка є несумісною із класично-хвильовою картиною розподілу енергії світлової хвилі у просторі, у той час як у корпускулярній теорії світла, котра трактує світло як потік окремих частинок – фотонів, вона, навпаки, є природною. Адже саме частинка, корпускула, може доставити обмежену дозу (квант) енергії у визначену точку простору. Просторова локалізація кванта енергії випромінювання особливо яскраво виявляється у фотоефекті на окремих атомах, чи молекулах — іншими словами у явищі фотоіонізації атомів (або молекул). Тоді як у класичній електромагнітній хвилі енергія розподілена в просторі безперервно по всій хвильовій поверхні (хвильовому фронтові) і про жодну локалізацію, зосередження енергії у довкіллі певної точки простору (на атомі) не йдеться. Хвильовий та корпускулярний аспект випромінювання пов'язані між собою твердженням про корпускулярно-хвильовий дуалізм світла. Термін дуалізм означає подвійність властивостей, яка поєднує в одному об'єкті несумісні на перший погляд риси. Досліди, які ми аналізуватимемо далі в нашому курсі, переконуватимуть нас у тому, що світло має одночасно риси як класичної електромагнітної хвилі так і потоку частинок-фотонів. Існують переконливі експерименти, в яких світло виявляє хвильові властивості, так само як існують досліди, в яких світло поводить себе як потік квантів (фотонів).

Квантові (корпускулярні) властивості електромагнітного поля, доведені та спостережені експериментально, усвідомлені в межах теорії корпускулярно-хвильового дуалізму, запровадили у фізику уявлення про кванти. Кванти енергії електромагнітного поля, фотони, багато у чому нагадують мікрочастинки (корпускули): зокрема вони мають масу, імпульс, як єдине ціле вони взаємодіють з речовиною та іншими мікрочастинками. У той же самий час ніщо не заперечує і хвильової природи електромагнітного випромінювання, яка проявляється в цілій низці суто хвильових ефектів.

Явища, в яких світло демонструє хвильові властивості	Явища, в яких світло демонструє корпускулярні властивості
✓ інтерференція	✓ фотоефект
✓ дифракція	✓ ефект Комптона
✓ дисперсія	✓ теплове випромінювання
✓ поляризація	✓ тиск світла

Основні види взаємодії електромагнітних хвиль з речовиною. Інтенсивність хвилі, вектор Пойнтінга

Електромагнітна хвиля, яка є процесом розповсюдження коливань електромагнітного поля, повинна безпосередньо взаємодіяти з зарядженими частинками. Зокрема і з тими, які знаходяться в речовині (середовищі). Фізичні процеси при такій взаємодії є досить різноманітними. Проте, їх завжди можна розділити на два типи: процеси взаємодії із збереженням енергії кванта випромінювання і процеси взаємодії із перетворенням енергії кванта.

До першого типу відносять такі процеси як пропускання, відбиття та заломлення світла, обертання площини поляризації, розсіяння, тощо. Такі процеси є предметом вивчення класичної оптики. До другого типу відносять явища поглинання, люмінесценції, фотоефекту, генерації носіїв, екситонів, тощо. При взаємодіях другого типу енергія електрона передається речовині, і в результаті можуть генеруватися різні квазічастинки. Якщо виникаючі при перетворенні енергії кванта частинки є не зарядженими (фонони, фотони, екситони, магнони), то їх відносять до групи 2А. Якщо ж виникають електрони, або дірки, або інші заряджені частинки, такі процеси відносять до групи 2Б.

Явища цієї групи отримали загальну назву фотоелектричних. Процеси другого типу, зокрема, завжди починаються з поглинання кванта енергії випромінювання. Електричне і магнітне поле світлової хвилі залишаються майже сталими (незмінними) на відстанях порядку $\lambda/(2\pi)$, де λ - довжина хвилі. Для світлових хвиль це складає приблизно відстань у 10^{-7} м. В об'ємі з таким характерним розміром - $\Delta V \approx (10^{-7})^3 = 10^{-21}$ м³ - міститься приблизно 10^8 атомів у конденсованому середовищі (тверді тіла, рідини), або приблизно $3 \cdot 10^4$ молекул будь-якого газу при нормальних умовах. Тому в усьому оптичному діапазоні, речовину можна розглядати як суцільне однорідне середовище, нехтуючи його структурною дискретністю. Лише при особливих умовах, наприклад, розповсюдження світла у дуже розрідженому газі, середовище треба розглядати як дискретне. Для рентгенівських променів та γ - випромінювання, із їх надзвичайно малою довжиною хвилі, навіть конденсовані середовища не можна розглядати як суцільні та однорідні.

Вивчення взаємодії світла з зарядженими частинками речовини полегшується, якщо урахувати відносно невеликі швидкості руху таких частинок: $v \ll c$. Тому сила Лоренца, яка діє на заряджені

частинки з боку магнітного поля світлової хвилі, є пропорційною до відношенню $\frac{v}{c} \ll 1$, тому вона є малою порівняно із силою Кулона, яка діє на заряди речовини з боку електричного поля хвилі.

Нарешті внутрішні електричні поля, існуючі в атомах та молекулах та зумовлені зарядами ядер і електронів, значно сильніші за електричне поле світлової хвилі. Тому у звичайних умовах світлове випромінювання лише незначно збурює стан електронів (або іонів) у речовині. Виключення з цього правила треба робити хіба що для концентрованого лазерного випромінювання високої інтенсивності.

Інтенсивністю електромагнітної хвилі ми називатимемо кількість енергії, яку вона переносить в одиницю часу через одиницю площі хвильової поверхні у напрямі нормальному до цієї поверхні. Таке визначення передбачає векторний характер величини інтенсивності, цей вектор у теорії електромагнітних хвиль отримав назву вектора Пойнтинга.

Для модуля вектора Пойнтинга (інтенсивності) можна записати наступний вираз:

$$J = \frac{d^2 W}{dS dt} = \frac{dN}{dS} \quad (16)$$

де W - енергія електромагнітних коливань, яку переносить хвиля, dS - елемент площі хвильової поверхні (поверхня всі точки якої мають однакову фазу коливань), dt - інтервал часу. З огляду на те, що $\frac{dW}{dt} = N$ -

потужність випромінювання, інтенсивність хвилі можна визначати також як потужність, яку хвиля переносить крізь одиницю хвильової поверхні. Розмірність інтенсивності: $[J] = \text{Вт/м}^2$.

Щодо напрямку вектора Пойнтинга можна зауважити, що енергія електромагнітного поля переноситься в напрямі розповсюдження хвилі, тобто у напрямі хвильового вектору \vec{k} : отже, $\vec{J} \parallel \vec{k}$ - вектор Пойнтинга та хвильовий вектор збігаються за напрямом. З іншого боку, ми знаємо, що вектор \vec{k} є нормальним до векторів напруженостей магнітного та електричного поля: $\vec{k} \perp (\vec{E}, \vec{H})$. Отже, нормальним є до цієї пари векторів також і вектор Пойнтинга \vec{J} . Більше того, виходячи з розмірностей вектора Пойнтинга (Вт/м^2), та векторів \vec{E} , \vec{H} (В/м та А/м) можна записати наступне співвідношення поміж ними:

$$\vec{J} = [\vec{E} \times \vec{H}] \quad (17)$$

Інтенсивність хвилі повинна бути прямо пропорційною до густини енергії електромагнітного поля: $J \sim w$. Неважко збагнути, що коефіцієнтом пропорційності повинен бути вектор швидкості електромагнітної хвилі \vec{v} , іншими словами:

$$\vec{J} = w \vec{v} \quad (18)$$

Рівняння (23.18) має назву рівняння Умова-Пойнтинга.

Хвильові поверхні, хвильовий фронт, система променів

Хвильова поверхня – поверхня, всі точки якої мають однакову фазу коливань. Зокрема для електромагнітної хвилі така поверхня визначається з рівняння:

$$\omega t - (\vec{k}, \vec{r}) = \text{const} \quad (19)$$

де \vec{r} - вектор, який задає положення точки на хвильовій поверхні, \vec{k} - хвильовий вектор, який показує напрям розповсюдження хвилі і модуль якого обернено пропорційний її довжині ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$).

Ліва частина (23.19) явно залежить від часу (через складову ωt), тоді як права частина мусить бути константою, незмінною в часі величиною. Оскільки $\vec{k} = \text{const}$ в тому розумінні, що напрям хвилі є незмінним в часі, то з цього випливає висновок, що величина $\vec{r} = \vec{r}(t)$. Це означає, що хвильова поверхня не може перебувати на місці, вона безперервно рухається. Радіус-вектори всіх точок, безперервно змінюються в часі, хвильова поверхня пересувається в просторі з часом. Диференціюючи за часом, отримуємо рівняння:

$$\left(\vec{k}, \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = \omega \quad (20)$$

Приймаючи до уваги, що $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$, та \vec{k} однаково спрямовані вектори (хвильова поверхня може рухатися лише у напрямі хвилі), маємо:

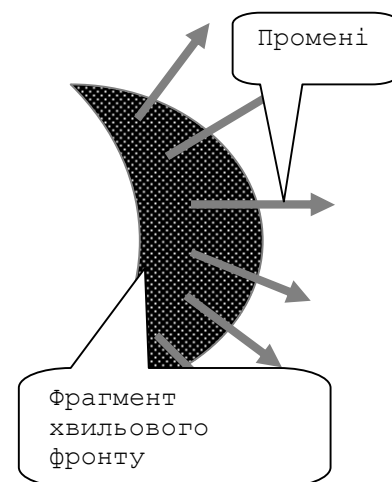
$$kv = \frac{2\pi v}{\lambda} = \omega \quad (21)$$

$$\text{звідки випливає, що } v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (22)$$

іншими словами, хвильова поверхня за період коливань пересувається на відстань рівну довжині хвилі, отже, рухається із швидкістю, яка точно дорівнює швидкості хвилі. Швидкість (22) є фазовою швидкістю хвилі.

Змінюючи фіксоване значення фази коливань, можна отримати безліч різних хвильових поверхонь. Одна така поверхня від іншої відрізнятиметься лише фазою, в якій коливаються всі точки поверхні. Особливу роль серед них відіграє хвильова поверхня, яка відокремлює ту частину простору, в якій вже збуджені коливання, від тої частини простору, де коливання ще не розпочалися. Таку хвильову поверхню ми називатимемо хвильовим фронтом.

Хвильовий фронт є однією з хвильових поверхонь, тому він також рухається зі швидкістю (22). Вектори \vec{k} , \vec{v} , \vec{J} , розглянуті нами вище, в кожній точці хвильового фронту повинні бути нормальними до його поверхні. Якщо хвильовий фронт відрізняється від площини, то в різних точках фронту напрям цих векторів може бути неоднаковим. Система ліній нормальних до хвильового фронту має назву променів. У випадку плоского хвильового фронту система променів, очевидно є системою паралельних прямих, у випадку сферичного фронту — відповідно системою радіальних напівпрямих, які розходяться з точки O (точки збудження коливань, початку координат). В інших випадках система променів може бути складнішою, з огляду на більш складні форми хвильових фронтів. Промені показують напрям переносу енергії хвилею, тому що вектор Пойнтінга, нормальний до хвильового фронту, через те мусить бути дотичним до ліній-променів.

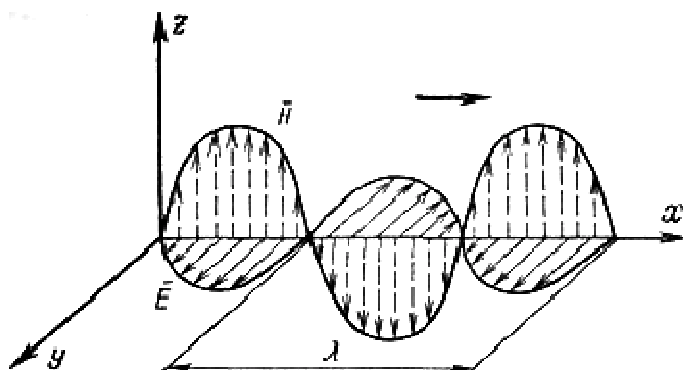


2.3. Випромінювання електромагнітних хвиль. Застосування та властивості радіохвиль

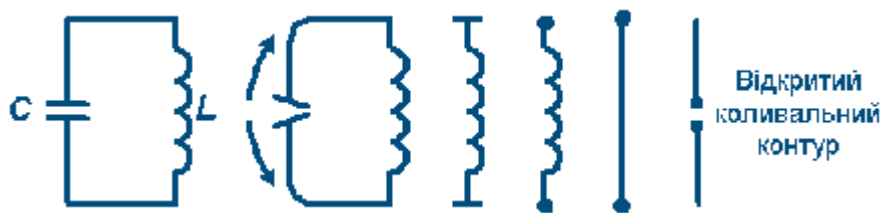
Розробляючи теорію електромагнітного поля Д.Максвелл в 60-х роках XIX століття теоретично обґрунтував можливість існування електромагнітних хвиль (на основі складених їм диференційованих рівнянь) і навіть обчислив швидкість їх розповсюдження. Вона співпала із швидкістю світла $v=c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Це дало Максвелу підставу зробити висновок: світло - це один з видів електромагнітних хвиль. Виводи Максвела були визнані далеко не всіма фізиками - сучасниками Максвела. Було потрібно експериментальне підтвердження існування електромагнітних хвиль. Адже теорія без практики - це тільки припущення!

Німецький фізик Г.Герц в 1888 році завдяки експерименту, яки він виконав, блискуче підтвердив теорію Максвела. Але німецький фізик не бачив перспективи їх застосування.

А.С.Попов, російський фізик, зумів знайти їм практичне застосування, тобто дав їм путівку в життя. Можливість практичного застосування електромагнітних хвиль для встановлення зв'язку без проводу він вперше продемонстрував 7 травня 1895 р. Для отримання електромагнітних хвиль Г. Герц використав простий пристрій, який нині називають вібратором Герца. Найпростішим випадком інтерференції є накладання двох гармонічних хвиль з однаковою частотою і поляризацією (напрямком). При розповсюдженні середніх і коротких радіохвиль інтерференція виникає в тому випадку, якщо в



одну і ту ж точку простору попадають хвилі, що йдуть безпосередньо від передавача і відображені від іоносфери, або хвилі, відображені різними ділянками іоносфери. Для ультракоротких радіохвиль інтерференція нерідко виходить внаслідок приходу в дану точку простору хвиль, що пройшли різні шляхи в тропосфері, або за рахунок їх віддзеркалення від місцевих предметів. Дифракція радіохвиль (від лат. diffractus — розламаний, переламаний) - це явище виникає при зустрічі радіохвиль з перешкодами. Радіохвиля, зустрічаючи при розповсюдженні в однорідному середовищі будь-яку перешкоду, змінюється по амплітуді і фазі і проникає в область тіні, відхиляючись від прямолінійного шляху. Це явище, аналогічне дифракції світла, називається Дифракція радіохвиль. В реальних випадках розповсюдження радіохвиль перешкоди можуть мати довільну форму і бути як непрозорими, так і напівпрозорими для радіохвиль. Дифракція радіохвиль на сферичній поверхні Землі є однією з причин прийому радіосигналів за межами прямої видимості, коли передавач і приймач розділені опуклістю земної кулі. Ефект дифракційного проникнення радіохвилі в область тіні, як і в оптичному випадку, залежить від співвідношення між розміром перешкоди і довжиною хвилі і виражений тим сильніше, чим більше довжина хвилі. З іншого боку, радіохвилі, розповсюджуючись поблизу напівпровідної поверхні Землі, затухають унаслідок часткового поглинання енергії хвилі Землею тим сильніше, чим коротше хвиля. Тому дальність розповсюдження так



званої земної хвилі істотно залежить від її довжини. Достатньо довгі хвилі можуть розповсюджуватися за рахунок Дифракції радіохвиль на значні відстані, які досягають іноді декількох тисяч км. Дифракція

радіохвиль на окремо стоячих будівлях і опуклостях рельєфу, розташованих уздовж траси (гори і ін.), також може грати корисну роль. Вона викликає перерозподіл енергії хвилі і може привести до "посилення" радіосигналу за перешкодою. Особливу роль грає дифракція при розповсюдженні радіохвиль в середовищах, що містять локальні неоднорідності, наприклад в іоносфері, де радіохвиля зустрічає безліч хаотично розташованих перешкод - хмар різної форми, які відрізняються електричними властивостями. Зміни, що безперервно відбуваються, і рухи неоднорідностей викликають зміни енергії сигналу в точці прийому - так звані дифракційні замирення радіохвилі. Дифракційні явища можуть бути суттєвими при випромінюванні радіохвиль направленими антенами і при радіолокації складних об'єктів.

Цей пристрій є відкритим коливальним контуром - в ньому створюються коливання заряду високої частоти. Значення ємності та індуктивності вібратора Герца малі. Тому частота коливань досить велика. Інтенсивність випромінювання електромагнітної хвилі пропорційна 4-у ступеню частоти. Пристрій, що здатний випромінювати електромагнітні хвилі, Герц назвав антеною, що в перекладі означає вуса. Низькочастотні коливання (звукові) антена не випромінює. Експеримент: Існує багато сучасних технічних пристроїв, які дозволяють отримати електромагнітні хвилі і вивчити їх властивості. Краще використовувати хвилі сантиметрового діапазону ($\lambda=3$ см). Кілометрові хвилі випромінюються спеціальним генератором надвисокої частоти (СВЧ). Генератор за допомогою рупорної антени випромінює електромагнітні хвилі. Електромагнітна хвиля досягаючи приймача перетворюється в електричні коливання і посилюються підсилювачем і подаються на гучномовець. Електромагнітні хвилі випромінюються рупорною антеною в напрямі від рупора. Приймальна антена у вигляді такого ж рупора приймає хвилі, які розповсюджуються уздовж її осі.

Галузі застосування радіохвиль.

Наддовгі 105 - 104 $3 \cdot 10^{-3}$ - $3 \cdot 10^{-2}$ Радіотелеграфний зв'язок, передача метеорологічних даних і сигналів точного часу, зв'язок з підводним човном.

Довгі хвилі ДВ 104 - 103 $3 \cdot 10^{-2}$ - $3 \cdot 10^{-1}$ Радіомовлення, радіотелеграфний і радіотелефонний зв'язок.

Середні хвилі СВ 103 - 102 $3 \cdot 10^{-1}$ - 3 Радіомовлення, радіотелеграфний і радіотелефонний зв'язок.

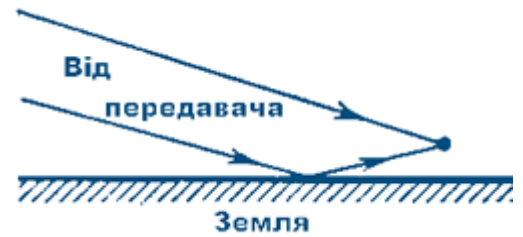


Короткі хвилі КВ 102 - 10 3 - 30 Радіомовлення, радіотелеграфний зв'язок, зв'язок з космічними супутниками, зв'язок радіоаматорства і ін.

Ультракороткі хвилі УКВ 10 - 0,001 30 - $3 \cdot 10^5$ Радіомовлення, телебачення, радіоаматорство, космічна і ін.

Розповсюдження радіохвиль

Дуже важливо мати відповідь на питання - Як саме розповсюджується радіохвиля. На практиці від рішення цього питання залежить якість при прийомі радіохвилі, а розповсюдження радіохвиль впливають наступні чинники: Фізичні і геометричні властивості поверхні Землі; Наявність іоносфери, тобто іонізованого газу на висоті 100 - 300 км.; Штучні споруди або об'єкти (будинки, літаки і т.п.) Іонізація повітря викликана електромагнітним випромінюванням Сонця і потоками заряджених частинок, що випромінюються їм. Іоносфера відображає радіохвилі 10 м. Але здатність іоносфери відображати і поглинати радіохвилі істотно міняється залежно від часу доби і пори року. При проходженні радіохвиль спостерігаються такі явища як інтерференція, і дифракція (обгинання опуклої поверхні Землі)



Інтерференція (від лат. inter - взаємно, між собою; ferio - вдаряю, вражаю) - накладання хвиль, при якому в різних точках спостерігається посилення або послаблення амплітуди коливань. Інтерференція спостерігається у хвиль довільної природи - поверхневих (на воді), поперечних та повздовжніх звукових, електромагнітних (світло, радіохвилі), хвиль де Бройля. При розповсюдженні радіохвиль Інтерференція виникає перш за все із-за їх віддзеркалення від поверхні Землі, внаслідок чого в кожную точку над Землею приходять 2 хвилі - що прийшла прямо і відображена, що інтерферують один з одним.

Найпростішим випадком інтерференції є накладання двох гармонічних хвиль з однаковою частотою і поляризацією (напрямком). При розповсюдженні середніх і коротких радіохвиль інтерференція виникає в тому випадку, якщо в одну і ту ж точку простору попадають хвилі, що йдуть безпосередньо від передавача і відображені від іоносфери, або хвилі, відображені різними ділянками іоносфери. Для ультракоротких радіохвиль інтерференція нерідко виходить внаслідок приходу в дану точку простору хвиль, що пройшли різні шляхи в тропосфері, або за рахунок їх віддзеркалення від місцевих предметів.

Дифракція радіохвиль (від латів. diffractus — розламаний, переламаний) - це явище виникає при зустрічі радіохвиль з перешкодами. Радіохвиля, зустрічаючи при розповсюдженні в однорідному середовищі будь-яку перешкоду, змінюється по амплітуді і фазі і проникає в область тіні, відхиляючись від прямолінійного шляху. Це явище, аналогічне дифракції світла, називається Дифракція радіохвиль. В реальних випадках розповсюдження радіохвиль перешкоди можуть мати довільну форму і бути як непрозорими, так і напівпрозорими для радіохвиль. Дифракція радіохвиль на сферичній поверхні Землі є однією з причин прийому радіосигналів за межами прямої видимості, коли передавач і приймач розділені опуклістю земної кулі. Ефект дифракційного проникнення радіохвилі в область тіні, як і в оптичному випадку, залежить від співвідношення між розміром перешкоди і довжиною хвилі і виражений тим сильніше, чим більше довжина хвилі. З іншого боку, радіохвилі, розповсюджуючись поблизу напівпровідної поверхні Землі, затухають унаслідок часткового поглинання енергії хвилі Землею тим сильніше, чим коротше хвиля. Тому дальність розповсюдження так званої земної хвилі істотно залежить від її довжини. Достатньо довгі хвилі можуть розповсюджуватися за рахунок Дифракції радіохвиль на значні відстані, які досягають іноді декількох тисяч км. Дифракція радіохвиль на окремо стоячих будівлях і опуклостях рельєфу, розташованих уздовж траси (гори і ін.), також може грати корисну роль. Вона викликає перерозподіл енергії хвилі і може привести до "посилення" радіосигналу за перешкодою. Особливу роль грає дифракція при розповсюдженні радіохвиль в середовищах, що містять локальні неоднорідності, наприклад в іоносфері, де радіохвиля зустрічає безліч хаотично розташованих перешкод - хмар різної форми, які відрізняються електричними властивостями. Зміни, що безперервно відбуваються, і рухи неоднорідностей викликають зміни енергії сигналу в точці прийому - так звані дифракційні завмирання радіохвилі. Дифракційні явища можуть бути суттєвими при випромінюванні радіохвиль направленими антенами і при радіолокації складних об'єктів.

3. Висновки.

У даній лекції розглянуті питання пов'язані з: енергією та імпульсом електромагнітної хвилі; випромінюванням електромагнітних хвиль; шкалою електромагнітних хвиль; застосуванням та властивостями радіохвиль. Засвоєння цих фізичних явищ і законів, є базою при подальшому вивченні спеціалізованих дисциплін. Формування правильного розуміння границь застосовності цих фізичних понять, законів, теорій дозволить оцінювати ступінь вірогідності результатів, отриманих за допомогою експериментальних методів дослідження. Навчання побудові математичних моделей фізичних явищ, а також їхнього аналізу на основі аналітичних рішень і чисельного експерименту дозволить курсантам набутти стійких навичок роботи за фахом.