

## Фізичні принципи формування електромагнітного поля та поширення радіохвиль

*Представлений матеріал містить базові поняття і термінологію щодо ЕМП, пояснює фізичну природу утворення і поширення ЕМП і показує зв'язок енергетичних характеристик ЕМП із параметрами випромінювання передавачів.*

**Базові терміни і визначення** (Рекомендація [ITU-T K.91](#), 06.2020. Настанови щодо оцінки, обчислення і моніторингу впливу на людину радіочастотних електромагнітних полів)

- **антена** [Рек. [ITU-T K.70](#)]: пристрій, який служить перетворювачем між направленою (електромагнітною) хвилею (наприклад, коаксіальним кабелем) і вільною просторовою хвилею, або навпаки. За допомогою антени можна випромінювати або приймати радіосигнал;
- **коефіцієнт підсилення антени**  $G_i(\theta, \phi)$ : кількісне значення спрямованості з урахуванням втрат на розсіяння (ефективність антени),  $\theta$  – кут напрямку випромінювання у вертикальній площині,  $\phi$  – кут напрямку у горизонтальній площині.
- **діаграма спрямованості антени (ДСА) або відносна діаграма поля (діаграма випромінювання)** (relative field pattern, antenna pattern, radiation pattern [Рек. [ITU-T K.70](#)]): відношення абсолютного значення напруженості поля (зазвичай прийнято електричного) до абсолютного значення максимальної напруженості поля. ДСА пов'язана з відносним коефіцієнтом підсилення антени наступним чином:  
$$f(\theta, \phi) = \sqrt{G_i(\theta, \phi)}$$
- **передавач** (transmitter [Рек. [ITU-T K.70](#)]): електронний пристрій, що використовується спеціально для генерування радіочастотної електромагнітної енергії з метою зв'язку. Вихід передавача підключається через лінію передачі до передавальної антени, яка є справжнім джерелом електромагнітного випромінювання;
- **радіочастота** (RF- radio frequency) [Рек. [ITU-T K.70](#)]: будь-яка частота  $f$ , на якій електромагнітне випромінювання може бути застосованим для телекомунікацій. Відповідно до Регламенту радіозв'язку радіочастоти відносяться до діапазону частот від 9 кГц до 300 ГГц;
- **електромагнітне поле** – ЕМП/ (EMF –electromagnetic field [Рек. [ITU-T K.70](#)]): фізичне поле, що уявляє собою сукупність змінних у часі електричного і магнітного полів, які, при певних умовах, можуть породжувати один одного, змішуючись у просторі (Рис.1). Таке збурення ЕМП в просторі носить назву **електромагнітної хвилі** (EMX). Будь-яка EMX розповсюджується у просторі зі швидкістю світла. Напруженості електричного  $E$  і магнітного полів  $H$  змінюються у просторі з частотою радіосигналу, характеризуються напрямком, амплітудою, а результат взаємодії (перемноження величин)  $k$  співпадає із напрямком поширення EMX (рис.2);\

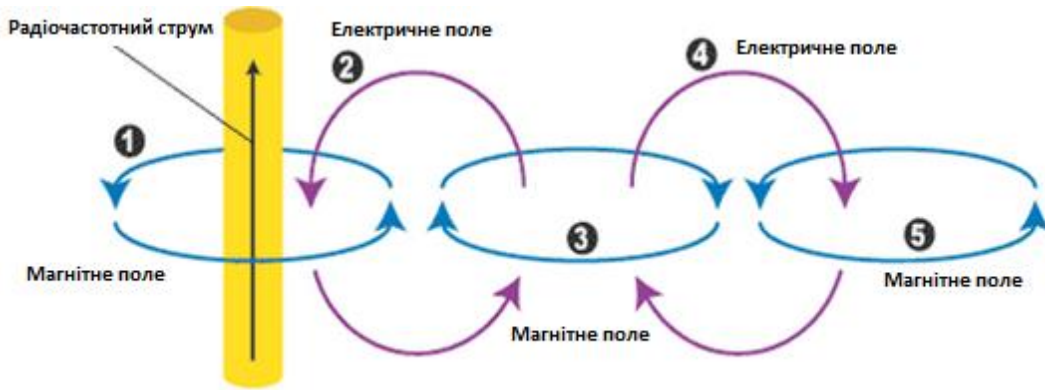


Рис.1 Пояснення породження електромагнітного поля (ЕМП)

- **електромагнітна хвиля** (EMX / EMW – electromagnetic wave [Рек. [ITU-T K.70](#)]): фізична форма існування ЕМП у просторі. Вона характеризується такими параметрами, як частота  $f$  і довжина  $\lambda$  хвилі, які пов'язані співвідношенням:  $\lambda = c / f$ , де  $c$  – швидкість поширення електромагнітних хвиль, яка у вільному середовищі дорівнює майже  $3 \cdot 10^8$  м/с (300 000 км/с);

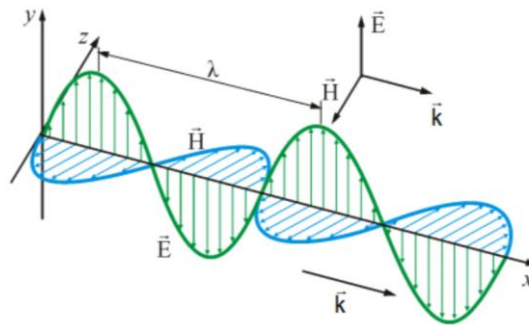


Рис.2 Орієнтація направлених величин (векторів) E, H і k у просторі

- **ближня зона поля антени** (near-field region [Рек. [ITU-T K.52](#)]): область поля, яка існує в безпосередній близькості від антени або іншої випромінюючої структури, в якій електричні та магнітні поля не мають суттєвого плоско-хвильового характеру, але значно відрізняються від точки до точки (у просторі). Близня зона поля далі поділяється на реактивну зону, яка є найближчою до антени (випромінюючої структури) і яка містить більшість або майже всю накопичену енергію, і випромінюючу зону, де випромінююче поле переважає над реактивним, але не має значного плоско-хвильового характеру і є складним за структурою. Для багатьох антен зовнішня межа реактивного близького поля приймається на відстані однієї довжини хвилі від поверхні антени.
- **дальня зона поля антени** (far-field region ([Рек. [ITU-T K.52](#)]): область навколо антени, де розподіл ЕМП по суті не залежить від відстані від антени. У дальній області ЕМП має переважно плоско-хвильовий характер, тобто локально рівномірний розподіл напруженості електричного поля та напруженості магнітного поля в площинах, поперечних до напрямку поширення.
- **густина потоку потужності, еквівалента плоскій хвилі**  $S_{\text{екв}}$  ( $S_{\text{eq}}$ ) [Рек. [ITU-T K.52](#)]: еквівалентна густина потужності плоскій хвилі - це загальноживаний термін, пов'язаний з будь-якою ЕМХ і дорівнює за величиною густині потоку потужності плоскої хвилі, що має таку саму напруженість електричного ( $E$ ) або магнітного ( $H$ ) полів. Визначення

введено для забезпечення обчислення і вимірювання рівня ЕМП у дальній зоні ДСА антени.

Густина потоку потужності – це потужність на одиницю площини нормально (перпендикулярно) розташованої до напрямку поширення електромагнітної хвилі (ЕМХ), звичайно виражена у одиницях Вт на квадратний метр (Вт/м<sup>2</sup>). У питанні впливу на людину таке визначення еквівалентне до густини потужності *плоскої* хвилі, що має місце у дальній зоні антени джерела випромінювання. Для плоских хвиль - щільність потоку потужності, напруженість електричного поля ( $E$ ) та напруженість магнітного поля ( $H$ ) пов'язані з внутрішнім опором вільного простору,  $Z_0 = 377$  Ом. Зокрема,

$$S_{екв} = E^2 / Z_0 = Z_0 \times H^2 = E \times H,$$

де напруженість електричного поля  $E$  і напруженість магнітного поля  $H$  виражаються в одиницях В/м і А/м, відповідно, а  $S$  в одиницях Вт / м<sup>2</sup>. Хоча багато методик обстеження вказують одиниці вимірювання для щільності потужності  $S_{екв}$ , але фактично вимірними величинами є  $E$  або  $H$ .

- **еквівалентна випромінювана потужність** (ЕВП/ERP- equivalent radiated power) [Рек. [ITU-T К.70](#)]: ERP - це частина потужності, що подається на антену, помножена на максимальний коефіцієнт підсилення антени відносно напівхвильового диполя.
- **еквівалентна ізотропно випромінювана потужність** (ЕІВП/EIRP- equivalent isotropically radiated power) [Рек. [ITU-T К.70](#)]: EIRP - це частина потужності, що подається на антену, помножена на максимальний коефіцієнт підсилення антени відносно ізотропної антени;

Сучасний світ високих технологій неможливо уявити без радіо. Нині навряд чи знайдеться людина, яка би не чула слова «радіовипромінювання», «електромагнітне поле», «радіохвилі», «поширення радіохвиль». Але переважна більшість людей не замислюється над фізичними процесами, за якими функціонують телебачення, мобільний зв'язок, Інтернет та багато інших послуг, які надаються за допомогою радіотехнологій зв'язку.

Незважаючи на велику різноманітність радіотехнологій зв'язку, їх функціонування базується на використанні такого унікального природного явища, як радіохвилі.

Радіохвилі – це змінні електромагнітні поля, які поширюються у просторі. Тобто, неодмінною умовою існування радіохвиль є зміна у часі електромагнітного поля.

Електромагнітне поле (ЕМП), яке змінюється у часі, створюється випромінюючим елементом, роль якого, у переважній більшості випадків, виконує антена. Для створення такого змінного у часі поля до антени надходить електромагнітне коливання, яке створюється (генерується) високочастотним генератором. Загалом, генератор з антеною та лінією передачі електромагнітної енергії (кабель або хвилевід) від генератора до антени, являють собою частину передавача (рис. 3), призначеного для передачі інформації будь-якого призначення (сигнали теле - і радіомовлення, радіорелейного, супутникового, стільникового зв'язку, радіолокації тощо).



Рисунок 3 – Спрощена схема радіопередавача

Таким чином, за допомогою антени утворюється радіохвиля, яка переносить енергію електромагнітних коливань у просторі. У діапазоні радіочастот від 10 кГц до 300 ГГц цей процес носить назву «*поширення радіохвиль*». Саме перенесення енергії випромінювання забезпечує передавання інформації від джерела, передавача інформації, до її користувача, приймача, які можуть знаходитися на надто великих відстанях один від одного. Простір, у якому поширюється радіохвиля, утворює межі існування електромагнітного поля. Цей простір обмежений за напрямком через технічні характеристики антени: діаграму спрямованості антени (ДСА) та її ефективність, а за відстанню – через природне ослаблення радіохвилі у середовищі поширення. Тобто, рівень поля поряд з антенною передавача і на певній відстані від нього буде відрізнятися на величину ослаблення у просторі пропорційно відстані від передавальної антени і на якійсь відстані прийом такого сигналу приймальною антенною і приймачем стає неможливим через низький рівень ЕМП. Так, якщо передавач випромінює сигнал з еквівалентною ізотропно - випроміненою потужністю  $P_{\text{ЕІВП}}$  (Вт), то у точці спостереження на відстані  $R$  (м) і за умови поширення радіохвилі у вільному просторі напруженість поля  $E$  (В/м) дорівнює [Рек. [ITU-R P.525](#)]:

$$E = \frac{\sqrt{30P_{\text{ЕІВП}}}}{R} \quad (1)$$

В інших умовах поширення радіохвиль (міські умови забудови, природні перепони рельєфу місцевості, атмосферні опади тощо) ослаблення буде більшим і для забезпечення зв'язку необхідно це враховувати при плануванні і розбудові каналу або мережі зв'язку.

Характер ЕМП у близькій і дальній зонах антени різняться. Всі енергетичні особливості поширення ЕМХ виконуються тільки у дальній зоні антени, де активне ЕМП вже сформовано, силові лінії напруженості поля  $E$  і  $H$  набули властивостей плоскої хвилі і у кожній точці простору поширення можуть бути враховані (обчислені і виміряні) інші енергетичні характеристики поля (Рис. 4). Концентричні кола у дальній зоні носять назву «фронт

радіохвилі» як геометричне місце точок, в яких у певний момент часу характеристики випромінювання (значення напруженості і фази поля) є однаковими. При віддаленні від антени фронт у точці спостереження приймається плоским, через що радіохвиля набула назву «плоскої». Дальнє поле починається з відстані більше  $2L^2/\lambda$ , де  $L$  - максимальний лінійний розмір антени,  $\lambda$  – довжина радіохвилі.



Рис. 4 Пояснення ближнього і дальнього поля антени.

Одним з ключових параметрів, за яким характеризується вплив ЕМП на оточуюче середовище, є густина потоку енергії електромагнітного поля. Для плоскої радіохвилі у точці спостереження на відстані  $R$  вона може бути обчислена як

$$S = \frac{P}{4\pi R^2} \times G(\theta), \quad (2)$$

Де:  $P$  – потужність передавача;  $S$

$G(\theta)$  – коефіцієнт підсилення антени у напрямку  $\theta$ .

Якщо антена випромінюючого пристрою (передавача) розташована на висоті  $h$  відносно точки спостереження, то відстань  $R$  розраховується як *похила відстань* (рис. 5) за формулою:

$$R = \sqrt{d^2 + h^2} \quad (3)$$

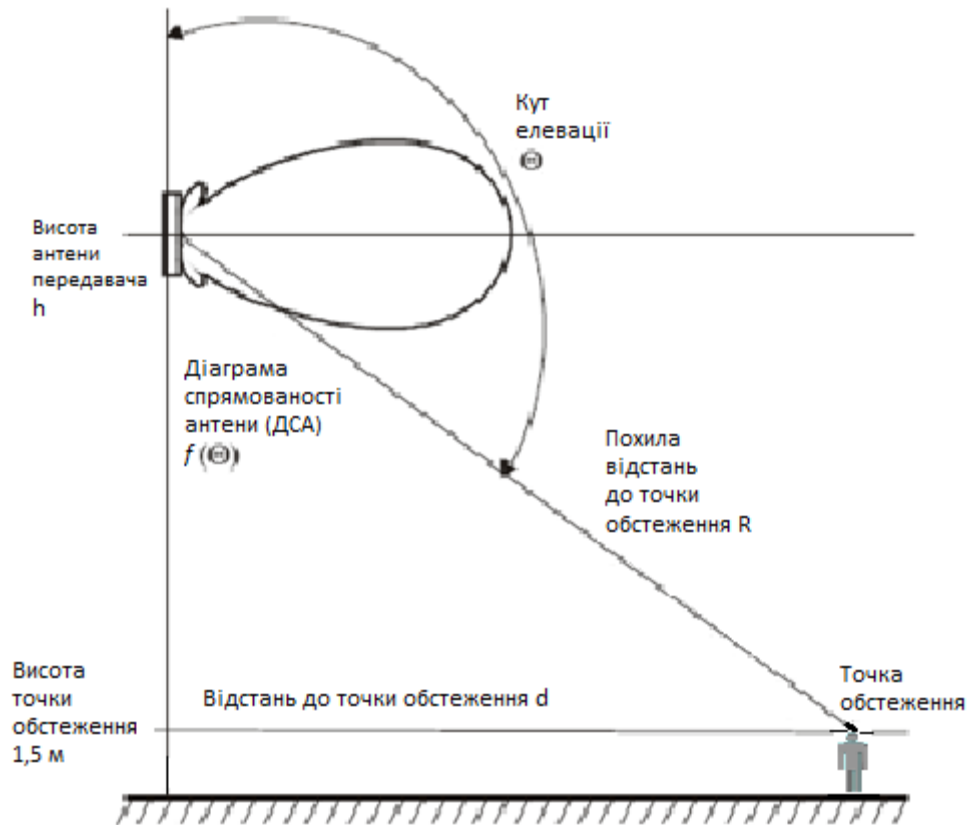


Рис. 5 Пояснення до розрахунку густини потоку енергії

## 1. Властивості електромагнітного поля у просторі і навколо передавачів

Створене електромагнітне поле поширюється у просторі у вигляді електромагнітного радіовипромінювання за такими основними властивостями:

- 1) електромагнітне випромінювання поширюється в однорідному середовищі прямолінійно з постійною швидкістю;
- 2) електромагнітному випромінюванню притаманна властивість абсорбції (поглинання) енергії деякими речовинами і відбиття енергії провідниками. Глибина проникання суттєво залежить від електричних властивостей речовини. У провідниках завдяки *поверхневому ефекту* більша частина енергії ЕМП поглинається поверхневим шаром або «відбивається» через перевипромінювання. Корисним проявом цього ефекту є можливість використання провідників для екранування різних пристроїв і захисту людини від ЕМП. Інші речовини, у тому числі тіло людини, поглинають енергію ЕМП;
- 3) можливість забезпечувати концентрацію енергії електромагнітного випромінювання у просторі за допомогою направлених антен.

Зазвичай, у популярній літературі, для спрощення, радіохвилю умовно відображають у вигляді концентричних сферичних напівкіл (рис. 6).



Рис. 6. – Умовне позначення радіохвиль

Концентричні напівкола позначають так званий фронт радіохвилі. Фізично фронт хвилі уявляє собою перпендикулярний напрямку поширення хвилі зріз електромагнітної хвилі у якійсь момент часу, коли стан хвилі характеризується певними рівними за величиною і фазою напруженостями  $E$  і  $H$ . Якщо у фронті хвилі виділити фрагмент (площадку) певного розміру (Рис.7), то для цієї площадки можливо достатньо точно виміряти ці значення напруженостей. У якості такої площадки у різних моделях досліджень і уявляється тіло людини, розміщеної у фронті хвилі.

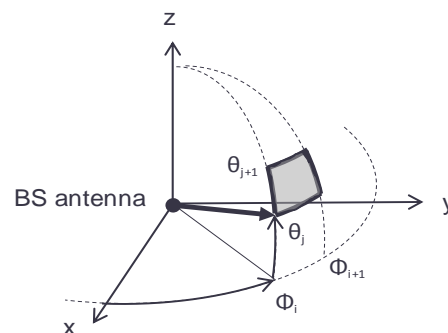


Рис.7 Виділення фрагменту (площадки) у фронті електромагнітної хвилі

Напруженість електричного поля  $E$  і густина потоку енергії  $S$ , що утворюється типовою базовою станцією з різними рівнями випромінювання послаблюються з віддаленням від передавача. На рис.8 демонструється як залежить рівень  $S$  ( $\text{мкВт}/\text{см}^2$ ) від потужності передавача та відстані до нього.

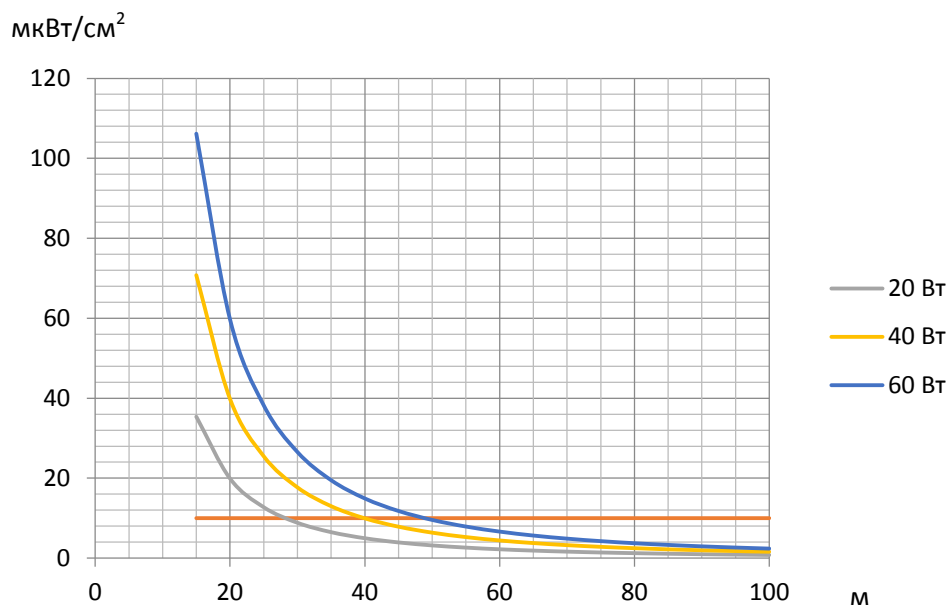


Рис. 8 Залежність густини потоку енергії від відстані та потужності передавача і граничний рівень густини потоку енергії (позначений червоним кольором)

Наведений приклад демонструє найжорсткіший з позиції утворення високих рівнів ЕМП сценарій, коли точка обстеження знаходиться у напрямку максимального коефіцієнту підсилення антени (50 разів). Червоною лінією позначено рівень густини потоку енергії ( $10 \text{ мкВт/см}^2$ ), прийнятий допустимим (граничним) санітарними нормами ДСН. Із рисунку витікає, що, у такому випадку небезпечна зона, де не виконується граничні норми ДСН на густину потоку енергії ЕМП, знаходиться у межах відстані 20-50 м від передавача, в залежності від його потужності.

Серед характеристик ЕМП величина густини потоку енергії  $S$  **найбільш повно відображає фізичні процеси просторової дії ЕМП** на речовини, які знаходяться на шляху поширення електромагнітної хвилі, а також є доступною для визначення, внаслідок чого вона є **ключовим параметром за яким здійснюється оцінка впливу радіовипромінювань**. Величина  $S$  може бути обчислена за формулами (1) і (2), і виміряна різними методами за допомогою як спеціального обладнання, так і традиційними способами за допомогою аналізатору спектра з наступною обробкою даних вимірювань.