

**Д. І. Бахтіяров**, старш. викладач  
 Національний авіаційний університет  
 orcid.org/0000-0003-3298-4641  
 e-mail: bakhtiaroff@tks.nau.edu.ua

## ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ МОДЕЛІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ УСЕРЕДИНІ ПРИМІЩЕННЯ

### Вступ

Найбільш важливими параметрами для аналізу умов розповсюдження електромагнітних випромінювань зазвичай є характеристика загасання, їх середньоквадратичне відхилення, розподіл затримок сигналу за багатопроменевого розповсюдженні.

Розрізняють стаціонарні (статичні) моделі (описують усереднені параметри загасання сигналу у будь-якій точці простору залежно від відстані та від передавача) і імпульсні моделі (які вивчають динаміку зміни сигналу, затримки при багатопроменевості, так звані «кути прибуття» сигналів у приймач). Перші мають найбільше поширення зручні як для оцінок потужності сигналів в приміщенні, так і для прогнозування мінімальних і максимальних рівнів потужності під час побудови систем зв'язку.

### Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз останніх досліджень [1–16] показує, що досі немає чітко визначеної моделі розповсюдження електромагнітних хвиль усередині приміщень для побудови системи захисту інформації (ЗІ) від витоків за рахунок ПЕМВН. Існуючі моделі оцінки загроз витoku інформації за рахунок розповсюдження ПЕМВН мають узагальнений характер і відсутні адекватні аналітичні моделі, що дозволяють оцінити рівень побічних випромінювань у заданих точках усередині приміщення і зовні.

### Постановка проблеми дослідження

Найбільш складною є проблема моделювання (передбачення) рівня сигналу для систем ЗІ, що використовуються в приміщеннях, у яких виникають додаткові фактори «випадковості»: затінення (OLOS, *obsrtucted line-of-sight*) сигналів обладнанням, меблями (стаціонарне затінення) або людьми (мобільне затінення), що ускладнюють прогнозування розповсюдження ПЕМВН. Відповідно до рекомендацій Міжнародного союзу електров'язку (МСЕ) у приміщеннях модель повинна враховувати безліч додаткових чинників: відбиття від стін і стель, втрати розповсюдження в будівлі, дифракція на перешкодах.

Крім цього, слід враховувати і особливості переходу сигналу зовні всередину приміщень, у тому числі через отвори вікон, дверей, і навпаки.

### Загальні питання розповсюдження радіохвиль у приміщеннях

Умови розповсюдження радіохвиль у приміщеннях істотно відрізняються від умов поза приміщеннями «на природі». У літературі розрізняють (рис. 1):

- розповсюдження сигналу в межах прямої видимості (*LOS, line-of-sight*);
- розповсюдження сигналу в умовах затінення (*OLOS, obstructed line-of-sight*);
- розповсюдження сигналу у відсутності прямої видимості (*NLOS, non line-of-sight*).

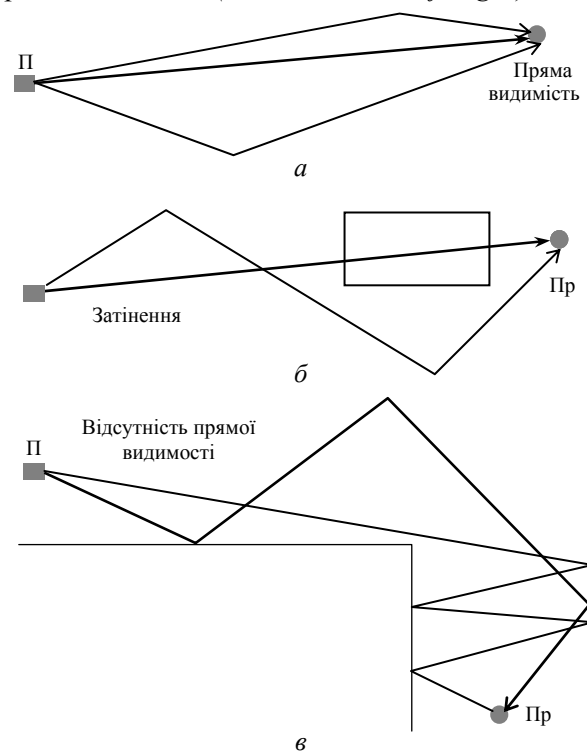


Рис. 1. Умови розповсюдження радіосигналів усередині приміщення:  
 а — в умовах прямої видимості; б — за наявності затінення; в — в умовах відсутності прямої видимості

У табл. 1 наведені властивості деяких приміщень, у яких має місце розповсюдження електромагнітних випромінювань [1].

Таблиця 1

## Характеристики деяких приміщень

№ з/п	Приміщення	Характер розповсюдження радіохвиль	Розмір, м	Затіннення предметами	Люди
1	Офісна будівля	Відсутність прямої видимості, затіннення <i>NLOS, OLOS</i>	100	Фіксоване	Рухоме
2	Аудиторія	Затіннення <i>OLOS</i>	15	Фіксоване	Фіксоване
3	Коридор	Затіннення <i>OLOS</i>	60	Фіксоване	Рухоме
4	Зал аеропорту	Відсутність прямої видимості, затіннення <i>NLOS, OLOS</i>	300	Фіксоване	Рухоме
5	Літак	Затіннення <i>OLOS</i>	50	Фіксоване	Фіксоване/ Рухоме

Через те, що багатоповерхові офісні будівлі відрізняються наявністю «дуже пересічених» просторів складної форми з перегородками з різних матеріалів, наскрізних обсягів між поверхами (шахти ліфта, сходові отвори), великою кількістю затінюючих рухомих об'єктів (персонал), вони представляють найбільшу складність для моделювання особливостей розповсюдження радіохвиль.

Для опису та моделювання розповсюдження радіохвиль має сенс звести різноманітні конфігурації приміщень до наступного обмеженого набору завдань:

А) на одному поверсі:

- обмеженість об'єму, подовгу тунелю, відбиття від поверхонь, матеріал різний;
- складна конфігурація об'єму, виступи, повороти, отвори;
- затіннення меблями, перегородками, обладнанням (фіксоване);
- затіннення людьми (рухоме);

Б) багатоповерховість:

- проникнення сигналу через перекриття;
- однорідні конструкції поверхів;
- наявність наскрізних отворів (сходи), шахти ліфтів;

В) поза/всередині приміщень:

- перехід сигналу ззовні всередину приміщення;
- перехід сигналу зсередини приміщення назовні.

Істотними відмінностями приміщень, як середовища розповсюдження радіохвиль, є також такі чинники:

- відстань між передавачем і приймачем є значно меншою, ніж при розповсюдженні поза приміщеннями;
- мінливість навколишнього оточення (середовища) значно більша, ніж поза приміщеннями, особливо щодо відстані передавач-приймач.

Процеси змінення потужності передавача (загасання радіосигналів) у міру переміщення до приймача, і в приміщеннях, і поза ними — нестаціонарні, тому поряд з ustalеними параметрами потужності сигналу в кожній точці досліджуваного простору намагаються передбачити (табл. 2) такі імпульсні характеристики (часто — статистично усереднені) сигналу, як середня затримка, його розсіювання і т. д. [2–3].

На рис. 2 і 3 показані типові характеристики зміни потужності сигналу в приміщенні.

Таблиця 2

## Типові набори параметрів і характеристик

Змінні параметри	Статичні характеристики при безперервному випромінюванні	Імпульсні характеристики
Частота, розміри приміщення, висота антен, поляризація хвилі, матеріали стін, конфігурація приміщень, об'єкти затіннення	Загасання (втрати) потужності, логарифмічні, середньоквадратичне відхилення, середня затримка променів	Розподіл (дисперсія) затримок при багатопробності, максимальна надлишкова затримка, багатопробні компоненти сигналу «прибувають» в приймач кластерами (розподіл Пуассона), розподіл затримок і амплітуд всередині кластера

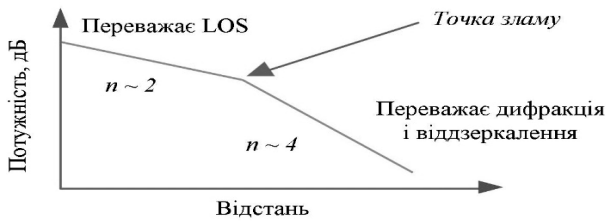


Рис. 2. Характеристики для різних механізмів загасання

Тут  $n$  — показник ступеня загасання

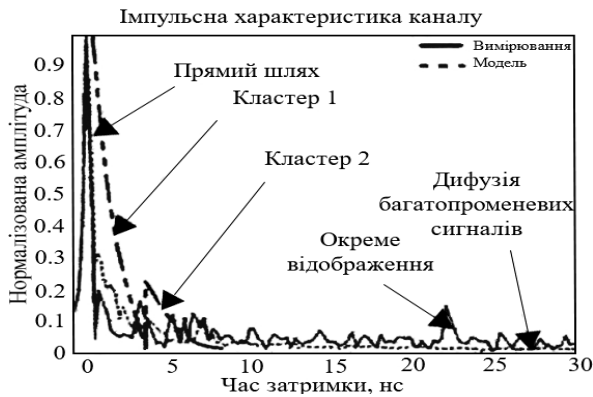


Рис. 3. Часозмінні характеристики типового бездротового каналу

Відповідно до характерних розмірів приміщень в них, як правило, розгорнуті в даний час телекомунікаційні мережі локального і/або адміністративного рівня, у яких обробляється інформація, що становить державну або комерційну таємницю. Тому вимоги до систем захисту інформації, що включають моделювання особливостей розповсюдження ПЕМВН істотно і безперервно зростають.

З точки зору додатків у локальних мережах найбільш важливими є такі характеристики [3]:

- покриття (територія розповсюдження ПЕМВН у межах контрольованої зони (КЗ));
- скритність;
- оцінка якості передачі сигналу в межах та поза межами КЗ.

Усі ці характеристики пов'язані з втратами потужності.

**Вплив обмеженості обсягу на розповсюдження радіохвиль**

Моделі для опису розповсюдження радіохвиль усередині приміщень, як правило, є значно складнішими за моделі для сигналів у відкритому просторі (поза приміщеннями). Це зумовлено такими обставинами, як обмеженість простору між передавачем і приймачем, його складною конфігурацією (коридори, повороти, переходи, багатоповерхові будівлі), а також необхідністю врахування ефектів багатопроменевості (сигнали в приймач надходять як у результаті відбиття від поверхонь, так і за рахунок дифракції, а також

проникнення крізь перегородки, стіни). Результати вимірювань загасання електромагнітного поля при розповсюдженні між поверхами залежать навіть від кількості відкритих дверей на поверхах [4].

Параметри розповсюдження в даному випадку залежать від:

- типу будівлі;
- конфігурації внутрішніх приміщень;
- матеріалів покриттів підлоги і стелі;
- наявності затінюючих об'єктів (фіксованих і рухомих).

Багатопроменевість в приміщенні (на відміну від середовища поза приміщенням) відрізняється тим, що в багатьох випадках вихідний сигнал може «повернутися» в передавач. Має місце ефект інтерференції (рис. 4).

Основними механізмами розповсюдження радіохвиль в приміщеннях (рис. 5) є [4, 5–6]: відбиття від поверхонь, дифракція на краях затінюючих об'єктів, розсіювання на шорсткуватих площинах і проникнення через затінюючі перешкоди.

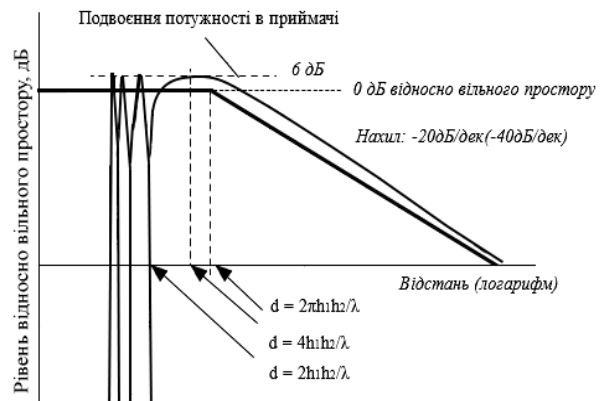


Рис. 4. Типові характеристики загасання в приміщеннях

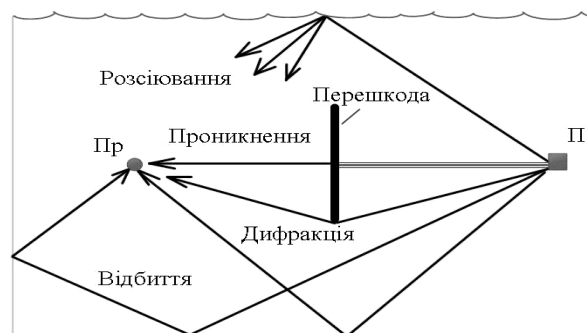


Рис. 5. Приклад поширення радіосигналів всередині приміщення

Відбиття — основний механізм розповсюдження поза прямої видимості, що визначає багатопроменеву природу поширення сигналу всередині приміщення. Відбиття виникає, коли електромагнітна хвиля зустрічає на своєму шляху

ху середовище з різними параметрами (діелектрична проникність і магнітна сприйнятливність, а також електропровідність). Амплітуди компонентних променів в обмеженому обсязі визначаються значеннями коефіцієнтів відбиття, які, у свою чергу, залежать від частоти сигналу, його поляризації, кута падіння і властивостей матеріалу, що відбиває.

Дифракційний компонент сигналу зазвичай малий порівняно з відбитими складовими. Механізм дифракції має місце, коли радіохвиля «натикається» на край «затінюючого» об'єкта, через що виникає вторинне випромінювання на всі боки.

Дифракційні компоненти відрізняються за амплітудою і формою від багатопробових компонентів, відбитих від гладких поверхонь, і також визначаються коефіцієнтами дифракції. Останні залежать як від типу об'єкта затінення, так і від кутів падіння і «заломлення».

Для «негладких» поверхонь (характерні розміри на них зазвичай можна порівняти з довжиною хвилі) вступає в дію механізм розсіювання, який із достатнім ступенем точності визначається геометричними розмірами взаємного розміщення передавача і приймача, а також параметрами розсіювання поверхні і її електромагнітними властивостями (табл. 3) [4, 7–8].

Таблиця 3

Степеневий показник загасання для різних типів приміщень

Конфігурація приміщень	Степеневий показник загасання	Механізм розповсюдження
Коридори	1,4–1,9	Хвилевідний
Великі відкриті кімнати	2	Вільний простір
Мебльовані кімнати	3	Вільний простір + багатопробовість
Щільно заставлені кімнати	4	Поза прямої видимості (дифракція, розсіювання та ін.)
Між різними поверхами	5	Втрати через проникнення через підлоги, стелі, стіни

Іншими словами, на практиці для захисту інформації за рахунок побічних електромагнітних випромінювань слід урахувати втрати розповсюдження і відбиття від стін та стель, втрати розповсюдження в будівлі, дифракцію від перегородок і інших перешкод, затінення при переміщенні приймача, розбіжність поляризації до і після відбиття, розподіл затримок, висоту розміщення антен передавача і приймача та ін. Для коректного опису небезпечного сигналу побічних електромагнітних випромінювань у приймачі в умовах багатопробовості та інших перешкод через обмеженість обсягу, важливо вміти моделювати основні складові такого сигналу та особливості його розповсюдження для конкретного приміщення (рис. 6) [8].

### Електромагнітні хвилі у вільному просторі

Класичний підхід [9] до розрахунку розподілу електромагнітного поля в присутності відбиття і поглинання полягає в розрахунку напруженості поля в однорідному ізотропному просторі на основі законів відбиття, дифракції та розсіювання. Однак, специфічні умови розподілу електромагнітного поля всередині приміщень виключають можливість безпосереднього застосування такої методики. Мінливість розташування приймачів та передавачів радіозв'язку, переміщення перешкод складної форми унеможливають точний розрахунок розподілу електромагнітного поля.

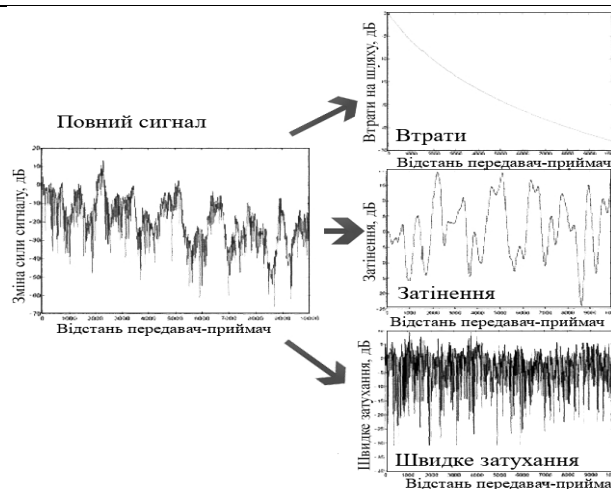


Рис. 6. Вплив основних фізичних механізмів, які деформують сигнал

Труднощі опису реального планування приміщень, контрольованої зони і розташування перешкод, що виникають при таких розрахунках, збільшують необхідний обсяг обчислень. Тому точний розрахунок розподілу поля використовується тільки у виняткових, найпростіших випадках, наприклад, при розрахунку тіншової зони за великою перешкодою при точно відомому розташуванні передавача.

Сьогодні прийнято поділяти всі моделі [8] розповсюдження електромагнітного поля на дві категорії: модель великої відстані і модель малої відстані.

Модель великої відстані застосовується для розрахунків поля поза приміщеннями, а модель малої відстані — усередині приміщень.

У моделі великої відстані розглядається вплив на електромагнітне поле макроефекту, зумовленого перешкодами великого розміру (порівняно з довжиною хвилі).

Відповідно до цієї моделі, електромагнітне поле в міських умовах описується тими самими рівняннями, що і для вільного простору, але з іншими параметрами розповсюдження, а також певною ймовірністю відхилення реальних значень розподілу електромагнітного поля від розрахункового.

Передбачається, що наявність перешкод, у середньому, не впливає на структуру електромагнітного поля, яке залишається таким же, як і у вільному просторі, — а саме стаціонарним, монотонним і гладким.

Стаціонарність означає незмінність структури поля в часі, монотонність — безперервне спадання величини поля зі збільшенням відстані від приймача до передавача, гладкість — відповідність незначних змін відстані незначним змінам напруженості поля.

Модель незначної відстані відображає інтерференційну структуру електромагнітного поля, що виникає внаслідок взаємодії когерентних хвиль, що випромінювались передавачем.

Сумарна величина електромагнітного поля в кожній точці простору визначається амплітудами і фазами декількох хвиль, які за рахунок багаторазового відбиття пройшли шлях різної довжини від передавача; амплітуди і фази хвиль статистично незалежні, і в результаті виходить інтерференційна картина поля у вигляді випадкового чергування максимумів (додавання в фазі) і мінімумів (додавання в протифазі) поля (див. рис. 4).

Оскільки відстань між мінімумами і максимумами інтерференційної картини поля дорівнює чверті довжини хвилі, то й істотні зміни величини напруженості поля також відбуваються на дуже малих відстанях, порядку декількох сантиметрів у діапазоні УКХ.

Очевидно, що структура поля на малих відстанях є не гладкою, не монотонною і стаціонарною. Збільшення або зменшення напруженості поля не пов'язане з відстанню до передавача, оскільки визначається випадковим станом радіоканалу (взаємним розташуванням і пересуванням приймача, передавача і перешкод) у поточний момент часу.

У результаті можливі дуже сильні зміни величини електромагнітного поля на невеликих відстанях і в короткі проміжки часу. З точки зору теорії сигналів нестаціонарна інтерференційна

структура поля відповідає прийому декількох копій одного і того самого сигналу. Ідеальний сигнал передавача досягає приймача у вигляді декількох копій сигналу, кожна з яких має власний час розповсюдження.

Копії сигналу накладаються, одна на одну, викликаючи спотворення форми сигналу, які характеризуються як швидкі завмирання величини сигналу на антені приймача (див. рис. 6). Величина швидких завмирань сигналу визначається миттєвим станом багатопробеневого каналу розповсюдження, тобто переміщенням передавача, приймача і перешкод між ними, а також швидкістю цих переміщень. Практично величина поправки на швидкі завмирання визначає відсоток часу, протягом якого величина напруженості поля перевищує задану величину.

### **Електромагнітні хвилі всередині приміщення**

Аналіз розповсюдження радіохвиль усередині будівлі є відносно новою сферою досліджень, яка виникла внаслідок бурхливого розвитку систем персонального радіозв'язку та засобів несанкціонованого зняття інформації за рахунок ПЕМВН [10]. Характерною особливістю структури електромагнітного поля в приміщенні на відміну від поля у вільному просторі або міських умовах є складність у визначенні усередненої величини втрат. Параметри середовища поширення істотно змінюються на дуже невеликих відстанях, як, наприклад, під час розповсюдження між поверхами будівлі.

У даний час експериментальні результати вимірювань дальності розповсюдження електромагнітних випромінювань усередині будівлі є основним джерелом інформації при проектуванні систем захисту інформації та контрольованої зони. Багато фірм, що займаються побудовою систем захисту інформації публікують результати вимірювань загасання поля порівняно з розрахунковим значенням поля у вільному просторі. При цьому відмінність в інформації, що публікується, дуже велика [11, 12–14].

Наприклад, результати вимірювання загасання електромагнітних випромінювань у великому приміщенні, за різними джерелами, можуть відрізнятися на 10 дБ і більше просто через те, що вони проводилися в різних приміщеннях або за різної щільності затінюючих об'єктів.

Зрозуміло, цінність таких вимірів, як підстава для загальних висновків, досить невелика. Саме тому метою подальших досліджень стала розробка гнучкої моделі (вона включає необхідну кількість коефіцієнтів та змінних), що описує розповсюдження електромагнітних випромінювань та ПЕМВН всередині приміщення [17].

**Множник ослаблення радіосигналу під час розповсюдження радіохвиль над межею поділу двох середовищ. Залежність від поляризації радіохвиль**

На рис. 10 і 11 показані схеми падіння плоскої електромагнітної хвилі на плоску межу розділу двох середовищ.

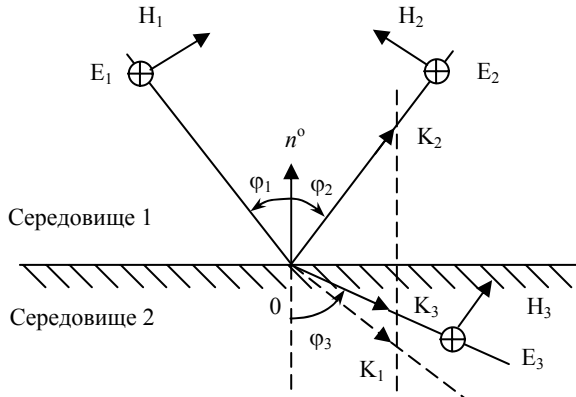


Рис. 10. Падіння горизонтально поляризованої хвилі на плоску межу розділу двох середовищ

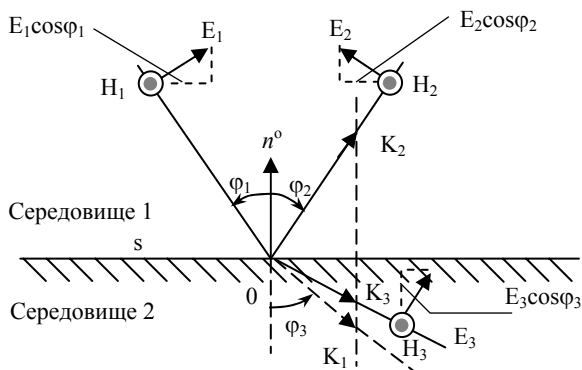


Рис. 11. Падіння нормально поляризованої хвилі на плоску межу розділу двох середовищ

Хвиля поширюється в середовищі 1 і змінюється в часі за гармонійним законом  $exp(j\omega t)$ . При цьому на кордоні розділу виникають ще дві хвилі: відбита — розповсюджується в середовищі 1, і заломлена — розповсюджується в середовищі 2. З цих хвиль заданою є падаюча хвиля з напруженістю електромагнітного поля  $E_1$  і магнітного поля  $H_1$ . Відбита хвиля з відповідними напруженостями  $E_2, H_2$  і заломлена, з напруженостями  $E_3, H_3$ , повинні бути визначені через задані напруженості  $E_1$  і  $H_1$ .

При переході через кордон розділу двох середовищ тангенціальні (дотичні до поверхні) складові полів повинні бути безперервні [9], що призводить до необхідності виконання наступних рівностей, які відомі як суворі граничні умови

$$(E_3 - E_1 - E_2)n^0 = 0; (H_3 - H_1 - H_2)n^0 = 0, \quad (1)$$

де  $n^0$  — нормаль до поверхні в точці відбиття.

Аналіз системи рівнянь (1), проведений в літературі, показує, що вектори Умова–Пойнтінга,

що характеризують напрям поширення падаючої, відбитої і заломленої хвиль, знаходяться в одній площині, і при цьому виконується закон заломлення Снеліуса і закон відбиття, за якого кут падіння дорівнює куту відбиття.

Обидва кути відраховуються від вектора  $n^0$ , тобто від вертикалі до площини  $S$ . (В теорії поширення застосовується також поняття наближених граничних умов, які частіше ще називають умовами Ван-Дер-Поля-Леонтовича).

На рис. 10 і 11 представлено розташування всіх векторів при падінні на плоску межу розділу двох середовищ лінійно поляризованих хвиль з горизонтальною і нормальною поляризацією.

У разі, коли суміжні середовища є ідеальними діелектриками, фазові швидкості поширення всіх трьох хвиль уздовж кордону розділу рівні, і за умови (1) і додаткової рівності, що пов'язує вектори  $E$  і  $H$  рівняннями Максвелла, маємо

$$E = E \exp j(\omega t - k);$$

$$H = \frac{k}{\omega \mu} (E \times S_0), \quad (2)$$

де  $E$  — напруженість електричного поля;  $H$  — напруженість магнітного поля;  $k$  — модуль хвильового вектору;  $\omega$  — кругова частота сигналу;  $\mu$  — магнітна проникність;  $S_0$  — одиничний вектор, який визначає напрями поширення падаючої хвилі для горизонтально поляризованої хвилі, тобто такої хвилі, у якій вектор  $E$  перпендикулярний площині падіння (див. рис. 10).

Коефіцієнти відбиття і заломлення виглядають так:

$$F_1 = \frac{\cos \varphi_1 - \frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_2}{\cos \varphi_1 + \frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_2};$$

$$f_1 = \frac{2 \cos \varphi_1}{\cos \varphi_1 + \frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_2}$$

горизонтальна поляризація хвиль (3),

де  $F_1 = \frac{E_2}{E_1}$  — коефіцієнт відбиття;  $f_1 = \frac{E_2}{E_1}$  —

коефіцієнт заломлення;  $E_1, E_2, E_3$  — горизонтально поляризовані складові хвиль, для нормально поляризованої хвилі, у якій вектор  $E$  лежить у площині падіння хвилі (див. рис. 10), відповідні коефіцієнти дорівнюють

$$F_2 = \frac{\frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_1 - \cos \varphi_2}{\frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2};$$

$$f_2 = \frac{2 \cos \varphi_1}{\frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_1 + \cos f_2},$$

нормальна поляризація хвиль (4),

де  $F_1 = \frac{E_2}{E_1}$  — коефіцієнт відбиття;  $f_1 = \frac{E_2}{E_1}$  —

коефіцієнт заломлення;  $E_1, E_2, E_3$  — нормально поляризовані складові хвиль.

У виразах (3), (4),  $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$ ,  $k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2}$  постійні

поширення в середовищах 1 і 2;  $\lambda_1, \lambda_2$  — довжини хвиль у середовищах 1 і 2.

У загальному випадку, коли обидва середовища є поглинаючими (тобто в середовищах з кінцевою провідністю), постійна поширення (в певній літературі — коефіцієнт поширення) є комплексною величиною, яка дорівнює

$$k = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - j \omega \mu \sigma}, \quad (5)$$

Вираз (5) можна привести до іншого вигляду, ввівши діелектричну проникність в комплексній

формі  $\varepsilon' = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$  і представивши  $k = \beta - j \alpha$ , де

$\beta$  — фазова постійна,  $\alpha$  — коефіцієнт поглинання на одиницю довжини.

Фазова постійна  $\beta$  і коефіцієнт загасання  $\alpha$  визначаються за формулами

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_a \mu_a}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\varepsilon_a \omega} \right)^2} + 1 \right)};$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_a \mu_a}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\varepsilon_a \omega} \right)^2} - 1 \right)}. \quad (6)$$

У комплексній формі коефіцієнт поширення можна також записати у вигляді

$$k = |k| e^{-j\psi};$$

$$|k| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_a \mu_a}{2} \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\varepsilon_a \omega} \right)^2}};$$

$$\psi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\gamma}{\varepsilon_a \omega}. \quad (7)$$

### Відзеркалення і заломлення радіохвиль на границі розподілу діелектрик/діелектрик

При поширенні радіохвиль у закритих приміщеннях наближено можна вважати, що елементи, від яких відбувається відбиття хвиль — діелектрики. Це характерно для коридорів, офісних приміщень з малою кількістю обладнання в металевих корпусах, тобто для всіх таких приміщень, де

відбиття і заломлення переважно походить від непровідних поверхонь або поверхонь з дуже малою провідністю. Також можна вважати, що вище сказане відповідає поширенню радіохвиль на відкритому просторі поблизу поверхні Землі за малої провідності ґрунту, тобто за  $60\sigma\lambda \ll 1$ , де  $\sigma$  — провідність відбиваючої поверхні [9, 12, 14].

У разі діелектричних відбиваючих поверхонь, постійна поширення є дійсною величиною, яка дорівнює  $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$ .

Відповідно до теорії електродинаміки, коефіцієнти відбиття і заломлення  $F_1 = \frac{E_2}{E_1}$ ,  $f_1 = \frac{E_2}{E_1}$ ,

$F_2 = \frac{E_2}{E_1}$ ,  $f_2 = \frac{E_2}{E_1}$ , наведені раніше для будь-яких середовищ

$$F_1 = \frac{\cos \varphi_1 - \frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_2}{\cos \varphi_1 + \frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_2};$$

$$f_1 = \frac{2 \cos \varphi_1}{\cos \varphi_1 + \frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos f_2}$$

горизонтальна поляризація хвиль (8),

$$F_2 = \frac{\frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_1 - \cos \varphi_2}{\frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2};$$

$$f_2 = \frac{2 \cos \varphi_1}{\frac{k_2 \mu_1}{k_1 \mu_2} \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2}$$

нормальна поляризація хвиль (9).

Оскільки далі розглядаються тільки випадки поширення електричних хвиль у повітряному середовищі при відбитті від людей, стелі і стін коридорів (або від елементів конструкцій приміщень), то можна вважати, що  $n_1 = 1, n_2 = \sqrt{\varepsilon}$ .

Тоді вирази для коефіцієнтів відбиття записують у такому вигляді:

$$F_1 = \frac{\cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_1}}{\cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_1}}$$

горизонтальна поляризація (10),

$$F_2 = \frac{\varepsilon \times \cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_1}}{\varepsilon \times \cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_1}}$$

нормальна поляризація (11)

### Аналіз коефіцієнтів відбиття від елементів приміщень

Коефіцієнт відбиття являє собою відношення комплексних амплітуд напруженості електричного поля падаючої і відбитої хвиль, і є величиною комплексною. Модуль і фаза коефіцієнта відбиття залежать від електричних параметрів середовищ (від діелектричної проникності і питомої електропровідності), від кута ковзання  $\gamma$ , а також від поляризації падаючої радіохвилі.

Коефіцієнти відбиття впливають безпосередньо з рівнянь Максвелла при обліку граничних умов при відбитті, і в загальному випадку, коли поверхня, що відбиває є напівпровідною, тобто в ній виникають струми зміщення і струми

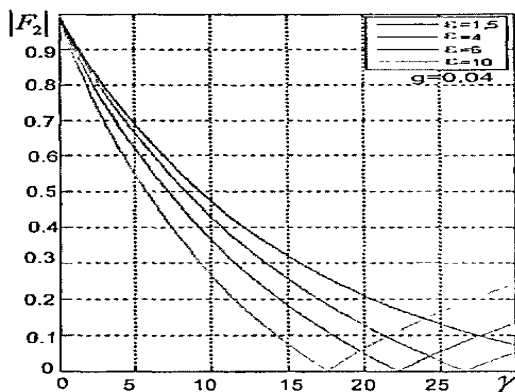


Рис. 12. Залежність модуля і фази коефіцієнта відбиття за нормальної поляризації електромагнітного поля від кута ковзання

### Рекомендації щодо вибору моделі розповсюдження хвиль у приміщеннях

Складність вибору адекватної моделі розповсюдження радіохвиль і структури поля посилюється труднощами практичного визначення параметрів моделі і порівнянням якості отриманих розрахунків, заснованих на різних спрощених моделях взаємодії електромагнітного поля з середовищем. Переважна більшість відомих моделей — емпіричні або напівемпіричні [15]. Вони засновані на великій кількості експериментів з виявленням характерних особливостей у вигляді поправкових коефіцієнтів або показників ступеня загасання. Вимірювання параметрів таких моделей потребує проведення великої кількості випробувань у різних умовах і розрахунку статистичної помилки. Чим більше відхилення, тим меншою мірою точна модель.

Незважаючи на схожість підходів, оцінки за різними моделями можуть відрізнятися значною мірою. Це зумовлено різноманітністю конструкцій приміщень, у яких проводилися експерименти, складністю опису численних фізичних процесів при багатопроменевому розповсюдженні сигналів в замкнутих об'ємах, рухливістю (часозмінністю розташування) затінюючих об'єктів.

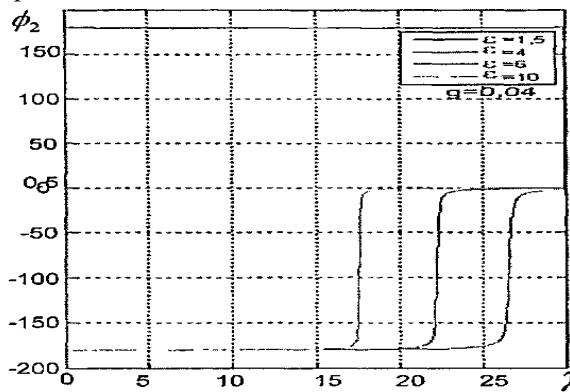
провідності; вони визначаються такими формулами:

$$F_1 = \frac{\cos \varphi - \sqrt{\varepsilon - ig - \sin^2 \varphi}}{\cos \varphi + \sqrt{\varepsilon - ig - \sin^2 \varphi}} = |F| e^{-i\varphi};$$

$$F_1 = \frac{(\varepsilon - ig) \cos \varphi - \sqrt{\varepsilon - ig - \sin^2 \varphi}}{(\varepsilon - ig) \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon - ig - \sin^2 \varphi}} = |F| e^{-i\varphi}, \quad (12)$$

де  $g = 60\lambda\sigma$ ;  $\lambda$  — довжина хвилі випромінювання;  $\sigma$  — провідність середовища.

На рис. 12 представлені залежності модуля і фази коефіцієнта відбиття за нормальної поляризації електромагнітного поля від кута ковзання за різних значень  $\varepsilon$ .



Як результат, ускладнюється аналіз і прогноз сигналу в системах зв'язку при довільному розміщенні випромінювачів електромагнітних хвиль.

Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) сформулював рекомендації з побудови стаціонарних моделей для аналізу розповсюдження радіохвиль усередині приміщень; серед рекомендованих такі матеріали *ITU-R P.1238* (у приміщеннях — *indoor*) і *COST 231* (у приміщеннях — *indoor*), а також *ITU-R P.1411* (поза приміщеннями — *outdoor*) [16]. Обидва рекомендованих для приміщень підходи засновані на моделі Зейделя–Раппопорта [15–16] і відносяться до групи емпіричних моделей, коли облік конфігурації приміщення, кількості поверхонь, що відбивають (і матеріалу цих поверхонь), поверховості і т.д. здійснюється за допомогою численних коефіцієнтів, визначених експериментально. Ключовою характеристикою таких моделей є опис загасання потужності від дальності при довільному розміщенні передавача і приймача.

### Висновки

У сучасних системах захисту інформації від витоку за рахунок ПЕМВН об'єкти захисту розташовані в будівлях (в межах КЗ), тому виключ-



но важливу роль набуває грамотний аналіз зон розповсюдження небезпечного сигналу ПЕМВН усередині приміщень довільної конфігурації з урахуванням таких додаткових чинників — затінення сигналу і загасання за рахунок подолання суміжних поверхонь. У існуючих рекомендаціях ці два важливі чинники не враховуються. Точність існуючих моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань усередині приміщень залежить не тільки від точності бази даних використовуваних коефіцієнтів, але й від емпіричних коефіцієнтів до конфігурації реального приміщення.

Тому є досить актуальним вирішення такого завдання: побудова і експериментальна верифікація стаціонарної моделі розповсюдження сигналу в приміщеннях складної форми, у якій:

– параметри відбитих від поверхонь сигналів розраховуються на основі опису конфігурації приміщення, розміщення джерела випромінювання і використовуваних матеріалів;

– для оцінки загасання сигналу враховується затінення сигналу фіксованими і мобільними об'єктами у вигляді експериментальних коефіцієнтів.

Дане завдання вирішується шляхом побудови, на основі відомих рішень (моделі Хата, моделі COST 231, моделі багатопверхових будівель, моделі проникнення сигналу з відкритого простору в приміщення та навпаки) так званої модернізованої (об'єднує різні підходи) моделі, у якій будуть досягнуті наукові результати наступних досліджень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Kuhn M. G.** Soft Tempest: Hidden Data Transmission Using Electromagnetic Emanations. *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. № 1525. С. 124–142.
2. **Mordechai Guri**, Assaf Kachlon, Ofer Hasson GSMem: Data Exfiltration from Air-Gapped Computers over GSM Frequencies. *USENIX Security Symposium*. 2015. № 24. С. 849–864.
3. **Киреева Н. В.**, Семенов А. В. Утечка информации по каналам ПЭМИ и способы их защиты. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. С. 499–504.
4. **Лыков Ю. В.** Анализ источников ПЭМИ в современных ПЭВМ. *Радиотехника*. 2012. № 169. С. 196–207.
5. **Спесивцев А. В.**, Вегнер В. А., Крутяков А. Ю. Защита информации в персональных ЭВМ. *Радио и связь*. 1992. С. 192.
6. **Крылова С. Л.** Исследование побочных электромагнитных излучений видеосистемы ПЭВМ в учебной лаборатории информационной безопасности. *Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education*. URL: <https://www.sworld.com.ua/konfer35/597.pdf> (дата звернення: 21.10.2019).
7. **Ishii T.** RF propagation in buildings. *RF Design Magazine*. 1989. № 7. С. 45–49.
8. **Iskander M.** Outdoor/indoor propagation modeling for wireless communications systems. *IEEE, USNC-URSI National Radio Science Meeting*. 2001. № 15. С. 150–153.
9. **Якимов А. Н.**, Андреев П. Г., Князева В. В. Моделирование распространения электромагнитных волн в помещении с учетом влияния местных предметов. *Радиоэлектроника*. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/14/text.html> (дата звернення: 21.10.2019).
10. **Bakhtiiarov D. I.** Evaluation of energy availability of means to communicate with UAVs in conditions of radioelectronic countermeasures by the enemy. *Information technology and security*. 2016. Т. 4. № 1. Р. 118–130.
11. **Theodore S.** Wireless Communications: Principles and Practice. 2012. 736 p.
12. **Bakhtiiarov D. I.**, Lavrynenko O. Y., Konakhovych G. F. A digital speech signal compression algorithm based on wavelet transform. *Electronics and control systems*. 2016. № 2. Р. 30–36. DOI: 10.18372/1990-5548.48.11204.
13. **Lavrynenko O. Y.**, Bakhtiiarov D. I., Konakhovych G. F. Compression algorithm of voice control commands of uav based on wavelet transform. *Science-Based Technologies*. 2018. № 2. Р. 137–142. DOI: 10.18372/2310-5461.38.12858.
14. **Recommendations ITU-R P.1238.** Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz. 2012. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-7-201202-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-7-201202-S!!PDF-E.pdf) (дата звернення: 21.10.2019).
15. **Meiling Luo.** Indoor radio propagation modeling for system performance prediction. *STIC Sant'e*. Lyon, 2013. 128 p.
16. **Digital mobile radio towards future generation systems (COST 231 Final Report).** European Commission. 1999. 443 p.
17. **Бахтіяров Д. І.**, Козлюк І. О. Методика модернізації моделі розповсюдження радіохвиль в середині приміщення для побудови контрольованої зони корпоративної мережі. *Наукоємні технології*. 2019. №3. Т.43. С. 349–356. DOI: 10.18372/2310-5461.43.13987.

**Бахтіяров Д. І.**

## **ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ МОДЕЛІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ВСЕРЕДИНІ ПРИМІЩЕННЯ**

*Стаття присвячена проблемам розповсюдження радіохвиль усередині будівель і приміщень для подальшої побудови систем захисту інформації від побічних електромагнітних випромінювань та наведень. Наявність всередині будівлі стін, перегородок, меблів, радіоелектронної апаратури, людей та інших об'єктів створює складне середовище розповсюдження радіохвиль. Таким чином, умови розповсюдження радіохвиль усередині приміщень істотно відрізняються від умов розповсюдження радіохвиль у вільному просторі. Метою аналізу розповсюдження радіохвиль є розрахунок дальності розповсюдження електромагнітних випромінювань та визначення реальних характеристик сигналу. Класичний підхід до розрахунку розподілу електромагнітного поля полягає в розрахунку напруженості поля в однорідному ізотропному просторі на основі законів відбиття, дифракції та розсіювання. Проте, через особливі умови в приміщенні, виключається можливість безпосереднього застосування такої методики. Технічні засоби обробки інформації, які в процесі роботи здійснюють її обробку, зберігання і передачу, генерують електромагнітні випромінювання, які є побічними, тобто паразитними. Таким чином, в результаті нелінійних процесів в блоках технічного обладнання генеруються і випромінюються в навколишній простір побічні електромагнітні випромінювання і наведення, рівень яких може бути достатнім для прийому радіосигналу на певній відстані від технічних засобів. Отже, актуальним стає питання визначення оптимальної моделі опису загроз через канал витоку побічних електромагнітних випромінювань та наведень, а також розмір контрольованої зони, в межах якої контролюються наявність сторонніх осіб і несанкціоноване перебування в об'єкті, і можливість використання розвідувального обладнання, тому що в цій зоні існує ймовірність перехоплення інформації.*

**Ключові слова:** електромагнітне поле; дифракція; інтерференція; контрольована зона; модель розповсюдження радіохвиль.

**Bakhtiarov D. I.**

## **PECULIARITIES OF SELECTION OF THE ELECTROMAGNETIC DISTRIBUTION MODEL RADIATION INSIDE THE ROOM**

*This article deals with the distribution of radio waves inside buildings and spaces to further build a system of defense of information from side-by-side electromagnetic radiation and intrusion. The presence of inside the building of walls, partions, furniture, electronic equipment, people and other objects creates a complex distribution of radio waves. Thus, the conditions for radio waves in the interior vary significantly from the distribution of radio waves in free space. The purpose of analyzing radio waves is to calculate the range of electromagnetic radiation and to determine the real characteristics of the signal. The classical approach to the settlement of the electromagnetic field is to calculate the tension of the field in a single isotropic space based on the laws of reflection, diffraction, and scattering. However, because of the special conditions in the room, the possibility of directly applying the method is excluded. Technical means of information processing, which in the process of carrying out its processing, storage and transmitting make it possible to generate electromagnetic radiation, which is by bit, or parasitic. Thus, the nonlinear processes in the equipment units of machinery are generated and emitted into the surrounding space by the side of the electromagnetic radiation and the radiation that can be sufficient for the radio to be acceptable at a certain distance from mechanical means. Therefore, it becomes urgent to determine the optimal model for the description of threats through the channel of leakage of electromagnetic radiation and intrusion, as well as the size of the controlled area, which controls the presence of unauthorized persons and unauthorized stay in the facility, and the ability to use intelligence equipment, because in this the area is likely to intercept information.*

**Keywords:** electromagnetic field; diffraction; interference; controlled zone; radiowaves distribution model.

**Бахтіяров Д. И.**

## **ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ**

*Данная статья посвящена проблемам распространения радиоволн внутри зданий и помещений для дальнейшего построения систем защиты информации от побочных электромагнитных излучений и наводок. Наличие внутри здания стен, перегородок, мебели, радиоэлектронной аппаратуры, людей и других объектов создает сложную среду распространения радиоволн. Таким образом, условия распространения радиоволн внутри помещений существенно отличаются от условий распространения радиоволн в свободном пространстве. Целью анализа распространения радиоволн является расчет дальности распространения электромагнитных излучений и вы-значение реальных характеристик сигнала. Классический подход к расчету распределения*

*электромагнитного поля заключается в расчете напряженности поля в однородном изотропном пространстве на основе законов отражения, дифракции и рассеяния. Однако, в силу особых условий в помещении, исключается возможность непосредственного применения такой методики. Технические средства обработки информации, которые в процессе работы осуществляют ее обработку, хранение и передачу, генерируют электромагнитные излучения, которые являются побочными, то есть паразитными. Таким образом, в результате нелинейных процессов в блоках технического оборудования генерируются и излучаются во внешнее пространство побочные электромагнитные излучения и наводки, уровень которых может быть достаточным для приема радиосигнала на определенном расстоянии техническими средствами. Итак, актуальным становится вопрос определения оптимальной модели описания угроз через канал утечки побочных электромагнитных излучений и наводок, а также размер контролируемой зоны, в пределах которой контролируются наличие посторонних лиц и несанкционированного пребывания на объекте, и возможность использования разведывательного оборудования, так как в этой зоне существует вероятность перехвата информации.*

**Ключевые слова:** электромагнитное поле; дифракция; интерференция; контролируемая зона; модель распространения радиоволн.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2019 р.

Прийнято до друку 24.11.2019 р.