

**ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ  
ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

**Кафедра транспортного зв'язку**

**А. О. Єлізаренко**

**МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У КАНАЛАХ  
РУХОМОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ**

*Конспект лекцій*

*з дисципліни*

**«ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА»**

**Харків – 2017**

**УДК 656.25**

Єлізаренко А. О. Моделі поширення радіохвиль у каналах рухомого радіозв'язку: Конспект лекцій. – Харків: УкрДУЗТ, 2017. – 51 с.

Конспект лекцій містить короткий виклад лекційних матеріалів з основних положень теорії поширення радіохвиль та основних моделей розрахунків енергетичних характеристик каналів рухомого радіозв'язку.

Рекомендується для студентів факультету ІКСТ, які вивчають дисципліну «Технічна електродинаміка», і може бути корисним при вивченні відповідних розділів дисципліни «Радіотехнічні системи залізничного транспорту».

Іл. 12, табл. 3, бібліогр.: 24 назв.

Конспект лекцій розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри транспортного зв'язку 24 листопада 2016 р., протокол № 5.

Рецензент

доц. Н. А. Корольова

А. О. Єлізаренко

МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У КАНАЛАХ  
РУХОМОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Конспект лекцій  
з дисципліни

*«ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА»*

Відповідальний за випуск Єлізаренко А. О.

Редактор Ібрагімова Н. В.

---

Підписано до друку 26.12.16 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,25. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

## Зміст

Вступ.....	4
..	
1 Поширення радіохвиль у вільному просторі.....	5
2 Особливості поширення радіохвиль на наземних трасах...	10
3 Двопроменева модель поширення радіохвиль.....	14
4 Емпіричні моделі поширення радіохвиль.....	21
5 Порівняльний аналіз розрахунків енергетичних характеристик каналів за різними моделями.....	31
6 Особливість поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізниць.....	34
6.1 Структура електромагнітного поля.....	34
6.2 Удосконалена модель поширення радіохвиль в умовах залізниць.....	40
Контрольні питання.....	48
Список літератури.....	50

## Вступ

Конспект лекцій призначений для самостійної роботи при вивченні дисципліни «Технічна електродинаміка» і охоплює матеріал змістовного модуля «Випромінювання і поширення радіохвиль».

Курс базується на знаннях, отриманих при вивченні фізики і теорії електричних і магнітних кіл. У свою чергу цей курс є базовим для вивчення дисциплін: „Радіотехнічні системи залізничного транспорту”, ”Системи зв’язку з рухомими об’єктами”, ”Системи передачі в електрозв’язку”.

Тракт поширення радіохвиль є важливою складовою системи рухомого радіозв’язку. Радіохвилі – єдиний спосіб передачі інформації на рухомі об’єкти. Важливим етапом при проектуванні радіомереж є розрахунок енергетичних характеристик каналів. Актуальність таких завдань пов’язана з широким впровадженням систем рухомого радіозв’язку.

Запропоновано значну кількість моделей поширення радіохвиль. У конспекті лекцій розглянуто найбільш відомі моделі розрахунку енергетичних характеристик каналів рухомого радіозв’язку та проведено їх аналіз.

На залізницях широко використовують системи рухомого технологічного радіозв’язку в усіх ланках роботи. Такі системи організують безпосередньо на території залізничних станцій і вузлів, інфраструктура яких має значний вплив на умови поширення радіохвиль та енергетичні характеристики радіоканалів. На основі виконаних експериментальних досліджень запропоновано удосконалену модель поширення радіохвиль для розрахунку каналів рухомого радіозв’язку в умовах впливу інфраструктури залізниць. Такий підхід відповідає рекомендаціям ІТУ-R, а принцип уточнення параметрів моделі за результатами досліджень поширення радіохвиль у конкретних умовах організації дозволяє суттєво підвищити точність прогнозування рівнів сигналів.

Матеріали конспекту лекцій враховують досвід і практику викладання дисципліни на кафедрі „Транспортний зв’язок” і забезпечують підготовку до виконання лабораторних і практичних завдань і тестового контролю знань.

## 1 Поширення радіохвиль у вільному просторі

Поширення радіохвиль у вільному просторі є основним еталонним поняттям у радіотехніці. Співвідношення для вільного простору, як базову складову, часто використовують у різних моделях поширення радіохвиль на реальних трасах радіозв'язку.

Вільний простір – це ідеалізоване однорідне, непоглинаюче середовище з діелектричною проникністю  $\epsilon_0$ , магнітною проникністю  $\mu_0$  і провідністю середовища  $\sigma_0=0$  См:

$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$  – діелектрична проникність вільного простору, Ф/м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнітна проникність вільного простору, Гн/м.

Відносні значення діелектричної  $\epsilon$  і магнітної  $\mu$  проникностей визначають як

$$\epsilon = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0}, \quad \mu = \frac{\mu_a}{\mu_0},$$

де  $\epsilon_a, \mu_a$  – абсолютні діелектрична і магнітна проникності середовища відповідно.

На рисунку 1 показано ізотропний випромінювач, який розміщений у вільному просторі. Ізотропний випромінювач випромінює електромагнітні хвилі з однаковою інтенсивністю в усіх напрямках. У вільному просторі радіохвилі поширюються прямолінійно зі швидкістю світла  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Променем називається лінія, вздовж якої поширюється електромагнітна хвиля. Фронтом хвилі називається геометричне місце точок з однаковою фазою електромагнітної хвилі. Вектор Пойнтинга вказує поширення електромагнітної хвилі і за модулем дорівнює щільності потоку потужності, що переноситься хвилею [1, 2].

Тоді потужність, яка припадає на одиницю площі сферичної поверхні (модуль вектора Пойнтинга  $\vec{P}$ ), на відстані  $r$  від

точкового ізотропного випромінювача потужністю  $P$  складає, Вт/м<sup>2</sup>,

$$P = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

де  $S = 4\pi r^2$  – площа поверхні сфери.

У той же час середнє значення вектора Пойнтинга визначають як добуток діючих значень напруженості електричного  $E$  і магнітного  $H$  полів:

$$P = E \cdot H, \quad (2)$$

де  $E_{\partial}$  – діюче значення напруженості електричного поля, В/м;  
 $H_{\partial}$  – діюче значення напруженості магнітного поля, А/м.

Енергія електричного і магнітного полів радіохвиль однакові і складають

$$\varepsilon_0 E_{\partial}^2 = \mu_0 H_{\partial}^2. \quad (3)$$

Тоді можна записати

$$E_{\partial} = H_{\partial} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = H_{\partial} \cdot \rho_0, \quad (4)$$

де  $\rho_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi$  – хвильовий опір вільного простору, Ом.

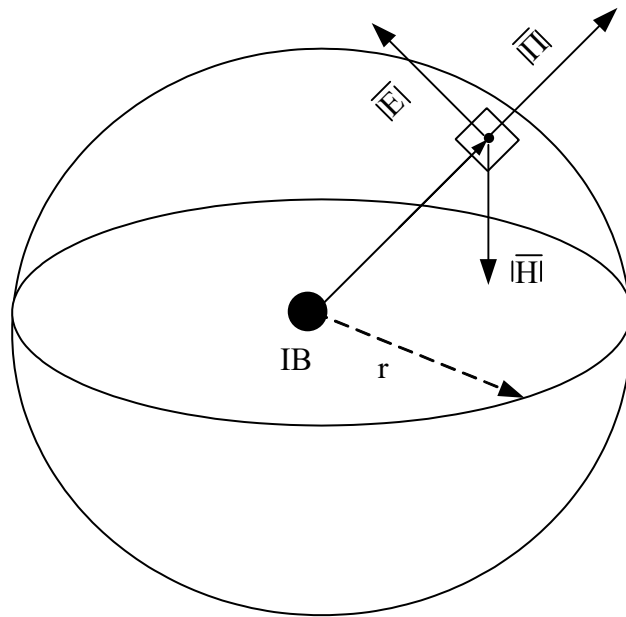


Рисунок 1- Поширення радіохвиль у вільному просторі

Прирівнявши значення модулів вектора Пойнтинга з формул (1) і (4), можна визначити напруженість електричного поля, В/м:

$$\frac{P}{4\pi r^2} = E_\delta \cdot \frac{E_\delta}{120\pi};$$

$$E_\delta = \frac{\sqrt{30P}}{r}, \quad (5)$$

де  $P$  - випромінювана потужність, Вт;

$r$  - відстань від випромінювача до точки приймання, м.

На практиці широко застосовують направлені антени, які дозволяють сконцентрувати випромінювану потужність у необхідному напрямку зв'язку, що дозволяє підвищити напруженість електричного поля в точці приймання.

$$E_\delta = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot D}}{r}, \quad (6)$$

де  $D$  – коефіцієнт направленої дії антени відносно ізотропного випромінювача.

Енергетичний потенціал радіолінії повніше характеризує потужність сигналу безпосередньо на виході приймальної антени (на вході приймача).

Потужність сигналу на вході приймача  $P_{прм}$  при використанні ізотропної антени з урахуванням діючої (ефективної) площі (довжини) приймальної антени або діючої довжини лінійної антени можна визначити за формулою

$$P_{прм} = \Pi \cdot S_{эф} = \Pi \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} = P \cdot \frac{\lambda^2}{16\pi^2 r^2}, \quad (7)$$

де  $S_{эф} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}$  – діюча площа приймальної антени, м<sup>2</sup>.

При розрахунках дальності зв'язку значення  $P_{іді}$  зручно визначати в децибелах відносно одного вата.

$$10 \lg P_{прм} = 10 \lg P + 10 \lg \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \text{ або} \\ P_{прм(дБвт)} = P_{(дБвт)} + 20 \lg \frac{\lambda}{4\pi r}. \quad (8)$$

При зростанні відстані від передавача зменшується напруженість поля в точці приймання і потужність на виході приймальної антени. Це є наслідком зменшення питомої потужності електромагнітної хвилі, яка припадає на одиницю поверхні. Таким чином, слід зазначити, що в умовах вільного простору напруженість поля сигналу в точці приймання не залежить від частоти сигналу, у той час як потужність сигналу на виході приймальної антени зменшується зі зростання частоти сигналу, відповідно зменшення діючої (ефективної) площі (довжини) приймальної антени.

На рисунку 2 наведено графік залежності послаблення при передачі електромагнітної енергії між ненаправленими антенами у вільному просторі  $20 \lg \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)$  від відстані  $r$  для сигналів різних частот [3]. Залежності наведено для найбільш використовуваних смуг частот у системах рухомого радіозв'язку метрового і



дециметрового діапазонів. При використанні більш високих частот суттєво зменшується потужність сигналу в приймальній антені.

При розрахунках каналів радіозв'язку зручно використовувати поняття втрат при поширенні радіохвиль, які визначають як різницю між випромінюваною потужністю і потужністю на вході приймача, дБ:

$$L = P - P_{\text{прм}} \quad (9)$$

За умови ізотропної діаграми спрямованості антен втрати енергії сигналів називають основними. У реальних умовах необхідно враховувати параметри антенно-фідерних трактів передачі і приймання.

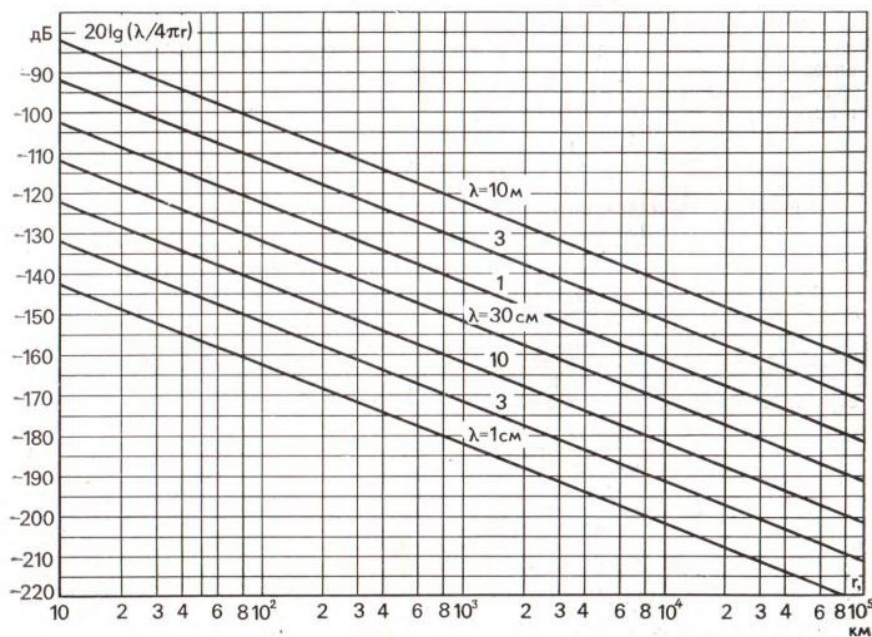


Рисунок 2 – Графік залежності ослаблення при передачі електромагнітної енергії між ненаправленими антенами у вільному просторі

Розрахункові формули для визначення напруженості поля і потужності сигналів в умовах вільного простору наведено в рекомендаціях міжнародного союзу електричного зв'язку МСЕ Р.525-2 [4], які узагальнюють розглянуті вище співвідношення.

Співвідношення між напруженістю поля і потужністю сигналу в приймальній антені можна визначити за формулою (7) або подати в логарифмічній формі

$$P_{np} = E - 20 \lg f + 12,782, \quad (10)$$

де  $P_{np}$  - потужність на виході приймальної антени;  
 $f$  - частота, МГц.

Враховуючи формули (9) та (10), можна записати

$$E = P_{nep} + 20 \lg f - 12,782 - L. \quad (11)$$

Формули (10),(11) дозволяють проводити розрахунки таких енергетичних характеристик каналів, як залежність напруженості поля або потужності на вході приймача від відстані.

## **2 Особливості поширення радіохвиль на наземних трасах**

При поширенні радіохвиль ультракороткохвильових діапазонів над гладкою землею поверхнею необхідно враховувати затінення на трасах внаслідок кривизни земної поверхні, відбиття енергії радіохвиль на границі розділу атмосфери і земної поверхні та відповідні втрати в земній поверхні. Деякий додатковий вплив створюють втрати енергії в тумані та гідрометеорах; необхідно також враховувати вплив атмосферної рефракції [3].

Важливим параметром наземних радіотрас є відстань прямої видимості, яка в більшості випадків і обмежує реальну дальність радіозв'язку.

Відстанню прямої видимості називають відстань між передавальною та приймальною антенами, при якій пряма лінія між антенами лише торкається поверхні землі (дивись рисунок 3).

Відстань прямої видимості  $R_0$  можна визначити як

$$R_0 = \sqrt{(a_0 + h_1)^2 - a_0^2} + \sqrt{(a_0 + h_2)^2 - a_0^2} \quad (12)$$

або наближено

$$R_0 = \sqrt{2a_0}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (13)$$

де  $a_0$  - радіус Землі,  $a_0 = 6370$  км.

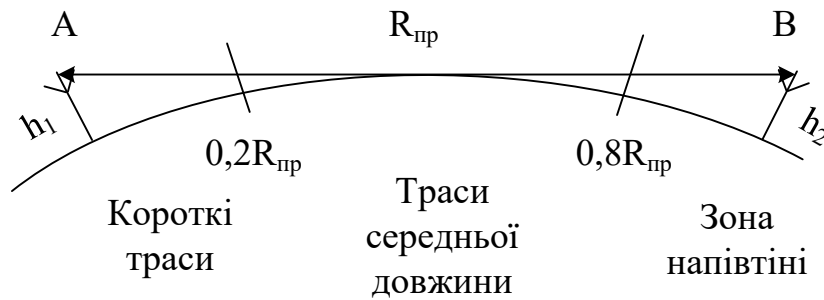


Рисунок 3 – Класифікація трас поширення радіохвиль у межах зони прямої видимості між антенами

Залежно від співвідношення дальності радіозв'язку і відстані прямої видимості розглядають три типи трас [2]: короткі траси, радіотраси середньої протяжності та зони напівтіні (дивись рисунок 3).

1 Радіотраси малих відстаней,  $R < 0,2R_0$ , - поверхню землі можна вважати локально плоскою.

2 При  $0,2R_0 < R < 0,8R_0$  радіотраси середньої протяжності. Перша зона Френеля не перекривається опуклістю земної поверхні, але необхідно враховувати вплив сферичності землі.

3 При  $R > 0,8R_0$  розрахунки необхідно вести з урахуванням дифракції радіохвиль на земному шарі.

Область  $0,8R_0 < R < 1,2R_0$  називають областю напівтіні.

При розповсюдженні радіохвиль у тропосфері відбувається викривлення їх траєкторій за рахунок рефракції, обумовленої зміною діелектричної проникності повітря по висоті. При нормальній атмосферній рефракції дальність прямої видимості збільшується і для діапазону УКХ визначається формулою

$$R_0 = \sqrt{2a_0}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (14)$$

При аналізі всіх процесів за наявності границь розділу різних середовищ атмосфери і поверхні Землі необхідно враховувати, що енергія електромагнітного поля радіохвиль

передається в межах обмеженої області простору, яку називають істотною областю поширення радіохвиль (дивись рисунок 4).

Це впливає з положень хвильової оптики та може бути пояснено на основі принципу Гюйгенса-Френеля [3]. За принципом Гюйгенса-Френеля, кожна точку, якої досягла електромагнітна хвиля, можна вважати джерелом вторинних сферичних хвиль, а поля в точці приймання можна визначити як результат підсумовування полів вторинних випромінювачів. При зростанні діаметра заштрихованої зони можлива ситуація, коли поля від вторинних джерел на межі зони будуть у протифазі з полем вторинного випромінювання центра. Це відповідає різниці ходу променів  $\lambda/2$  та відповідає розмірам першої зони Френеля, при цьому випромінені поля складаються, і напруженість поля досягає максимальної величини. При подальшому віддаленні від центра амплітуди хвиль вторинного випромінювання зменшуються і суттєву область при поширенні радіохвиль обмежують 8-12 зонами Френеля.

Істотна область простору при розповсюдженні радіохвиль в однорідному середовищі є еліпсоїдом обертання з фокусами в точках передачі та приймання, які є геометричним місцем точок, для яких виконується умова  $ACB-AB=(8-12)\lambda/2$  (дивись рисунок 4), і таким чином охоплює перші 8-12 зон Френеля, у межах яких і передається основна енергія радіосигналу.

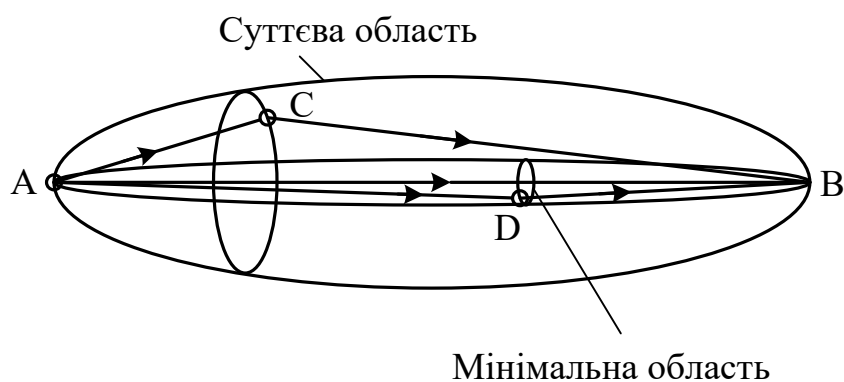


Рисунок 4 – Мінімальна та суттєва області при поширенні радіохвиль

Мінімально необхідну область при поширенні радіохвиль наближено можна обмежити третиною першої зони Френеля.

Визначити радіус зони Френеля можна за формулою

$$\rho_n = \sqrt{\frac{n\lambda r_1(r-r_1)}{r}}, \quad (15)$$

де  $n$  – номер відповідної зони Френеля;  
 $r$  – відстань від точок випромінювання та приймання;  
 $r_1$  – відстань від точки вторинного випромінювання до точки приймання.

У таблиці 1 наведено результати розрахунків розмірів першої зони Френеля  $\rho_1$  і розміри істотної області  $\rho_{10}$  для різних частот залежно від довжини траси.

На приземних трасах в ультракороткохвильовому діапазоні радіохвиль антени розташовують на таких висотах ( $h_a > \lambda$ ), що їх можна вважати піднятими.

Якщо істотна зона не досягає земної поверхні, то при аналізі умов поширення радіохвиль можна не враховувати відбитий від землі промінь. Об'єкти і споруди, які знаходяться за межами суттєвої області, мало впливають на умови поширення радіохвиль. Така ситуація можлива, наприклад, при розрахунках ЕМС між достатньо близько розташованими антенами базових станцій.

Таблиця 1 – Розміри істотних областей при поширенні радіохвиль різних діапазонів

$r, \text{км}$	$f = 150 \text{ МГц}$		$f = 450 \text{ МГц}$		$f = 900 \text{ МГц}$	
	$\rho_1, \text{М}$	$\rho_{10}, \text{М}$	$\rho_1, \text{М}$	$\rho_{10}, \text{М}$	$\rho_1, \text{М}$	$\rho_{10}, \text{М}$
0,1	14,1	44,7	8,16	25,7	5,76	18,2
0,3	24,5	77,5	14,12	44,5	9,98	31,5
0,5	31,6	100,0	18,24	57,4	12,9	40,6
1,0	44,7	141,4	25,8	81,2	18,24	57,4
2,0	62,9	200,0	36,5	114,9	25,8	81,2
3,0	77,3	244,9	44,68	140,7	31,6	99,5
4,0	89,2	282,8	51,62	162,5	36,5	114,9
6,0	109,2	346,4	63,22	198,9	44,7	140,7

10,0	141,2	447,2	81,6	256,9	57,7	181,7
------	-------	-------	------	-------	------	-------

### 3 Двопроменева модель поширення радіохвиль

На радіотрасах малих відстаней і середньої протяжності земна поверхня потрапляє в межі зон Френеля і в цьому випадку поле в точці приймання формується за рахунок взаємодії прямого та відбитого від землі променів. Напруженість поля прямого променя відповідає умовам вільного простору, спрощено вважаючи атмосферу однорідним непоглинаючим середовищем з параметрами  $\varepsilon=1$ ,  $\sigma=0$ , що не створює суттєвого впливу на умови поширення радіохвиль.

Напруженість поля, яке створює відбитий від землі промінь, визначається з урахуванням коефіцієнтів відбиття Френеля. При цьому в першому наближенні малу частину сферичної поверхні падаючої хвилі можна вважати плоскою. Сферичну поверхню землі на невеликій площі теж можна вважати локально плоскою. У необхідних випадках можна врахувати опуклість земної поверхні при відбитті радіохвиль.

Коефіцієнт відбиття від земної поверхні залежить від поляризації, кута падіння, діелектричної проникності, провідності ґрунту, довжини хвилі і визначається за формулами [3]:

- для вертикально поляризованої хвилі величина коефіцієнта відбиття

$$\dot{V}_\beta = \frac{\varepsilon' \sin \theta_\beta - \sqrt{\varepsilon' - \cos^2 \theta_\beta}}{\varepsilon' \sin \theta_\beta + \sqrt{\varepsilon' - \cos^2 \theta_\beta}} = |\dot{V}_\beta| e^{-j\beta_\beta}; \quad (16)$$

- для горизонтальної поляризації

$$\dot{V}_\Gamma = \frac{\sin \theta_\beta - \sqrt{\varepsilon' - \cos^2 \theta_\beta}}{\sin \theta_\beta + \sqrt{\varepsilon' - \cos^2 \theta_\beta}} = |\dot{V}_\Gamma| e^{-j\beta_\Gamma}, \quad (17)$$

де  $\varepsilon = \varepsilon' - j60\sigma\lambda$  - відносна комплексна діелектрична проникність ґрунту;

$j$  - уявна одиниця;

$\theta_g$  - кут падіння, причому

$$\sin \theta_g = \frac{(h_1 + h_2)}{\sqrt{R^2 + (h_1 + h_2)^2}}. \quad (18)$$

Підсумкову напруженість поля в точці приймання визначають за інтерференційними формулами як результат інтерференції прямої хвилі і хвилі, відбитої від земної поверхні (дивись рисунок 5).

Лінійна поляризація радіохвиль визначається положенням вектора електричного поля  $\vec{E}$  відносно поверхні землі. Якщо вектор знаходиться у площині, перпендикулярній до поверхні землі, то хвиля вертикально поляризована. Якщо вектор  $\vec{E}$  розташовано паралельно поверхні землі, то поляризація радіохвилі горизонтальна.

У системах рухомого радіозв'язку використовують тільки радіохвилі з вертикальною поляризацією. Вертикально розташовані лінійні антени випромінюють хвилі вертикальної поляризації. У системах телевізійного мовлення використовують радіохвилі з горизонтальною поляризацією.

Напруженість поля прямої хвилі, яка проходить безпосередньо до приймальної антени в умовах, близьких до вільного простору, визначають за формулою

$$E_{np} = \frac{\sqrt{30PG_1}}{r_1} F_1(\alpha) e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_1}. \quad (19)$$

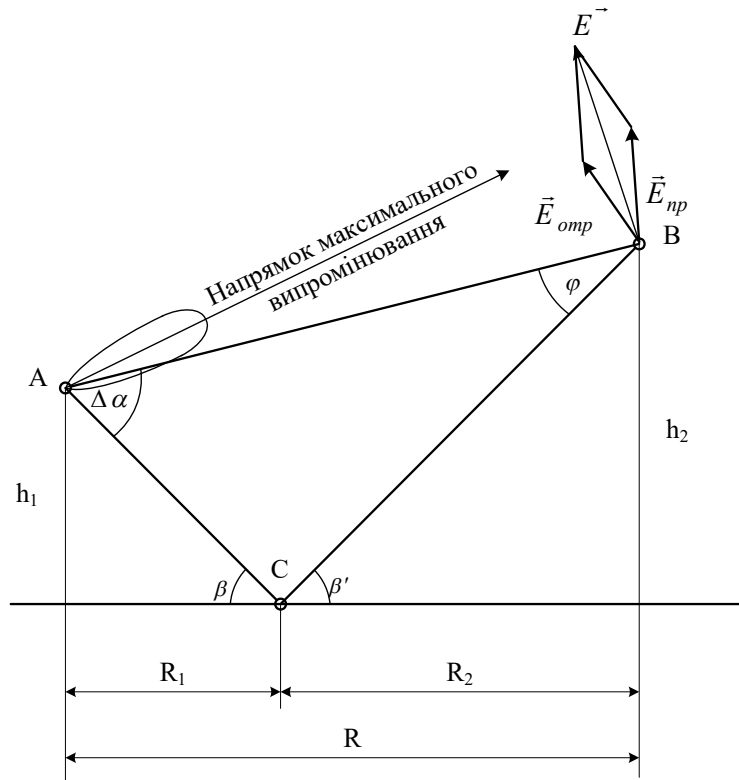


Рисунок 5 – Двопроменева модель поширення радіохвиль

Напруженість відбитої хвилі визначається за формулою

$$E_{від} = \frac{\sqrt{30PG_1}}{r_2} F_1(\alpha + \Delta\alpha) |\Phi| e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_2 + j\beta_\Phi}, \quad (20)$$

де  $P$  - ефективна випромінювана потужність;

$\alpha$  - кут між напрямом максимального випромінювання і напрямом зв'язку;

$\Delta\alpha$  - кут між напрямками поширення прямої і відбитої хвиль;

$r_1$  - відстань, яку проходить прямий промінь;

$r_2$  - відстань, яку проходить відбитий від землі промінь;

$|\Phi|$  - модуль коефіцієнта відбиття, який враховує зменшення амплітуди відбитої хвилі;

$\beta_\Phi$  - фаза коефіцієнтів відбиття, які враховують зміну фази відбитої хвилі відносно падаючої.

У реальних умовах організації мереж радіозв'язку дальність зв'язку  $r \gg h_1, h_2$ , і при визначенні амплітуд прямої і відбитої хвиль



можно прийняти  $r_1 \approx r_2 \approx r$ . При визначенні суми векторів  $E_{np}$ ,  $E_{від}$  можна не враховувати малий кут  $\psi$  між напрямками прямої і відбитої хвиль. При використанні малоспрямованих антен можна прийняти

$$F_1(\alpha) \approx F(\alpha + \Delta\alpha) \approx 1, \quad (21)$$

Тоді комплексна амплітуда результуючого поля може бути представлена як

$$E = E_{np} + E_{від} = \frac{\sqrt{30PG}}{r} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r} \left[ 1 + |\Phi| e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r + j\beta_\Phi} \right], \quad (22)$$

де  $\Delta r$  - різниця ходу між відбитою та прямою хвилями.

Використавши співвідношення

$$e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r} = \cos \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r - j \sin \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r, \quad (23)$$

можна представити результуючу напруженість поля як

$$E = E_0 \left| 1 + |\Phi| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r + \Phi\right) - j |\Phi| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r + \beta_\Phi\right) \right|, \quad (24)$$

модуль якої дорівнює

$$E = E_0 \sqrt{1 + |\Phi|^2 + 2|\Phi| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r + \beta_\Phi\right)} = E_0 \cdot V, \quad (25)$$

де  $E_0$  - напруженість поля в умовах, близьких до вільного простору;

$V$  - множник послаблення, який враховує вплив землі.

На рисунку 6 як приклад наведено результати розрахунку напруженості поля за двопрменевою моделлю за

інтерференційними формулами для частоти 300 МГц. Розрахунки проведено при вертикальній поляризації для умов вологого ґрунту з параметрами  $\varepsilon=20$ ,  $\sigma=10^{-2}$  Сим/м ґрунту при висотах антен  $h_1=25$  м, при висоті установлення антен абонентських станцій  $h_2=5, 6, 15, 20, 25$  м (криві 1, 2, 3, 4, 5) у діапазонах відстаней від 0,15 – 3 км.

На графіках спостерегаються три характерні зони. У початковій частині кривих залежність напруженості поля від відстані близька до  $1/r$ , практично незалежно від висот установлення антен. Це характерно для поширення радіохвиль в умовах, наближених до вільного простору, через незначний вплив відбитої від земної поверхні хвилі. При значних висотах установлення антен і малих відстанях земна поверхня знаходиться поза межами області, істотної при поширенні радіохвиль, і при цьому вплив відбитих від землі полів незначний.

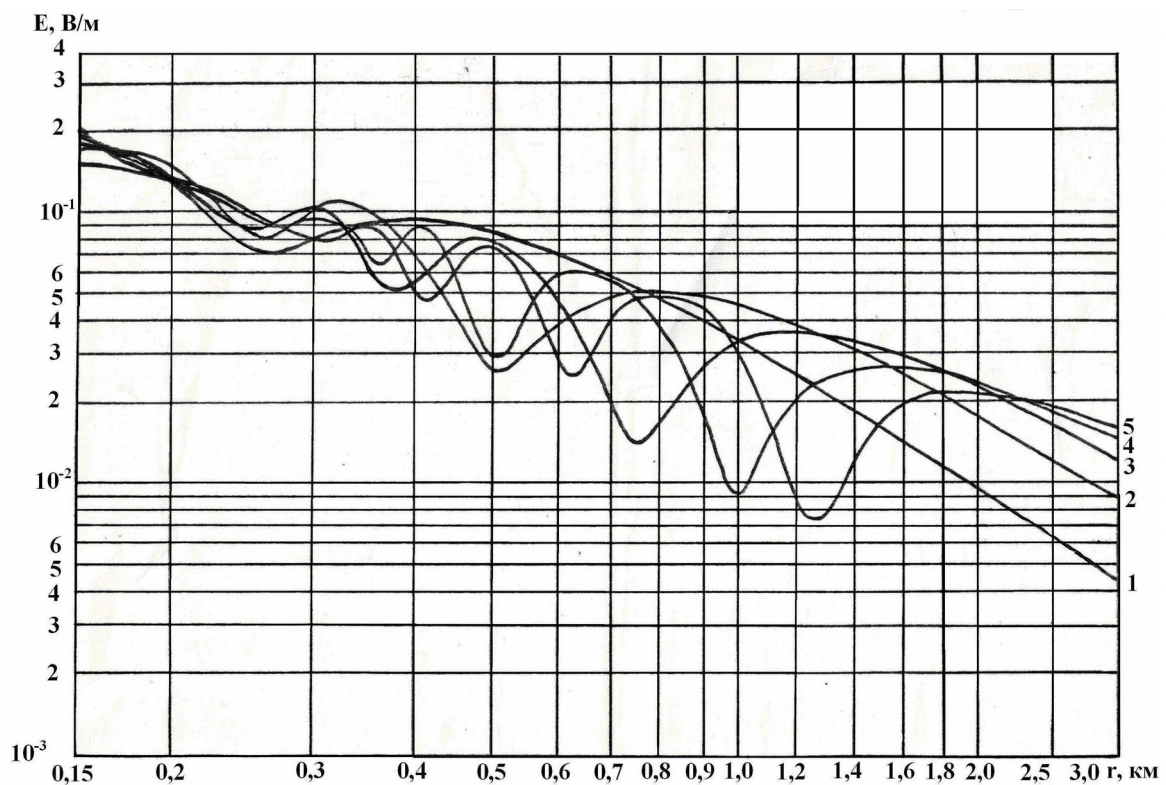


Рисунок 6 – Залежність напруженості поля від відстані за двопроменевою моделлю поширення радіохвиль

При збільшенні відстані виникають флуктуації напруженості поля внаслідок зміни фазових співвідношень при інтерференції прямого і відбитого променів, які залежать від частоти, параметрів земної поверхні і висоти установлення антени.

$$\text{При} \quad \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r + \beta_{\phi} = 2m\pi, \quad m=1,2,3 \quad (26)$$

пряма і відбита хвилі приходять у точку приймання з однакою фазою і створюють інтерференційний максимум напруженості поля, де  $m$  – номер максимуму.

Для кожного інтерференційного максимуму

$$|V_m| = 1 + |\Phi_m|, \quad (27)$$

де  $|\Phi_m|$  - значення модуля коефіцієнта відбиття.

При малих кутах падіння, які характерні для більшості випадків на лініях радіозв'язку з рухомими об'єктами, значення модуля коефіцієнта відбиття близьке до одиниці, тому без значної похибки значення модуля множника послаблення в інтерференційних максимумах  $|V_m| \approx 2$ .

$$\text{Якщо} \quad \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r + \beta_{\phi} = (2n+1) \cdot \pi, \quad n = 1,2,3,\dots, \quad (28)$$

то пряма і відбита хвилі приходять у точку приймання в протифазі, що призводить до створення інтерференційних мінімумів напруженості поля, де  $n$  - номер мінімуму.

У точках інтерференційних мінімумів

$$|V_n| = 1 - |\Phi_n|, \quad (29)$$

де  $|\Phi_n|$  - значення модуля коефіцієнта відбиття.

При менших відстанях ширина інтерференційних пелюсток менша через гіперболічну залежність  $\Delta r$  від відстані. Значення

$|V_n|$  в мінімумах зростає при збільшенні кута падіння і зменшення  $|\Phi_n|$ .

При подальшому спрощенні інтерференційної моделі поширення радіохвиль (внаслідок малих значень кутів падіння  $\theta$  значення коефіцієнтів відбиття наближається до одиниці, а фазовий зсув відбитої хвилі  $\beta \approx \pi$ ) для відстаней, які знаходяться в межах  $18 \frac{h_1 h_2}{\lambda} < r < 0,8r_0$ , залежність напруженості поля від відстані наближається до оберненоквадратичної  $1/r^2$  і визначається формулою Введенського [5]

$$|E| = \frac{4\pi\sqrt{30PG_1}}{r^2} \cdot \frac{h_1 \cdot h_2}{\lambda}. \quad (30)$$

Більшість зон обслуговування на реальних трасах знаходяться в межах дії формули Введенського.

На рисунку 6 залежність напруженості поля від відстані наближається до квадратичної  $1/R^2$  і проявляється характерна для формули Введенського пропорційність напруженості поля добутку висот антен.

Таким чином, на прикладі конкретних числових значень параметрів поширення радіохвиль на основі розв'язання інтерференційних формул для спрощеної моделі земної поверхні показано перехід до квадратичної формули Введенського.

#### **4 Емпіричні моделі поширення радіохвиль**

Теоретичні моделі є хорошим наближенням, але не враховують всі можливі впливи на реальних трасах рухомого радіозв'язку, особливо в містах. Двопроменева модель є основою при розрахунках РРЛ і хорошою теоретичною основою для розрахунків у мережах рухомого радіозв'язку, якщо враховувати поправкові коефіцієнти. Б. О. Введенський вперше запропонував використовувати для розрахунків електромагнітного поля в реальних умовах квадратичну формулу з додатковим множником ослаблення, який визначався з експериментальних даних для конкретних умов поширення радіохвиль.

У подальшому було запропоновано декілька моделей поширення радіохвиль, які можна розділити на дві великі групи: статистичні і детерменістські. Поділяють моделі для розрахунків в умовах пересіченої місцевості і в містах. Рекомендації різних національних і міжнародних організацій суттєво відрізняються. Складність вибору адекватної моделі поширення радіохвиль визначається труднощами практичного визначення параметрів моделі і порівняння якості роботи систем радіозв'язку, які базуються на різних моделях радіополя.

Статистичні моделі базуються на результатах експериментальних досліджень напруженості поля. Ці моделі враховують випадковий характер рівнів сигналів і параметрів радіоканалу і базуються на усередненні великої кількості емпіричних даних, отриманих у різних умовах організації радіозв'язку.

Детерміністські моделі враховують вплив окремих великих перешкод на трасах поширення радіосигналів і місцевих умов. Метою таких методів є підвищення точності розрахунку шляхом більш детального врахування особливостей конкретних трас, у тому числі планування району, характер забудови та рельєф місцевості.

Одна з перших моделей розрахунку очікуваної дальності радіозв'язку покладена в основу рекомендацій Міжнародного союзу електрозв'язку МСЕ-Р. Р 370-1, яка запропонована в 1966 р. У подальшому МСЕ доповнював і розвивав ці методи, що відображено в рекомендаціях Р. 370-2, Р. 370-5 та Р. 1546-3, остання редакція якої була прийнята у 2011 р. [6, 7].

За цими методиками, значення напруженості поля знаходять з «кривих поширення радіохвиль», які відображують функціональну залежність напруженості поля від дальності зв'язку при певних параметрах радіомереж.

$$E = F(R, f, h_{bc}, h_{ac}), \quad (31)$$

де  $R$  - довжина траси, км;

$f$  - робоча частота (діапазон частот), МГц;

$h_{bc}$ ,  $h_{ac}$  - ефективна висота передавальної антени базової та абонентської станції, м.

Напруженість поля сигналу в мережах рухомого радіозв'язку є випадковою величиною за місцем і часом.

При аналізі просторових флуктуацій напруженості поля в каналах рухомого радіозв'язку розрізняють швидкі і повільні завмирання сигналів. Швидкі завмирання є наслідком інтерференційних флуктуацій напруженості поля внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль. Повільні флуктуації виникають внаслідок зміни загального рельєфу місцевості і варіантів забудови. Повільні завмирання практично є коливаннями середнього рівня сигналу при переміщенні мобільної станції на значні відстані.

Просторова і часова неоднорідності діелектричної проникності тропосфери призводять до зміни умов рефракції радіохвиль, що у свою чергу викликає випадкові часові зміни рівнів сигналів на наземних трасах.

Повільні флуктуації і рефракційні зміни напруженості поля визначаються загальними змінами рельєфу місцевості і градієнта діелектричної проникності атмосфери і практично не залежать від впливу інфраструктури залізниць. Характеристики таких змін напруженості поля можна визначити за загальними рекомендаціями ITU – R з прогнозування поширення радіохвиль на наземних трасах [7, 23].

Відсоток пунктів на місцевості, у яких забезпечується приймання сигналів передавача на заданій відстані з заданою вірогідністю, називають імовірністю зв'язку за місцеположенням або надійністю радіозв'язку по полю.

Криві поширення радіохвиль у рекомендаціях ITU-R P.1546 побудовані для медіанного значення напруженості поля за місцем і різними значеннями імовірностей часових флуктуацій 50 %, 10 % і 1 %. Вважають, що просторові флуктуації напруженості поля в каналах рухомого радіозв'язку відповідають логарифмічно-нормальному закону, тобто значення напруженості поля в децибелах будуть відповідати нормальному закону.

Для медіанного значення імовірність перевищення розрахункового рівня складає лише 50 %, тобто надійність радіоканалу по полю складає лише 50 %. Для більшої надійності

необхідно вести розрахунки каналів за значеннями напруженості поля, які перевищуються з більшою імовірністю.

Значення сигналу з необхідною надійністю визначають з урахуванням додаткового параметра  $K(p)$

$$K(p) = \sigma \cdot K. \quad (32)$$

Значення коефіцієнта  $K$  та імовірність забезпечення зв'язку за місцеположенням наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Значення імовірнісних коефіцієнтів надійності зв'язку

S(p)	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,92	0,95	0,98	0,99
K	0	0,253	0,524	0,842	1,282	1,4	1,65	2,05	2,326

Значення напруженості поля  $E(p)$ , які перевищуються з більшою імовірністю  $p$ , будуть меншими, ніж медіанні значення:

$$E(p) = E_{0,5} - K \cdot \sigma, \quad (33)$$

де  $E_{0,5}$  - медіанні значення напруженості поля з кривих поширення радіохвиль за просторовими флуктуаціями;

$\sigma$  - середньоквадратичне відхилення напруженості поля. Для каналів рухомого радіозв'язку  $\sigma = 6-8$  дБ;

$K$  - коефіцієнт логорифмічно нормального розподілу, який відповідає необхідній надійності зв'язку.

У рекомендації МСЕ Р.1546 [7] наведено сімейства кривих поширення радіохвиль для частот 100, 600, 2000 МГц. Наведені значення напруженості поля перевищуються в 50 % точок приймання для трьох варіантів 50 %, 10 % і 1 % часових флуктуацій. Криві поширення побудовані для потужності передавача 1 кВт при використанні напівхвильового диполя.

На рисунку 7 наведено приклад кривих поширення радіохвиль з рекомендації МСЕ Р.1546 для частоти 100 МГц для умов пересіченої місцевості.

Криві відповідають висотам передавальної антени від 37,5 до 1200 м, де кожне наступне значення висоти відповідає удвоєному попередньому при висоті приймальної антени 10 м. Для висот, які відрізняються від наведених, застосовується лінійна апроксимація кривих. Наведені криві побудовані для сухопутних трас в умовах середньопересіченої місцевості з перепадом висот  $\Delta h = 50$  м.

Якщо значення робочих частот проєктованих радіомереж у смугах 30-3000 МГц відрізняються від значень, прийнятих при побудові кривих, то використовують відповідні поправкові коефіцієнти, які визначають шляхом інтерполяції або екстраполяції значень напруженості поля для кривих на частотах, які наведені в рекомендації.

Впровадження стільникових мереж рухомого радіозв'язку стимулювало дослідження і розроблення методів розрахунку рівнів сигналів в умовах міської забудови. Однією з перших була запропонована модель Окамури, яка розроблена на основі багаторічних експериментальних досліджень поширення радіохвиль у м. Токіо. Згідно з моделлю Окамури на основі побудованих графіків залежності медіанних значень втрат  $L$ , дБ від відстані між передавальною і приймальною антеною було запропоновано апроксимуюче співвідношення

$$L = L_0 + A(f, r) + C(h_{BC}) + C(h_{AC}), \quad (34)$$

де  $L_0$  - втрати при поширенні у вільному просторі;

$A(f, r)$  - відношення медіанних втрат у місті до втрат у вільному просторі при висоті антени базової станції  $h_{BC} = 20$  м і абонентської станції  $h_{AC} = 3$  м;

$C(h_{BC})$  і  $C(h_{AC})$  - коригуючі коефіцієнти, які враховують реальні значення висот установаження антен базової і абонентської станції;

$r$  - довжина траси.

Згасання у вільному просторі  $L_0$  розраховують за формулою відносно параметрів проєктованої мережі



$$L_0 = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2, \quad (35)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі, м.

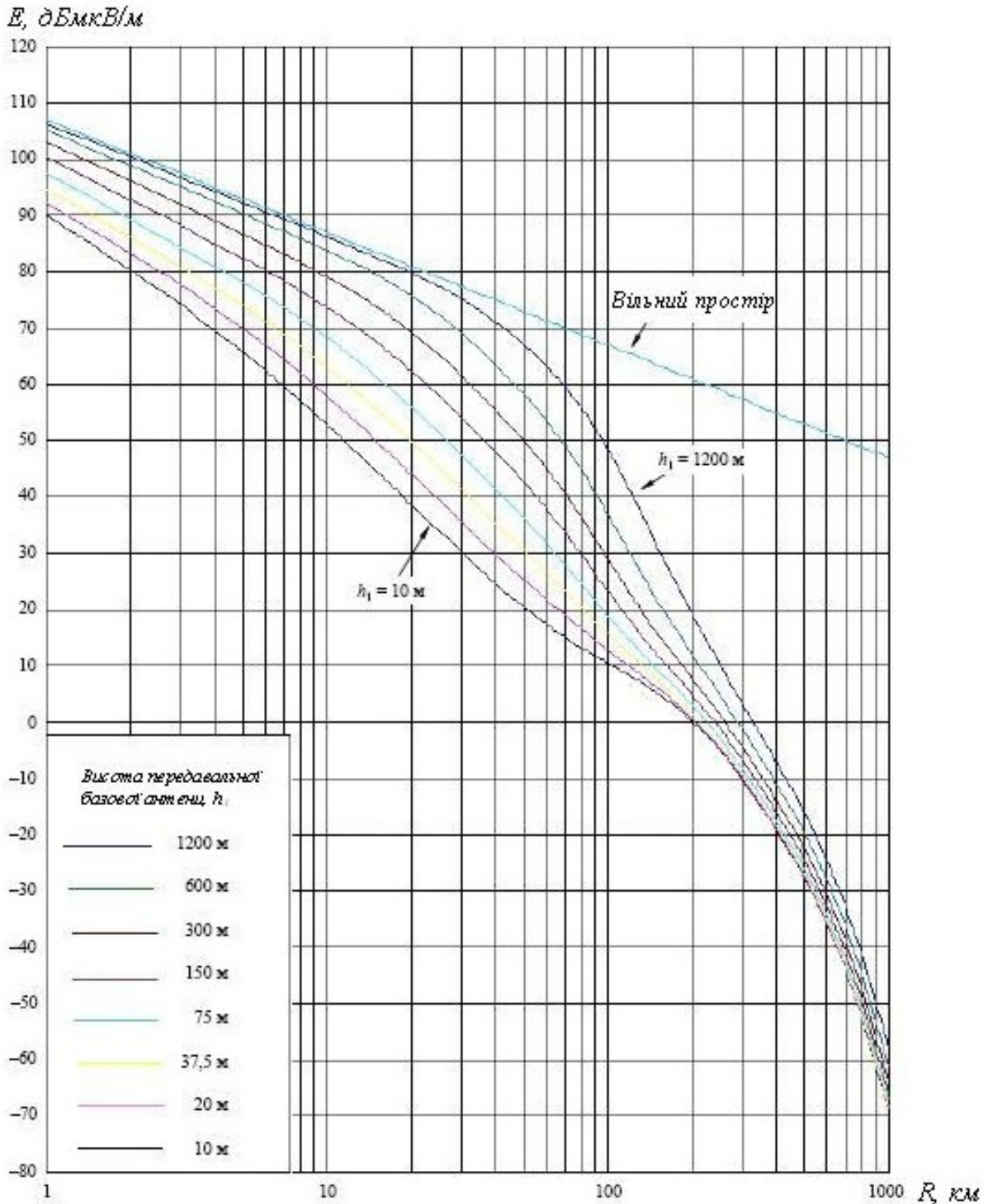


Рисунок 7 – Криві поширення радіохвиль,  
за рекомендацією Р.1546

Значення коефіцієнтів  $A(f, r)$ ,  $C(h_{BC})$  і  $C(h_{AC})$  визначають за спеціальними графіками, які побудовано на основі експериментальних даних.

Графоаналітичний метод розрахунків за моделлю Окамури створює певні незручності. М. Хата запропонував емпіричні формули, які апроксимують криві Окамури для медіанного значення згасання сигналу між двома ізотропними антенами. Така модель отримала назву моделі Окамури-Хата. Формули спеціально підібрано для умов поширення радіохвиль у різних територіальних зонах: місто, приміська зона, сільська місцевість.

Похибка в розрахунках за формулами Хата для певних умов не перевищує 1 дБ порівняно з результатами Окамури.

За моделлю Окамури-Хата медіанне значення втрат  $L$  для умов міста розраховують за формулою [9]

$$L = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_{AC} + (44,9 - 6,55 \lg h_{BC}) \lg R - a(h_{AC}), \quad (36)$$

де  $f$  - робоча частота, МГц;

$h_{BC}$  - висота встановлення антени базової станції, м;

$h_{AC}$  - висота підйому абонентської станції, м;

$R$  - дальність зв'язку, км;

$a(h_{AC})$  - коригуючий коефіцієнт, який використовують при висоті антени абонентської станції, відмінної від 1,5 м.

$$A(h_{ac}) = (1,1 \cdot \lg f - 0,7) \cdot h_{ac} - (1,56 \cdot \lg f - 0,8). \quad (37)$$

У приміській  $L_{II}$  і сільській  $L_C$  місцевостях згасання сигналів зменшується порівняно з величиною згасання в умовах міста.

$$L_{II} = L - 21 \lg \left( \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4; \quad (38)$$

$$L_C = L - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 40,94. \quad (39)$$

Модель Окамури–Хата дає можливість виконувати розрахунки при таких обмеженнях:

- частота сигналу  $f = 100 \dots 1500$  МГц;
- дальність зв'язку  $R = 1 \dots 100$  км;
- висота підйому антени базової станції (БС)  $h_{BC} = 20 \dots 200$  м;
- висота підйому антени абонентської станції (АС)  $h_{AC} = 1 \dots 10$  м.

Модель Окамури-Хата орієнтована на проведення розрахунків в умовах квазіплоскої території і не дозволяє враховувати різкі перепади висот будівель на конкретних трасах. Але цю модель найчастіше використовують при розрахунках стільникових мереж. Ця модель рекомендована Міжнародним союзом електрозв'язку МСЕ – рекомендація Р.529 [10].

На основі досліджень за проектом Європейського союзу COST-Cooperation for Scientific and Technical Research (співтовариство для наукових і технічних досліджень) розширено можливості моделі Окамури-Хата на частотний діапазон від 1,5 до 2 ГГц. Ця модель, яка отримала назву COST 231-Хата [Рек], призначена для ефективних висот антен базових станцій 10-200 м та абонентських станцій 1-10 м і для відстаней між ними 1-20 км [11, 12].

Певне застосування при розрахунках напруженості поля сигналів у мережах рухомого радіозв'язку знаходять детерміністські моделі, з яких найбільш відомі моделі Уолфіша-Ікегамі і Ксія-Бертоні [13]. У детерміністських моделях враховують особливості території і її забудови, інформація про яку знаходиться в спеціальних базах даних – цифрових картах місцевості, які є невід'ємною частиною сучасних геоінформаційних технологій.

Основні характеристики найбільш відомих моделей, які використовують при розрахунках каналів рухомого радіозв'язку в ультракороткохвильових діапазонах, наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 — Коротка характеристика моделей поширення радіохвиль

Модель	Призначення	Діапазон радіохвиль, МГц	Діапазон відстаней, км	Висота антен, м	Вплив рельєфа
1	2	3	4	5	6
1 ITU-R P.525 Вільний простір	Основна складова для більшості інших моделей	до 40000	Без обмежень	Без обмежень	Не враховується
2 ITU-R P.370-7	Для радіо- та телевізійного мовлення, але використовується для всіх служб. Основана на статистичній обробці численних експериментальних даних. Криві наведені для медіанних значень за місцем та часом (50%)	30-1000	до 1000	Висоти антен базової і абонентської станції $h_{BC}=37,5-1200$ м, $h_{AC}=10$ м	Враховуються перешкоди і місцевості
3 Хата, ITU-R P.529	Статистична модель для розрахунків зон обслуговування в системах транкінгового та стільникового радіозв'язку	150-1500	1-20	Висоти антен базової і абонентської станції $h_{BC}=20-200$ м $h_{AC}=1-10$ м	Місто, приміська зона, село. Рельєф не враховує
4 COST -231-НАТА	Статистична модель для розрахунків систем бездротового доступу з розширеним діапазоном робочих частот	1500-2000	1-20	Висоти антен базової і абонентської станції $h_{BC}=20-200$ м $h_{AC}=1-10$ м	Місто, приміська зона, село. Рельєф не враховує

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6
5 COST-231-WOLFISH-IKEGAMI	Детерміністська модель для систем рухомого радіозв'язку в місті. Враховує відбиття та дифракцію радіохвиль від будівель	800-2000	0,02-5	Висоти антен базової і абонентської станції $h_{BC}=30-200$ м, $h_{AC}=1-10$ м	Рельєф місцевості не враховується. Враховується орієнтація вулиць відносно напрямку зв'язку
6 ITU-R P.1546	Для систем рухомого радіозв'язку	30-3000	до 500	Висоти антен базової і абонентської станції $h_{BC}=10-1200$ м, $h_{AC}=10$ м	Рельєф враховується: перешкоди, моря, поляризація

Ці моделі враховують дифракцію на будівлях, яка створює основне ослаблення енергії радіохвиль на коротких міських трасах.

Модель Ксіа-Бертоні дозволяє врахувати етажність будівель і ширину вулиць. Модель побудована на основі рівнянь хвильової оптики і враховує різні механізми поширення радіохвиль: поширення у вільному просторі, дифракція на кромках криши будинків, відбиття від стін будівель.

Недоліком цієї моделі є суттєве обмеження по дальності дії зв'язку (до 0,5 км).

Модель Уолфіша-Ікегамі визначає медіанне значення втрат передачі  $L$ , дБ, за формулою

$$L = L_1 + L_2 + L_3, \quad (40)$$

де  $L_1$  - втрати при поширенні у вільному просторі;  
 $L_2$  - втрати при відбитті радіохвиль від будівель;  
 $L_3$  - втрати, пов'язані з орієнтацією вулиць відносно напрямку приходу сигналів.

Модель використовують за таких умов:

- висота антени базової станції  $h_{BC}=4-50$  м;

- висота антени абонентської станції  $h_{AC} = 1-3$  м;
- частота 0,8-2 ГГц;
- відстань 0,2-5 км.

Модель враховує лише середню висоту будівель, що є її суттєвим недоліком.

Застосування чисто детерміністських методів для розрахунку поля у великих зонах обслуговування не завжди виправдано через відсутність апріорної інформації про характеристики відбиття сигналів від різних типів споруд, з урахуванням неоднорідності поверхні стін і складної конфігурації. Можливе поєднання статистичних і детерміністських методів. Детерміністські методи використовуються для прогнозування локальних тіньових зон, утворених великими будівлями на трасах поширення радіохвиль. Середнє значення напруженості поля в освітленій зоні визначається статистичними методами, які дозволяють визначити медіанне значення напруженості поля в статистично однорідних умовах.

## **5 Порівняльний аналіз розрахунків енергетичних характеристик каналів за різними моделями**

Вище розглянуто найбільш відомі моделі поширення радіохвиль. Деякі з них набули статусу рекомендацій МСЕ.

Моделі поширення радіохвиль з елементами детерміністських розрахунків впливу окремих об'єктів на трасах Ксія-Бертоні, Уолфіша-Ікегамі та деякі інші мають скоріше академічний інтерес насамперед тому, що орієнтовані на дуже малі дальності радіозв'язку 0,5 – 1 км, де нескладно забезпечити умови радіопокриття, а розрахунок більш точних значень напруженості поля в цьому випадку має здебільшого лише теоретичне значення.

Для практичних завдань прогнозування рівнів сигналів у каналах радіозв'язку різного призначення найбільш широко використовують моделі Введенського, Окамури-Хата та методики розрахунку за рекомендацією МСЕ - Р.Р.1546.

Відомі публікації [10, 14], присвячені розрахункам каналів у відповідності з цими найбільш поширеними моделями. Однак

відсутні роботи, у яких проводилось би системне співставлення результатів прогнозування напруженості поля, розрахованої за різними моделями для однакових умов організації каналів рухомого радіозв'язку.

На рисунку 8 наведено результати розрахунків напруженості поля за найбільш поширеними моделями: рекомендація ITU-R P.1546, модель Окамури – Хата (рекомендація ITU-R P.529), формула Б. О. Введенського, виконані для умов, за якими побудовано криві поширення радіохвиль у рекомендації МСЕ P.1546.

Для зручності і наочності співставлення результатів розрахунків за різними моделями в розрахунках на рисунку 8 прийнято однакові значення висот установлення антени стаціонарної  $h_1=20$  м і антени приймальної радіостанції  $h_2=10$  м при потужності передавача 1 кВт і використанні напівхвильового вібратора в якості передавальної і приймальної антени. Результати всіх розрахунків представлені як залежність напруженості поля  $E$ , дБмкВ/м, від відстані для частоти  $f=100$  МГц.

Результати розрахунків за різними моделями суттєво відрізняються, хоча вони не протирічать фізичним уявленням про особливості застосування кожної з них.

Базова крива 1 відповідає рекомендації P.1546 для умов середньо-пересіченої місцевості. Результати розрахунків за формулою Введенського [5] (крива 2) знаходяться вище базової кривої на 10 дБ, що відповідає умовам відкритої місцевості, а не середньопересіченої.

Криві 3, 4, 5 розраховано за моделлю Окамури–Хата для різних умов поширення радіохвиль відповідно до рекомендації [9].

Крива 3, яка розрахована для умов міста, розташована нижче базової кривої P.1546, що відповідає більш складним умовам поширення радіохвиль у містах. Але криві 4 для умов приміської території і 1 для P.1546 майже збігаються. Різниця напруженості поля не перевищує 2 дБ.

Крива 5 для відкритої місцевості за моделлю Окамури–Хата розташована значно вище P.1546 і нижче напруженості поля у вільному просторі (крива 6), але при невеликій відстані і значних

висотах антен напруженість поля за кривою 5 наближається до умов вільного простору.

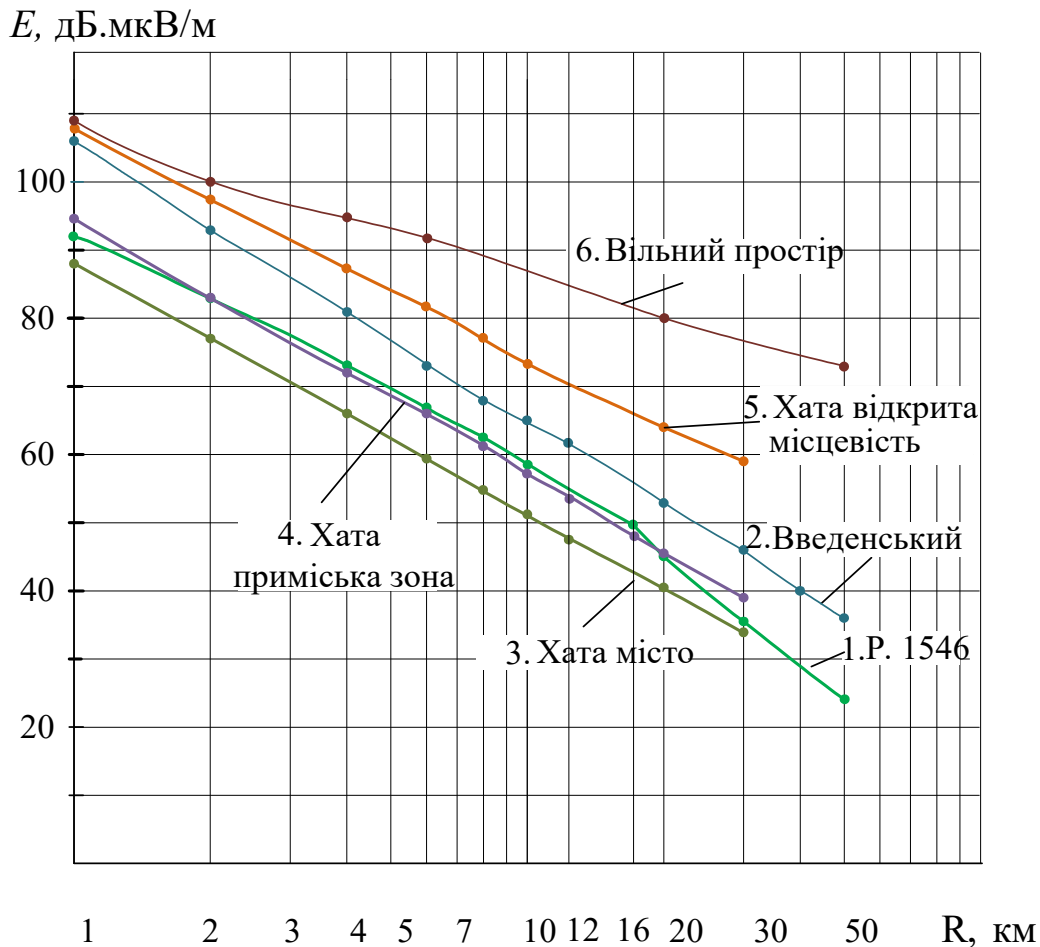


Рисунок 8 - Залежність напруженості поля від відстані для різних моделей поширення радіохвиль

Таким чином, використання моделі Окамури–Хата при проектуванні радіомереж надає більш широкі можливості врахувати особливості поширення радіохвиль в умовах різної місцевості.

Підвищення точності розрахунків може бути досягнуто при використанні моделей з експериментально визначеними параметрами для конкретних умов функціонування радіозв'язку. Для цього необхідно проведення попередніх експериментальних досліджень і співставлення отриманих результатів с даними розрахунків за вибраною моделлю, що дає можливість скоригувати параметри моделі.

## **6 Особливості поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізниць**



## 6.1 Структура електромагнітного поля

На залізницях України широко використовують системи технологічного радіозв'язку для оперативного управління рухомими об'єктами. Відповідно до чинних нормативних документів усі ділянки залізниць повинні бути обладнані засобами рухомого радіозв'язку [15].

Системи рухомого залізничного радіозв'язку класифікують за технологічними ознаками і розрізняють станційний (СРЗ), поїзний (ПРЗ) і ремонтно-оперативний радіозв'язок (РОРЗ) [16-18].

Розглянуті вище моделі не враховують особливості поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізниць, тому безпосереднє використання цих моделей для розрахунків каналів рухомого радіозв'язку на залізничних станціях і перегонах не забезпечує необхідної точності прогнозування енергетичних характеристик каналів. Необхідно визначити адекватну модель поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізниць.

Маючи спільну фізичну природу з особливостями поширення ультракоротких радіохвиль в умовах міст, поширення радіохвиль в умовах залізниць має суттєві особливості і вимагає досліджень за всіма характеристиками:

- залежність медіанних значень від відстані в різних умовах організації радіоканалів;
- параметри просторових флуктуацій інтерференційних полів сигналів;
- поляризаційні характеристики електромагнітного поля.

При впровадженні мереж технологічного радіозв'язку метрового діапазону у смугах 150 МГц на залізничному транспорті були розроблені відповідні рекомендації, які базувались на кривих поширення радіохвиль визначених експериментально. Криві поширення радіохвиль побудовані при певній потужності передавача, висот установлення антен. У конкретних умовах враховуються необхідні поправки.

На території залізничних станцій і вузлів поширення ультракоротких радіохвиль проходить у складних умовах. У зоні між передавальною і приймальною антенами знаходяться

численні перешкоди: опори, ферми та інші елементи контактної мережі, пристрої освітлення, велика кількість рухомого складу, будівлі та інші споруди. Переважна більшість залізничних ліній в Україні знаходяться в умовах середньопересіченої місцевості, вони можуть проходити в умовах прилеглої забудови міського і приміського типу. На електрифікованих ділянках з обох боків колій розташовано опори на відстанях 50 м одна від одної.

У результаті екранування істотної області при поширенні радіохвиль перешкодами і розсіювання енергії електромагнітної хвилі середнє значення напруженості поля в точці приймання менше, ніж при поширенні на відкритій місцевості за інших однакових умов. Цей факт враховують експериментальні криві поширення радіохвиль, які покладено в основу документів з розрахунку і проектування мереж.

Перешкоди на трасах поширення радіохвиль, насамперед металеві об'єкти, стають ефективними перевипромінювачами електромагнітної енергії, що визначає багатопроменевий характер радіоканалу і складну інтерференційну структуру поля. Ця остання тим складніша, чим більша кількість джерел перевипромінених хвиль. При довільному положенні передавальної, приймальної антен і перевипромінюючих об'єктів співвідношення між амплітудами і фазами хвиль у точці спостереження мають випадковий характер, хоча результуючий сумарний сигнал має фіксоване значення. При зміні взаємного положення приймальної і передавальної антен у каналах рухомого радіозв'язку або перевипромінюючих об'єктів виникають просторові флуктуації напруженості поля, які можна розглядати як випадковий процес.

У точку приймання приходить не тільки випромінена регулярна компонента, але і численні складові, перевипромінені об'єктами з випадковими амплітудами і фазами. Процес інтерференції коливань зручно ілюструвати за допомогою складання векторів на діаграмі (рисунок 9), де  $E_0$  – регулярна компонента, яка відповідає вертикальній поляризації поля передавальної антени,  $E_i$  – елементарний вектор перевипромінених полів, а  $\sum_{i=1}^n E_s$  – сумарний вектор перевипромінених полів.

Сумарний вектор перевипромінених полів, займаючи довільне положення, може створювати вертикальну  $\sum_{i=1}^n E_{s1}$  і горизонтальну  $\sum_{i=1}^n E_{s2}$  складові.

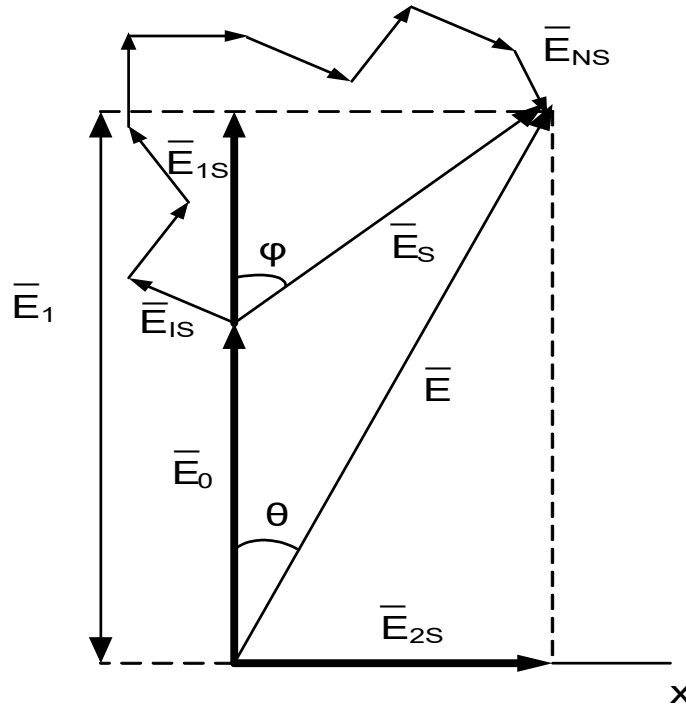


Рисунок 9 – Структура електромагнітного поля

Процес інтерференції полів можна представити у вигляді рівнянь. Основна компонента  $E_1$ , яка відповідає спряженій поляризації поля передавальної антени, складається з регулярної компоненти  $E_0$  та численних перевипромінених полів цієї ж поляризації  $E_i$ . Неосновна компонента іншої поляризації  $E_2$  створюється тільки сумою перевипромінених полів. Таким чином,

$$E_1 = E_0 \cos \omega t + \sum_{i=1}^n E_i \sin \theta_i \cos(\omega t + \Delta \varphi), \quad (41)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^n E_i \cos \theta_i \cos \varphi_i \cos(\omega t + \Delta \varphi), \quad (42)$$

де  $E_0$  - регулярна компонента напруженості поля;

$\sum_{i=1}^n E_i$  - сума перевипромінених хвиль.

Таким чином, при поширенні плоскополяризованих радіохвиль в умовах залізниць виникає їх деполаризація, а результуюче електричне поле буде еліптично поляризованим.

Кількість перевипромінюючих об'єктів значна, фази окремих перевипромінених хвиль рівномірні в інтервалі  $0 \dots 2\pi$ , а їх амплітуди незначні. У таких умовах ортогональні проекції сумарного вектора перевипромінених полів  $\bar{E}_s$  будуть розподілені за нормальним законом.

На цій підставі можна обґрунтовано вважати, що амплітуда результуючого вектора перевипромінених полів розподілена за законом Релея [8].

$$W(E) = \frac{2 \cdot E}{E_S^2} \exp\left(-\frac{E^2}{E_S^2}\right). \quad (43)$$

У випадку інтерференції хвиль постійної амплітуди і фази (регулярна компонента напруженості поля основної поляризації) з сукупністю  $n$  коливань з довільними амплітудами і фазами (перевипромінені поля) щільність розподілу ймовірностей амплітуд напруженості поля в цьому випадку описується узагальненим законом Релея або законом Релея – Райса [19].

$$W(E) = \int_0^{2\pi} W(E, \varphi) d\varphi = \frac{2 \cdot E}{E_S^2} \exp\left(-\frac{E^2 + E_0^2}{E_S^2}\right) J_0\left(\frac{2 \cdot E \cdot E_0}{E_S^2}\right), \quad (44)$$

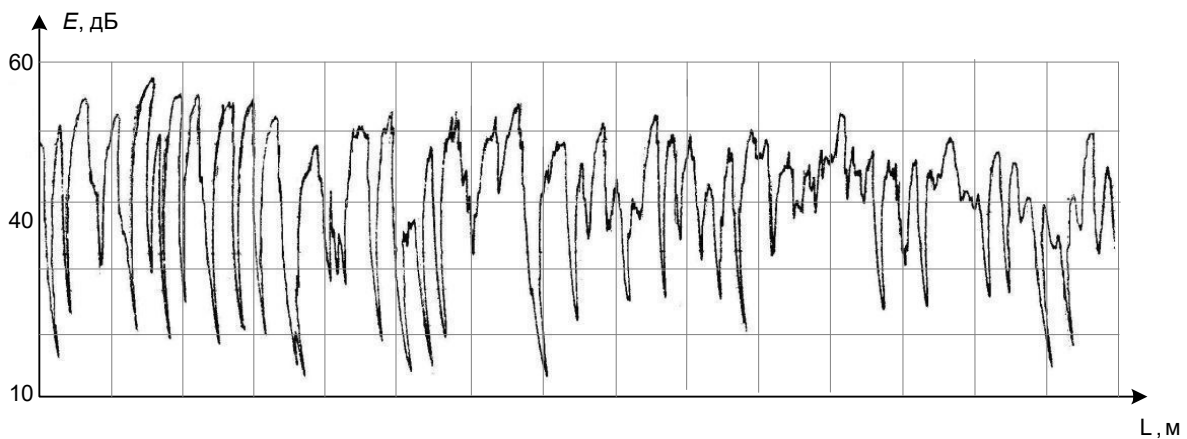
де  $J_0\left(\frac{2EE_0}{E_S^2}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{2EE_0}{E_S^2} \cos \varphi\right) \cos \varphi d\varphi$  - функція Бесселя першого роду нульового порядку.

Зразки записів флуктуацій напруженості поля ортогональних поляризаційних компонент при вертикальній поляризації поля передавальної антени на короткому відрізку шляху в умовах електрифікованих залізничних станцій наведені на рисунку 10. Просторові флуктуації напруженості поля мають випадковий характер, проте спостерігається регулярне

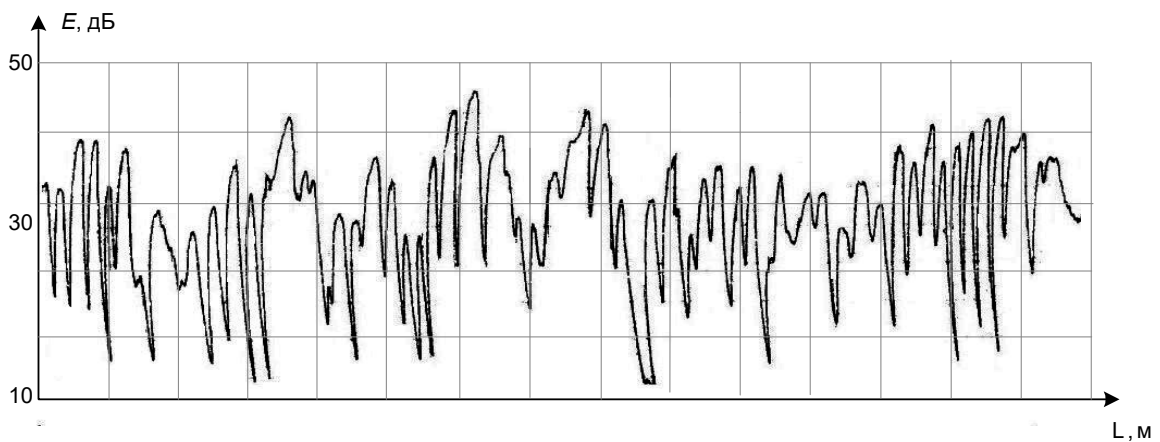
чергування суміжних максимумів і мінімумів, що підтверджує їх інтерференційне походження.

Об'єкти на трасах поширення радіохвиль створюють поля неосновної (горизонтальної) компоненти  $E_2$  значної амплітуди, які відрізняються від основної компоненти  $E_1$  лише на 5-7 дБ [15]. Напруженість поля в точках інтерференційних мінімумів суттєво відрізняється від середньостатистичних значень, що може призвести до зниження надійності каналу і навіть до втрати зв'язку.

Середнє значення напруженості поля перевипромінених полів вертикальної поляризації і горизонтальної поляризації відрізняється неістотно, що підтверджує наше припущення про симетричність формування поляризаційних складових перевипромінених полів.



а)



б)

## Рисунок 10 – Флуктуації напруженості поля основної (а) і неосновної (б) поляризаційних компонент на електрифікованих ділянках залізниць

При вертикальній поляризації поля передавальної антени напруженість перевипромінених полів горизонтальної поляризації на електрифікованих залізничних станціях у середньому на 5,1 – 5,8 дБ менше відповідних основних компонент. У горизонтальній площині перевипромінені поля не мають суттєвої спрямованості, хоча напруженість поля дещо більша при орієнтації вздовж залізничної станції. На неелектрифікованих ділянках залізниць перевипромінені поля мають меншу інтенсивність і відповідно змінюються поляризаційні характеристики.

Просторову надійність або надійність радіозв'язку по полю  $p$ , %, характеризують як відсоток точок приймання, у яких просторово флюктууючий сигнал перевищує мінімально необхідний рівень приймання в межах відносно короткого відрізка шляху на максимальній заданій відстані. Інтегральні функції розподілу флуктуацій амплітуд напруженості поля дозволяють визначити імовірність перевищення певних рівнів сигналів і таким чином проводити розрахунки каналів із заданою надійністю по полю.

### **6.2 Удосконалена модель поширення радіохвиль в умовах залізниць**

Чинні нормативні документи [15-17] забезпечують вирішення основних питань організації і розрахунку каналів залізничного технологічного радіозв'язку різного призначення в метровому діапазоні радіохвиль на частотах 151,725-156,000 МГц. Але з точки зору завдань широкої модернізації засобів технологічного радіозв'язку і освоєння нових діапазонів радіохвиль у смугах 450 і 900 МГц ці нормативні документи мають суттєві недоліки. Правила організації і розрахунку мереж СРЗ, ПРЗ, РОРЗ не передбачають

розрахунок каналів у перспективних для залізниць діапазонах 450 і 900 МГц.

В основу розрахунків каналів покладено графічні залежності зміни напруженості електричного поля сигналів від відстані  $E_2 = \varphi(r)$ , які побудовано при певних параметрах радіомереж. Застосування графоаналітичних методів ускладнює автоматизацію розрахунків і проектування радіомереж.

Не є доцільною диференціація методик за технологічними ознаками, але необхідно врахувати особливості поширення радіохвиль при організації радіомереж різного призначення на станціях і перегонах залізниць, електрифікованих і неелектрифікованих ділянках.

Необхідна уніфікація методів розрахунку, яка б забезпечувала єдиний підхід до розрахунку каналів радіозв'язку на основі загальних методологічних принципів, єдиної термінології і позначень і діапазонну і технологічну універсальність, передбачаючи розрахунок каналів в усіх використовуваних смугах частот.

Необхідно розроблення удосконаленої статистичної моделі для розрахунку енергетичних характеристик каналів технологічного радіозв'язку в умовах впливу інфраструктури залізниць із заданою надійністю. Пропонована модель побудована на основі результатів експериментальних досліджень поширення радіохвиль в умовах організації мереж рухомого радіозв'язку на залізницях.

Вимірювання проводились на ряді станцій і перегонів Південної залізниці в умовах електрифікованих і неелектрифікованих ділянок. Дослідження виконувались на частотах 450, 900 МГц. Вимірювалась напруженість поля основних і неосновних поляризаційних компонент при вертикальній поляризації поля передавальної антени.

Дослідження виконувались за допомогою сертифікованої апаратури для вимірювання напруженості поля FSM-8 та аналізатора спектра типу Anritsu MS 2724B з сертифікованими вимірювальними антенами, апаратні похибки якої задовольняють умови метрологічного забезпечення досліджень [20]. У якості джерел випромінювання використовувались типові радіозасоби у

відповідних полосах частот, вихідна потужність яких контролювалась.

При виконанні досліджень за результатами вимірювань напруженості поля для заданих відстаней на кожній із трас поширення радіохвиль визначались середні значення для певних висот установлення передавальної і приймальної антен. Для визначення статистичних характеристик використовувалися некорельовані дискретні значення обсягом 150 відліків. При проведенні досліджень враховувались особливості умов поширення радіохвиль на території залізничних станцій і перегонах залізниць. Проводилось порівняння результатів середніх значень напруженості поля на однаковій відстані від передавача для різних трас. На території станцій середні значення напруженості поля відрізнялись мало. Це свідчить про те, що в цілому на залізничних станціях умови поширення радіохвиль досить однорідні. На перегонах значення напруженості поля можуть відрізнятися більше залежно від місцевих особливостей трас. Для окремих трас результати вимірювань напруженості поля відрізнялись в 1,2 – 1,5 разу. У той же час усереднені апроксимуючі криві відрізняються мало. Для визначення апроксимуючих залежностей були усереднені результати вимірювань для трас, які були найбільш типовими.

На рисунку 11 за результатами статистичної обробки вимірів побудовано криві залежності медіанних значень напруженості поля від відстані для типових умов станцій (крива 1) і перегонів (крива 2) на неелектрифікованих ділянках залізниць. Експериментальні криві поширення радіохвиль для залізничних станцій і перегонів порівнювались з даними, які визначені за моделлю Окамури–Хата (рекомендація ITU-R P.529) [10]. Криві 3, 4, 5 розраховано за моделлю Окамури–Хата для різних умов поширення радіохвиль: місто, приміська зона, відкритий простір. Всі криві побудовано для однакових умов передачі на частоті 900 МГц при потужності передавача 1 Вт і використанні напівхвильового вібратора в якості антени, висот установлення антен стаціонарної  $h_1 = 20$  м і антени приймальної (локомотивної) радіостанції  $h_2 = 5$  м.

Експериментальні результати відрізняються від результатів, визначених за моделлю Окамури–Хата відповідно до



рекомендації ITU-R P.529. Підвищити точність розрахунків напруженості поля можна на основі модифікації моделі Окамури–Хата за умовами експериментальних кривих.

Визначено апроксимації залежностей напруженості поля від відстані для умов перегонів і станцій:

$$E_{\text{прс}} = 79,25 - 26,05 \cdot \lg f + 13,82 \cdot \lg h_1 + (1,1 \cdot \lg f - 0,7) \cdot h_2 - (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} + 4,78 \cdot (\lg f)^2; \quad (45)$$

$$E_{\text{срс}} = 57,01 - 7,22 \cdot \lg f + 13,82 \cdot \lg h_1 + (1,1 \cdot \lg f - 0,7) \cdot h_2 - (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} + 2 \cdot \left(\lg\left(\frac{f}{28}\right)\right)^2. \quad (46)$$

Результати вимірювань на різних частотах підтвердили частотну універсальність запропонованої моделі. Використання удосконаленої моделі підвищує точність визначення енергетичних характеристик радіоканалів на 8-11 дБ на станціях і перегонах залізниць порівняно з рекомендаціями Міжнародного союзу залізниць [3].

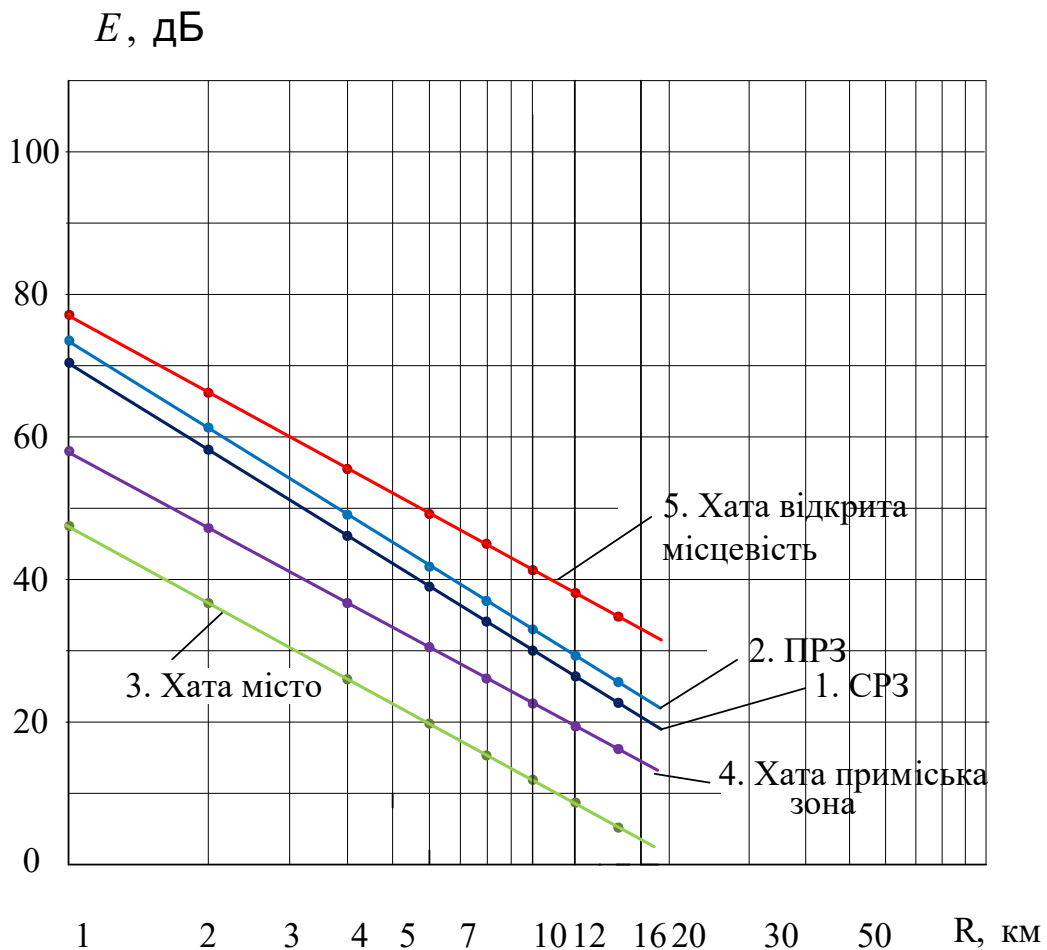


Рисунок 11 – Криві поширення радіохвиль в умовах впливу інфраструктури залізниць

Експериментальні криві поширення радіохвиль відповідають особливостям різних трас. На перегонах залізниць згасання сигналів дещо більше, ніж на відкритій місцевості (крива 2). На залізничних станціях згасання сигналів менше, ніж в умовах приміської зони, за рахунок меншої щільності забудови. У той же час у рекомендаціях з впровадження систем GSM-R на залізницях [21] рекомендують вести розрахунки зон обслуговування радіомереж за формулою Окамури–Хата для умов міст. Це забезпечує значний надлишковий запас потужності. Але при реальному проектуванні необхідно враховувати зростання згасання в більш складних умовах порівняно з базовими. Відповідно до рекомендацій ITU-R при збільшенні горбкуватості поверхні додаткове згасання визначають залежно від перепаду висот місцевості за рекомендаціями ITU-R P.370, P.1546 [6, 7]. Вплив лісових насаджень на трасах поширення радіохвиль можливо врахувати відповідно до рекомендації ITU-R P.833 [22].

На електрифікованих ділянках залізниць необхідно враховувати додаткове згасання, викликане пристроями електрозабезпечення і контактної мережі. За результатами експериментальних досліджень додаткове згасання складає 5-8 дБ на залізничних станціях і 1-2 дБ на перегонах залізниць.

Вести розрахунки енергетичних характеристик каналів зручніше на основі значень втрат сигналів. Формули для розрахунку основних втрат потужності сигналів для умов поширення радіохвиль на станціях  $L_{осн.ст}$ , дБ, і перегонах  $L_{осн.пер}$ , дБ, становлять

$$L_{осн.ст} = 52,35 + 27,22 \cdot \lg f - 13,82 \cdot \lg(h_1) - (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_2 + (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} - 2 \cdot (\lg(\frac{f}{28}))^2 \quad (47)$$

$$L_{осн.пер} = 30,11 + 46,05 \cdot \lg f - 13,82 \cdot \lg(h_1) - (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_2 + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_1)) \cdot \lg R^{1,15} - 4,78(\lg(\frac{f}{28}))^2 \quad (48)$$

Такий підхід зручніший для автоматизації розрахунків, оскільки замість базових кривих поширення радіохвиль використовуються емпіричні рівняння, універсальні для різних діапазонів частот і висот установлення антен радіостанцій.

Додаткові особливості конкретних трас – рельєф місцевості, вплив рефракційних змін, вплив лісових насаджень, електрифікація – можуть бути враховані окремими додатковими показниками відповідно до рекомендацій ІТУ-R і відомчих документів.

Для найбільш повної характеристики інтерференційних просторових флуктуацій, викликаних впливом інфраструктури залізниць побудовані емпіричні інтегральні функції розподілу. Вони дозволяють визначити імовірність перевищення певних рівнів сигналів і таким чином проводити розрахунки каналів із заданою надійністю по полю [20].

На графіках (рисунок 12) наведено експериментальні інтегральні функції розподілу значень напруженості поля в різних умовах поширення радіохвиль. Криві побудовано на основі результатів статистичної обробки узагальнених результатів дослідження. По осі ординат наведено рівні сигналу у

відносних одиницях  $K_i = \frac{E_i}{E_{сз}}$ .

Графіки характеризують розподіл імовірностей амплітуд напруженості поля на будь-якій відстані від передавальної антени. По осі абсцис нанесено кількість точок приймання у відсотках, у яких сигнал, що приймається, перевищує рівень, зазначений на осі ординат. Найбільш глибокі флуктуації спостерігаються на залізничних станціях (крива 1) і перегонах електрифікованих ділянок залізниць (крива 2). Причому різниця глибини флуктуацій несуттєва. На залізничних станціях неелектрифікованих ділянок глибина флуктуацій напруженості поля зменшується (крива 3). Найменша глибина флуктуацій спостерігається на перегонах неелектрифікованих ділянок залізниць (крива 4). Відповідні значення середньоквадратичного відхилення напруженості поля для заданих умов складають: на електрифікованих залізничних станціях  $\sigma_1 = 5,2$  дБ, на перегонах електрифікованих ділянок залізниць  $\sigma_2 = 4,7$  дБ, на неелектрифікованих залізничних станціях  $\sigma_3 = 3,1$  дБ, і значно менше значення  $\sigma_4 = 1,3$  дБ спостерігається на перегонах неелектрифікованих ділянок залізниць.

Характер і глибина флуктуацій на частотах 900 і 450 МГц відрізняються несуттєво. На малих відстанях при збільшенні частоти в результаті зменшення розмірів областей, істотних при поширенні радіохвиль, а отже, зменшення кількості екрануючих і перевипромінюючих об'єктів, збільшується складова  $E_0$  при деякому зниженні амплітуди перевипромінених полів  $E_s$ . Це призводить до зменшення глибини флуктуацій на частоті 900 МГц. Проте при більших відстанях зменшення когерентної складової  $E_0$  для частоти 900 МГц за рахунок зростання екрануючої дії перешкод призводить до деякого зростання глибини флуктуацій.

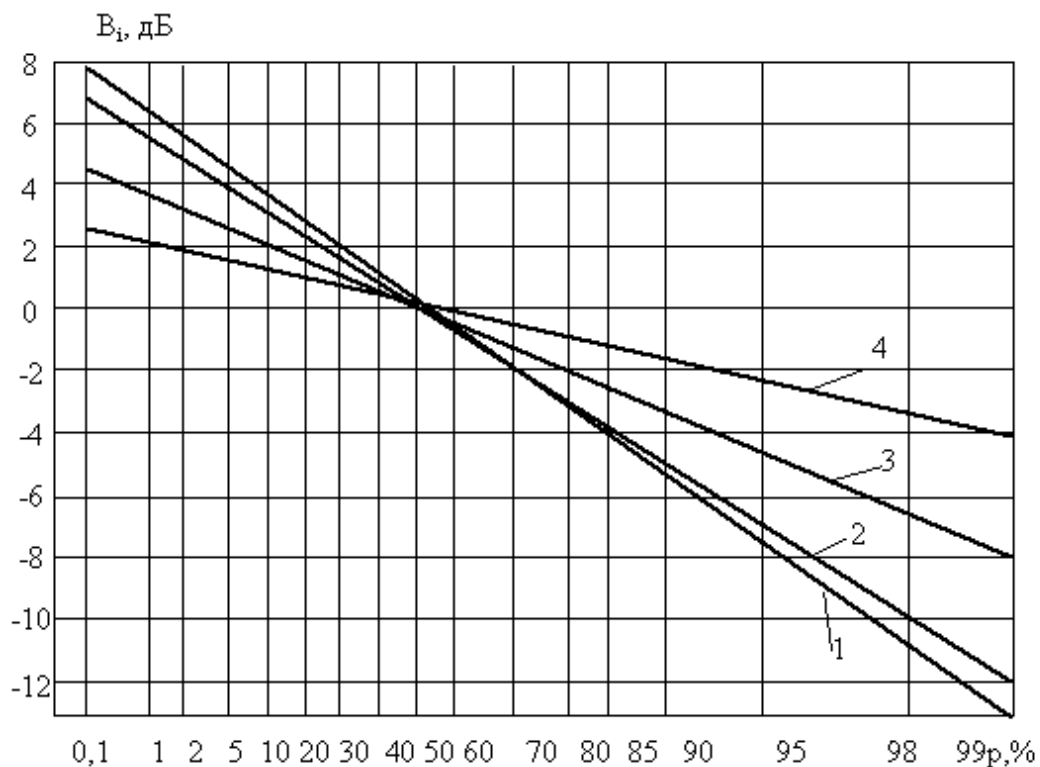


Рисунок 12 - Розподіл рівнів сигналів залежно від надійності радіосигналу по полю

На перегонах неелектрифікованих ділянок залізниць напруженість поля регулярної компоненти  $E_0$  значна, а величина перевипромінених полів  $E_s$  відносно мала, оскільки кількість перевипромінюючих об'єктів в області, суттєвій при поширенні радіохвиль, у цих випадках незначна. На залізничних станціях неелектрифікованих ділянок залізниць зростає кількість перевипромінюючих об'єктів, компонента  $E_s$  при цьому відносно збільшується, а регулярна компонента  $E_0$  зменшується за рахунок екранування істотної області, особливо сильно в разі низькорозташованих антен, у результаті глибина флуктуацій зростає.

На електрифікованих ділянках залізниць за рахунок впливу пристроїв електрифікації значно зростає кількість перевипромінюючих об'єктів і відповідно зростає глибина флуктуацій, причому різниця для станцій і перегонів незначна (криві 1, 2). У загальному випадку при малих відстанях між передавальною і приймальною антенами глибина флуктуацій менша. При подальшому збільшенні відстані між передавальною

і прийнятною антенами співвідношення стабілізується. Це співвідношення вже склалося і збільшення розмірів істотної області, наприклад за межі станції, істотно не впливає. Визначальний вплив мають перші зони Френеля, де вже зосереджено практично всі великі металеві перевипромінюючі об'єкти – рухомий склад, опори і ферми контактної мережі та інше. У більш віддалених зонах при цьому, як правило, немає перевипромінюючих об'єктів такого роду, і вплив цих областей значно менший.

У каналах рухомого радіозв'язку, насамперед на перегонах залізниць, окрім розглянутих інтерференційних флуктуацій, які називають швидкими, необхідно враховувати так звані повільні просторові завмирання сигналів. Повільні флуктуації виникають внаслідок зміни загального рельєфу місцевості і варіантів забудови. Повільні завмирання практично є коливаннями середнього рівня сигналу при переміщенні мобільної станції на значні відстані. Автори роботи [8] вважають, що результати експериментальних досліджень повільних коливань не протирічають загальноприйнятій моделі логарифмічно нормального закону розподілу рівнів поля.

Зміни умов рефракції радіохвиль викликає випадкові часові зміни рівнів сигналів на наземних трасах (часові флуктуації).

Повільні просторові і часові флуктуації напруженості поля практично не залежать від впливу інфраструктури залізниць і визначаються загальними змінами рельєфу місцевості і градієнта діелектричної проникності атмосфери. Характеристики таких змін напруженості поля можна визначити за загальними рекомендаціями ITU – R з прогнозування поширення радіохвиль на наземних трасах [23].

Результати досліджень поширення радіохвиль важливі не тільки для розрахунку мереж технологічного радіозв'язку, але і для організації стільникових мереж загального користування, які мають працювати вздовж залізниць для обслуговування пасажирів поїздів [24].

Використання удосконаленої моделі поширення радіохвиль в умовах впливу залізниць підвищує точність розрахунку ослаблення радіосигналів і визначення зон обслуговування і дозволяє оптимізувати проектні рішення для забезпечення високої якості та необхідної надійності радіоканалів.

## Контрольні питання

- 1 Енергія електромагнітного поля у вільному просторі.
  - 2 Промінь, фронт і поляризація електромагнітної хвилі.
  - 3 Що таке «вільний простір» в електродинаміці?
  - 4 Поширення радіохвиль в умовах вільного простору.
  - 5 Вплив землі і тропосфери на поширення радіохвиль.
- Атмосферна рефракція.
- 6 Двопроменева модель поширення радіохвиль.
  - 7 Формула Введенського при розрахунках ультракороткохвильового діапазону.
  - 8 Що таке рефракція радіохвиль?
  - 9 Що таке дифракція радіохвиль?
  - 10 Що таке інтерференція радіохвиль?
  - 11 Що таке відстань прямої видимості?
  - 12 Від чого залежать характеристики променя, який відбитий від поверхні землі?
  - 13 Структура електричного поля відповідно до двопроменевої моделі поширення радіохвиль над земною поверхнею?
  - 14 Що таке криві поширення радіохвиль?
  - 15 Як визначають втрати енергії при поширенні радіохвиль?
  - 16 Статистичні моделі поширення ультракоротких радіохвиль.
  - 17 Модель Окамури-Хата в розрахунках енергетичних характеристик каналів рухомого радіозв'язку.
  - 18 Особливості поширення радіохвиль в умовах інфраструктури залізниць.
  - 19 Інтерференційні просторові флуктуації напруженості поля сигналів.
  - 20 Причини повільних флуктуацій електромагнітного поля.
  - 21 Детерміністські моделі поширення радіохвиль в умовах міста.
  - 22 Особливості поширення радіохвиль різних діапазонів.
  - 23 Розрахунок енергетичних характеристик у каналах рухомого радіозв'язку.
  - 24 Причини часових флуктуацій напруженості поля при поширенні радіохвиль.

25 Причини просторових флуктуацій у каналах рухомого радіозв'язку.

26 Що таке надійність радіоканала по полю?

27 Основні моделі поширення радіохвиль у каналах рухомого радіозв'язку.



## Список літератури

1 Шокало, В. М. Електродинаміка та поширення радіохвиль [Текст] / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усін [та ін.]. – Харків: ХНУРЕ, вид-во «Колегіум», 2009.-435 с.

2 Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / Б. М. Петров. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 457 с.

3 Рекомендация МСЭ-Р Р.525-2. Расчёт ослабления в свободном пространстве. Calculation of free-space attenuation [Текст]. – Женева, 1994. – 4 с.

4 Калинин, А. И. Распространение радиоволн и работа радиолиний [Текст] / А. И. Калинин, Е. Л. Черенкова. – М.: Связь, 1971. – 439 с.

5 Введенский, Б. А. Распространения ультракоротких радиоволн [Текст] / Б. А. Введенский. – М.: «Наука», 1973. – 407 с.

6 ITU-R Recommendation P.370. VNF and UNF propagation curves for the frequency range 30 MHz to 1000 MHz. Broadcasting services. Кривые распространения ОВЧ и УВЧ диапазона частот от 30 до 1000 МГц [Текст]. – Женева, 1991. – 45 с.

7 Recommendation ITU-R P.1546-3. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz [Текст]. – Женева, 2007. – 57 с.

8 Долуханов, М. П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн [Текст] / М.П. Долуханов. – М.: Связь, 1971. – 184 с.

9 Hata, M. Empirical fomula for propagation loss in land mobile radio services [Текст] / М. Hata // IEEE Trans. Venicular Technology. – 1980. – Vol. 29, № 3. – P. 317-325.

10 Recommendation ITU-R P.529-3. Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands [Текст]. - Женева, 1999. – 25 с.

11 Investigation of Modified Hata Propagation Models. Spectrum Planning Report. Radiofrequency Planning Group Australian Communications Authority // SP. – 2/01, april 2001. - P. 15.

12 Рекомендации COST 231 – Хата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cost.eu/domains\\_actions/ict/Actions/231](http://www.cost.eu/domains_actions/ict/Actions/231).

13 Ikegami, F. Theoretical prediction of mean field strength on urban mobile radio [Текст] / F. Ikegami // IEEE Trans. On Antenn. And Propag. – 1991. – Vol. 39, № 3. – P.137-143.

14 Милютин, Е. Модели расчёта потерь мощности сигнала в сотовых системах связи [Текст] / Е. Милютин // Мобильные телекоммуникации. – 2008. - № 4. – С. 25-29.

15 Радиотехнические системы железнодорожного транспорта: учеб. для вузов ж. - д. трансп. [Текст] / Ю. В. Ваванов, А. В. Елизаренко, А. А. Танцюра [и др.]. – М.: Транспорт, 1991. – 303 с.

16 Правила организации и расчета сетей поездной радиосвязи [Текст]: нормат.-произв. изд. – М.: Транспорт, 1991. – 93 с.

17 Методические указания по расчету системы станционной радиосвязи [Текст]: нормат.-произв. изд. – М.: Транспорт, 1991. – 46с.

18 Руководящие указания по организации и расчету ремонтно-оперативной радиосвязи [Текст]: нормат.-произв. изд. – М.: Транспорт, 1991. – 29 с.

19 Рекомендация ITU-R P.1057-2-2007. Распределение вероятностей, касающихся моделирования распространения радиоволн [Текст]. – Женева, 2007. – 18 с.

20 Єлизаренко, А. О. Удосконалена статистична модель для розрахунку енергетичних характеристик каналів залізничного технологічного радіозв'язку [Текст] / А. О. Єлизаренко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. - № 2. - С. 37-42.

21 GSM-R. Procurement & Implementation Guide [Текст] / International Union of Railways-Paris. – Paris, 2009. – 246 с.

22 Рекомендация ITU-R P. 833-6-2007. Ослабление сигналов растительностью [Текст]. – Женева, 2007. – 17 с.

23 Рекомендация ITU-R P.453-9-03. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции. – Женева, 2003. – 23 с.

24 Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку [Текст]: затв. наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 09.06.2009 р. № 340-Ц. – К., 2010. – 123 с.





