



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**К. А. Трубчанінова, О. С. Жученко, В. П. Лисечко**

**БЕЗДРОТОВІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ**

*Навчальний посібник*

**Харків 2022**

**УДК 621.391**

**Т 776**

*Рекомендовано вченою радою Українського державного університету залізничного транспорту як навчальний посібник  
(витяг з протоколу № 4 від 08.08.2022 р.)*

**Рецензенти:**

професор О. А. Серков (НТУ «ХП»),  
доцент О. В. Шефер (Національний університет  
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Трубчанінова К. А., Жученко О. С., Лисечко В. П.  
Т 776 Бездротові телекомунікаційні системи: Навч. посібник.  
– Харків: УкрДУЗТ, 2022. – 86 с., рис. 40, табл. 31.  
ISBN

Навчальний посібник призначений для ознайомлення здобувачів вищої освіти з бездротовими телекомунікаційними системами, містить як теоретичні відомості, так і практичні поради з розв'язування типових задач під час практичних занять, при курсовому та дипломному проєктуванні, а також самостійній підготовці. Крім того, типові задачі можуть бути використані при проведенні поточного, модульного та підсумкового контролю знань здобувачів вищої освіти, а також під час іспиту.

Для здобувачів вищої освіти, які навчаються за очною (денною, вечірньою), заочною (дистанційною) і поєднаними формами навчання.

УДК 621.391

ISBN

© Український державний університет  
залізничного транспорту, 2022.

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
<i>1. Зони Френеля для бездротового каналу</i>	6
1.1. Теоретичні відомості	6
1.2. Типове завдання 1	7
Контрольні питання	8
Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 1	9
<i>2. Дальність роботи бездротового каналу зв'язку 802.11</i>	10
2.1. Теоретичні відомості	10
2.2. Типове завдання 2	14
Контрольні питання	16
Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 2	16
<i>3. Попереднє планування бездротової локальної мережі 802.11</i>	18
3.1. Теоретичні відомості	18
3.2. Типове завдання 3	22
Контрольні питання	22
Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 3	22
<i>4. Робота з програмою D-link Wi-Fi Planner PRO</i>	26
4.1. Теоретичні відомості	26
4.2. Типове завдання 4	26
Контрольні питання	28
Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 4	28
<i>5. Втрати на трасі радіоканалу, за моделлю Хата</i>	42
5.1. Теоретичні відомості	42
5.2. Типове завдання 5	46
Контрольні питання	47
Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 5	48
<i>6. Втрати на трасі радіоканалу, за моделями Уолфіша-Ікегами і Кся-Бертоні</i>	51
6.1. Теоретичні відомості	51
6.2. Типове завдання 6	55
Контрольні питання	56
Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 6	57
<i>7. Оцінювання втрат на трасі радіоканалу у випадку дифракції на клині при одній перешкоді</i>	61
7.1. Теоретичні відомості	61

7.2. Типове завдання 7	63
Контрольні питання	65
Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 7	65
8. Оцінювання втрат на трасі радіоканалу у випадку дифракції на циліндрі	67
8.1. Теоретичні відомості	67
8.2. Типове завдання 8	69
Контрольні питання	71
Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 8	71
9. Розрахунок параметрів мережі 802.11e (мобільний WiMAX)	72
9.1. Теоретичні відомості	72
9.2. Типове завдання 9	78
Контрольні питання	78
Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 9	81
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	84

## ВСТУП

Навчальний посібник призначений для ознайомлення здобувачів вищої освіти з бездротовими телекомунікаційними системами, містить як теоретичні відомості, так і практичні поради з розв'язування типових задач під час практичних занять, при курсовому та дипломному проектуванні, а також самостійній підготовці. Крім того, типові задачі можуть бути використані при проведенні поточного, модульного та підсумкового контролю знань студентів, а також під час іспиту.

У навчальному посібнику наведено формули, необхідні для виконання розрахунків, таблиці, які пояснюють рисунки і додатки. У посібнику розглядаються задачі, пов'язані з інженерними розрахунками характеристик бездротового каналу зв'язку стандарту 802.11х, питання планування бездротової локальної мережі 802.11х, що виникають перед інженерами-експлуатаційниками існуючих бездротових телекомунікаційних систем.

Оволодіння основними положеннями та методиками розрахунків, наведеними в розділах посібника, дозволяє здобувачам більш якісно їх засвоїти, одержати необхідні знання та навички.

# 1. ЗОНИ ФРЕНЕЛЯ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОГО КАНАЛУ

## 1.1. Теоретичні відомості

Для ефективного зв'язку за допомогою високочастотних хвиль потрібно забезпечити безперешкодну лінію прямої видимості між передавачем і приймачем. При цьому навколо прямого тракту між передавачем і приймачем має бути певна відстань, вільна від перешкод [1, 19]. Для розрахунку радіуса першої зони Френеля в центральній точці між приймачем і передавачем необхідно знати відстань між ними і частоту (довжину хвилі), на якій працює система зв'язку. Зразковий вигляд зони Френеля зображено на рис. 1.1.

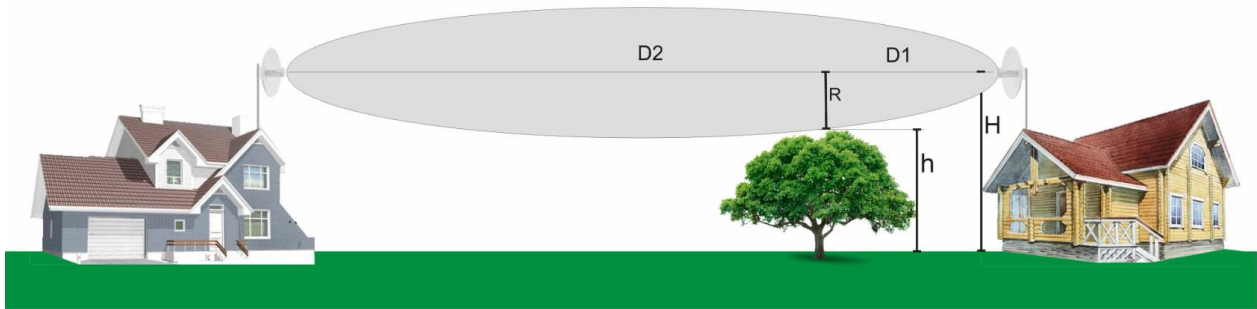


Рис. 1.1. Зразковий вигляд зони Френеля

Розрахунок радіуса першої зони Френеля, м, виконується за формулою

$$R_c = 17,31 \cdot \sqrt{\frac{D}{4 \cdot F}}, \quad (1.1)$$

де  $D$  – відстань між передавачем і приймачем, км;  
 $F$  – робоча частота системи, ГГц.

Розрахунок радіуса зони Френеля в довільній точці на прямій між передавачем і приймачем, м, виконується за формулою

$$R = 17,31 \cdot \sqrt{\frac{1}{F} \cdot \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2}}, \quad (1.2)$$

де  $D_1$  – відстань від першої антени до потрібної точки, км;  
 $D_2$  – відстань від другої антени до потрібної точки, км.

Висота підвісу антен, м, розраховується за формулою

$$H = \frac{D}{8,24} + 4,47 \cdot \sqrt{D}. \quad (1.3)$$

Вважається, що за відсутності будь-яких перешкод в області, відповідній 0,6 радіуса першої зони Френеля, що вносяться перешкодами, можна знехтувати. Отже, висота розміщення антен приймачів має забезпечувати відстань не менше  $0,6R$  від прямої між антенами до найближчих до неї перешкод [3, 4, 5, 7].

При розгляді бездротових каналів великої дальності при визначенні висоти розміщення антен необхідно додатково враховувати радіус кривизни земної поверхні. У середньому він дорівнює  $R_3 = 6371$  км.

## 1.2. Типове завдання 1

1. Вибрати з табл. 1.1 відповідно до свого варіанта вихідні дані для розрахунку.

Таблиця 1.1

Варіанти завдання (вказані за номером здобувача в журналі)

<i>Варіант</i>	<i>F, ГГц</i>	<i>D, км</i>	<i>Варіант</i>	<i>F, ГГц</i>	<i>D, км</i>	<i>Варіант</i>	<i>F, ГГц</i>	<i>D, км</i>
<b>1</b>	<b>2,4</b>	<b>40</b>	<b>11</b>	<b>0,4</b>	<b>70</b>	<b>21</b>	<b>5,1</b>	<b>50</b>
2	3,7	50	12	2,1	60	22	0,8	40
3	0,9	30	13	1,9	40	23	3,3	30
4	5	80	14	4,2	50	24	1,6	80
5	0,5	40	15	3,6	50	25	2,5	70
6	1,2	30	16	1,3	40	26	4,7	90
7	3,4	60	17	5,3	30	27	5,2	70
8	2	90	18	4,8	90	28	0,6	60
9	1,7	50	19	3,2	80	29	1,5	50
10	5,5	80	20	0,7	60	30	3,9	40

2. Розрахувати радіус зони Френеля в центральній точці і десяти точках (рівномірно) від центра до кожної з антен (по десять точок до кожної антени).

3. Повторити розрахунок для частоти з варіанта (31 – номер варіанта) і тієї самої відстані  $D = D_1 + D_2$ .

4. За отриманими даними побудувати графіки залежності радіуса зони Френеля від відстані до першої антени.

5. Для початкових вихідних даних визначити мінімально можливу висоту підвісу антен приймачів, на якій можна знехтувати спотвореннями, що вносяться перешкодами. Прийняти, що єдиною перешкодою, що заважає поширенню радіосигналу, є земна поверхня.

6. Зробити висновки за результатами розрахунків.

### Контрольні питання

1. Поясніть поняття зони Френеля.

2. Наведіть розрахунок радіуса першої зони Френеля на вашому прикладі.

3. Наведіть розрахунок радіуса зони Френеля в довільній точці на прямій між передавачем і приймачем на вашому прикладі.

4. Поясніть закон залежності радіуса зони Френеля від відстані до антени.

5. Для яких бездротових технологій і систем передачі необхідний розрахунок радіуса першої зони Френеля?

6. Чому наявність прямої видимості між антенами не є достатньою умовою для якісної роботи високочастотного радіолінка?

7. Як вирішуються питання впливу перешкоди на шляху радіохвиль за наявності прямої видимості між передавачем і приймачем?

8. У якому випадку детектор якості сигналу буде показувати майже сто відсотків, але швидкість лінка буде мінімальною?

9. Наведіть умови встановлення антен на обох сторонах мережі для забезпечення нульових втрат і повторів пакетів.

10. Яка частина (у відсотках) зони Френеля має залишатися чистою від будь-яких перешкод для забезпечення нульових втрат сигналу в каналі?



## Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 1

Розрахунок радіуса першої зони Френеля за формулою (1.1):

$$R_c = 17,31 \cdot \sqrt{\frac{40}{4 \cdot 2,4}} = 35,334 \text{ м.}$$

Результати розрахунків радіуса зони Френеля в довільній точці на прямій між передавачем і приймачем  $R$  за формулою (1.2) зведені в табл. 1.2 і на рис. 1.2.

Таблиця 1.2

Результати розрахунків радіуса зони Френеля в довільній точці на прямій між передавачем і приймачем

$R, \text{ м}$	$D, \text{ км}$	$R, \text{ м}$	$D, \text{ км}$
21,2	4	34,62	24
28,267	8	32,384	28
32,384	12	28,267	32
34,62	16	21,2	36
35,334	20		

Висота підвісу антен розраховується за формулою (1.3):

$$H = \frac{40}{8,24} + 4,47 \cdot \sqrt{40} = 33,125 \text{ м.}$$

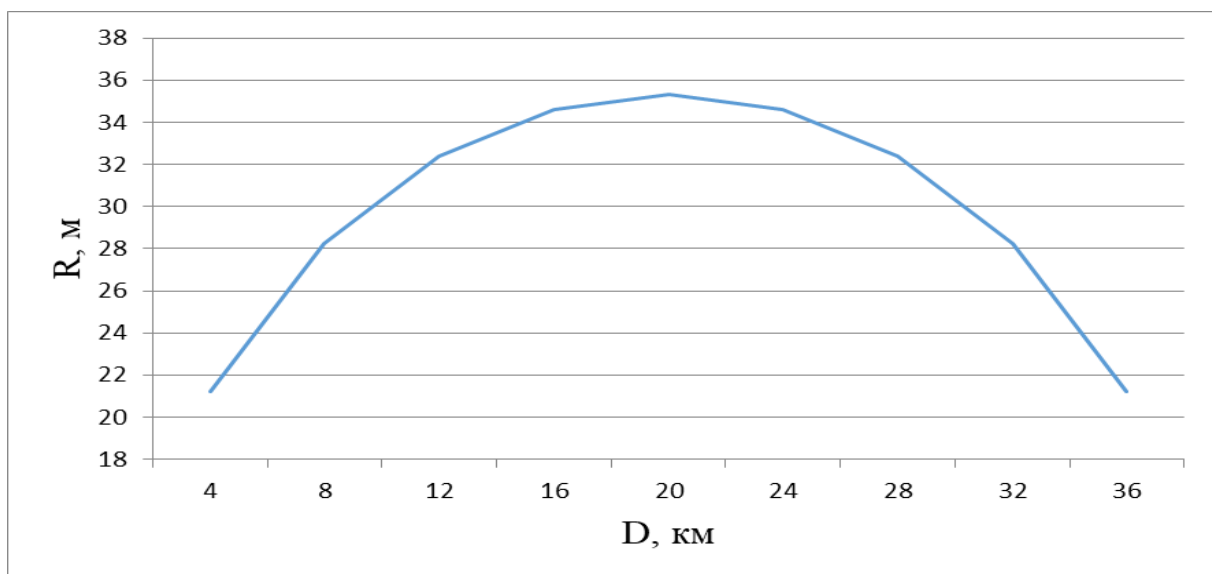


Рис. 1.2. Графік залежності радіуса зони Френеля від відстані до антени

## 2. ДАЛЬНІСТЬ РОБОТИ БЕЗДРОТОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ 802.11

### 2.1. Теоретичні відомості

*Wi-Fi* – торгова марка об'єднання Wi-Fi Alliance для бездротових мереж на базі стандарту IEEE 802.11, що об'єднує набір стандартів зв'язку для комунікації через бездротову локальну мережеву зону частотних діапазонів 0,9; 2,4; 3,6 і 5 ГГц. Кожен із цих діапазонів поділяється на ряд піддіапазонів, або каналів. У різних країнах існують свої обмеження з використання частотних діапазонів, тому і кількість доступних для неліцензійного використання каналів у кожній країні різна. Для неліцензійного використання в Україні дозволені канали з діапазонів 2,4 ГГц і 5 ГГц [3–5].

Смуга пропускання 2,4 ГГц містить лише 14 каналів, що перекриваються, шириною 22 МГц кожен. Для стандарту 802.11g і більш пізніх ширина кожного каналу встановлена рівною 20 МГц. Сумарно вони займають смугу частот від 2,401 до 2,495 ГГц. Розподіл каналів по смузі частот наведено на рис. 2.1. У цьому діапазоні одночасно доступні лише три непересічних 22 МГц канали. Список центральних частот кожного каналу наведено в табл. 2.1.

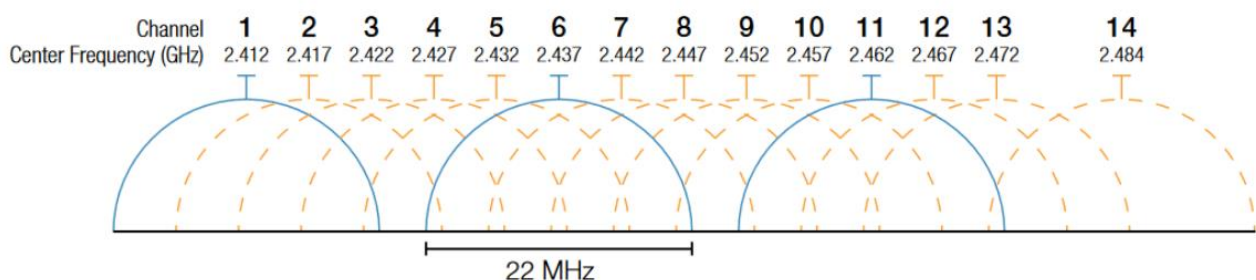


Рис. 2.1. Розподіл каналів 802.11 по смузі частот у діапазоні 2,4 ГГц

Діапазон 5 ГГц поділений на чотири піддіапазони:

1. UNII-1: 5150–5250 МГц (доступно чотири частотних канали).

2. UNII-2: 5250–5350 МГц (доступно чотири частотних канали).

3. UNII-2 Extended: 5470–5725 МГц (доступно 11 частотних каналів).

4. UNII-3: 5725–5825 МГц (доступно чотири частотних канали).

Таблиця 2.1

Центральні частоти каналів 802.11 у діапазоні 2,4 ГГц

<i>Номер каналу</i>	<i>Частота, МГц</i>	<i>Номер каналу</i>	<i>Частота, МГц</i>	<i>Номер каналу</i>	<i>Частота, МГц</i>	<i>Номер каналу</i>	<i>Частота, МГц</i>
1	2412	5	2432	9	2452	13	2472
2	2417	6	2437	10	2457	14	2484
3	2422	7	2442	11	2462		
4	2427	8	2447	12	2467		

Ширина кожного каналу встановлена 20 МГц. Список центральних частот кожного каналу наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Центральні частоти каналів 802.11 у діапазоні 5 ГГц

<i>Номер каналу</i>	<i>Частота, МГц</i>	<i>Номер каналу</i>	<i>Частота, МГц</i>	<i>Номер каналу</i>	<i>Частота, МГц</i>	<i>Номер каналу</i>	<i>Частота, МГц</i>
<b>Піддіапазон UNII-1</b>							
36	5180	40	5200	44	5220	48	5240
<b>Піддіапазон UNII-2</b>							
52	5260	56	5280	60	5300	64	5320
<b>Піддіапазон UNII-2 Extended</b>							
100	5500	112	5560	124	5620	136	5680
104	5520	116	5580	128	5640	140	5700
108	5540	120	5600	132	5660		
<b>Піддіапазон UNII-3</b>							
149	5745	153	5765	157	5785	161	5805

Стандарти 802.11b і 802.11g використовують по одному каналу шириною 22 (20) МГц. У стандарті 802.11n можуть використовуватися канали шириною 40 МГц (два канали по

20 МГц), при цьому одночасно може використовуватися чотири таких канали, у теорії забезпечуючи граничну сумарну швидкість до 600 Мбіт/с. З огляду на те, що в діапазоні 2,4 ГГц лише три непересічних 20 МГц канали (або чотири 10 МГц), використовувати канали по 40 МГц рекомендується тільки в діапазоні 5 ГГц [20–22].

Для співіснування каналів шириною 20/40 МГц точка доступу стандарту 802.11n має переходити на інший канал або перемикатися на використання каналу шириною в 20 МГц, якщо сусідня точка доступу починає передачу в одній з половин каналу 40 МГц. У стандарті 802.11ac можуть використовуватися канали шириною 160 МГц (8\*20 МГц) при одночасній роботі до восьми таких каналів. Теоретична гранична швидкість при цьому дорівнюватиме 6,93 Гбіт/с [8].

Головним недоліком широких каналів є більший вплив на них перешкод, а отже, менша відстань передачі даних. Існує також зворотна модифікація каналів виробниками – зменшення їхньої ширини до 5 або 10 МГц, що дозволяє збільшити дальність передачі за рахунок меншої швидкості.

Метод одночасного використання декількох каналів, що використовується в 802.11n і 802.11ac, отримав назву МІМО (multiple input multiple output – множинний вхід, множинний вихід). Підвищення пропускної здатності відбувається за рахунок передачі сигналу по декількох частотних каналах і подальшого приймання з об'єднанням в один потік даних.

Це можливо при використанні на кожен потік власної антени і свого тракту приймання/передачі на кожній стороні. Саме тому точки доступу стандарту 802.11n, що мають лише одну антену, забезпечують теоретично досяжну швидкість лише 150 Мбіт/с (один канал шириною 40 МГц). Прийнято користуватися позначенням  $M * N$ , де  $M$  – кількість потоків на передачу, а  $N$  – кількість потоків на приймання.

Отже, для досягнення максимально можливих 600 Мбіт/с у технології 802.11n необхідно використовувати конфігурацію 4 \* 4 потоки МІМО. Точка доступу при цьому повинна мати чотири антени.

## Розрахунок дальності роботи бездротового каналу зв'язку 802.11

Розрахунок дальності бездротового каналу *Wi-Fi* виводиться з формули розрахунку втрат у вільному просторі:

$$FSL = 33 + 20(\lg F + \lg D), \quad (2.1)$$

де *FSL* (Free Space Loss) – втрати у вільному просторі, дБ;

*F* – центральна частота каналу, на якому працює система зв'язку, МГц;

*D* – відстань між двома *Wi-Fi* точками, км.

Отже, відстань *D*, км, можна визначити за формулою

$$D = 10^{\frac{FSL - 33}{20} - \lg F}. \quad (2.2)$$

Втрати у вільному просторі також можна визначити виходячи з сумарного посилення системи передачі *Y*, дБ, за формулою

$$FSL = Y - SOM, \quad (2.3)$$

де *Y* – сумарне підсилення системи передачі, дБ;

*SOM* (*System Operating Margin*) – запас з підсилення, дБ, враховує можливі фактори, що негативно впливають на дальність зв'язку:

- температурний дрейф чутливості приймача і вихідної потужності передавача;
- будь-які атмосферні явища: туман, сніг, дощ;
- неузгодженість антени, приймача, передавача з антенно-фідерним трактом.

Параметр *SOM* зазвичай береться 10 дБ. Вважається, що такий запас з посилення достатній для інженерного розрахунку.

Сумарне підсилення системи передачі, дБ, розраховується за формулою

$$Y = P_t + G_t + G_r - P_{\min} - L_t - L_r, \quad (2.4)$$

де  $P_t$  – потужність передавача, дБм;

$G_t$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени, дБм;

$G_r$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени, дБм;

$P_{\min}$  – чутливість приймача на певній швидкості, дБм;

$L_t$  – втрати сигналу в коаксіальному кабелі і рознімачах передавального тракту, дБ;

$L_r$  – втрати сигналу в коаксіальному кабелі і рознімачах приймального тракту, дБ.

Втрати сигналу в коаксіальному кабелі і трактах приймання та передачі  $L_t$ , дБ, і  $L_r$ , дБ, необхідно враховувати тільки при використанні зовнішніх винесених антен. При використанні точок доступу з внутрішніми або підключеними безпосередньо антенами цими параметрами можна знехтувати.

У табл. 2.3 наведені середні показники чутливості для різних швидкостей передачі даних у діапазоні 2,4 ГГц для 802.11g і 5 ГГц для 802.11n (канал 40 МГц).

## 2.2. Типове завдання 2

1. Вибрати з табл. 2.3 відповідно до свого варіанта вихідні дані для розрахунку.

2. Усі розрахунки проводяться з урахуванням того, що використовуються штатні антени точок доступу. Для технології 802.11n і каналів 1 і 2 наведено номери тільки перших 20 МГц «напівканалів» - 40 МГц канал вони утворюють у сукупності з наступним по порядку 20 МГц каналом.

Таблиця 2.3

Варіанти завдання (вказані за номером здобувача в журналі)

Варіант	$P_b$ дБм	$G_b$ дБм	$G_n$ дБм	802.11g		802.11n	
				канал 1	канал 2	канал 1	канал 2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	10	1	2	1	8	36	136
2	11	2	0	2	9	40	128
3	12	3	1	3	10	44	108
4	13	1	3	4	11	52	120

Продовження табл. 2.3

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
5	14	2	2	5	12	56	132
6	15	3	0	6	13	60	149
7	10	1	1	7	8	100	153
8	11	2	3	1	9	112	157
9	12	3	2	2	10	56	124
10	13	1	0	3	11	36	112
11	14	2	1	4	12	40	136
12	15	3	3	5	13	44	128
13	10	1	2	6	8	52	108
14	11	2	0	7	9	56	120
15	12	3	1	1	10	60	132
16	13	1	3	2	11	100	149
17	14	2	2	3	12	112	153
18	15	3	0	4	13	56	157
19	10	1	1	5	8	36	124
20	11	2	3	6	9	40	112
21	12	3	2	7	10	44	136
22	13	1	0	1	11	52	128
23	14	2	1	2	12	56	108
24	15	3	3	3	13	60	120
25	10	1	2	4	8	100	132
26	11	2	0	5	9	112	149
27	12	3	1	6	10	56	153
28	13	1	3	7	11	36	157
29	14	2	2	1	12	44	124
30	15	3	0	2	13	60	112

3. Для технології 802.11g (2,4 ГГц) для кожного з заданих 20 МГц каналів розрахувати дальності роботи для всіх можливих швидкостей передачі (табл. 2.4).

4. Для технології 802.11n (5 ГГц) для кожного з заданих 40 МГц каналів розрахувати дальності роботи для всіх можливих швидкостей передачі (табл. 2.4).

5. За отриманими значеннями дальності побудувати графіки залежності відстані передачі від швидкості передачі. Усі чотири графіки мають бути побудовані на одній площині координат.

6. Зробити висновки за результатами розрахунків.

Таблиця 2.4

Залежність чутливості від швидкості передачі даних  
для 802.11g і 802.11n

<i>Швидкість, Мбіт/с</i>	<i>Чутливість, дБм</i>	<i>Швидкість, Мбіт/с</i>	<i>Чутливість, дБм</i>
<b>802.11g 2,4 ГГц</b>			
54	-66	18	-83
48	-71	12	-85
36	-76	9	-86
24	-80	6	-87
<b>802.11n 5 ГГц</b>			
15	-96	90	-86
30	-95	120	-83
45	-92	135	-77
60	-90	150	-74

### Контрольні питання

1. Поняття технології *Wi-Fi*.
2. Специфікація 802.11a.
3. Специфікація 802.11b.
4. Специфікація 802.11g.
5. Специфікація 802.11n.
6. Специфікація 802.11ac.
7. Специфікація 802.11ax.
8. Метод МІМО.
9. Принцип розрахунку дальності бездротового каналу Wi-Fi за вашим варіантом.
10. Пояснити графік залежності дальності роботи бездротового каналу зв'язку 802.11 при різних швидкостях.

### Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 2

Результати розрахунків дальності роботи бездротового каналу зв'язку для 1 каналу 802.11 наведено в табл. 2.5 і на рис. 2.2.



Таблиця 2.5

Результати розрахунків дальності роботи бездротового каналу зв'язку для 1 каналу 802.11 при різних швидкостях

Технологія 802.11n					Технологія 802.11g				
Швидкість, Мбіт/с	$D$ , км	$FSL$ , дБ	$\gamma$ , дБ	$F$ , МГц	Швидкість, Мбіт/с	$D$ , км	$FSL$ , дБ	$\gamma$ , дБ	$F$ , МГц
15	0,367	99	109	5430	54	0,026	69	79	2429,5
30	0,327	98	108	5430	48	0,046	74	84	2429,5
45	0,232	95	105	5430	36	0,082	79	89	2429,5
60	0,184	93	103	5430	24	0,13	83	93	2429,5
90	0,116	89	99	5430	18	0,184	86	96	2429,5
120	0,082	86	96	5430	12	0,231	88	98	2429,5
135	0,041	80	90	5430	9	0,26	89	99	2429,5
150	0,029	77	87	5430	6	0,291	90	100	2429,5

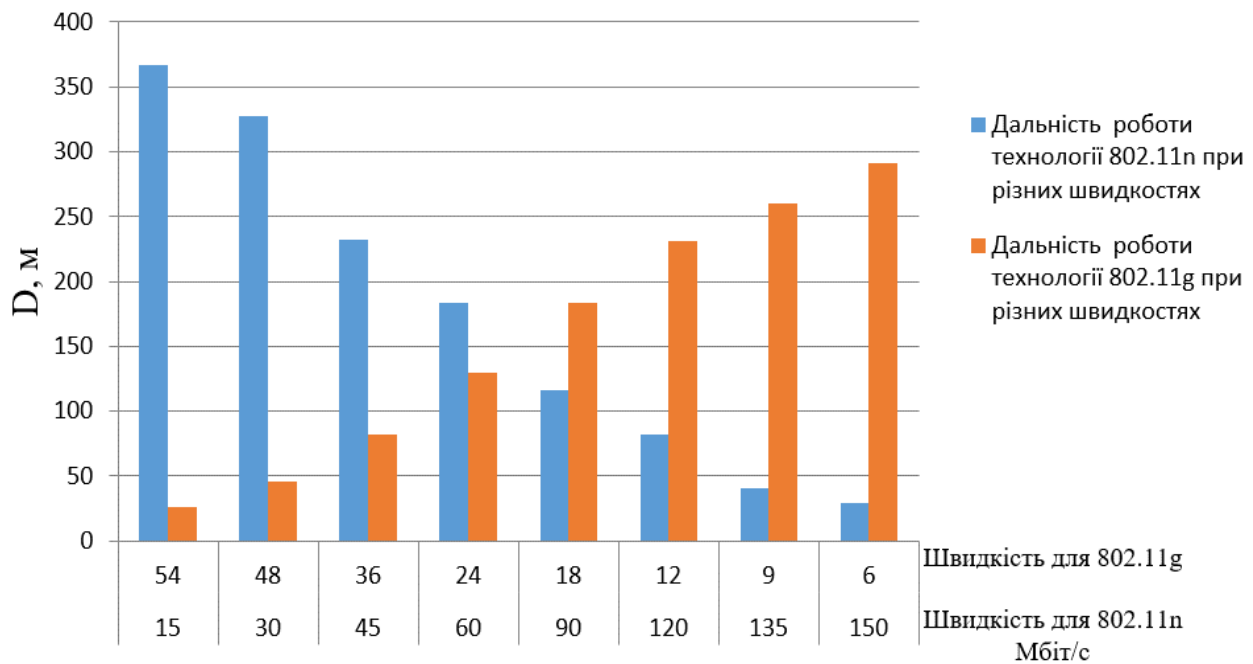


Рис. 2.2. Графік залежності дальності роботи бездротового каналу зв'язку 802.11 при різних швидкостях

### **3. ПОПЕРЕДНЄ ПЛАНУВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ 802.11**

#### **3.1. Теоретичні відомості**

При проєктуванні бездротової мережі в приміщеннях застосовують різні підходи, що майже завжди містять кілька етапів:

1. Оцінювання кількості точок доступу залежно від передбачуваної кількості користувачів Wi-Fi і послуг, що мають бути їм надані.

2. Розміщення точок доступу на план-схемі приміщення з урахуванням його розмірів, матеріалів, з яких виготовлені стіни і меблі, а також розміщення користувачів.

Одним з найпростіших способів визначення кількості точок доступу є задавання фіксованої кількості користувачів на точку. Наприклад, існує рекомендація використовувати одну точку доступу на 20 користувачів за відсутності шифрування і одну точку на 15 користувачів при використанні будь-якого шифрування. Такий підхід дуже простий, але має ряд недоліків. По-перше, така кількість точок доступу може виявитися надмірною, що призведе до зайвих витрат як на саме бездротове обладнання, так і організацію його розміщення (електроживлення, підключення до проводової локальної мережі) [8, 9]. По-друге, при великій кількості точок доступу, розміщених в одному приміщенні, розрахованому на велику кількість користувачів (наприклад конференц-зал або лекторій), вони можуть заважати один одному і їх потрібно розносити по різних каналах, що може бути складним при використанні діапазону 2,4 ГГц (наприклад якщо використовується технологія 802.11g).

Другий спосіб заснований на вимогах за рівнем сигналу. Наприклад, вважається, що для доступу в Інтернет (електронна пошта і веб-серфінг) досить забезпечити на всій території приміщення рівень сигналу не гірше, ніж 68-70 дБм. Такий підхід, як правило, потребує застосування спеціалізованого програмного забезпечення для попереднього розрахунку або використання вимірювань на місці, коли передбачувана до використання точка доступу розміщується в різних місцях

приміщення, і проводиться вимірювання її сигналу на можливих точках розміщення користувачів. Як правило, цей спосіб пропонує занижену кількість точок доступу, завдяки чому на практиці побудована мережа може не впоратися з навантаженням. До того ж повне покриття приміщення може виявитися не потрібним в тому випадку, коли користувачі компактно розміщуються в одній частині приміщення, а інша частина приміщення не використовується.

Третій спосіб попереднього визначення кількості точок доступу виходить з вимог щодо швидкості доступу залежно від необхідних користувачам послуг. У результаті таких розрахунків можна отримати деяку усереднену кількість точок доступу. Однак питання нерівномірності розміщення користувачів також необхідно враховувати на етапі розміщення точок доступу на план-схемі приміщення.

При проведенні планування слід провести енергетичний розрахунок і скласти частотний план, щоб розміщені в приміщенні точки доступу не впливали одна на одну, а їхній сигнал не виходив за межі приміщення і не впливав на бездротові мережі, розташовані зовні приміщення.

При розміщенні точок доступу дуже важливо визначити, з яких матеріалів зроблені стіни, перекриття, конструкційні елементи і меблі в приміщенні, і вже з урахуванням цього проводити розміщення обладнання і вибір антен, що будуть використовуватися разом з точками доступу.

Наприклад, однією з найпоширеніших помилок при розміщенні точок доступу є встановлення точки з навсібіч спрямованою антеною біля металевої або залізобетонної стіни чи конструкції. У цьому випадку металева поверхня буде відображувати сигнал. Діаграма направленості антени зміниться ставши спрямованою. До того ж виникне потужне багатопроменеве поширення (multipath), оскільки половина випромінюваної потужності буде йти до металевої стіни/поверхні і, відбиваючись назад, створить інтерференцію своєму ж корисному випромінюванню. Іншим прикладом може бути розміщення точки біля ємностей і труб з водою, що інтенсивно поглинає високочастотне випромінювання (особливо в частотному спектрі 2,4 ГГц) [10, 23].

Основним методом вирішення є винесення точок доступу з внутрішніми антенами (або самих зовнішніх антен) за межі перешкод, забезпечуючи безперешкодне випромінювання з урахуванням діаграми спрямованості антен.

Вплив матеріалу стін і перегородок, встановлених у приміщенні, можна оцінити за табл. 3.1.

Ефективна відстань становить величину, до якої зменшиться радіус дії після проходження відповідної перешкоди порівняно з відкритим простором. Наприклад, якщо на відкритому просторі радіус дії Wi-Fi досягає 100 м, то після проходження першої міжкімнатної стіни він зменшиться до 15 % цієї величини, тобто до 15 м, а після другої — до 15 % цього значення (до 2,2 м).

Таблиця 3.1

Втрати ефективності сигналу 802.11 при проходженні через різні середовища

<i>Перешкода</i>	<i>Додаткові втрати, дБ</i>	<i>Ефективна відстань, %</i>
Відкритий простір	0	100
Вікно без тонування (металізованого покриття)	3	70
Вікно з тонуванням (металізованим покриттям)	5-8	50
Міжкімнатна стіна	15-20	15
Несуча стіна	20-25	10
Бетонна підлога/стяга	15-25	10-15
Монолітне залізобетонне перекриття	20-25	10

Також необхідно враховувати, що рівень сигналу зменшується пропорційно квадрату відстані, тому швидкість спадає природним шляхом з віддаленням від точки доступу.

Для прикладу розглянемо схему, зображену на рис. 3.1.

Приміщення поділено перегородками на квадратні осередки зі стороною  $L$ . У центрі приміщення встановлена точка доступу. Необхідно визначити, які клітинки будуть охоплені покриттям мережі 802.11.

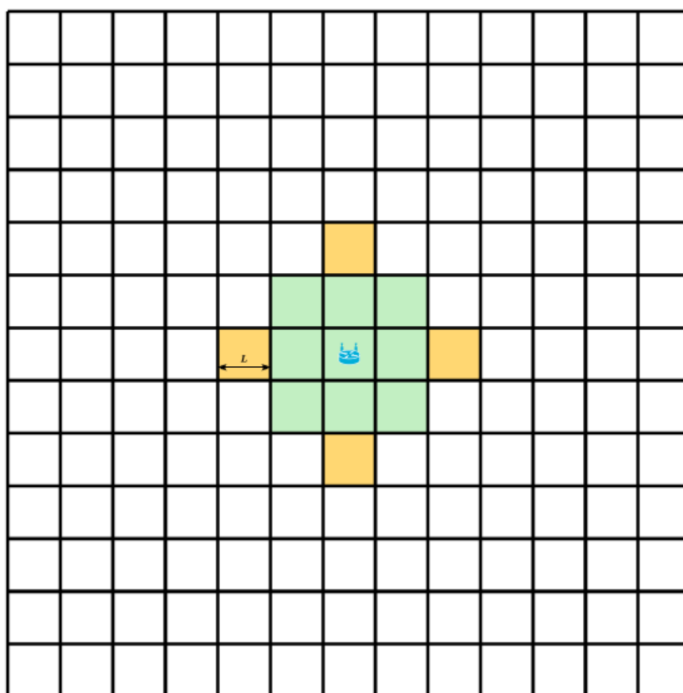


Рис. 3.1. Приклад визначення зони покриття мережі 802.11 з урахуванням матеріалу перешкод

Припустимо, що сторона кожного осередку дорівнює  $L = 5$  м. Перегородки виготовлені з дерева. Природним загасанням сигналу з відстанню нехтуємо. Радіус покриття мережі на відкритому просторі прийmemo рівним 100 м.

Спочатку визначимо область дії сигналу по чотирьох сторонах (верх-низ-право-ліво на рисунку).

Як було показано раніше, після проходження однієї дерев'яної стіни відстань зменшиться до 15 м. Після проходження другої – до 2,2 м. Отже, буде перекрито по два осередки в кожний бік.

Далі оцінимо область дії по діагоналі. Щоб потрапити в сусідній по діагоналі осередок, сигнал має пройти дві стіни. Отже, по діагоналі буде перекритий лише один осередок у кожний бік. На практиці необхідно буде враховувати і те, що сигнал у цьому випадку буде проходити не по нормалі до поверхні перегородки, а по дотичній, що збільшить загасання.

Оцінна зона покриття сигналу 802.11 відзначена на рис. 3.1 зеленим кольором. Помаранчевим відзначені осередки, які можливо будуть не повністю перекриті сигналом Wi-Fi. Знаючи зону покриття однієї точки, можна скласти попередній план розміщення точок доступу на всій території приміщення, при

цьому враховуючи, що осередки, частково перекриті сигналом, слід перекривати двома точками доступу.

### **3.2. Типове завдання 3**

Вибрати з табл. 3.2 відповідно до свого варіанта вихідні дані для розрахунку кількості точок доступу. Усі розрахунки проводяться з урахуванням того, що використовуються штатні антени точок доступу. Застосовується технологія 802.11n.

#### **Контрольні питання**

1. Етапи проектування мережі 802.11.
2. Оцінювання кількості точок доступу залежно від передбачуваної кількості користувачів Wi-Fi і послуг, що мають бути їм надані.
3. Проведіть порівняльний аналіз способів визначення кількості точок доступу мережі 802.11.
4. Оцінювання зони покриття мережі 802.11.
5. Вплив перешкод і несучих конструкцій на радіосигнал мережі 802.11.
6. Визначення поняття ефективної відстані.
7. Які розрахунки необхідно провести при проведенні планування мережі?
8. Поясніть розрахунки для 2,4 ГГц.
9. Поясніть розрахунки для 5 ГГц.
10. Проведіть порівняльний аналіз результатів розрахунків за питаннями 8 і 9.

#### **Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 3**

Для прикладу оцінимо кількість точок доступу аналітичним методом, необхідну для організації бездротової мережі в лекторії. З огляду на те, що на сьогодні переважна більшість мобільних пристроїв використовують технологію 802.11n, будемо орієнтуватися на неї. Є аудиторія на 130 здобувачів вищої освіти, які, наприклад, будуть брати участь в онлайн-опитуваннях,

використовувати веб-браузер, читати пошту, читати і викладати інформацію в соціальні мережі.

Тепер ми можемо спланувати мережу. Нехай кожен зі 130 здобувачів має з собою ноутбук або планшет і використовує його для доступу в Інтернет.

Початкові дані:

1. *Пристрої:*

– планшети (802.11n, 20 МГц, 1 потік), 65 Мбіт/с, реальна швидкість (ТСР) 30 Мбіт/с;

– ноутбуки (802.11n, 20 МГц, 2 потоки), 144 Мбіт/с, реальна швидкість (ТСР) 70 Мбіт/с.

2. *Додатки:* web, e-mail, соціальні мережі з необхідною гарантованою швидкістю для одного користувача 1 Мбіт/с.

Таблиця 3.2

Варіанти завдання (вказані згідно з номером здобувача в журналі)

Варіант	$N$ , люд	$F$ , Мбіт/с	$D_T$	$D_L$	$D_{2.4GHz}$	$D_{5GHz}$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<b>1</b>	<b>130</b>	<b>1</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0,4</b>
2	130	1.5	0.55	0.45	0.65	0,35
3	120	2	0.6	0.4	0.7	0.3
4	130	2.5	0.65	0.35	0.6	0.4
5	140	1	0.75	0.25	0.65	0.35
6	150	1.5	0.5	0.5	0.7	0.3
7	160	2	0.55	0.45	0.6	0.4
8	140	2.5	0.6	0.4	0.65	0.35
9	130	1	0.65	0.35	0.7	0.3
10	120	1.5	0.75	0.25	0.6	0.4
11	130	2	0.5	0.5	0.65	0.35
12	140	2.5	0.55	0.45	0.7	0.3
13	150	1	0.6	0.4	0.6	0.4
14	160	1.5	0.65	0.35	0.65	0.35
15	140	2	0.75	0.25	0.7	0.3
16	130	2.5	0.5	0.5	0.6	0.4
17	120	1	0.55	0.45	0.65	0.35
18	130	1.5	0.6	0.4	0.7	0.3
19	140	2	0.65	0.35	0.6	0.4
20	150	2.5	0.75	0.25	0.65	0.35

Продовження табл. 3.2

1	2	3	4	5	6	7
21	160	1	0.5	0.5	0.7	0.3
22	140	1.5	0.55	0.45	0.6	0.4
23	130	2	0.6	0.4	0.65	0.35
24	120	2.5	0.65	0.35	0.7	0.3
25	130	1	0.75	0.25	0.6	0.4
26	140	1.5	0.5	0.5	0.65	0.35
27	150	2	0.55	0.45	0.7	0.3
28	160	2.5	0.6	0.4	0.6	0.4
29	140	1.5	0.65	0.35	0.65	0.35
30	150	2	0.75	0.25	0.7	

3. *Кількість пристроїв*: 65 ноутбуків, 65 планшетів, використовуються одночасно. При цьому:

$D_T = 0.5$  – частка планшетних комп'ютерів і смартфонів (*Tablet PC*);

$D_L = 0.5$  – частка ноутбуків (*Laptop*);

$D_{2.4GHz} = 0.6$  – частка пристроїв, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц;

$D_{5GHz} = 0.4$  – частка пристроїв, що працюють у діапазоні 5 ГГц.

Планшетні комп'ютери використовують 20 МГц – канал в один потік, що забезпечує теоретичну швидкість роботи 72 Мбіт/с. Реальна швидкість при цьому буде приблизно у два рази менше і дорівнюватиме  $F_T = 35$  Мбіт/с.

Ноутбуки використовують 20 МГц - канал у два потоки, що забезпечує теоретичну швидкість роботи 144 Мбіт/с. Реальна швидкість при цьому буде приблизно у два рази менше і дорівнюватиме  $F_L = 70$  Мбіт/с.

Тепер визначимо коефіцієнт ефірного часу (*Airtime*) для кожного з типів пристроїв:

$$A_T = \frac{1}{35} = 0,029; \quad A_L = \frac{1}{70} = 0,014.$$



Загальний коефіцієнт ефірного часу для всіх пристроїв кожного типу дорівнюватиме

$$A_T^{all} = 0,029 \cdot 130 \cdot 0,5 = 1,857 ;$$

$$A_L^{all} = 0,014 \cdot 130 \cdot 0,5 = 0,929 .$$

Загальний коефіцієнт ефірного часу з урахуванням службового трафіка дорівнюватиме

$$A = (A_T^{all} + A_L^{all}) \cdot 1,25 = 3,482 .$$

Далі необхідно визначити кількість радіомодулів, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц, і радіомодулів, що працюють у діапазоні 5 ГГц:

$$N_{2,4GHz} = A \cdot D_{2,4GHz} = 3 ;$$

$$N_{5GHz} = A \cdot D_{5GHz} = 2 .$$

Отже, аналітичний метод планування бездротової локальної мережі стандарту IEEE 802.11 показав, що для організації бездротової мережі потрібно або три точки доступу, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц, і дві точки доступу, що працюють у діапазоні 5 ГГц, або три дводіапазонні точки доступу 2,4/5 ГГц з можливістю одночасної роботи в обох діапазонах.

## 4. РОБОТА З ПРОГРАМОЮ D-LINK WI-FI PLANNER PRO

### 4.1. Теоретичні відомості

Програма D-Link Wi-Fi Planner Pro призначена для первинного аналізу плану приміщення з метою розміщення на ньому точок доступу Wi-Fi. Програма орієнтована на використання обладнання D-Link [2, 11, 12].

### 4.2. Типове завдання 4

*Завдання 1.* Вибрати з табл. 4.1 відповідно до свого варіанта вихідні дані – довжину осередку  $L$  і тип перегородок.

1. Зареєструватися на сайті D-Link (<http://tools.dlink.com>).
  2. Після підтвердження реєстрації (лист надійде на вказану електронну пошту) зайти на сайт під зазначеними при реєстрації електронною поштою і паролем. Вибрати програму Wi-Fi Planner Pro.
  3. Ознайомитися з короткою послідовністю дій.
  4. Створити новий проєкт (кнопка «Create project») з назвою за прізвищем здобувача, який виконує роботу.
  5. Додати план поверху. Як план задати файл з рисунком за зразком на рис. 4.1.
  6. Вказати масштаб, користуючись кнопкою «Scale floor plan», за параметром  $L$ .
  7. Поставити зону покриття («Define Wi-Fi zone» - «Coverage zone»).
  8. Накреслити на схемі перегородки. Тип перегородок взяти за варіантом. Зовнішні стіни несучі бетонні («Concrete wall»).
  9. Накреслити область типу приміщення. Вибрати тип приміщення «Closed Office Area».
  10. Розрахувати розміщення точок автоматично, натиснувши на кнопку «Advisor».
- Деякі або всі точки доступу залишити за замовчуванням (діапазон 2,4 ГГц). Порівняти з результатом виконання попередньої практичної роботи.

Таблиця 4.1

Варіанти завдання (вказані за номером здобувача в журналі)

<i>Варіант</i>	<i>L, м</i>	<i>Тип перегородок</i>	<i>Варіант</i>	<i>L, м</i>	<i>Тип перегородок</i>
<b>1</b>	<b>3</b>	<b>бетонні</b>	16	3	бетонні
2	4	міжкімнатні	17	4	міжкімнатні
3	5	несучі	18	5	несучі
4	6	бетонні	19	6	бетонні
5	4	міжкімнатні	20	4	міжкімнатні
6	3	несучі	21	3	несучі
7	4	бетонні	22	4	бетонні
8	5	міжкімнатні	23	5	міжкімнатні
9	6	несучі	24	6	несучі
10	4	бетонні	25	4	бетонні
11	3	міжкімнатні	26	3	міжкімнатні
12	4	несучі	27	4	несучі
13	5	бетонні	28	5	бетонні
14	6	міжкімнатні	29	6	міжкімнатні
15	4	несучі	30	4	несучі

11. Зберегти результат для звіту у вигляді зображення, використавши відповідну кнопку «Export as image».

12. Згенерувати звіт програми, використавши кнопку «Generate Report ...». Згенерований звіт у форматі PDF додати до звіту.

13. Розмістити точки вручну так, щоб по всій робочій зоні забезпечити рівень сигналу не гірше, ніж -55 дБ. Порівняти з результатом виконання попередньої практичної роботи і автоматичним розміщенням.

14. Зберегти результат для звіту у вигляді зображення, використавши відповідну кнопку «Export as image».

15. Згенерувати звіт програми, використавши кнопку «Generate Report ...». Згенерований звіт у форматі PDF додати до звіту.

**Завдання 2.** Провести аналогічний розрахунок розміщення точок для плану двокімнатної квартири. План накреслити самостійно або взяти з мережі Інтернет.

1. Скласти звіт, у якому вказати послідовність дій, отримані результати роботи і висновки по них. До звіту докласти згенеровані в програмі звіти (разом чотири).

### **Контрольні питання**

1. Етапи проектування мережі 802.11.
2. Оцінювання кількості точок доступу залежно від передбачуваної кількості користувачів Wi-Fi і послуг, що мають бути їм надані.
3. Проведіть порівняльний аналіз способів визначення кількості точок доступу мережі 802.11.
4. Оцінювання зони покриття мережі 802.11.
5. Вплив перешкод і несучих конструкцій на радіосигнал мережі 802.11.
6. Визначення поняття ефективної відстані.
7. Які розрахунки необхідно провести при проведенні планування мережі?
8. Поясніть розрахунки для 2,4 ГГц.
9. Поясніть розрахунки для 5 ГГц.
10. Проведіть порівняльний аналіз результатів розрахунків за питаннями 8 і 9.

### **Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 4**

Програма D-Link Wi-Fi Planner Pro призначена для первинного аналізу плану приміщення з метою розміщення на ньому точок доступу Wi-Fi. Програма орієнтовна на використання обладнання D-Link.

Програма дозволяє враховувати різні параметри приміщення, зокрема не тільки фактичну площу приміщення, але і тип, матеріал і кількість перегородок.

Крім того, програма дозволяє вести розрахунки як при автоматичному розміщенні точок доступу, так і ручному.

Планування проводилось для різних варіантів, а саме для великої лекційної кімнати і для двокімнатної квартири.

**Завдання 1.** Розглянемо варіант для лекційної кімнати, спочатку в програмі створюється новий проєкт, як показано на рис. 4.1.

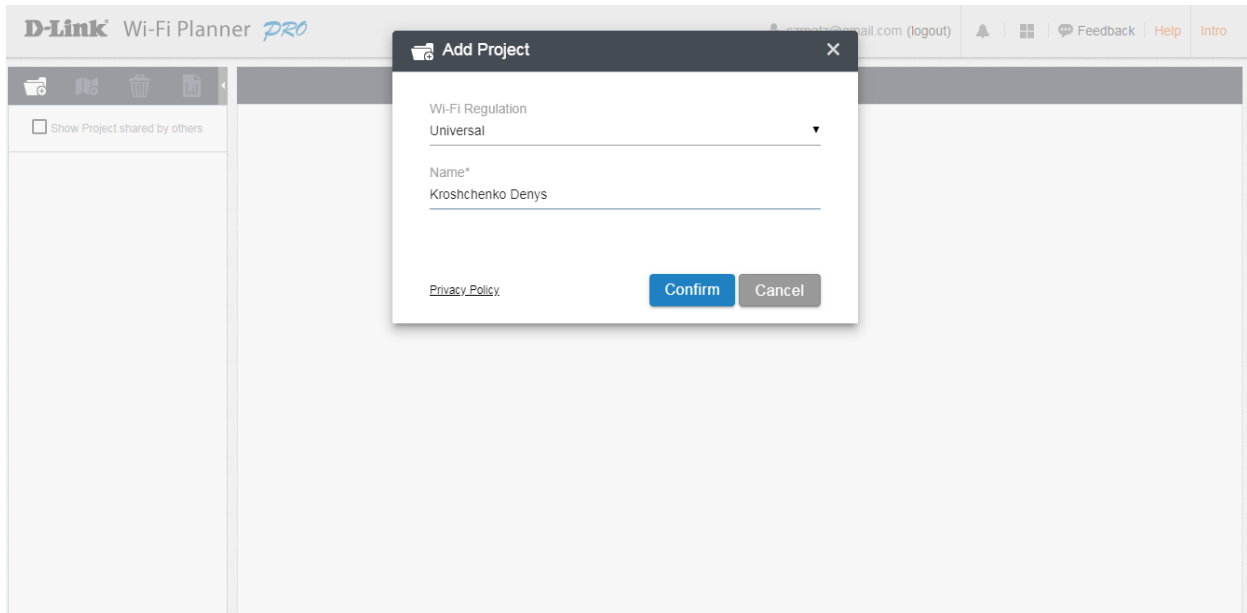


Рис. 4.1. Створення нового проєкту

Далі додаємо план будови приміщення для лекційної кімнати (рис. 4.2).

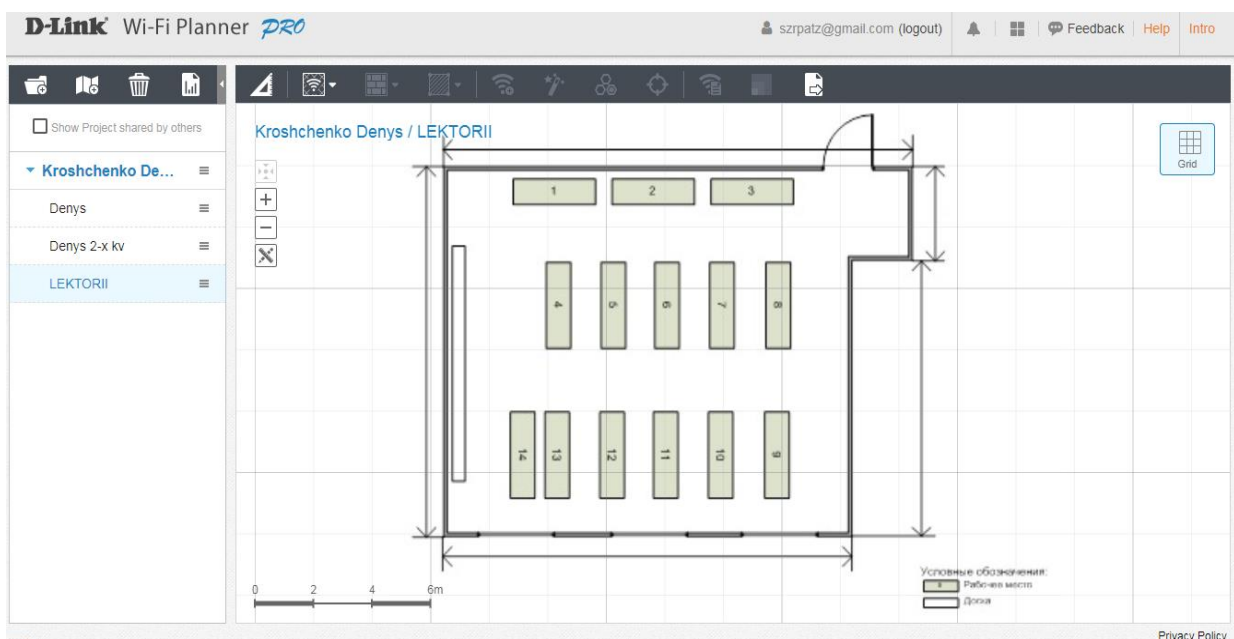


Рис. 4.2. План приміщення нового проєкту

Вказуємо розмір приміщення за своїми даними, використовуючи кнопку Scale floor plan (рис. 4.3, 4.4.).

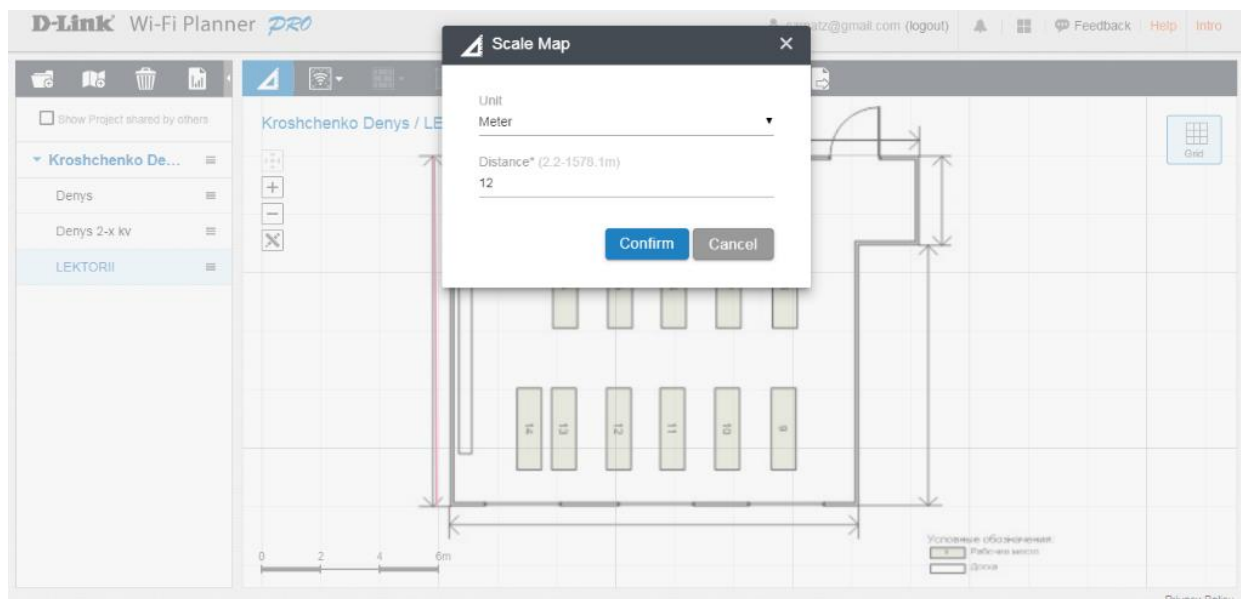


Рис. 4.3. Розмір приміщення за шириною

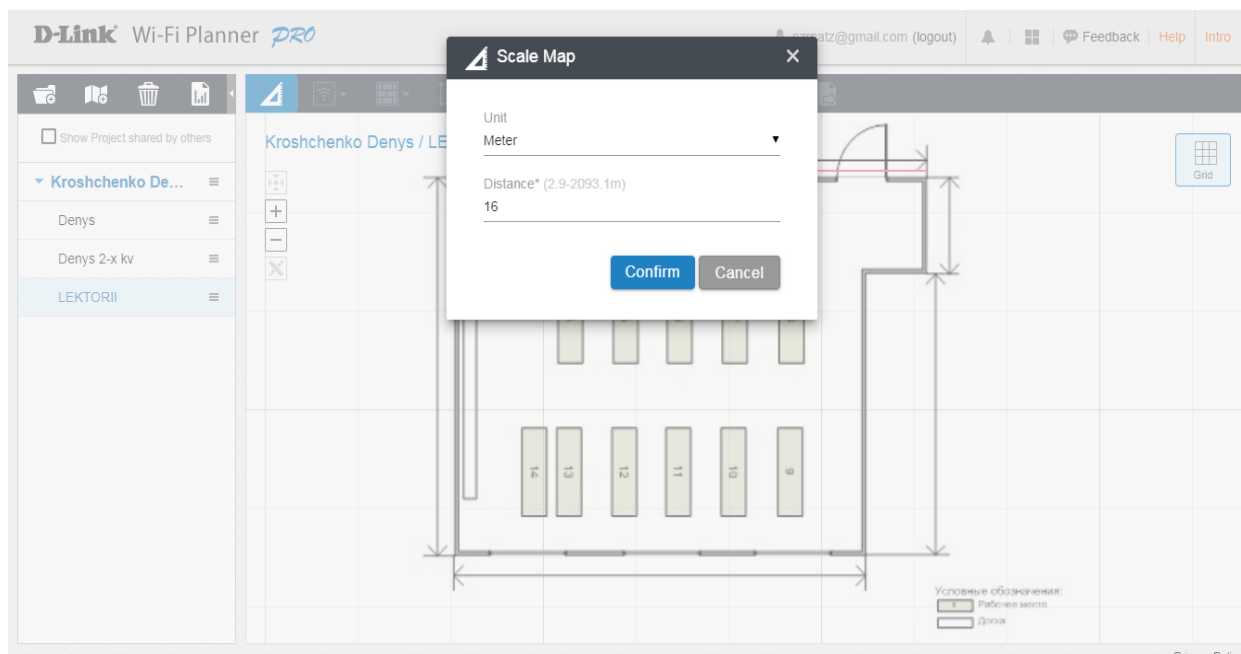


Рис. 4.4. Розмір приміщення за довжиною

Задаємо зону покриття Wi-Fi (рис. 4.5), натискаючи кнопки Define Wi-Fi zone та Coverage zone.

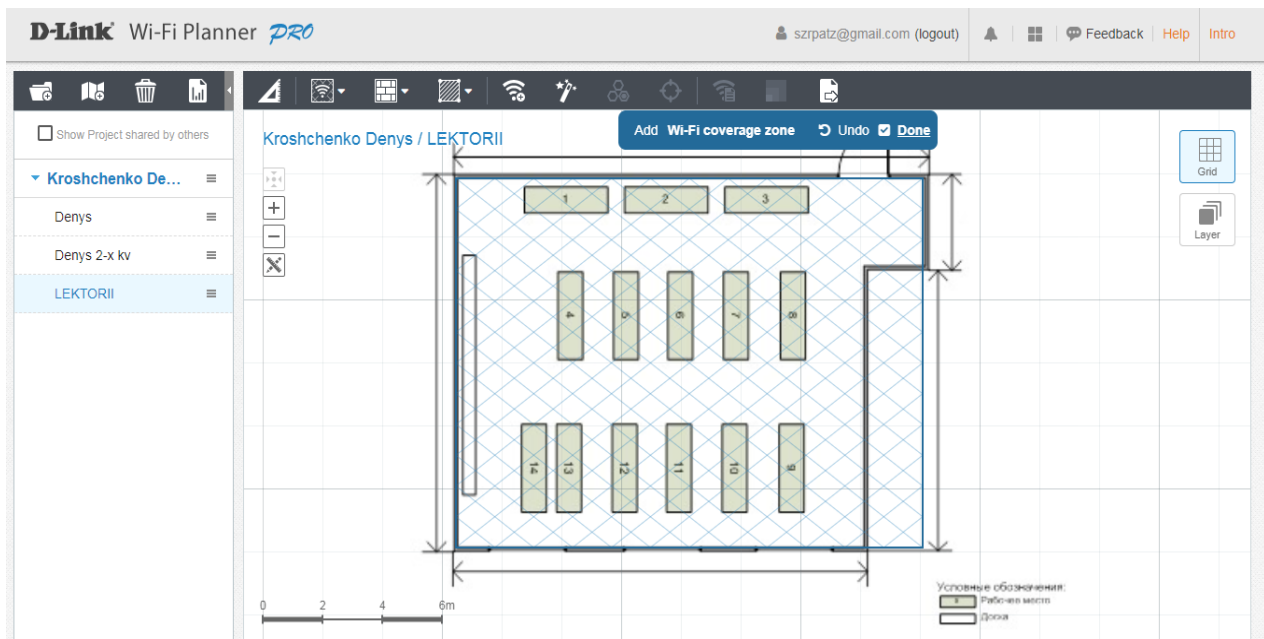


Рис. 4.5. Зона покриття Wi-Fi

Позначаємо на схемі зовнішні стіни як бетонні (рис. 4.6, 4.7).

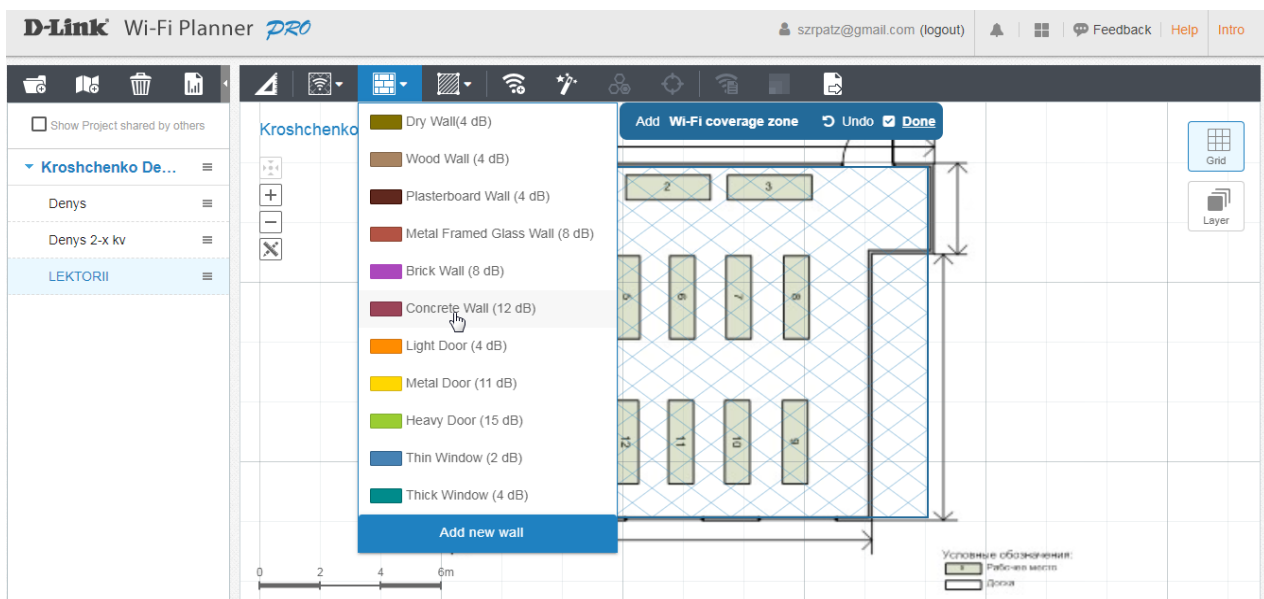


Рис. 4.6. Вибір типу стін

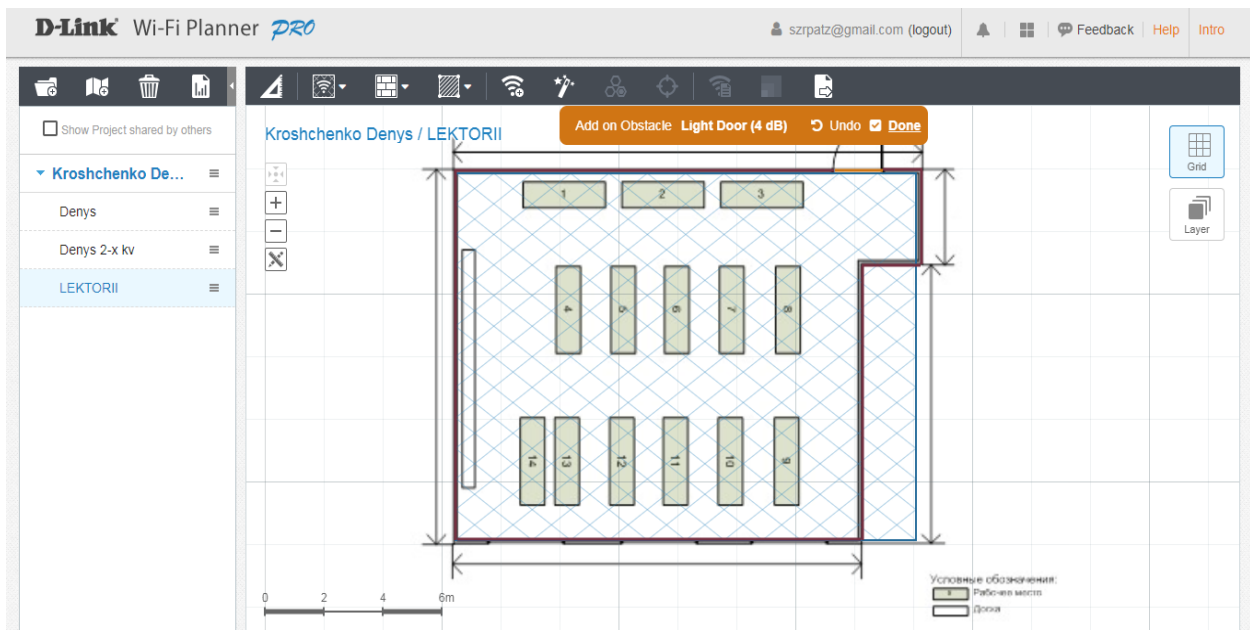


Рис. 4.7. Позначення бетонних стін

Задаємо область типу приміщення як закриту офісну зону (рис. 4.8).

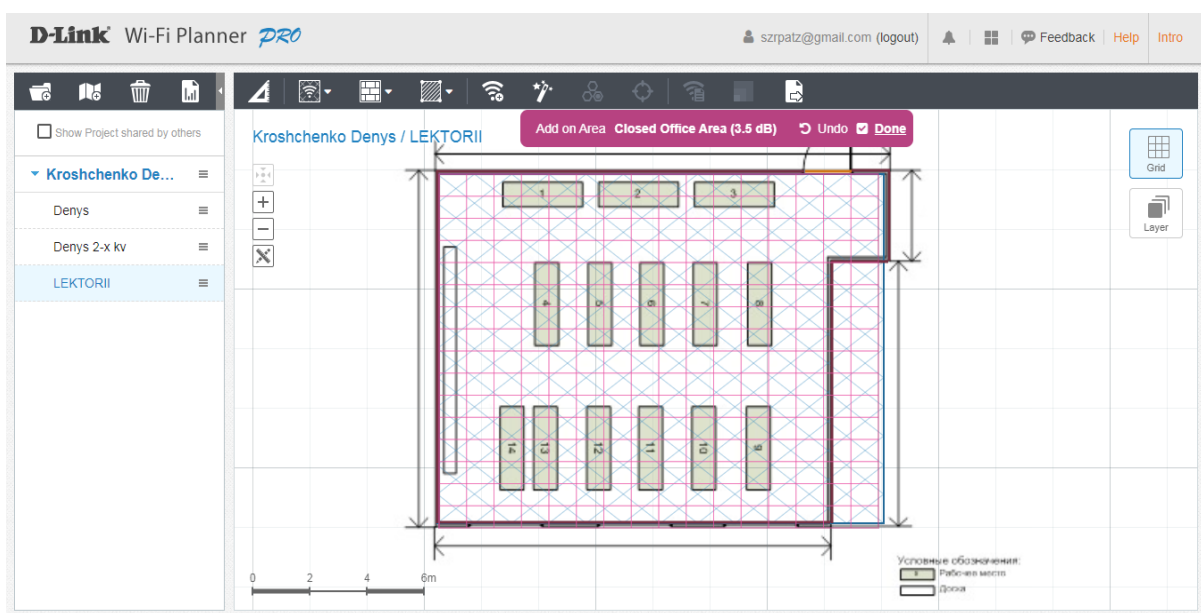


Рис. 4.8. Тип приміщення закрита офісна зона

Проводимо розрахунок точок доступу, автоматично натискаючи кнопку Advisor. Маємо результати імітаційного планування локальної мережі для діапазонів 2.4 ГГц (рис. 4.9) і 5 ГГц (рис. 4.10).



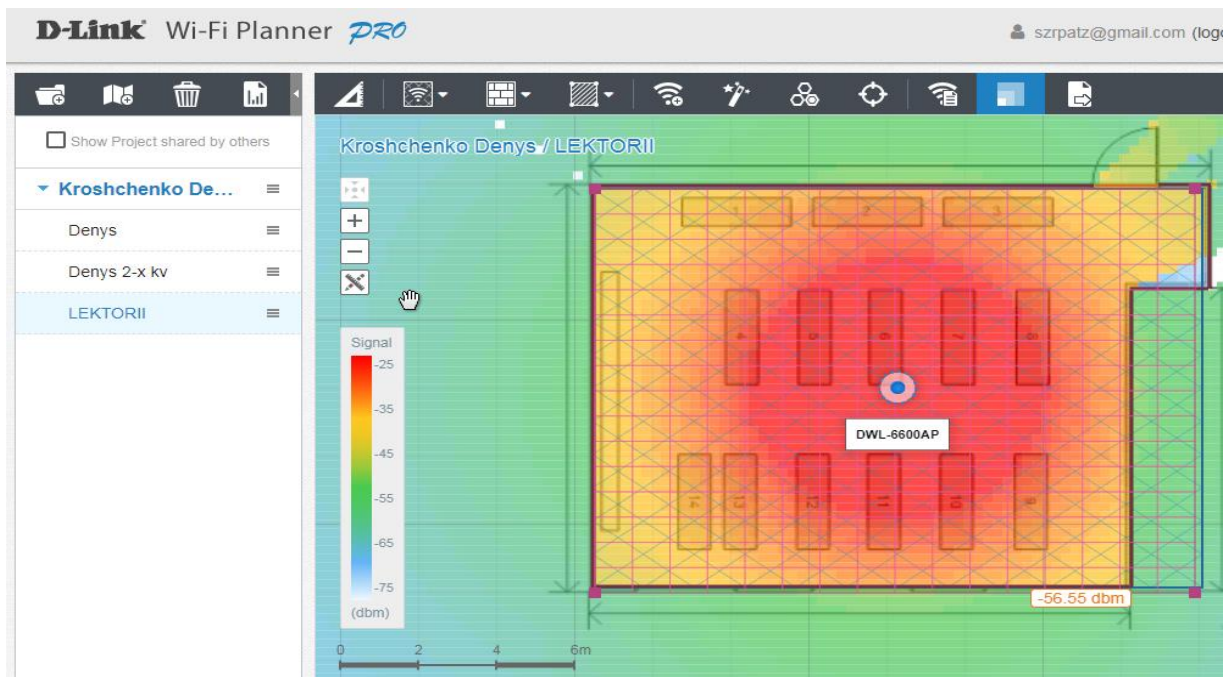


Рис. 4.9. Результати імітаційного планування бездротової локальної мережі для діапазону 2.4 ГГц

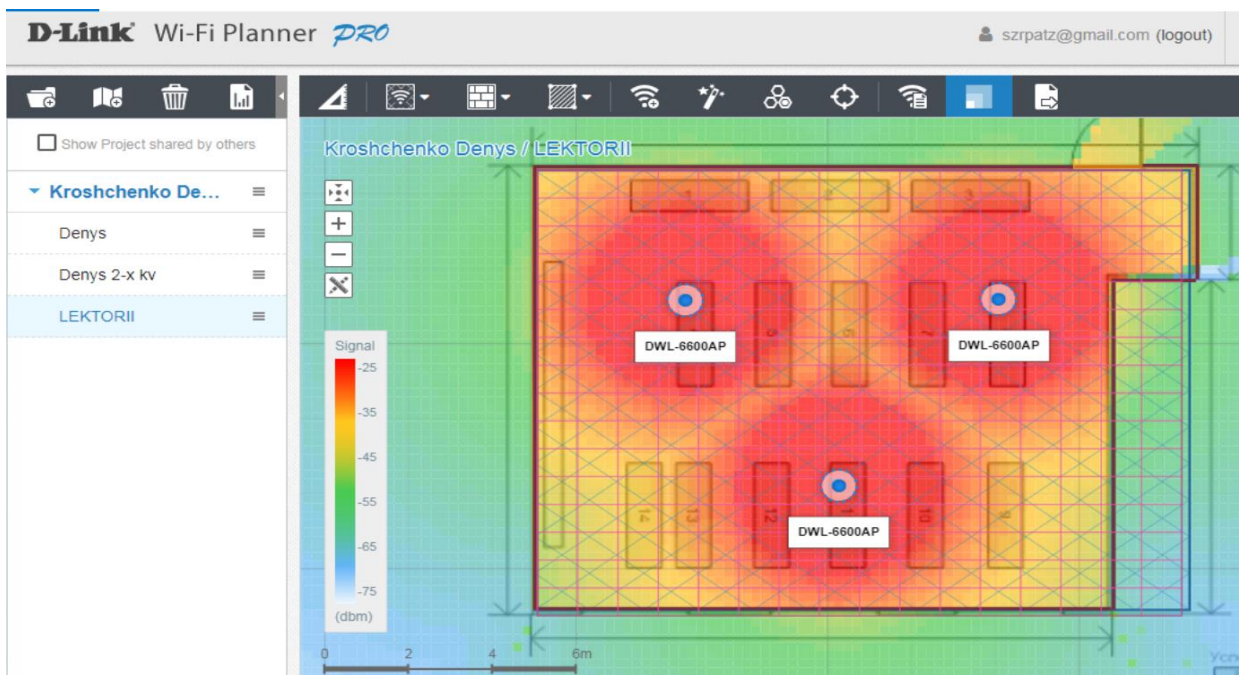


Рис. 4.10. Результати імітаційного планування бездротової локальної мережі для діапазону 5 ГГц

**Завдання 2.** Проведемо імітаційне моделювання планування бездротової локальної мережі Wi-Fi для двокімнатної квартири. При розміщенні точок доступу дуже важливо визначити, з яких

матеріалів зроблені стіни, перекриття, конструкційні елементи і меблі в приміщенні, і вже з урахуванням цього проводити розміщення обладнання і вибір антен, що використовуватимуться разом з точками доступу.

Створюємо новий проєкт та додаємо план будови квартири (рис. 4.11, 4.12).

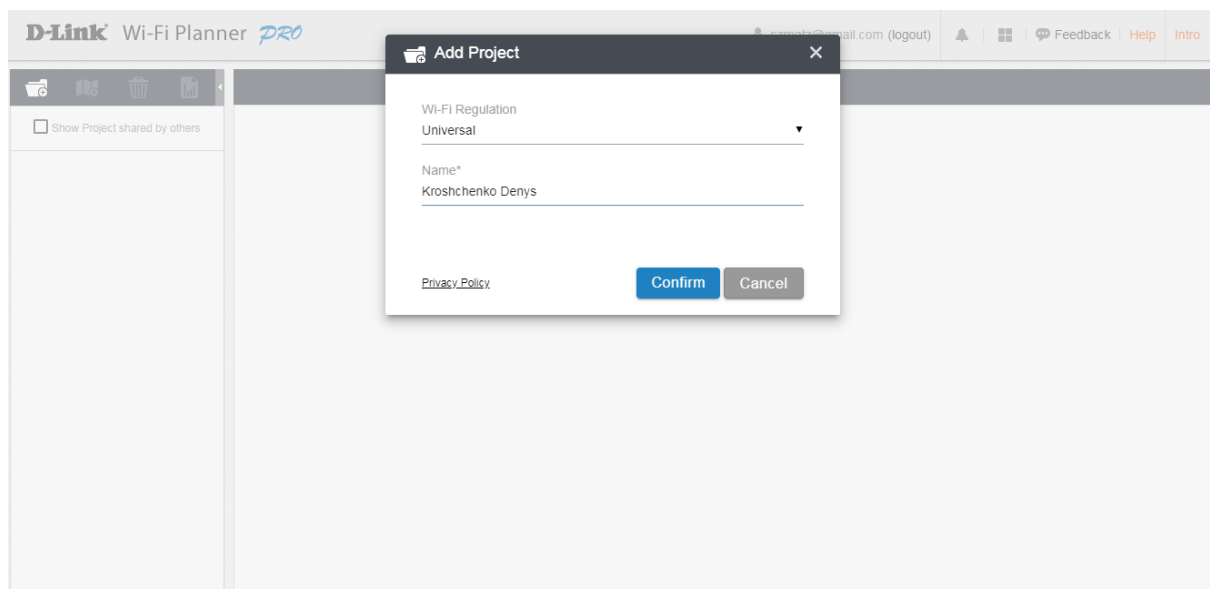


Рис. 4.11. Створення нового проєкту

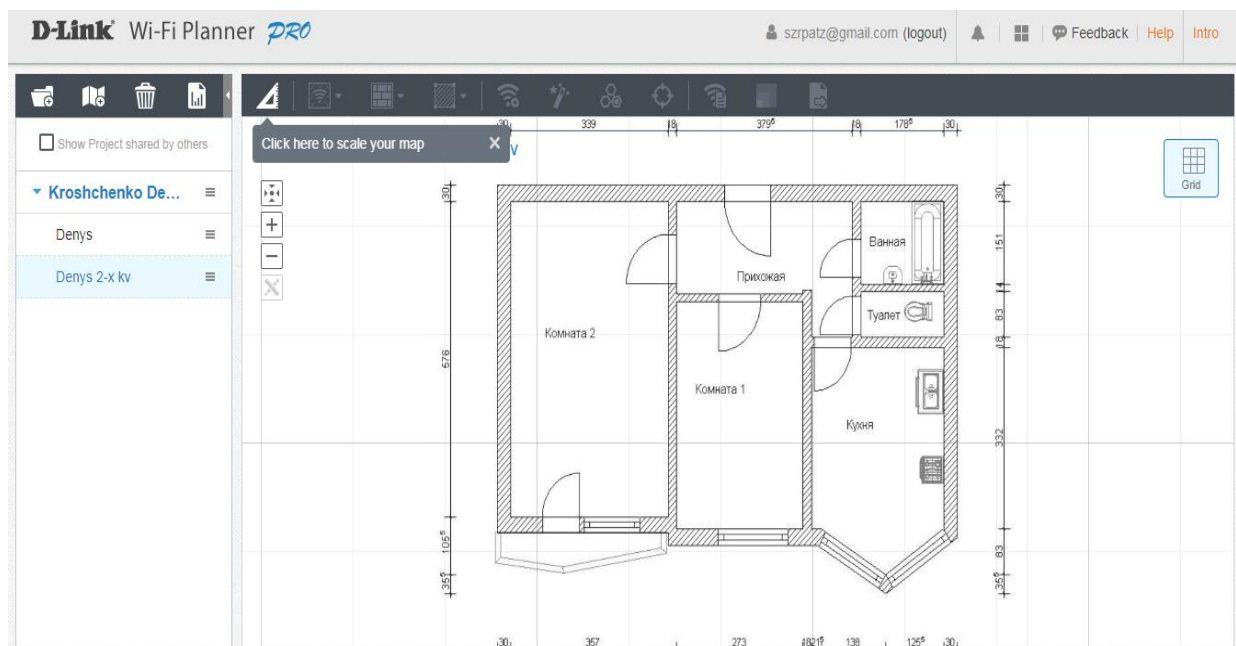


Рис. 4.12. План будови двокімнатної квартири

Вказуємо масштаб квартири за своїми даними (рис. 4.13, 4.14).

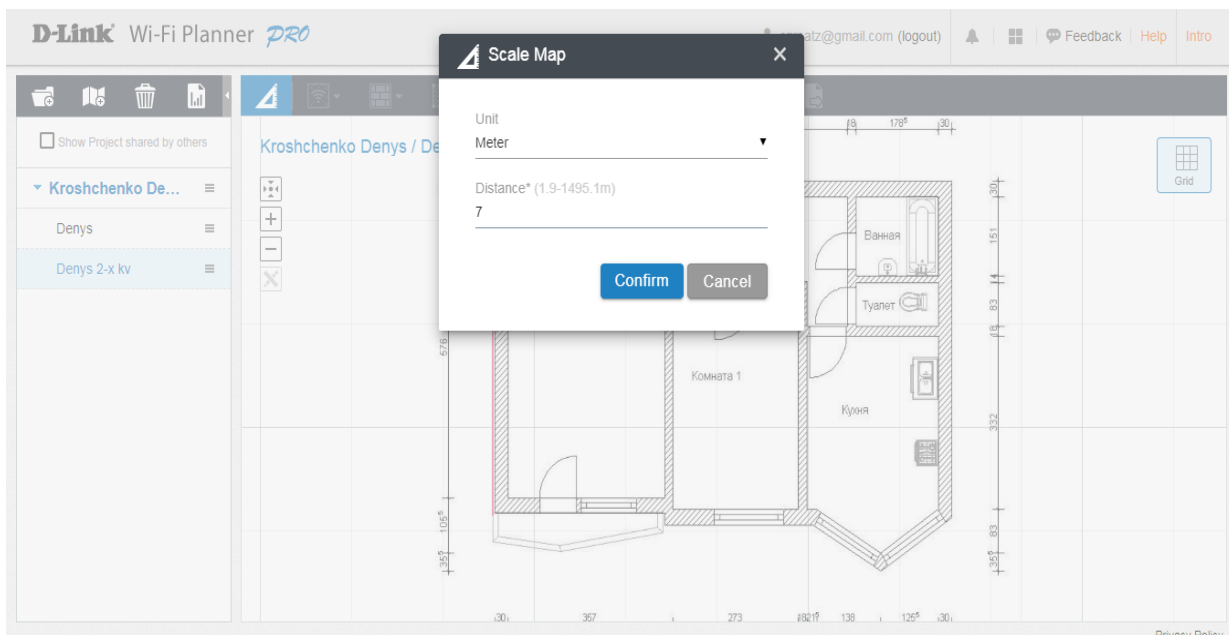


Рис. 4.13. Розмір приміщення за шириною

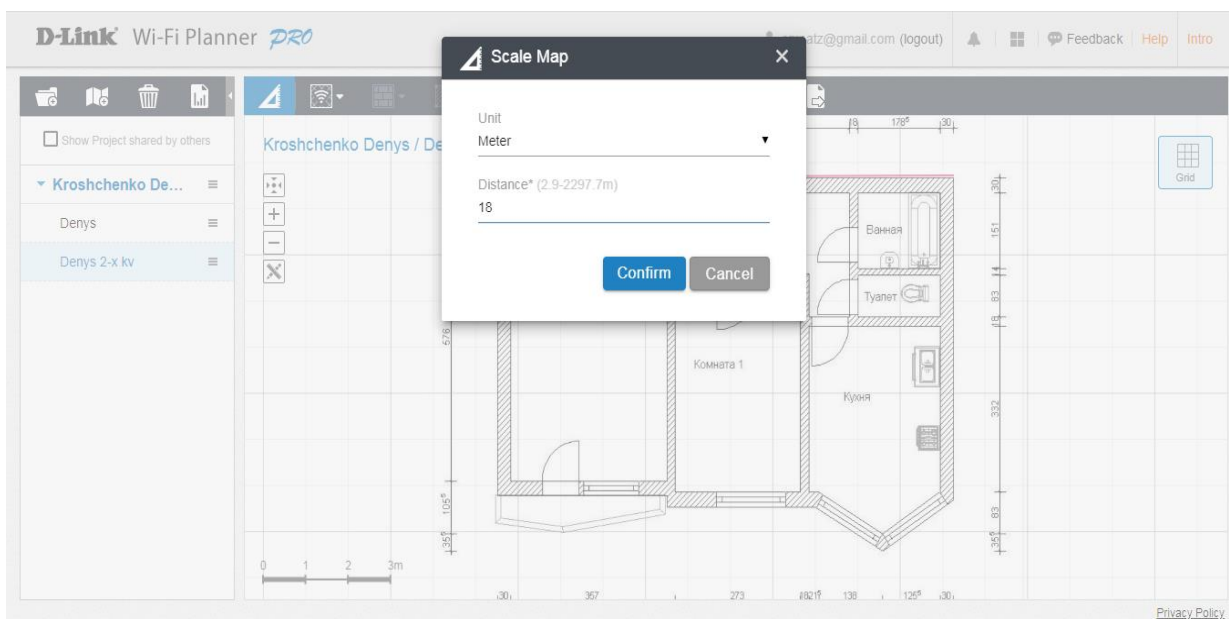


Рис. 4.14. Розмір приміщення за довжиною

Задаємо зону покриття Wi-Fi (рис. 4.15), натискаючи кнопки Define Wi-Fi zone та Coverage zone.

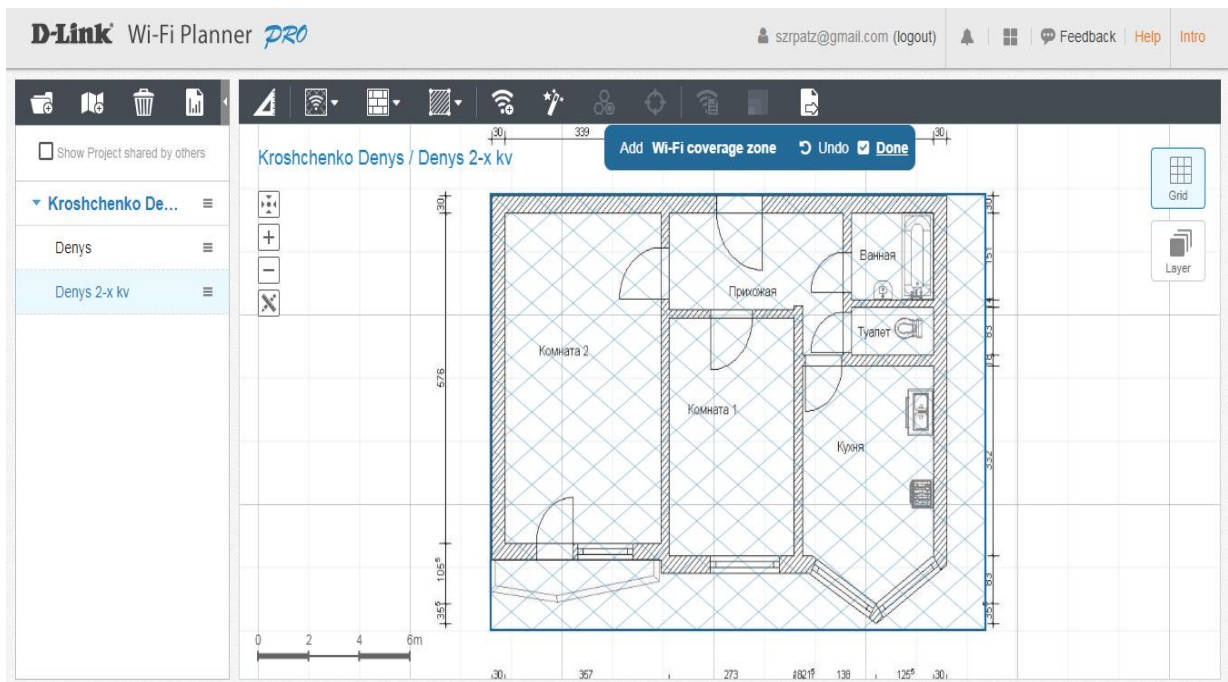


Рис. 4.15. Зона покриття Wi-Fi

Далі позначаємо на схемі зовнішні стіни (рис. 4.16, 4.17), перегородки (рис. 4.18, 4.19) і двері (рис. 4.20, 4.21) за своїми даними.

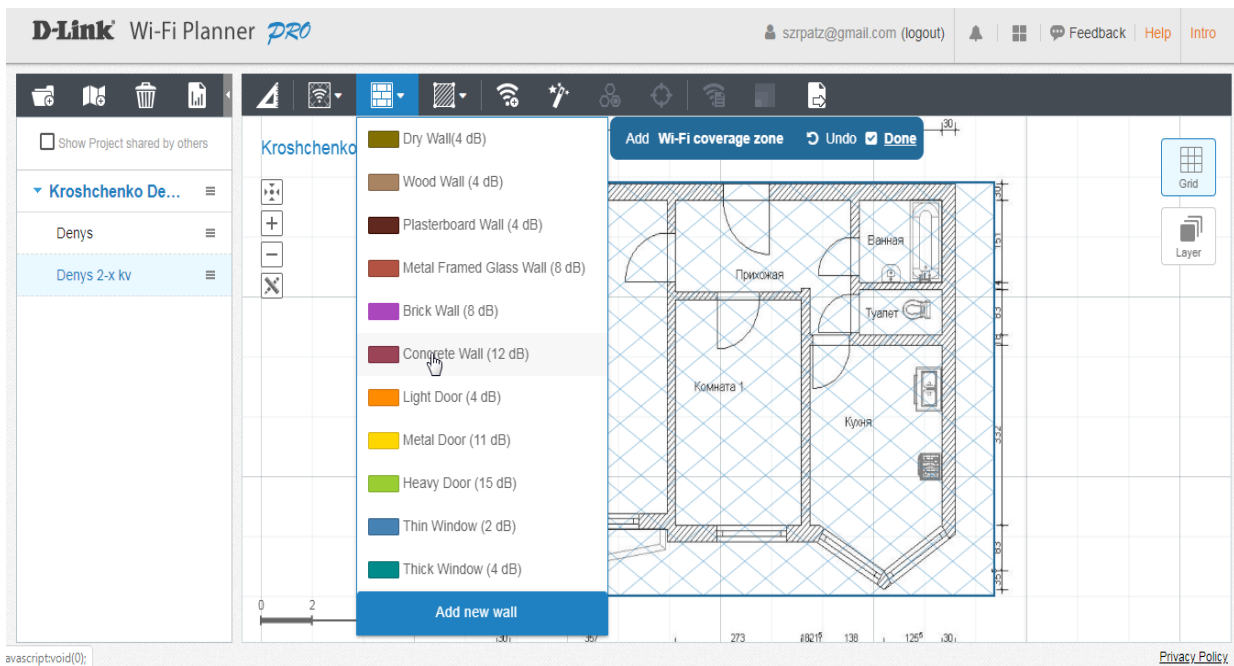


Рис. 4.16. Вибір типу стіни приміщення

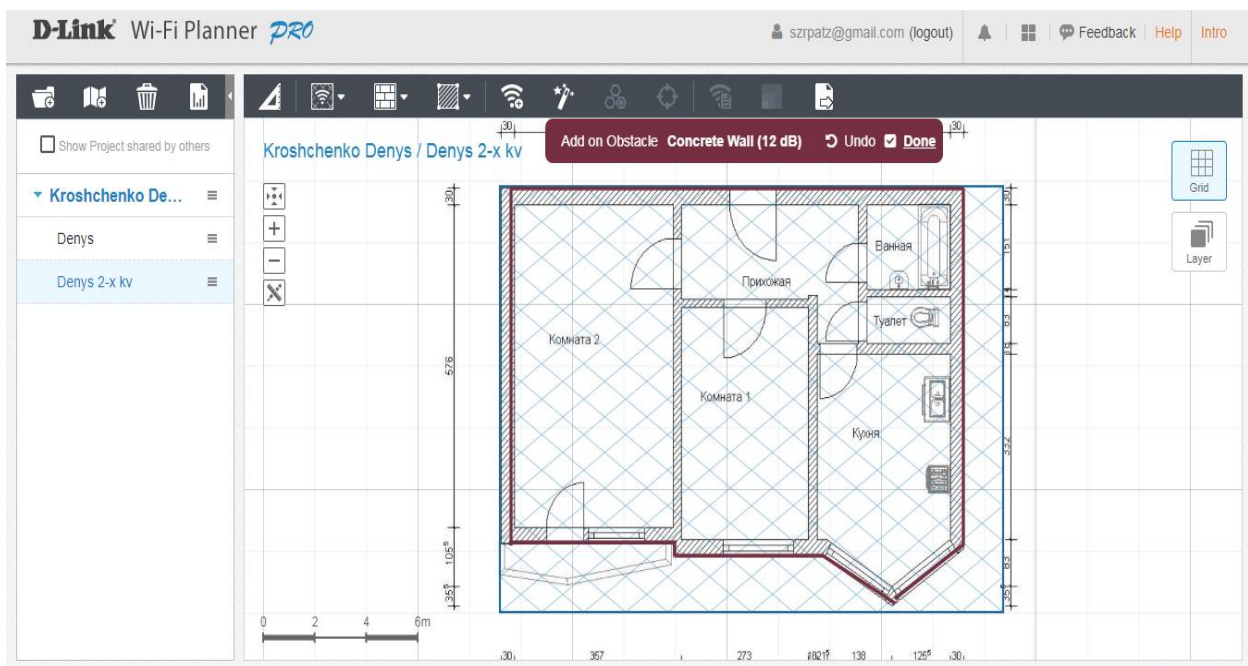


Рис. 4.17. Позначення бетонних стін приміщення

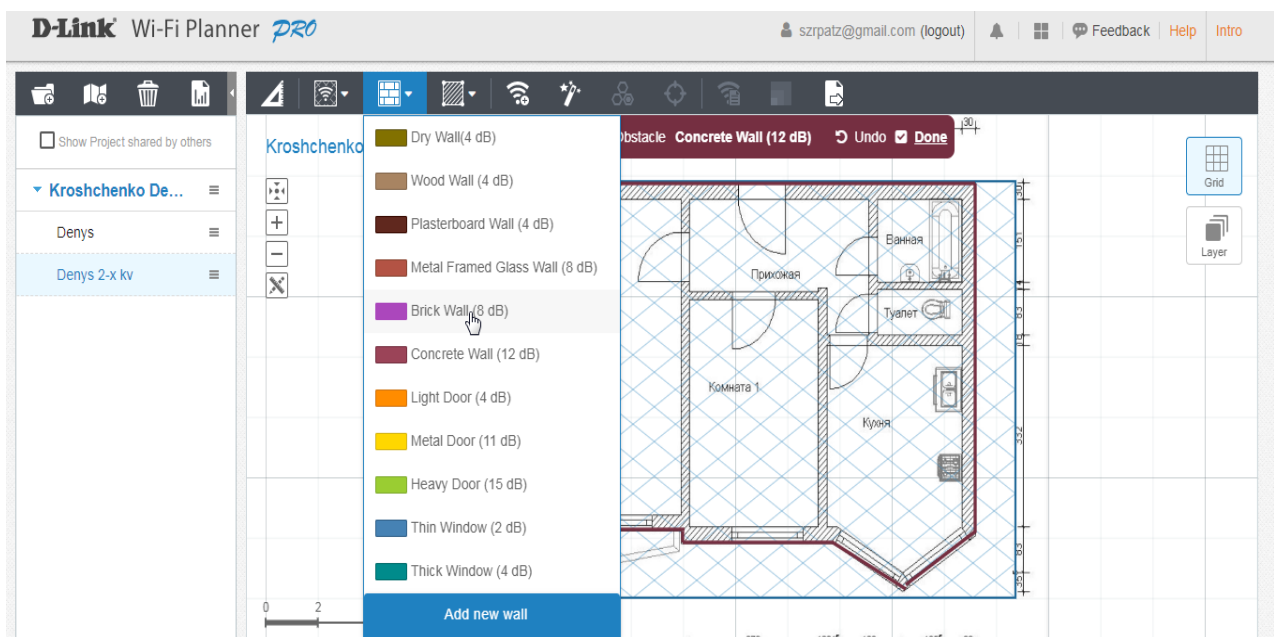


Рис. 4.18. Вибір типу перегородки

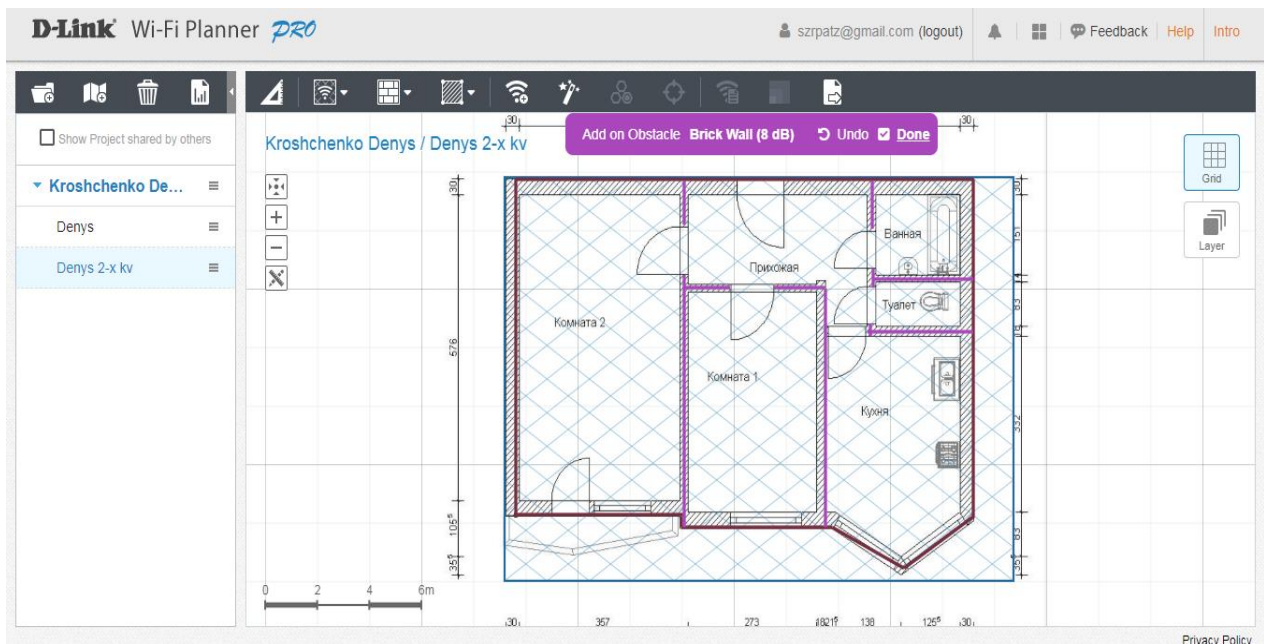


Рис. 4.19. Позначення цегляних перегородок приміщення

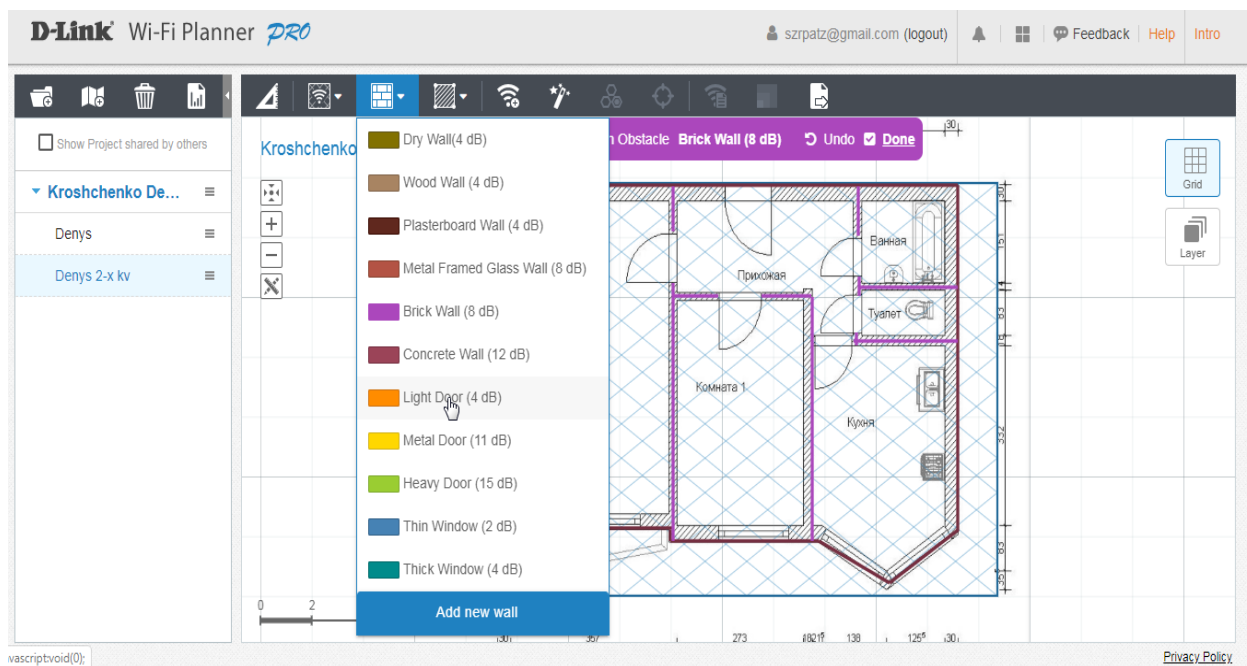


Рис. 4.20. Вибір типу дверей у приміщенні

Після цього потрібно позначити область типу приміщення як закриту офісну зону (рис. 4.22).

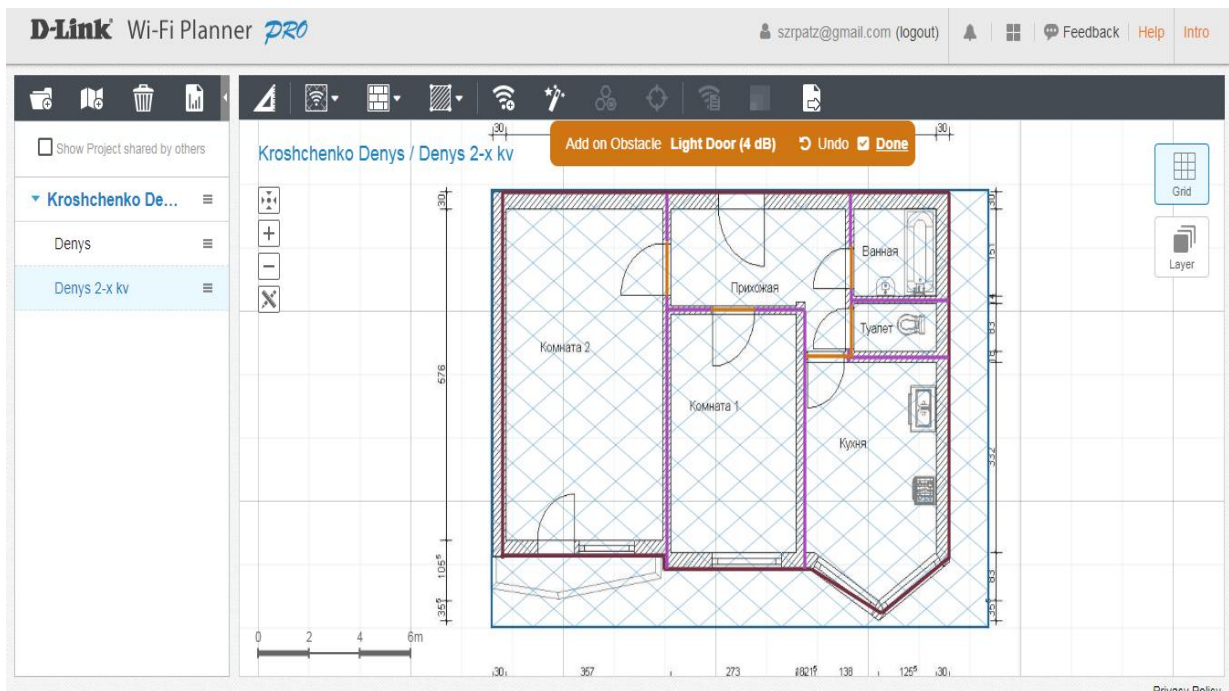


Рис. 4.21. Позначення легких дверей у приміщенні

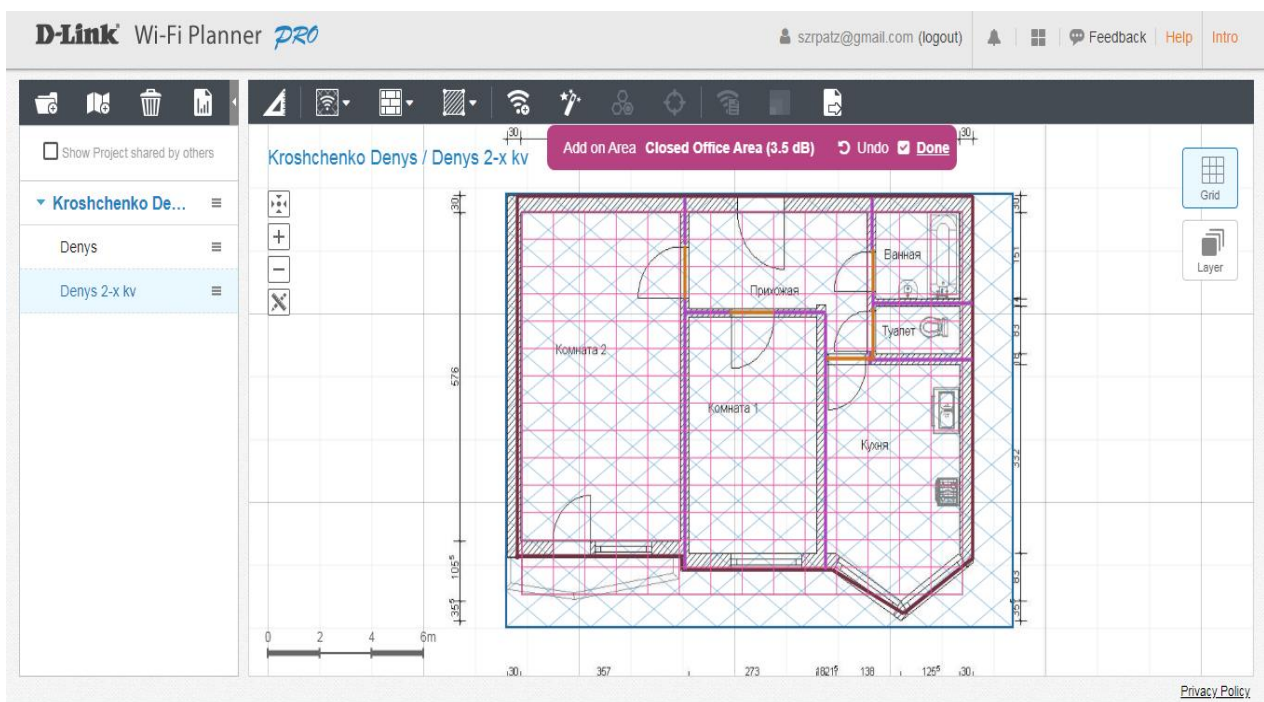


Рис. 4.22. Тип приміщення закрита офісна зона

Проводимо розрахунок точок доступу, автоматично натискаючи кнопку Advisor в діапазонах 2,4 ГГц (рис. 4.23) і 5 ГГц (рис. 4.24).

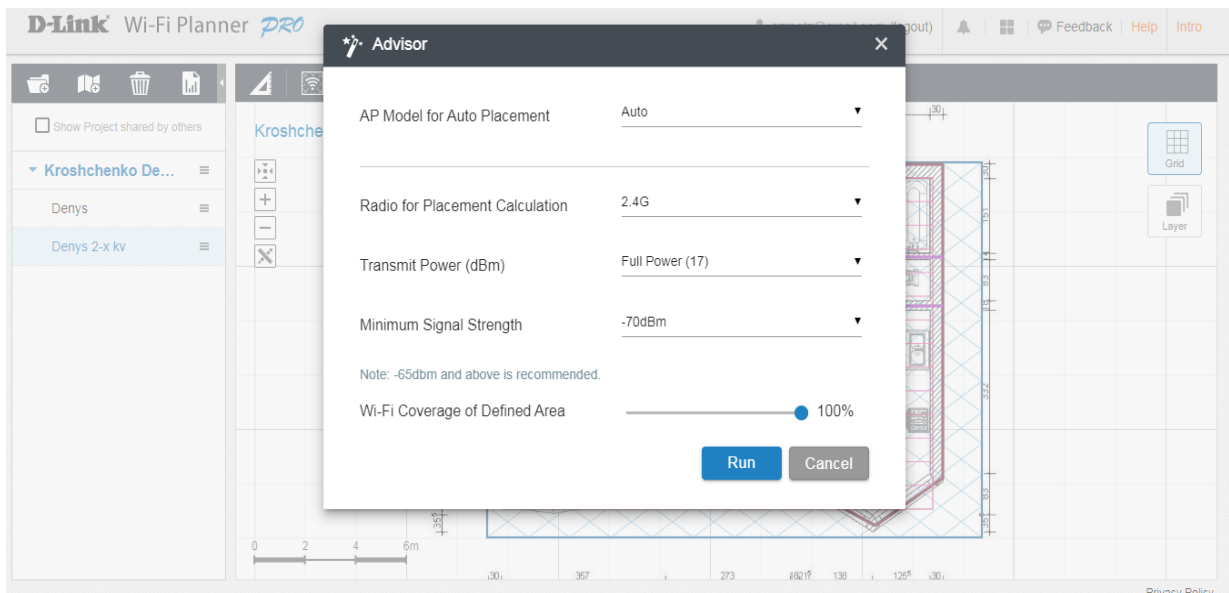


Рис. 4.23. Автоматичний розрахунок точок доступу в діапазоні 2,4 ГГц

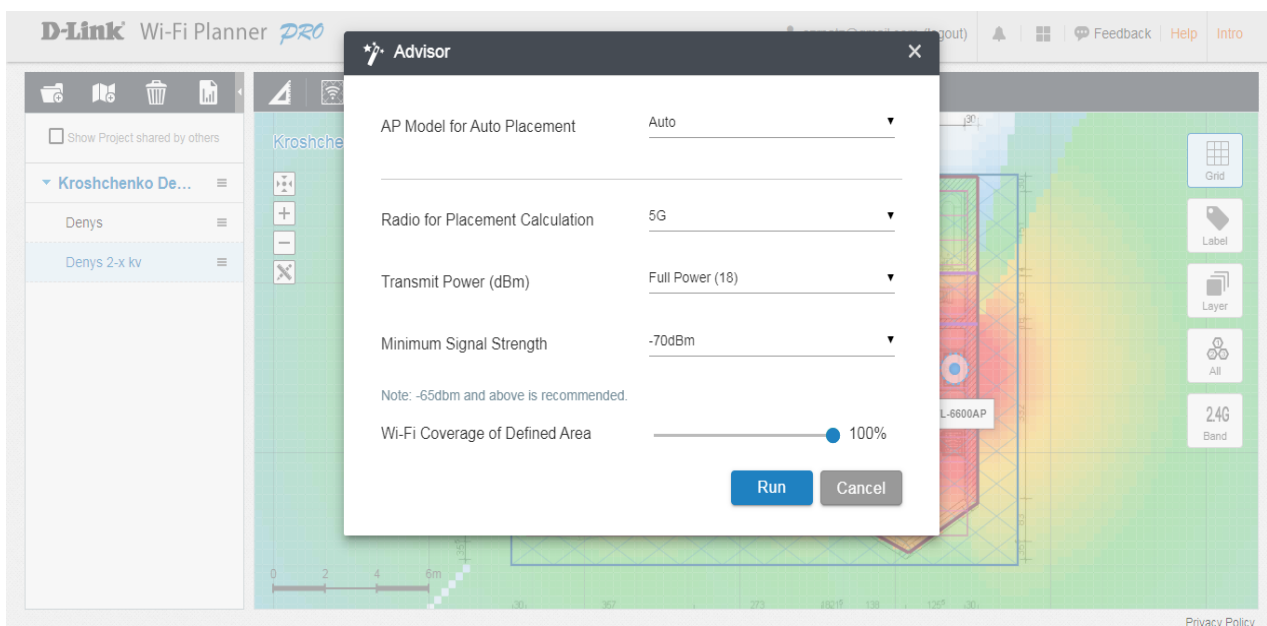


Рис. 4.24. Автоматичний розрахунок точок доступу в діапазоні 5 ГГц

Маємо результати імітаційного планування локальної мережі двокімнатної квартири для діапазонів 2,4 ГГц (рис. 4.25) і 5 ГГц (рис. 4.26).



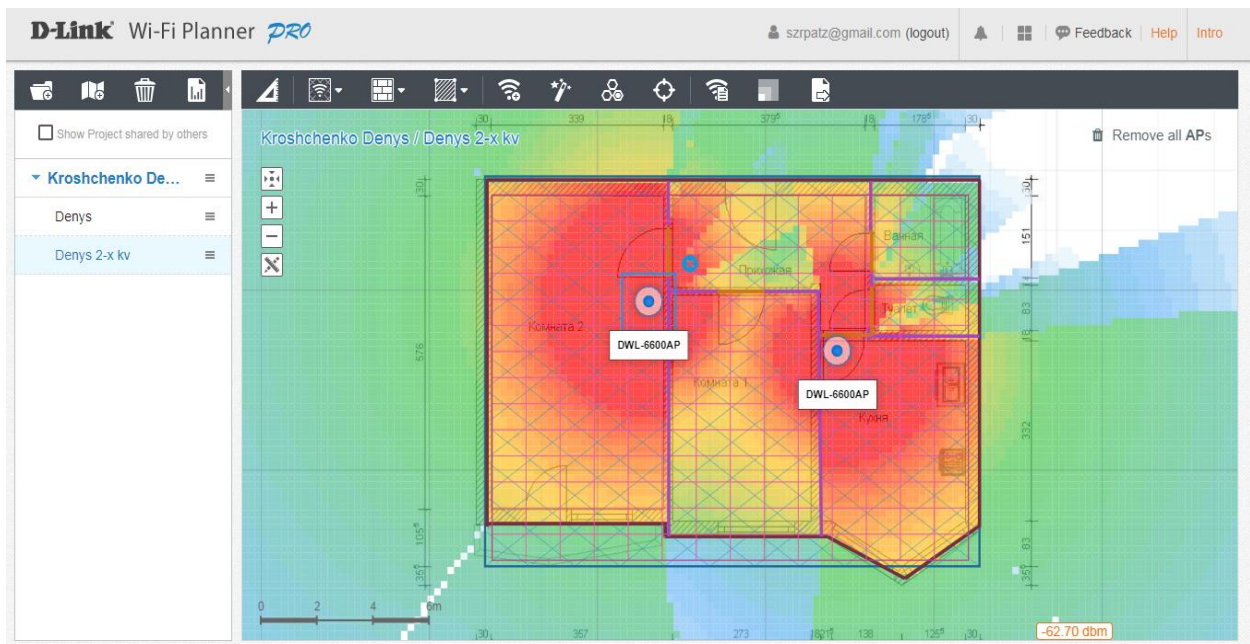


Рис. 4.25. Результати імітаційного планування бездротової локальної мережі для діапазону 2.4 ГГц

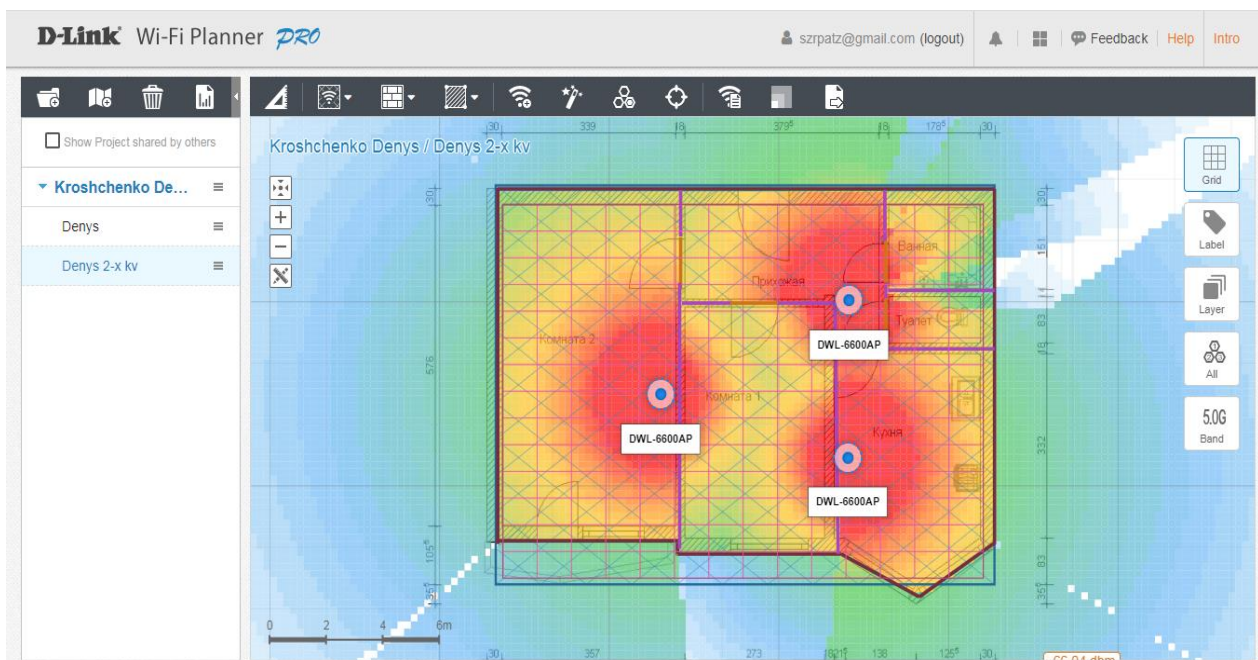


Рис. 4.26. Результати імітаційного планування бездротової локальної мережі для діапазону 5 ГГц

## **5. ВТРАТИ НА ТРАСІ РАДІОКАНАЛУ, ЗА МОДЕЛЛЮ ХАТА**

### **5.1. Теоретичні відомості**

Одним з відомих методів моделювання втрат у радіоканалі є метод кусочно-лінійної апроксимації загасання, віднесеного з логарифмом відстані. Зазвичай таку модель отримують на основі емпіричних вимірювань, а потім застосовують до інших схожих умов навколишнього середовища.

Існує велика кількість подібних параметричних моделей, частково адаптованих під той чи інший частотний діапазон і мають нормовані відхилення за точністю для спрощення розрахунків у далеких і ближніх радіополях. Такі моделі з достатнім рівнем точності дозволяють проводити моделювання трас і точок розміщення обладнання радіомереж. Дозволяють будувати горизонтальні і вертикальні епюри рівнів радіополя. Усі ці моделі використовують схожі підходи, відрізняючись переважно ваговими параметрами з урахуванням різних характеристик поля [1, 24, 27].

Більшість існуючих програмних продуктів, призначених для моделювання радіомереж, використовують ту чи іншу модель прогнозування загасання радіосигналу залежно від модельованої ситуації. У посібнику будуть розглянуті моделі Окамури, Хата і COST231-Хата, широко використовувані для моделювання мобільних бездротових мереж середнього і великого радіуса дії, таких як мережі 802.16e (мобільний WiMAX) і стільникові мережі.

#### **5.1.1. Модель Окамури**

Модель Окамури є однією з найбільш поширених моделей для прогнозування радіосигналу в міських умовах. Ця модель часто застосовується для відстаней 1-100 км і частотного діапазону 150-1920 МГц, а також добре екстраполюється для діапазону до 3 ГГц. Окамура використовував вимірювання загасання сигналу при передачі від базової станції до мобільного для отримання ряду кривих, що дають середню загасання відносно даних про поширення сигналу у вільному просторі на

території з нерівною поверхнею Землі. Самі вимірювання проводилися Окамуруою в Токіо. Висоти базових станцій при цих вимірювань були від 30 до 100 м, що перевищує звичайну висоту базових станцій, використовуваних у наш час.

Формула Окамури для розрахунку середнього значення втрат поширення на трасі, дБ, має вигляд

$$L_{cp}[\text{дБ}] = L_f + A_{cp}(f, d) - G(h_{BC}) - G(h_{AC}) - G_{nc},$$

де  $d$  – відстань між передавачем і приймачем;

$L_f$  – втрати у вільному просторі;

$A_{cp}$  – середнє загасання відносно загасання у вільному просторі;

$G(h_{BC})$  – висотний множник, що враховує висоту антени базової станції;

$G(h_{AC})$  – висотний множник антени мобільної станції;

$G_{nc}$  – коефіцієнт, що враховує тип навколишнього середовища.

Значення  $A_{cp}$  і  $G_{nc}$  отримують з емпіричних графіків Окамури. Висотні множники розраховуються за формулами

$$G(h_{BC}) = 20 \lg \left( \frac{h_{BC}}{200} \right), \quad 10 \text{ м} < h_{BC} < 1000 \text{ м};$$

$$G(h_{AC}) = \begin{cases} 10 \lg \left( \frac{h_{AC}}{3} \right), & h_{AC} < 3 \text{ м}; \\ 20 \lg \left( \frac{h_{AC}}{3} \right), & 3 \text{ м} < h_{AC} < 10 \text{ м}. \end{cases}$$

Втрати у вільному просторі розраховуються за формулою

$$L_f = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2.$$

Є також поправочні коефіцієнти, що враховують характер місцевості і забезпечують підвищення точності моделі. Модель Окамури зазвичай дає відхилення на 10-14 дБ між втратами на трасі, прогнозованими відповідно до моделі, і фактичними даними вимірювань у міських і приміських стільникових мережах [13, 25].

### 5.1.2. Модель Хата

Модель Хата є емпіричним поданням графічних даних про втрати на трасі, що наводяться Окамурою, і справедлива для діапазону частот 150-1500 МГц. Часто її називають моделлю Окамури-Хата. Суть цієї моделі полягає в апроксимації графіків Окамури спеціально підібраними формулами для різних територіальних зон, що умовно класифікуються як велике, середнє і мале місто, передмістя, сільська місцевість, відкрита місцевість.

Середні втрати на трасі в міському середовищі відповідно до моделі Хата розраховуються за формулою, дБ,

$$L_{\text{місто}} = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(f) - 13,83 \cdot \lg(h_{BC}) + \\ + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{BC})) \cdot \lg(d) - \alpha(h_{AC}) \quad , \quad (5.1)$$

де  $d$  – відстань між передавачем і приймачем, дБ;

$h_{BC}$  – висота базової станції, м;

$h_{AC}$  – висота мобільної станції, м;

$f$  – частота, МГц;

$\alpha(h_{AC})$  – поправочний коефіцієнт для висоти антени мобільної станції, що враховує зону охоплення, дБ.

Проводимо розрахунок поправочного коефіцієнта  $\alpha(h_{AC})$  для великого міста за формулою, якщо  $f < 300$  МГц, дБ,

$$\alpha(h_{AC}) = 8,29 \cdot (\lg(1,54 \cdot h_{AC}))^2 - 1,1, \quad (5.2)$$

або за формулою, якщо  $f \geq 300$  МГц, дБ,

$$\alpha(h_{AC}) = 3,2 \cdot (\lg(11,75 \cdot h_{AC}))^2 - 4,97. \quad (5.3)$$

Розрахунок поправочного коефіцієнта  $\alpha(h_{AC})$  для малого міста, передмістя і села виконується за формулою, дБ,

$$\alpha(h_{AC}) = (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_{AC} - (1,56 \cdot \lg(f) - 0,8). \quad (5.4)$$

Середні втрати на трасі в середовищі малого міста відповідно до моделі Хата розраховуються аналогічно за формулою (5.1), але з поправочним коефіцієнтом, розраховуваним за формулою (5.4).

Розрахунок середніх втрат на трасі в середовищі передмістя відповідно до моделі Хата проводиться за формулою, дБ,

$$L_{\text{передмістя}} = L_{\text{мале місто}} - 2 \cdot \left( \lg \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4. \quad (5.5)$$

Для сільської місцевості розрахунок проводиться за формулою, дБ,

$$L_{\text{село}} = L_{\text{мале місто}} - 4,78 \cdot (\lg(f))^2 + 18,33 \cdot \lg(f) - 40,94. \quad (5.6)$$

Хоча формули Хата не дозволяють урахувати всі специфічні поправки, доступні в методі Окамури, вони мають істотне практичне значення. Розрахунки за формулами Хата добре збігаються з даними моделі Окамури для дальності, більших 1 км. Отже, вона прийнятна для першого покоління стільникових систем, але не дозволяє моделювати з достатньою якістю сучасні стільникові системи з меншим розміром осередків [14].

### 5.1.3. Модель COST231–Хата

Модель Хата була розширена на діапазон 1,5-2 ГГц на основі проведених науково-технічних досліджень у рамках проєкту Європейського союзу COST – Cooperation for Scientific and Technical Research. Ця модель отримала назву модифікована модель Хата або модель COST231-Хата.

Далі буде проводиться розрахунок середніх втрат на трасі для великого міста, міста середніх розмірів і сільської місцевості за моделлю COST231-Хата.

Середні втрати на трасі в середовищі великого міста відповідно до моделі COST231-Хата розраховуються за формулою, дБ,

$$L_{\text{велике місто}} = 46,3 + 33,9 \cdot \lg(f) - 13,82 \cdot \lg(h_{BC}) + \\ + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{BC})) \cdot \lg(d) - \alpha(h_{AC}) + C, \quad (5.7)$$

де  $d$  – відстань між передавачем і приймачем, дБ;

$h_{BC}$  – висота базової станції, м;

$h_{AC}$  – висота мобільної станції, м;

$C$  – 3 дБ для великого міста, 0 дБ для міст середнього розміру та передмістя;

$f$  – частота, МГц;

$\alpha(h_{AC})$  – поправочний коефіцієнт для висоти антени мобільної станції що враховує зону охоплення, дБ.

Поправочний коефіцієнт  $\alpha(h_{AC})$  розраховується за формулами (5.2), (5.3) і (5.4) залежно від типу міста.

Середні втрати на трасі в середовищі середнього міста відповідно до моделі COST231-Хата розраховуються за формулою (5.7), поправочний коефіцієнт  $\alpha(h_{AC})$  розраховується за формулою (5.4).

Розрахунок середніх втрат на трасі в середовищі сільської місцевості виконується за формулою (5.6).

Формально моделі Окамури-Хата і COST231-Хата можна використовувати тільки для висоти антени базової станції, що перевищує 30 м, проте їх застосування можливе і для нижчих висот за умови, що сусідні будови значно нижче антени.

Модель COST231-Хата не прийнятна для оцінювання загасання сигналу при відстанях між рухомою і базовою станціями менше 1 км. У цьому випадку загасання сильно залежить від топографії місцевості, у якій відбувається поширення сигналу. Цю модель також не можна використовувати для оцінювання поширення сигналу по вулицях з високими будівлями (по так званих вуличних каньйонах).

## 5.2. Типове завдання 5

1. Вибрати з табл. 5.1 відповідно до свого варіанта вихідні дані для розрахунку.

2. Для частоти  $f_1$  розрахувати за моделлю Хата і побудувати графіки залежності величини втрат, дБ, від відстані (діапазон 1-10 км, точки через 1 км) для великого міста.

3. Провести розрахунки п. 2 для малого міста, передмістя і сільської місцевості.

4. Графік залежності величини втрат від відстані за моделлю Хата для різних типів місцевості будувати на одному рисунку.

5. Для частоти  $f_2$  розрахувати за моделлю COST231-Хата і побудувати графіки залежності величини втрат, дБ, від відстані (діапазон 1-10 км, точки через 1 км) для великого міста.

6. Провести розрахунки п. 5 для середнього міста і сільської місцевості.

7. Графік залежності величини втрат від відстані за моделлю COST231-Хата для різних типів місцевості будувати на одному рисунку.

8. Зробити висновки за результатами розрахунків.

Таблиця 5.1

Варіанти завдання (вказані згідно з номером здобувача в журналі)

<i>Варіант</i>	$f_1$ , МГц	$f_2$ , МГц	$h_{BC}$ , м	$h_{AC}$ , м	<i>Варіант</i>	$f_1$ , МГц	$f_2$ , МГц	$h_{BC}$ , м	$h_{AC}$ , м
<b>1</b>	<b>100</b>	<b>1500</b>	<b>30</b>	<b>1,5</b>	16	125	1550	95	8,5
2	150	1600	40	2	17	175	1650	85	8
3	200	1700	50	2,5	18	225	1750	75	7,5
4	250	1800	60	3	19	275	1850	65	7
5	300	1900	70	3,5	20	350	1950	55	6,5
6	400	1550	80	4	21	450	2000	45	6
7	500	1650	90	4,5	22	550	1500	35	5,5
8	600	1750	100	5	23	650	1600	30	5
9	700	1850	35	5,5	24	750	1700	40	4,5
10	800	1950	45	6	25	850	1800	50	4
11	900	1525	55	6,5	26	950	1900	60	3,5
12	1000	1625	65	7	27	1050	1875	70	3
13	1100	1725	75	7,5	28	1150	1575	80	2,5
14	1200	1825	85	8	29	1250	1675	90	2
15	1300	2000	95	8,5	30	1350	1775	100	1,5

### Контрольні питання

1. Розрахунок втрат на трасі радіоканалу за моделлю Окамури.

2. Які умови застосування моделі Окамури?

3. Розрахунок втрат на трасі радіоканалу за моделлю Хата.
4. Які умови застосування моделі Хата?
5. Розрахунок втрат на трасі радіоканалу за моделлю COST231-Хата.
6. Які умови застосування моделі COST231-Хата?
7. Порівняльна оцінка всіх трьох моделей.
8. Поясніть графік залежності величини втрат від відстані за моделлю Хата для різних типів місцевості.
9. Поясніть графік залежності величини втрат від відстані за моделлю COST231-Хата для різних типів місцевості.
10. Перелічіть недоліки моделей Хата і COST231-Хата.

### Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 5

Результати проведених розрахунків за моделлю Хата наведені в табл. 5.2 і на рис. 5.1. Результати проведених розрахунків за моделлю COST231-Хата наведені в табл. 5.3 і на рис. 5.2.

Таблиця 5.2

Результати проведених розрахунків за моделлю Хата

<i>L</i> <sub>місто</sub> , дБ	<i>L</i> <sub>мале місто</sub> , дБ	<i>L</i> <sub>передмістя</sub> , дБ	<i>L</i> <sub>село</sub> , дБ
97,566	76,758	70,747	53,358
110,735	89,927	83,916	66,527
118,439	97,631	91,619	74,231
123,904	103,096	97,085	79,696
128,144	107,336	101,324	83,936
131,608	110,8	104,788	87,4
134,536	113,728	107,717	90,328
137,073	116,265	110,254	92,865
139,311	118,503	112,492	95,103
141,313	120,505	114,494	97,105
$\alpha(h_{AC})$ , дБ =21,87	$\alpha(h_{AC})$ , дБ =42,68	$\alpha(h_{AC})$ , дБ = 42,68	$\alpha(h_{AC})$ , дБ =42,68



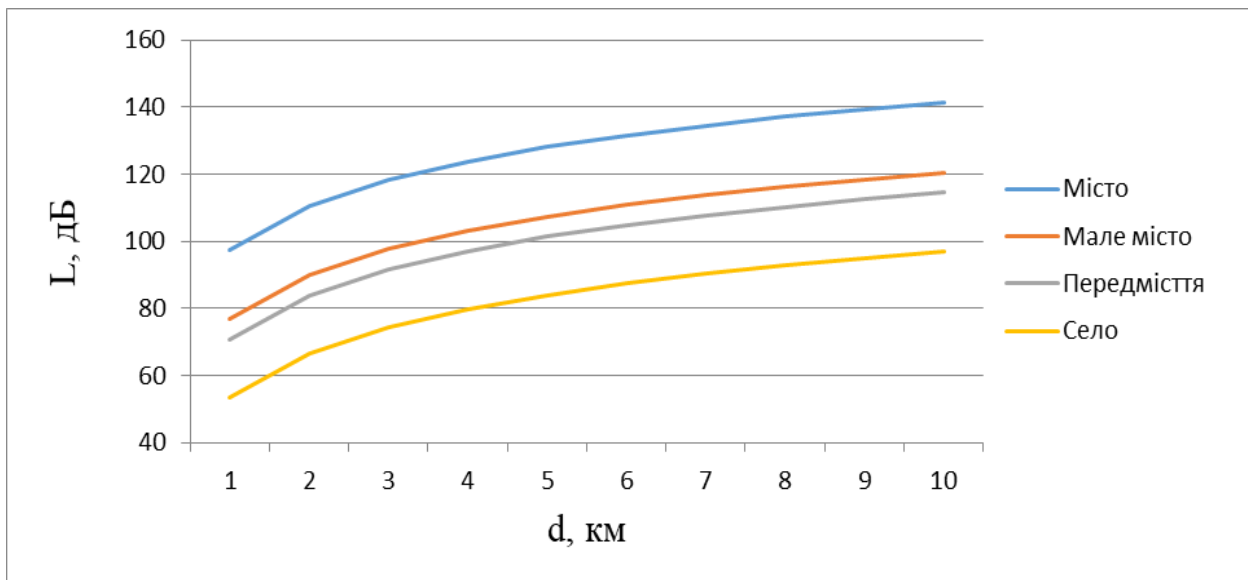


Рис. 5.1. Графік залежності величини втрат від відстані за моделлю Хата для різних типів місцевості

Таблиця 5.3

Результати проведених розрахунків за моделлю COST231-Хата

<i>L</i> <sub>велике місто</sub> , дБ	<i>L</i> <sub>середнє місто</sub> , дБ	<i>L</i> <sub>село</sub> , дБ
138,744	71,88	40,939
151,913	85,049	54,108
159,617	92,752	61,811
165,082	98,218	67,277
169,322	102,457	71,516
172,786	105,921	74,98
175,714	108,85	77,909
178,251	111,387	80,446
180,489	113,624	82,684
182,491	115,626	84,685
$\alpha(h_{AC})$ , дБ = 15,792	$\alpha(h_{AC})$ , дБ = 79,656	$\alpha(h_{AC})$ , дБ = 79,656

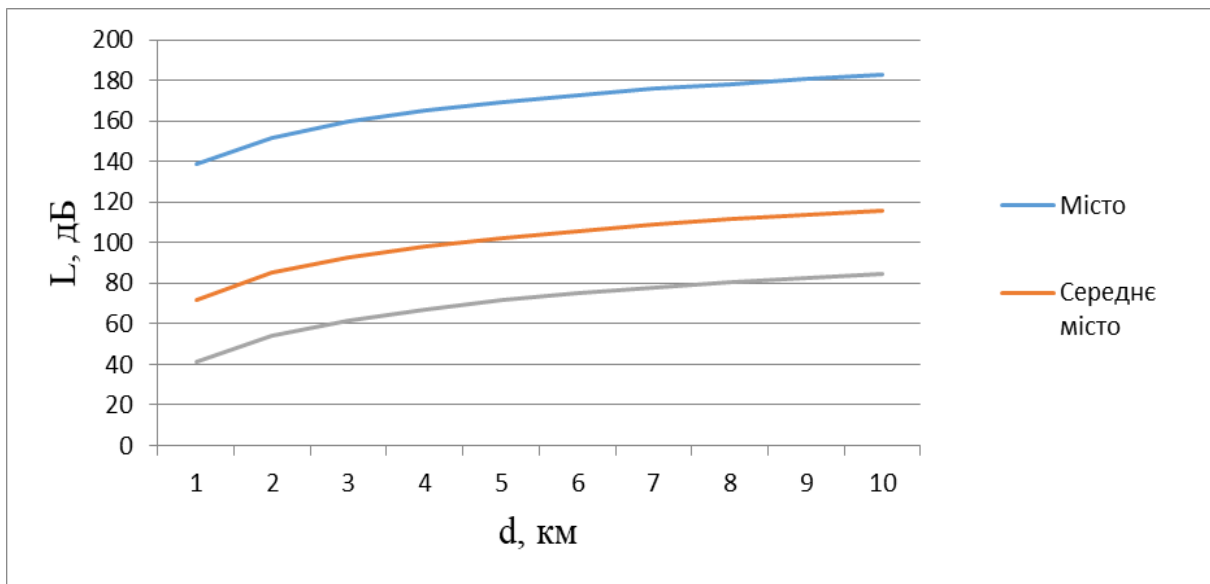


Рис. 5.2. Графік залежності величини втрат від відстані за моделлю COST231-Хата для різних типів місцевості

## 6. ВТРАТИ НА ТРАСІ РАДІОКАНАЛУ, ЗА МОДЕЛЯМИ УОЛФІША-ІКЕГАМІ І КСЯ-БЕРТОНІ

### 6.1. Теоретичні відомості

Раніше розглянуті моделі Окамури, Хата і COST231-Хата призначені для розрахунку втрат на відстанях більше 1 км від базової станції (БС) і потребують розміщення антени БС вище найближчих будівель. У цих моделях не враховується вплив будівель, що оточують антени БС, і мобільної станції (МС), що не дозволяє застосовувати ці моделі для розрахунку малих стільників. Від цих обмежень вільні моделі Уолфіш-Ікегамі (Walfisch-Ikegami) і Кся-Бертоні (Xia-Bertoni) [15, 26].

#### 6.1.1. Модель Уолфіша-Ікегамі

Модель Уолфіша-Ікегамі призначена для розрахунку рівня сигналу в малих стільниках. Ця модель заснована на фізичному поданні поля в точці приймання у вигляді двох складових: когерентної і відбитої. Когерентна складова визначається хвилею, дифрагує навколо будівель вздовж траси поширення з боку БС. Відбитий компонент створює хвилі, утворені в результаті перевипромінювання стінами побудов падаючих на них хвиль від БС. Відбитий компонент приходить з напрямків, що не збігається з напрямком на БС, і навіть протилежних цьому напрямку. Модель стверджує, що в умовах міста з відносно невисокою, але щільною забудовою основною трасою розповсюдження радіосигналу (за відсутності прямої видимості між вузлами) є траса, утворена променем, багаторазово перевідбитим від будівель, що може бути описана як серії послідовних екранів.

У зоні прямої видимості для розрахунку величини втрат при поширенні використовується формула, дБ,

$$L_{LOS} = 42,6 + 26 \cdot \lg(d) + 20 \cdot \lg(f), \quad (6.1)$$

де  $d$  – відстань між БС і МС, дБ;

$f$  – частота передачі, МГц.

У випадку, коли БС і МС поза зоною прямої видимості, розрахунок проводиться за формулою, дБ,

$$L_{NLOS} = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd} & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}, \quad (6.2)$$

де  $L_0$  – втрати при розповсюдженні у вільному просторі без перешкод, дБ;

$L_{rts}$  – втрати на боці МС, викликані розсіюванням радіосигналу при відбитті від поверхні будівель вулиці, на якій знаходиться МС, дБ;

$L_{msd}$  – оцінка величини втрат, викликаних багаторазовим перевідбиттям і розсіюванням радіосигналу від дахів будинків, дБ.

Втрати при розповсюдженні у вільному просторі розраховуються за формулою, дБ,

$$L_0 = 32,44 + 20 \cdot \lg(d) + 20 \cdot \lg(f). \quad (6.3)$$

Розрахунок втрат на боці МС, викликаних розсіюванням радіосигналу при відбитті від поверхні будівель вулиці, виконується за формулою, дБ,

$$L_{rts} = -16,9 + 10 \cdot \lg(w) + 10 \cdot \lg(f) + 20 \cdot \lg(\Delta h_{ms}) + L_{ori}, \quad (6.4)$$

де  $\Delta h_{ms}$  – різниця між висотою будівель і висотою розміщення МС, м;

$w$  – середня ширина вулиць, м;

$L_{ori}$  – складова втрат, залежна від орієнтації вулиць відносно напрямку приходу сигналу, дБ.

Складова втрат, залежна від орієнтації вулиць відносно напрямку приходу сигналу, розраховується за формулою, дБ,

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354 \cdot w & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ), & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 + 0,114(\varphi - 35^\circ) & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}, \quad (6.5)$$

де  $\varphi$  – орієнтація вулиць відносно траси розповсюдження сигналу.

При оцінюванні величини втрат, викликаних багаторазовим перевідбиттям і розсіюванням радіосигналу від дахів будинків, використовується формула, дБ,

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \lg(d) + k_f \cdot \lg(f) - 9 \cdot \lg(b), \quad (6.6)$$

де  $L_{bsh}$  – складова, що визначається висотою підвісу БС відносно дахів навколишніх будівель;

$k_a$  – параметр, що задає збільшення втрат при зменшенні висоти антени відносно середньої висоти навколишніх будівель;

$k_d$  – параметр, що визначає залежність величини втрат при розповсюдженні від частоти сигналу;

$k_f$  – параметр, що визначає залежність величини втрат при розповсюдженні від частоти сигналу;

$b$  – середній інтервал між кварталами.

Складова  $L_{bsh}$  розраховується за формулою, дБ,

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \cdot \lg(1 + \Delta h_{bs}) & h_{bs} > h_r \\ 0 & h_{bs} \leq h_r \end{cases}, \quad (6.7)$$

де  $\Delta h_{bs}$  – різниця висоти антени БС і середнього рівня дахів, м.

Параметр  $k_a$ , який задає збільшення втрат при зменшенні висоти антени відносно середньої висоти навколишніх будівель, розраховується за формулою

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_{bs} > h_r \\ 54 - 0,8 \cdot \Delta h_{bs}, & d \geq 0,5 \text{ км}, h_{bs} \leq h_r \\ 54 - 1,6 \cdot \Delta h_{bs} \cdot d & d < 0,5 \text{ км}, h_{bs} \leq h_r \end{cases}. \quad (6.8)$$

Параметри  $k_d$  і  $k_f$  визначають залежність величини втрат при розповсюдженні від частоти сигналу, а також від розсіювання і відбиття при проходженні через послідовні екрани і розраховуються як

$$k_d = \begin{cases} 18 & h_{bs} \geq h_r \\ 18 - 15 \cdot \frac{\Delta h_{bs}}{h_r}, & h_{bs} < h_r \end{cases}, \quad (6.9)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \cdot \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{для міста середніх розмірів та передмістя} \\ -4 + 1,5 \cdot \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{для міста з щільною забудовою} \end{cases} \quad (6.10)$$

У наведених формулах слід підставляти частоту в мегагерцах, протяжність траси в кілометрах, інші параметри моделі в метрах. Ці формули дозволяють визначити медіанні (середні) втрати як для трас, на яких антена БС розташована над міською забудовою, так і трас, на яких антена БС розташована на рівні дахів або нижче цього рівня.

При проектуванні малих стільників необхідні відомості про конкретні ділянки міських трас. У ряді випадків можна скористатися статистичними даними для міста. Райони сучасної міської забудови: щільність забудови 90 будівель на 1 км; середня довжина будівлі 80-105 м; ширина 15 м; поверховість від 9 до 14; просвіти між будинками 15-20 м; середня дальність прямої видимості в шарі міської забудови 170 м. Забудову можна вважати однорідною для районів, де нема великих площ і парків [16, 27].

### 6.1.2. Модель Кся-Бертоні

Модель Кся-Бертоні побудована на основі рівнянь хвильової оптики і, як і модель Уолфіша-Ікегамі, розглядає різні механізми поширення радіохвиль в умовах міської забудови: розповсюдження у вільному просторі, дифракцію на кромках дахів будинків, відбиття від стін будівель. Коли антена БС розташована вище середнього рівня дахів будівель, з БС на МС приходять два промені – один у результаті дифракції на кромці даху будівлі, другий після перевідбиття від стіни. Величина середніх втрат у цьому випадку розраховується за формулою, дБ,

$$L = -10 \cdot \lg \left( \left( \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \right) - 10 \cdot \lg \left( \frac{\lambda}{2 \cdot \pi^2 \cdot r} \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2 \cdot \pi + \theta} \right)^2 \right) - 10 \cdot \lg \left( 2,35^2 \cdot \left( \frac{\Delta h_{bs}}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{1,8} \right), \quad (6.11)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі, м;

$\theta = \arctg\left(\frac{\Delta h_{ms}}{x}\right)$  – кут падіння переломленого променя на

антену МС, де  $x = \frac{w}{2}$  – відстань по горизонталі між МС і кромкою дахів, на якій дифрактує хвиля, м;

$r = \sqrt{\Delta h_{ms}^2 + x^2}$  – відстань від точки переломленого променя до антени МС, м [17].

## 6.2. Типове завдання 6

1. Вибрати з табл. 6.1 відповідно до свого варіанта вихідні дані для розрахунку.

Таблиця 6.1

Варіанти завдання (вказані згідно з номером здобувача в журналі)

<i>Варіант</i>	<i>F, МГц</i>	<i>h<sub>r</sub>, м</i>	<i>h<sub>bs1</sub>, м</i>	<i>h<sub>bs2</sub>, м</i>	<i>h<sub>ms</sub>, м</i>	<i>φ, град</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<b>1</b>	<b>800</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>9</b>	<b>1,2</b>	<b>20</b>
2	900	20	25	16	1,3	30
3	1000	25	32	22	1,4	40
4	1100	30	37	14	1,5	20
5	1200	35	43	26	1,6	60
6	1300	40	49	35	1,7	40
7	1400	18	30	11	1,8	80
8	1500	21	31	10	1,9	45
9	1600	24	28	21	2,0	25
10	1700	27	45	20	2,1	50
11	1800	33	39	19	2,2	30
12	1900	36	46	31	2,3	60
13	2000	39	47	30	2,4	45
14	850	42	48	22	2,5	65
15	950	45	50	34	2,6	50
16	1050	15	17	11	2,7	70
17	1150	20	26	13	2,8	60

Продовження табл. 6.1

1	2	3	4	5	6	7
18	1250	25	44	17	2,9	75
19	1350	30	38	28	3,0	65
20	1450	35	49	31	1,4	55
21	1550	40	50	32	1,5	75
22	1650	18	29	13	1,6	80
23	1750	21	41	19	1,7	85
24	1850	24	32	21	1,8	90
25	1950	27	38	20	1,9	15
26	875	33	42	32	2,0	85
27	975	36	50	31	2,1	10
28	1075	39	46	34	2,2	25
29	1175	42	44	31	2,3	5
30	1275	45	49	39	2,4	30

2. Для заданої частоти  $f$  розрахувати і побудувати графіки залежності величини втрат, дБ, від відстані (діапазон 200-1500 м, точки через 100 м) для нижченаведених варіантів:

- а) модель Уолфіша-Ікегамі в зоні прямої видимості;
- б) модель Уолфіша-Ікегамі поза зоною прямої видимості, висота БС  $h_{bs1}$ , місто середніх розмірів;
- в) модель Уолфіша-Ікегамі поза зоною прямої видимості, висота БС  $h_{bs1}$ , місто зі щільною забудовою;
- г) модель Уолфіша-Ікегамі поза зоною прямої видимості, висота БС  $h_{bs2}$ , місто середніх розмірів;
- д) модель Уолфіша-Ікегамі поза зоною прямої видимості, висота БС  $h_{bs2}$ , місто зі щільною забудовою;
- е) модель Кся-Бертоні, висота БС  $h_{bs1}$ .

Графіки будувати на одному рисунку.

3. Зробити висновки за результатами розрахунків.

### Контрольні питання

1. Розрахунок втрат на трасі радіоканалу за моделлю Уолфіша-Ікегамі.
2. Які умови застосування моделі Уолфіша-Ікегамі?



3. Розрахунок втрат на трасі радіоканалу за моделлю Кся-Бертоні.
4. Які умови застосування моделі Кся-Бертоні?
5. Порівняльна оцінка моделей.
6. Поясніть графік залежності величини втрат від відстані за моделлю Уолфіша-Ікегамі.
7. Поясніть графік залежності величини втрат від відстані за моделлю Кся-Бертоні.
8. Перелічіть недоліки моделі Уолфіша-Ікегамі.
9. Перелічіть недоліки моделі Кся-Бертоні.
10. Поясніть графік залежності величини втрат від відстані за моделями Уолфіша-Ікегамі та Кся-Бертоні для різних типів місцевості та висоти БС.

### Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 6

Результати проведених розрахунків втрат на трасі радіоканалу за моделями Уолфіша-Ікегамі і Кся-Бертоні наведені в табл. 6.2-6.4 і на рис. 6.1.

Таблиця 6.2

Результати проведених розрахунків за моделлю Уолфіша-Ікегамі поза зоною прямої видимості і в місті середніх розмірів

Модель Уолфіша-Ікегамі					
Поза зоною прямої видимості					
$L_{NLOS}$ , дБ					
Місто середніх розмірів					
Висота БС $h_{bs} = 30$ м	$L_0$ , дБ	$L_{msd}$ , дБ	Висота БС $h_{bs} = 9$ м	$L_0$ , дБ	$L_{msd}$ , дБ
1	2	3	4	5	6
36,184	24,267	-6,561	55,584	24,267	12,839
42,875	27,789	-3,391	64,292	27,789	18,025
47,623	30,287	-1,143	70,749	30,287	21,984
51,305	32,226	0,602	75,973	32,226	25,27
54,314	33,809	2,027	80,417	33,809	28,13
56,858	35,148	3,232	84,323	35,148	30,697
59,062	36,308	4,276	87,835	36,308	33,049

Продовження табл. 6.2

1	2	3	4	5	6
61,006	37,331	5,197	91,045	37,331	35,236
62,745	38,246	6,02	94,019	38,246	37,294
64,317	39,074	6,765	96,8	39,074	39,248
65,753	39,83	7,446	99,423	39,83	41,115
67,074	40,525	8,071	101,912	40,525	42,909
68,297	41,169	8,651	104,288	41,169	44,642
69,436	41,768	9,19	106,567	41,768	46,321
$L_{ori} = -4,69$			$L_{ori} = -4,69$		
$L_{rts} = 18,478$			$L_{rts} = 18,478$		
$L_{bsh} = -21,674$			$L_{bsh} = 0$		
$\Delta h_{ms} = 13,8$			$\Delta h_{ms} = 13,8$		
$\Delta h_{bs} = 15$			$\Delta h_{bs} = -6$		
$k_a = 54$			$k_a = 55,92$		
$k_d = 18$			$k_d = 24$		
$k_f = -4,095$			$k_f = -4,095$		

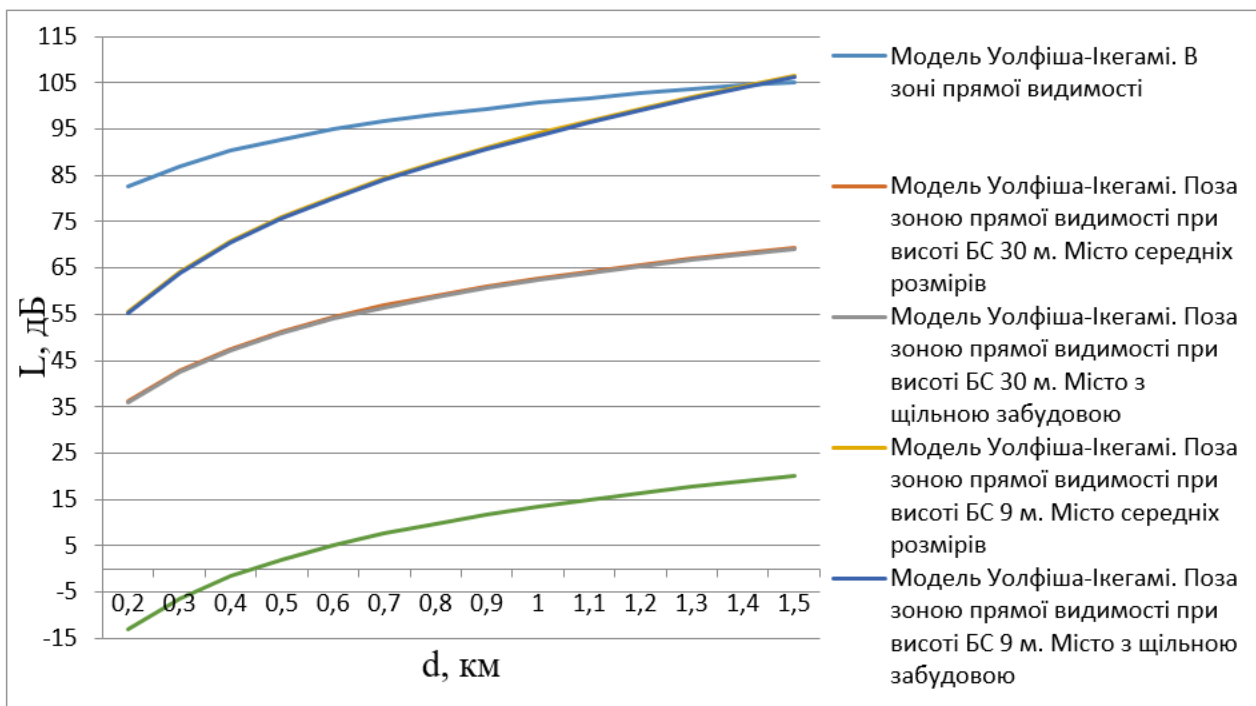


Рис. 6.1. Графік залежності величини втрат від відстані за моделями Уолфіша-Ікегамі та Кся-Бертоні для різних типів місцевості та висоти БС

Таблиця 6.3

Результати проведених розрахунків за моделлю Уолфіша-Ікегамі  
в зоні прямої видимості та моделлю Кся-Бертоні

Модель Кся-Бертоні	Модель Уолфіша-Ікегамі у зоні прямої видимості $L_{LOS}$ , дБ
$r = 11,584$	
$x = 7,5$	
$\lambda = 0,375$	
$\Theta = 1,073$	
$\Delta h_{bs} = 15$	
$L$ , дБ	
-13,068	82,489
-6,376	87,067
-1,629	90,315
2,054	92,835
5,063	94,894
7,067	96,634
9,811	98,142
11,754	99,472
13,493	100,662
15,066	101,738
16,502	102,721
17,823	103,624
19,046	104,461
20,185	105,24

Таблиця 6.4

Результати проведених розрахунків за моделлю Уолфіша-Ікегамі  
поза зоною прямої видимості і зі щільною забудовою

Модель Уолфіша-Ікегамі					
Поза зоною прямої видимості					
$L_{NLOS}$ , дБ					
Місто зі щільною забудовою					
Висота БС $h_{bs} = 30$ м	$L_0$ , дБ	$L_{msd}$ , дБ	Висота БС $h_{bs} = 9$ м	$L_0$ , дБ	$L_{msd}$ , дБ
1	2	3	4	5	6
35,87	24,267	-6,875	55,27	24,267	12,525
42,561	27,789	-3,705	63,978	27,789	17,712

Продовження табл. 6.4

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
47,309	30,287	-1,456	70,435	30,287	21,67
50,992	32,226	0,288	75,659	32,226	24,956
54	33,809	1,713	80,103	33,809	27,816
56,544	35,148	2,918	84,009	35,148	30,383
58,748	36,308	3,962	87,521	36,308	32,735
60,692	37,331	4,883	90,731	37,331	34,922
62,431	38,246	5,706	93,705	38,246	36,981
64,004	39,074	6,452	96,486	39,074	38,934
65,44	39,83	7,132	99,109	39,83	40,801
66,761	40,525	7,757	101,598	40,525	42,595
67,984	41,169	8,337	103,974	41,169	44,328
69,122	41,768	8,876	106,253	41,768	46,007
$L_{ori} = -4,69$			$L_{ori} = -4,69$		
$L_{rts} = 18,478$			$L_{rts} = 18,478$		
$L_{bsh} = -21,674$			$L_{bsh} = 0$		
$\Delta h_{ms} = 13,8$			$\Delta h_{ms} = 13,8$		
$\Delta h_{bs} = 15$			$\Delta h_{bs} = -6$		
$k_a = 54$			$k_a = 55,92$		
$k_d = 18$			$k_d = 24$		
$k_f = -4,203$			$k_f = -4,203$		

## 7. ОЦІНЮВАННЯ ВТРАТ НА ТРАСІ РАДІОКАНАЛУ У ВИПАДКУ ДИФРАКЦІЇ НА КЛИНІ ПРИ ОДНІЙ ПЕРЕШКОДІ

### 7.1. Теоретичні відомості

Явище дифракції полягає в огинанні радіохвилями перешкод, що зустрічаються на шляху їх поширення. При цьому втрати сигналу на трасі поширення зростають. Як правило, втрати на дифракцію оцінюють окремо в децибелах відносно вільного простору, як, наприклад, у моделі Уолфіша-Ікегамі, у якій розглядається випадок множинної дифракції в умовах міста. Однак досить часто зустрічаються ситуації, коли на трасі поширення електромагнітної хвилі трапляється незначна кількість перешкод, що можуть викликати явище дифракції, наприклад високий пагорб, розташований між двома вишками радіорелейного зв'язку. У цьому випадку зазвичай обмежуються оцінюванням втрат на дифракцію, викликаних однією або двома перешкодами [3, 4].

На трасі виділяють одну або дві найбільш значні перешкоди і апроксимують їх геометричними тілами (клином або циліндром), для яких на основі загальної теорії дифракції отримано математичні вирази, що дозволяють оцінити втрати на дифракцію на тілах відповідної форми. Використовуючи ці вирази, оцінюють втрати на дифракцію. Моделі, що визначають втрати на дифракцію, є детерміністськими. При оцінюванні повних втрат на трасі поширення втрати на дифракцію підсумовують з іншими видами втрат, отриманими за іншими моделям і для інших факторів, що впливають на поширення радіохвиль [5, 17].

#### 7.1.1. Дифракція на клині

Радіус першої зони Френеля (рис. 7.1) розраховується за формулою, м,

$$r(x) = \sqrt{\frac{\lambda \cdot x(a-x)}{a}} = 550 \cdot \sqrt{\frac{x(a-x)}{a \cdot f}}, \quad (7.1)$$

де  $x$  – відстань, м;

$a$  – відстань між передавачем і перешкодою, м,

для того, щоб при оцінюванні дифракційних втрат на трасі між передавачем або приймачем і клиноподібною перешкодою перша зона Френеля не перекривалася.

Аналогічно можуть бути записані та розраховані інші ділянки траси з заміною на  $b$  або інші відповідно.

Процедура розрахунку змінюється залежно від кількості клиноподібних перешкод на трасі.

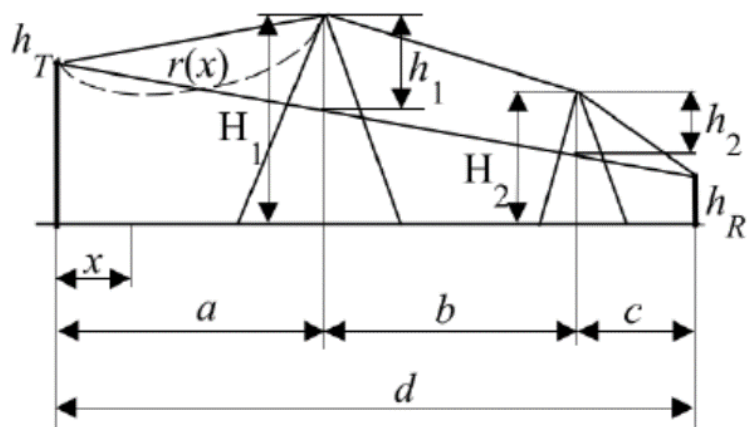


Рис. 7.1. Модель траси

### 7.1.2. Одна перешкода

Випадок однієї перешкоди зображений на рис. 7.2, де зображено можливі положення перешкоди на трасі між передавачем і приймачем.

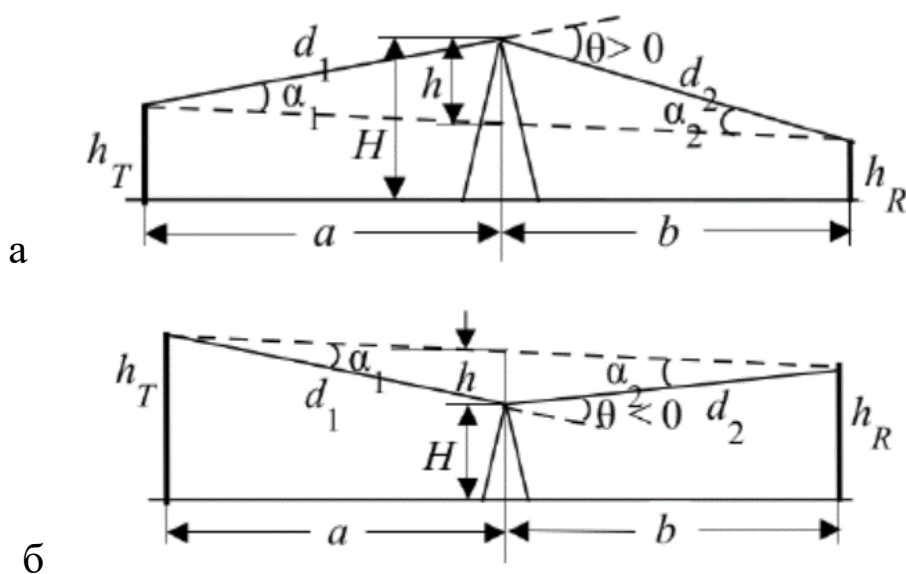


Рис. 7.2. Модель траси з однією перешкодою:  
 а – ( $H > h_T$  та  $H > h_R$ ); б – ( $H < h_T$  та  $H < h_R$ )

Розрахунок виконують у такому порядку:

1. Визначаємо висоту перешкоди,  $m$ , тобто степінь перекриття траси перешкодою за формулою

$$h = H - \left( h_T + a \cdot \frac{h_R - h_T}{a + b} \right), \quad (7.2)$$

де  $h_T$  – висота передавача,  $m$ ;

$h_R$  – висота приймача,  $m$ ;

$H$  – висота перешкоди,  $m$ ;

$b$  – відстань між перешкодою і приймачем,  $m$ .

2. Використовуючи геометричні параметри, що описують взаємне положення передавача, приймача і перешкоди на трасі, розраховуємо безрозмірний параметр  $v$  за формулою

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot \theta}{\lambda}}. \quad (7.3)$$

3. Якщо отримане значення  $v > -0,7$ , то наближене значення втрат на дифракцію оцінюють використовуючи формулу, дБ,

$$L_{dif}(v) = 6,9 + 20 \cdot \lg \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right), \quad (7.4)$$

якщо значення  $v \leq -0,7$ , то вважають, що  $L_{dif}(v) = 0$  дБ.

## 7.2. Типове завдання 7

1. Вибрати з табл. 7.1 відповідно до свого варіанта вихідні дані для розрахунку.

Таблиця 7.1

Варіанти завдання (вказані за номером здобувача в журналі)

<i>Варіант</i>	<i>f, МГц</i>	<i>h<sub>T</sub>, м</i>	<i>h<sub>R</sub>, м</i>	<i>a, км</i>	<i>b, км</i>	<i>H<sub>1</sub>, м</i>	<i>H<sub>2</sub>, м</i>
<b>1</b>	<b>800</b>	<b>45</b>	<b>30</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>50</b>	<b>25</b>
2	500	40	20	6	11	45	17
3	600	42	22	7	12	44	20
4	700	44	25	8	13	52	21
5	800	46	28	9	14	50	23
6	900	48	31	10	15	55	28
7	1000	50	34	11	16	58	29
8	1100	30	20	12	17	43	19
9	1200	32	23	13	18	41	22
10	1300	34	26	14	19	39	21
11	1400	36	29	9	11	45	27
12	1500	38	32	6	12	42	29
13	1600	40	35	7	13	47	31
14	1700	31	20	8	14	40	18
15	1800	33	22	9	13	39	19
16	1900	35	24	10	15	41	22
17	2000	37	27	11	16	43	25
18	2100	39	25	12	17	42	22
19	2200	41	29	13	18	50	26
20	2300	43	34	14	19	48	30
21	2400	45	36	8	11	54	32
22	2500	47	35	9	12	51	34
23	2600	49	37	6	13	55	33
24	2700	51	45	7	14	57	40
25	2800	53	41	8	15	58	36
26	2900	34	23	9	16	42	20
27	3000	37	22	10	17	46	20
28	3100	40	28	11	18	46	25
29	3200	43	29	12	19	49	25
30	3300	46	30	13	12	53	25

2. Для заданих частоти  $f$  і відстані  $b$  розрахувати і побудувати графіки залежності величини втрат на дифракцію на клині, дБ, від відстані  $d = a + b$  при зміні відстані  $a$  (діапазон 5-15 км, точки через 1 км) для кожної їхньої висоти перешкоди



$H_1$  і  $H_2$ . Для порівняння навести графік втрат у вільному просторі (формула (6.3)) для тих самих відстаней  $d$ . Графіки будувати на одному рисунку.

3. Для заданих частоти  $f$  і відстані  $a$  розрахувати і побудувати графіки залежності величини втрат на дифракцію на клині, дБ, від відстані  $d$  при зміні відстані  $b$  (діапазон 10-20 км, точки через 1 км) для кожної їхньої висоти перешкоди  $H_1$  і  $H_2$ . Для порівняння навести графік втрат у вільному просторі (формула (6.3)) для тих самих відстаней  $d$ . Графіки будувати на одному рисунку.

4. За результатами розрахунків зробити висновки про те, яка зі складових – втрати у вільному просторі або втрати на дифракцію – є переважаючою.

### Контрольні питання

1. Оцінювання дифракційних втрат на трасі між передавачем або приймачем.
2. Що таке дифракція?
3. Дифракція на клині.
4. Розрахунок втрат на дифракцію на клині при одній перешкоді.
5. Модель траси з однією перешкодою при  $H > h_T$  і  $H > h_R$ .
6. Модель траси з однією перешкодою при  $H < h_T$  і  $H < h_R$ .
7. Поясніть графік залежності величини втрат на дифракцію на клині від відстані при різних висотах перешкоди.
8. Яка зі складових – втрати у вільному просторі або втрати на дифракцію – є переважаючою?
9. Що може виступати перешкодою?
10. Як зменшити величини втрат на дифракцію на клині?

### Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 7

Результати проведених розрахунків втрат на трасі радіоканалу у випадку дифракції на клині при одній перешкоді наведено в табл. 7.2, 7.3 і на рис. 7.3.

Таблиця 7.2

Результати проведених розрахунків для частоти  $f$  і відстані  $a$ 

$h_1, \text{ м}$	$\nu_1$	$L_{dif1}, \text{ дБ}$	$h_2, \text{ м}$	$\nu_2$	$L_{dif2}, \text{ дБ}$
12,5	8,748	31,688	-12,5	5,814	28,126
12,105	8,531	31,469	-12,895	5,772	28,062
11,75	8,33	31,26	-13,25	5,754	27,989
11,429	8,141	31,06	-13,571	5,672	27,909
11,136	7,964	30,869	-13,864	5,616	27,824
10,87	7,798	30,685	-14,13	5,56	27,736
10,625	7,641	30,507	-14,375	5,502	27,644
$r(x) = 28,988$					

Таблиця 7.3

Результати проведених розрахунків для частоти  $f$  і відстані  $b$ 

$h_1, \text{ м}$	$\nu_1$	$L_{dif1}, \text{ дБ}$	$h_2, \text{ м}$	$\nu_2$	$L_{dif2}, \text{ дБ}$
5,938	6,139	28,599	-19,063	7,536	30,386
6,765	6,494	29,089	-18,325	7,191	29,978
7,5	6,776	29,46	-17,5	6,88	29,592
8,158	7,004	29,747	-16,842	6,597	29,226
8,75	7,188	29,974	-16,25	6,339	28,878
9,286	7,338	30,154	-15,714	6,103	28,548
9,773	7,461	30,299	-15,227	5,886	28,233
10,217	7,56	30,415	-14,783	5,686	27,932
10,625	7,641	30,507	-14,375	5,502	27,644
$r(x) = 35,502$					

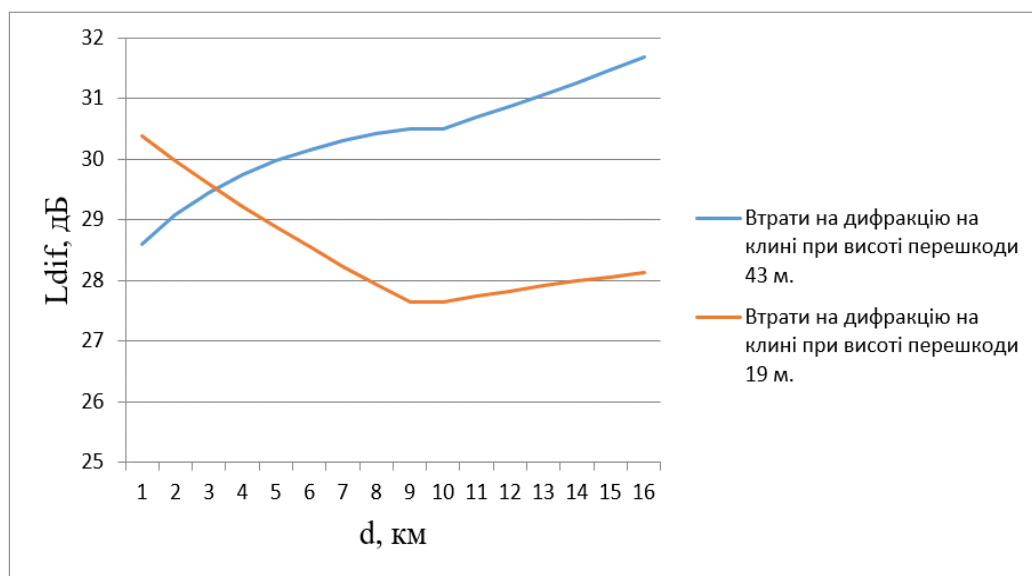


Рис. 7.3. Графік залежності величини втрат на дифракцію на клині від відстані при різних висотах перешкоди

## 8. ОЦІНЮВАННЯ ВТРАТ НА ТРАСІ РАДІОКАНАЛУ У ВИПАДКУ ДИФРАКЦІЇ НА ЦИЛІНДРІ

### 8.1. Теоретичні відомості

У більшості ситуацій перешкоди, що зустрічаються на місцевості, не схожі на простий клин, і апроксимація їх клином недооцінює втрати на дифракцію. Існують різні способи вирішення цього завдання [3, 28]. Один з них полягає в тому, що вершину перешкоди моделюють циліндром радіуса  $r$ , як показано на рис. 8.1.

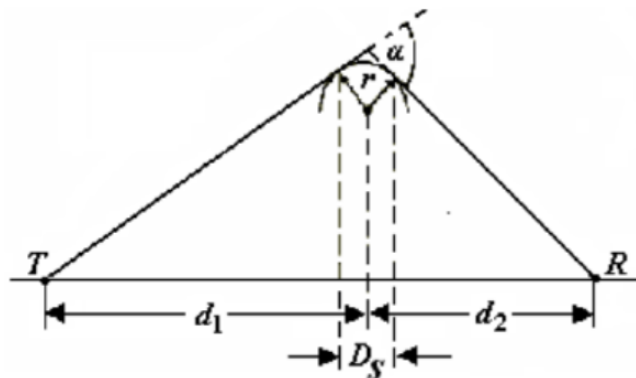


Рис. 8.1. Модель перешкоди з закругленою вершиною

#### 8.1.1. Перший варіант оцінювання втрат на перешкоді зі закругленою вершиною

Щоб розрахувати втрати, необхідно накреслити профіль об'єкта і провести прямі лінії з кінцевих точок лінії зв'язку так, щоб вони торкалися найвищих частин об'єкта, які видно з індивідуальних ракурсів [5, 17]. Необхідно оцінити параметри  $D_s$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  і обчислити радіус  $r$  за формулою

$$r = \frac{2 \cdot D_s \cdot d_1 \cdot d_2}{\alpha \cdot (d_1^2 + d_2^2)}, \quad (8.1)$$

де  $d_1$  – відстань між передавачем і перешкодою, км;

$d_2$  – відстань між перешкодою і приймачем, км;

$\alpha$  – кут падіння, рад;

$D_s$  – ширина циліндра, м.

Далі обчислюють втрати на дифракцію на клині  $L_{wdg}$  утвореними дотичними до перешкоди та додаткові витрати за формулою

$$L_r = 11,7 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot r}{\lambda}} . \quad (8.2)$$

При обчисленні додаткових втрат застосовується корекція цих втрат на нерівність. У загальному випадку більш гладкі об'єкти дають більш високі втрати на дифракцію.

Сумарні втрати на дифракцію на перешкоді з закругленою вершиною розраховують за формулою

$$L_{dif} = L_{wdg} + L_r . \quad (8.3)$$

### **8.1.2. Другий варіант оцінювання втрат на перешкоді з закругленою вершиною**

Додаткові втрати на дифракцію на перешкодах з фіксованим безрозмірним показником кривизни відносно втрат на клині пропорційні різниці втрат на дифракцію на гладкій сфері і клині.

Для кожного значення коефіцієнт пропорційності  $R$  є величиною постійною і не залежить від відношення  $F/F_1$ , де  $F_1$  – радіус першої зони Френеля в місці розташування перешкоди, м, а  $F$  – величина просвіту між лінією прямого променя в місці розташування перешкоди і висотою цієї перешкоди, тобто різниця між висотою лінії прямого променя над поверхнею землі і висотою перешкоди з урахуванням кривизни земної поверхні, що оцінюється за формулою (7.1). Коефіцієнт пропорційності  $R$  у деяких джерелах називають коефіцієнтом еквівалентної закругленості.

Дифракція на клині (wedge) відповідає  $R = 0$ , а на гладкій сфері  $R = 1$  (земля без перешкод). Для перешкод, що мають  $0 < R < 1$ , втрати на дифракцію  $L_{dif}$  розраховують за формулою

$$L_{dif} = L_{wdg} + R \cdot (L_{sph} - L_{wdg}) . \quad (8.4)$$

Нехай  $x = F/F_1$ . Тоді граничні криві, що визначають втрати на клині і гладкій сфері, можна визначити за формулами

$$L_{sph} = -38,68 \cdot x + 21,66, \quad (8.5)$$

$$L_{wdg} \begin{cases} 1,377 \cdot x^2 - 11,37 \cdot x + 6 & x \geq -0,5 \\ -50,4 / (1,6 - x) + 36 & x < -0,5 \end{cases} \quad (8.6)$$

де  $L_{sph}$  і  $L_{wdg}$  – відповідно втрати на дифракцію на гладкій сфері та клині відносно вільного простору, дБ, а  $x \leq 0.6$ .

## 8.2. Типове завдання 8

1. Вибрати з табл. 8.1 відповідно до свого варіанта вихідні дані для розрахунку.

Таблиця 8.1

Варіанти завдання (вказані за номером здобувача в журналі)

<i>Варіант</i>	<i>f, МГц</i>	<i>h<sub>T</sub>, м</i>	<i>h<sub>R</sub>, м</i>	<i>d<sub>1</sub>, км</i>	<i>d<sub>2</sub>, км</i>	<i>H</i>	<i>D<sub>s</sub></i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<b>1</b>	<b>800</b>	<b>45</b>	<b>30</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>50</b>	<b>25</b>
2	900	56	24	4	4	60	20
3	1000	5 s	35	5	5	62	21
4	1100	53	31	6	6	70	22
5	1200	44	29	3	4	72	23
6	1300	49	35	4	5	67	24
7	1400	47	34	5	6	58	25
8	1500	51	38	6	7	65	24
9	1600	50	41	3	6	63	23
10	1700	48	28	4	5	59	22
11	1800	46	37	5	4	57	21
12	1900	44	34	6	3	53	20
13	2000	48	30	2	7	67	21
14	2100	52	42	3	4	65	22
15	2200	48	31	4	5	61	23

Продовження табл.8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
16	2300	53	43	5	6	61	24
17	2400	51	30	6	3	60	25
18	2500	55	36	2	4	64	24
19	2600	49	32	3	5	64	23
20	2700	46	36	4	6	65	22
21	2800	54	39	5	7	63	21
22	2900	56	39	2	8	69	20
23	3000	52	41	3	3	71	21
24	700	47	32	4	4	59	22
25	600	45	36	5	7	58	23
26	950	49	37	6	3	67	24
27	1150	57	43	3	5	73	25
28	1350	48	41	2	3	65	24
29	1550	46	36	5	4	64	23
30	1650	45	32	4	2	69	22

2. Для заданих частоти  $f$  і відстані  $d_2$  розрахувати (двома способами, для кожного способу окремо вважати для гладкої поверхні з  $R = 1$  і окремо нерівної  $R = 0,65$ ) і побудувати графіки залежності величини втрат на дифракцію на циліндрі, дБ, від відстані  $d = d_1 + d_2$  при зміні відстані  $d_1$  (діапазон 1-10 км, точки через 1 км) для висоти перешкоди  $H$  (урахувати кривизну земної поверхні). Для порівняння навести графік втрат у вільному просторі (формула (6.3)) для тих самих відстаней  $d$ . Графіки будувати на одному рисунку (разом має бути п'ять кривих).

3. Для заданих частоти  $f$  і відстані  $d_1$  розрахувати (двома способами, для кожного способу окремо вважати для гладкої поверхні з  $R = 1$  і окремо нерівної  $R = 0,65$ ) і побудувати графіки залежності величини втрат на дифракцію на циліндрі, дБ, від відстані  $d = d_1 + d_2$  при зміні відстані  $d_2$  (діапазон 1-10 км, точки через 1 км) для висоти перешкоди  $H$  (урахувати кривизну земної поверхні). Для порівняння навести графік втрат у вільному просторі (формула (6.3)) для тих самих відстаней  $d$ . Графіки будувати на одному рисунку (разом має бути п'ять кривих).

4. За результатами розрахунків зробити висновки про те, яка зі складових – втрати у вільному просторі або втрати на дифракцію – є переважаючою.

## Контрольні питання

1. Оцінювання дифракційних втрат на трасі між передавачем або приймачем.
2. Дифракція на циліндрі.
3. Розрахунок втрат на дифракцію на циліндрі.
4. Модель перешкоди з закругленою вершиною.
5. Перший варіант оцінювання втрат на перешкоді з закругленою вершиною.
6. Другий варіант оцінювання втрат на перешкоді з закругленою вершиною.
7. Яка зі складових – втрати у вільному просторі або втрати на дифракцію – є переважаючою?
8. Як зменшити величини втрат на дифракцію на циліндрі?

### Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 8

Результати проведених розрахунків втрат на трасі радіоканалу у випадку дифракції на циліндрі наведені в табл. 8.2.

Таблиця 8.2

Результати проведених розрахунків у випадку дифракції  
на циліндрі

Спосіб 1	Спосіб 1
Для нерівної поверхні $R=0,65$	Для рівної поверхні $R=1$
$r = 11,525$	$r = 11,525$
$L_r = 117,381$	$L_r = 180,587$
$L_{wdg} = 3,368$	$L_{wdg} = 3,368$
$L_{dif} = 395,337$	$L_{dif} = 608,211$
$x = 0,24$	$x = 0,24$
Спосіб 2	Спосіб 2
$L_{sph} = 12,388$	$L_r = 12,388$
$L_{wdg} = 3,368$	$L_{wdg} = 3,368$
$L_{dif} = 9,231$	$L_{dif} = 12,388$

## 9. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ 802.11e (МОБІЛЬНИЙ WIMAX)

### 9.1. Теоретичні відомості

#### 9.1.1. Чутливість приймача

Під чутливістю приймача розуміється здатність радіоприймача приймати слабкі сигнали. На чутливість впливають потужність теплових шумів приймача, відношення сигнал/шум, коефіцієнт шуму, а також втрати реалізації, що враховують неідеальність приймача, помилки квантування, фазовий шум тощо [6, 29].

$$S_R = P_{h.n.} + K_{SNR} + K_n + L_I, \quad (9.1)$$

де  $P_{h.n.}$  – потужність теплових шумів приймача, Вт;

$K_{SNR}$  – відношення сигнал/шум, дБ;

$K_n$  – коефіцієнт шуму, дБ;

$L_I$  – втрати реалізації, дБ.

Потужність теплового шуму залежить від ширини смуги каналу  $B$  і розраховується за формулою

$$P_{h.n.} = -174 + 10 \cdot \lg(\Delta f), \quad (9.2)$$

де  $\Delta f$  – використовувана смуга частот.

Стандарт IEEE 802.16e орієнтований на використання смуг частот шириною 1,25; 5,0; 10,0; 20,0 МГц і заснований на технології OFDM. За рахунок наявності захисного інтервалу між піднесучими ефективною шириною спектра сигналу трохи більше ширини каналу  $B$ , тому  $\Delta f$  розраховується за формулою

$$\Delta f = B \cdot n \cdot \frac{N_{use}}{N_{all}}, \quad (9.3)$$

де  $N_{use}$  – кількість використовуваних піднесучих;

$N_{all}$  – кількість піднесучих OFDM сигналу;

$n$  – коефіцієнт дискретизації;

$B$  – ширина смуги, МГц.



Кількість використовуваних піднесучих  $N_{use}$  і повна кількість піднесучих OFDM сигналу  $N_{all}$  для кожної ширини каналу наведені в табл. 9.1. Кількість використовуваних піднесучих  $N_{use}$  складається з суми кількості піднесучих даних  $N_{data}$  і кількості пілотних піднесучих  $N_{pilot}$ . Кількість піднесучих даних визначається окремо для низхідного  $N_{DLdata}$  і висхідного напрямків  $N_{ULdata}$ .

Коефіцієнт дискретизації  $n$  визначає інтервал між піднесучими (разом з шириною смуги і кількістю піднесучих даних) і корисний час символу. Для каналу, ширина смуги якого кратна 1,25; 1,50; 2,00; 2,75 МГц, він дорівнює 28/25.

Таблиця 9.1

Кількість піднесучих для різних значень ширини каналу IEEE 802.16e

<b>Ширина смуги <math>B</math>, МГц</b>	$N_{all}$	$N_{use}$	$N_{DLdata}$	$N_{ULdata}$
1,25	128	85	72	56
5,00	512	421	360	280
10,00	1024	841	720	560
20,00	2048	1681	1440	1120

Відношення сигнал/шум приймача  $K_{SNR}$  залежить від схеми модуляції. Перелік схем модуляцій, затверджених стандартом WiMAX, і їхні вимоги до відношення сигнал/шум  $K_{SNR}$  для згорткового кодування (ЗК) і згорткового турбокодування (ЗТК) наведені в табл. 9.2. Ці дані справедливі для каналу з адитивним білим гаусівським шумом і коефіцієнтом помилок  $10^{-6}$ .

Таблиця 9.2

Параметри схем модуляції IEEE 802.16e

<b>Схема модуляції</b>	<b>Для ЗК, дБ</b>	<b><math>K_{SNR}</math> для ЗТК, дБ</b>	<b>Кількість біт на символ <math>R_{symb}</math></b>
QPSK 1/2	5,0	2,5	1,0
QPSK 3/4	8,0	6,3	1,5
QAM-16 1/2	10,5	8,6	2,0
QAM-16 3/4	14,0	12,7	3,0
QAM-64 1/2	16,0	13,8	3,0
QAM-64 2/3	18,0	16,9	4,0
QAM-64 3/4	20,0	18,0	4,5

У посібнику використовується для непарних варіантів згортове кодування (ЗК), а парних – згортове турбокодування (ЗТК).

Коефіцієнт шуму  $K_n$ , за рекомендаціями WiMAX Forum, приймається 7 дБ.

Втрати реалізації  $L_I$ , викликані, наприклад, підвищеним фазовим шумом приймача, знижують його чутливість, і для нормальної роботи такої системи потрібно більш потужний радіосигнал. Значення  $L_I$  прийнято 5 дБ.

### 9.1.2. Бюджет лінії

Для розрахунку дальності зв'язку використовується рівняння бюджету лінії, що зв'язує рівні потужності на вході приймача і вихідною потужністю передавача, які знаходяться один від одного на заданій відстані. При розрахунку дальності зв'язку вибирається найменше зі значень бюджету для низхідного (downlink, DL) і висхідного напрямків (uplink, UL). Бюджет лінії залежить від технічних характеристик базової (БС, bs) і абонентської мобільної (МС, ms) станцій. Завмирання сигналу не враховуються моделлю поширення радіохвиль, тому їх слід урахувати при розрахунку бюджету лінії (запас на завмирання  $F$  становить 10 дБ) [18].

На кордонах секторів у канал зв'язку вносить спотворення міжканальної інтерференції, рівень якої прийнято: для низхідного каналу  $I_{DL} = 2$  дБ, висхідного каналу  $I_{UL} = 3$  дБ.

Для врахування того факту, що будівлі перешкоджають поширенню електромагнітних хвиль, вводять додаткову поправку  $U_c$ , значення якої залежить від щільності забудови. Значення поправочного коефіцієнта  $U_c$  для різних типів забудови наведені в табл. 9.3.

Таблиця 9.3  
Значення поправочного коефіцієнта  $U_c$

<i>Тип забудови</i>	<i><math>U_c</math>, дБ</i>
Сільська місцевість	5
Передмістя	0
Міський район	-3
Щільна міська забудова	-4

Розрахунок бюджету лінії для низхідного напрямлення від базової станції до абонентської станції виконується за формулою

$$P_{DL} = P_{Txbs} - S_{Rms} + G_{Txbs} + G_{Rxms} - L_f - F - I_{DL} + U_c, \quad (9.4)$$

де  $P_{Txbs}$  – випромінювана потужність передавача БС, дБм;  
 $S_{Rms}$  – утливність приймача МС, дБм;  
 $G_{Txbs}$  – коефіцієнт посилення антени передавача БС, дБм;  
 $G_{Rxms}$  – коефіцієнт посилення антени приймача МС, дБм;  
 $L_f$  – втрати у фідері, дБ;  
 $F$  – завмирання сигналу, дБ;  
 $I_{DL}$  – рівень міжканальної інтерференції спадного каналу, дБ;  
 $U_c$  – поправочний коефіцієнт типу забудови, дБ.

Бюджет лінії для висхідного напрямку від абонентської станції до базової станції розраховується за формулою

$$P_{UL} = P_{Txms} - S_{Rbs} + G_{Txms} + G_{Rxbs} - F - I_{UL} + U_c, \quad (9.5)$$

де  $P_{Txms}$  – випромінювана потужність приймача МС, дБм;  
 $S_{Rbs}$  – чутливість приймача БС, дБм;  
 $G_{Txms}$  – коефіцієнт посилення антени приймача МС, дБм;  
 $G_{Rxbs}$  – коефіцієнт посилення антени передавача БС, дБм;  
 $I_{UL}$  – рівень міжканальної інтерференції висхідного каналу, дБ.

### 9.1.3. Розрахунок втрат на трасі радіосигналу

Для розрахунку оптимальної відстані від базової станції до абонента необхідно оцінити рівень втрат при розповсюдженні радіохвиль. Втрати на трасі при розповсюдженні електромагнітних хвиль у реальному середовищі визначають зменшення рівня потужності сигналу. Ці втрати не мають перевищувати енергетичний бюджет лінії. З урахуванням деякої мінімальної відстані  $d_0$  рівень втрат розраховується за формулою, дБ,

$$L = 10 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \lambda) + 10 \cdot \gamma \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + s + \Delta L_f + \Delta L_h, \quad (9.6)$$

де  $d_0$  – мінімальна відстань 100 м;  
 $s$  – рівень затінення сигналу, дБ;

$\Delta L_f$  – поправочний коефіцієнт для частоти;  
 $\Delta L_h$  – поправочний коефіцієнт для висоти антени МС,  
 залежний від типу місцевості;

$$\gamma = a - b \cdot h_{bs} + \frac{c}{h_{bs}} - a, b, c - \text{параметри типу місцевості.}$$

Постійні  $a, b, c$  залежать від ландшафту місцевості. Рівень затінення сигналу  $s$ , що змінюється за логнормальним законом розподілу з нульовим середнім, також залежить від типу ландшафту місцевості: А – горбиста місцевість, помірний ліс; В – рівнина з рідкісними горбами; С – рівнина, рідкісний ліс. Значення постійних  $a, b, c$  і рівня затінення сигналу  $s$  наведені в табл. 9.4.

Таблиця 9.4

Параметри, що залежать від ландшафту місцевості

<i>Параметр</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
a	4,6	4,0	3,6
b	0,0075	0,0065	0,0050
c	12,6	17,1	20,0
s, дБ	10,6	9,6	8,2

Без використання поправочних коефіцієнтів  $\Delta L_f$  і  $\Delta L_h$  формула (9.6) дійсна тільки для частот менше 2 ГГц і висоти антени приймача до 2 м.

Поправочний коефіцієнт  $\Delta L_f$  розраховується за формулою

$$\Delta L_f = 6 \cdot \lg\left(\frac{f}{2000}\right). \quad (9.7)$$

Формула розрахування поправочного коефіцієнта для висоти антени  $\Delta L_h$  залежно від ландшафту місцевості

$$\Delta L_h = \begin{cases} 10,8 \cdot \lg\left(\frac{h_{ms}}{2}\right) & \text{для A і B типу ландшафту} \\ -20 \cdot \lg\left(\frac{h_{ms}}{2}\right) & \text{для C типу ландшафту} \end{cases} \cdot \quad (9.8)$$

Значення висоти антени БС лежить у межах від 10 до 80 м, а висоти антени МС – від 2 до 10 м.

#### 9.1.4. Розрахунок швидкості передачі даних

Швидкість передачі даних залежить від ширини полоси каналу та використовуваної схеми модуляції. На швидкість передачі даних впливають захисний інтервал символу, відношення розподілу ресурсів вниз/вгору (DL/UL) і час передачі протокольної інформації. Тож швидкість передачі даних у напрямку вниз виконується за формулою

$$R_{DL} = B \cdot n \cdot \frac{N_{DLdata}}{N_{all}} \cdot R_{symb} \cdot \left(1 - \frac{T_h}{1 + T_g}\right) \cdot K_{DLtdd}, \quad (9.9)$$

де  $N_{DLdata}$  – кількість піднесучих для передачі даних у напрямку вниз;

$R_{symb}$  – кількість бітів на символ у використовуваній схемі модуляції;

$T_g$  – захисний інтервал символу;

$T_h$  – час передачі протокольної інформації;

$K_{DLtdd}$  – коефіцієнт розподілу ресурсів у напрямку вниз, а в напрямку вгору за формулою

$$R_{UL} = B \cdot n \cdot \frac{N_{ULdata}}{N_{all}} \cdot R_{symb} \cdot \left(1 - \frac{T_h}{1 + T_g}\right) \cdot K_{ULtdd} \quad (9.10)$$

де  $N_{ULdata}$  – кількість піднесучих для передачі даних у напрямку вгору;

$K_{ULtdd}$  – коефіцієнт розподілу ресурсів у напрямку вгору.

При розрахунках  $T_h$  зазвичай приймається рівним 20 % (1/5) основного часу передачі, а значення захисного інтервалу  $T_g$  - 1/8 тривалості корисного символу. Стандартом IEEE 802.16e передбачаються значення захисного інтервалу 1/4, 1/8, 1/16, 1/32.

Співвідношення між напрямками вниз/вгору дозволяє регулювати відношення швидкостей. WiMAX визначає відношення DL/UL (тобто  $K_{DLtdd}$ ) у межах від 3:1 до 1:1 для

різних типів трафіку. При виконанні цього завдання рекомендується використовувати значення 3:1.  $K_{ULtd}$  розраховується як зворотне значення від  $K_{DLtd}$ .

## 9.2. Типове завдання 9

1. Вибрати з табл. 9.5 за своїм варіантом вихідні дані для розрахунку.

2. Для заданих параметрів розрахувати чутливість приймачів БС і МС.

3. Розрахувати бюджет лінії для низхідного і висхідного напрямків для кожного з чотирьох типів забудови (табл. 9.3) і вибрати значення для розрахунку дальності зв'язку.

4. Розрахувати і побудувати графіки залежності величини втрат на трасі радіосигналу від відстані  $d$  між БС і МС (діапазон 100-2000 м, точки через 100 м) для трьох типів ландшафту (табл. 9.4). Графіки будувати на одному рисунку. На цій же координатній площині побудувати прямі, відповідні розрахованому в попередньому пункті бюджету лінії для кожного з типів забудови. Зробити висновки про дальність передачі для кожного поєднання типу забудови і типу ландшафту.

5. Розрахувати швидкість передачі даних для кожного з напрямків.

6. Зробити висновки за результатами розрахунків.

## Контрольні питання

1. Стандарт бездротового зв'язку 802.16.
2. Порівняння WiMAX та Wi-Fi.
3. WiMAX-2.
4. WiMAX-3.
5. Порівняльна таблиця стандартів WiMAX.
6. Недоліки технології.
7. Розрахунок чутливості приймача.
8. Розрахунок бюджету лінії.
9. Розрахунок втрат у радіоканалі.
10. Розрахунок швидкості передачі даних.

Таблиця 9.5

Варіанти завдання (вказані згідно з номером здобувача в журналі)

Варіант	$f, \text{ГГц}$	$B, \text{МГц}$	Схема модуляції	$h_{bss}, \text{м}$	$P_{Tx_{bss}}, \text{дБм}$	$G_{Tx_{bss}}, \text{дБм}$	$G_{Rcbss}, \text{дБм}$	$h_{mss}, \text{м}$	$P_{Tx_{mss}}, \text{дБм}$	$G_{Tx_{mss}}, \text{дБм}$	$G_{Rcmss}, \text{дБм}$
1	2,3	1,25	QPSK 1/2	10	30	15	15	2	25	2	2
2	2,4	5,00	QPSK 3/4	20	31	15,5	15,5	3	26	3	3
3	2,5	10,0	QAM -16 1/2	30	32	16	16	4	27	1	1
4	2,6	20,0	QAM -16 3/4	40	33	16,5	16,5	5	28	2	2
5	2,7	1,25	QAM -64 1/2	50	34	17	17	6	27	3	3
6	3,4	5,00	QAM -64 2/3	60	35	15	15	7	26	1	1
7	3,5	10,0	QAM -64 3/4	10	30	15,5	15,5	8	25	2	2
8	3,6	20,0	QPSK 1/2	20	31	16	16	9	26	3	3
9	3,7	1,25	QPSK 3/4	30	32	16,5	16,5	2	27	1	1
10	3,8	5,00	QAM -16 1/2	40	33	17	17	3	28	2	2
11	2,3	10,0	QAM -16 3/4	50	34	15	15	4	27	3	3
12	2,4	20,0	QAM -64 1/2	60	35	15,5	15,5	5	26	1	1
13	2,5	1,25	QAM -64 2/3	10	30	16	16	6	25	2	2
14	2,6	5,00	QAM -64 3/4	20	31	16,5	16,5	7	26	3	3
15	2,7	10,0	QPSK 1/2	30	32	17	17	8	27	1	1
16	3,4	20,0	QPSK 3/4	40	33	15	15	9	28	2	2
17	3,5	1,25	QAM -16 1/2	50	34	15,5	15,5	2	27	3	3
18	3,6	5,00	QAM -16 3/4	60	35	16	16	3	26	1	1
19	3,7	10,0	QAM -64 1/2	10	30	16,5	16,5	4	25	2	2

Продовження табл. 9.5

<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	3,8	20,0	QAM -64 2/3	20	31	17	17	5	26	3	3
21	2,3	1,25	QAM -64 3/4	30	32	15	15	6	27	1	1
22	2,4	5,00	QPSK 1/2	40	33	15,5	15,5	7	28	2	2
23	2,5	10,0	QPSK 3/4	50	34	16	16	8	27	3	3
24	2,6	20,0	QAM -16 1/2	60	35	16,5	16,5	9	26	1	1
25	2,7	1,25	QAM -16 3/4	10	30	17	17	2	25	2	2
26	3,4	5,00	QAM -64 1/2	20	31	15	15	3	26	3	3
27	3,5	10,0	QAM -64 2/3	30	32	15,5	15,5	4	27	1	1
28	3,6	20,0	QAM -64 3/4	40	33	16	16	5	28	2	2
29	3,7	1,25	QPSK 1/2	50	34	16,5	16,5	6	27	3	3
30	3,8	5,00	QPSK 3/4	60	35	17	17	7	26	1	1



## Приклад розв'язання варіанта 1 типового завдання 9

Результати проведених розрахунків параметрів мережі 802.16e наведені в табл. 9.6–9.9 і на рис. 9.1, 9.2.

Таблиця 9.6

Результати розрахунків втрат на трасі радіосигналу з різними ландшафтами місцевості

Ландшафт типу А	Ландшафт типу В	Ландшафт типу С	Відстань між БС і МС
$\gamma = 5,785$	$\gamma = 4,645$	$\gamma = 5,55$	
$\Delta L_f = 36,364$	$\Delta L_f = 36,364$	$\Delta L_f = 36,364$	
$\Delta L_h = 0$	$\Delta L_h = 0$	$\Delta L_h = 0$	
$L$ , дБ	$L$ , дБ	$L$ , дБ	$d$ , м
69,096	68,096	66,096	100
86,51	85,089	83,403	200
96,697	95,029	93,173	300
103,925	102,082	100,11	400
109,531	107,553	105,489	500
114,112	112,022	109,883	600
117,985	115,802	113,599	700
121,339	119,075	116,817	800
124,299	121,963	119,656	900
126,946	124,546	122,196	1000
129,34	126,882	124,493	1100
131,526	129,016	126,59	1200
133,537	130,978	128,52	1300
135,399	132,795	130,306	1400
137,133	134,486	131,969	1500
138,754	136,068	133,524	1600
140,277	137,555	134,986	1700
141,713	138,956	136,363	1800
143,072	140,281	137,667	1900
144,36	141,539	138,903	2000

Таблиця 9.7

Результати розрахунків бюджету лінії з різними типами забудови

<i>Тип забудови</i>	<i>Бюджет лінії для низхідного напрямку <math>R_{DL}</math></i>	<i>Бюджет лінії для висхідного напрямку <math>R_{UL}</math></i>
Сільська місцевість	135,317	131,317
Передмістя	130,317	126,317
Міський район	127,317	123,317
Щільна міська збудова	126,317	122,317

Таблиця 9.8

Результати розрахунків чутливості приймача

<i>Чутливість <math>S_R</math>, дБ</i>	<i>Потужність теплових шумів приймача <math>P_{h,n}</math>, Вт</i>	<i>Використовувана смуга частот <math>\Delta f</math></i>
-97,317	-114,317	$9,297 \cdot 10^5$

Таблиця 9.9

Результати розрахунків швидкості передачі даних

<i>Швидкість передачі даних по напрямку вниз <math>R_{DL}</math></i>	<i>Швидкість передачі даних по напрямку вгору <math>R_{UL}</math></i>
$2,362 \cdot 10^6$	$2,042 \cdot 10^5$

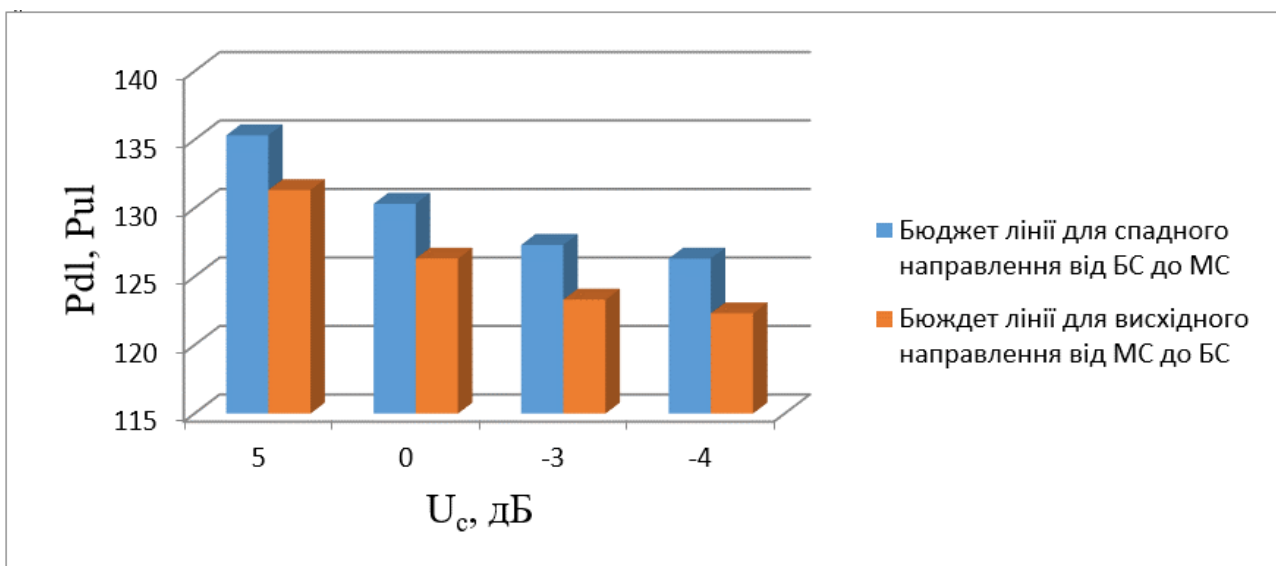


Рис. 9.1. Графік бюджету лінії з різними типами забудови

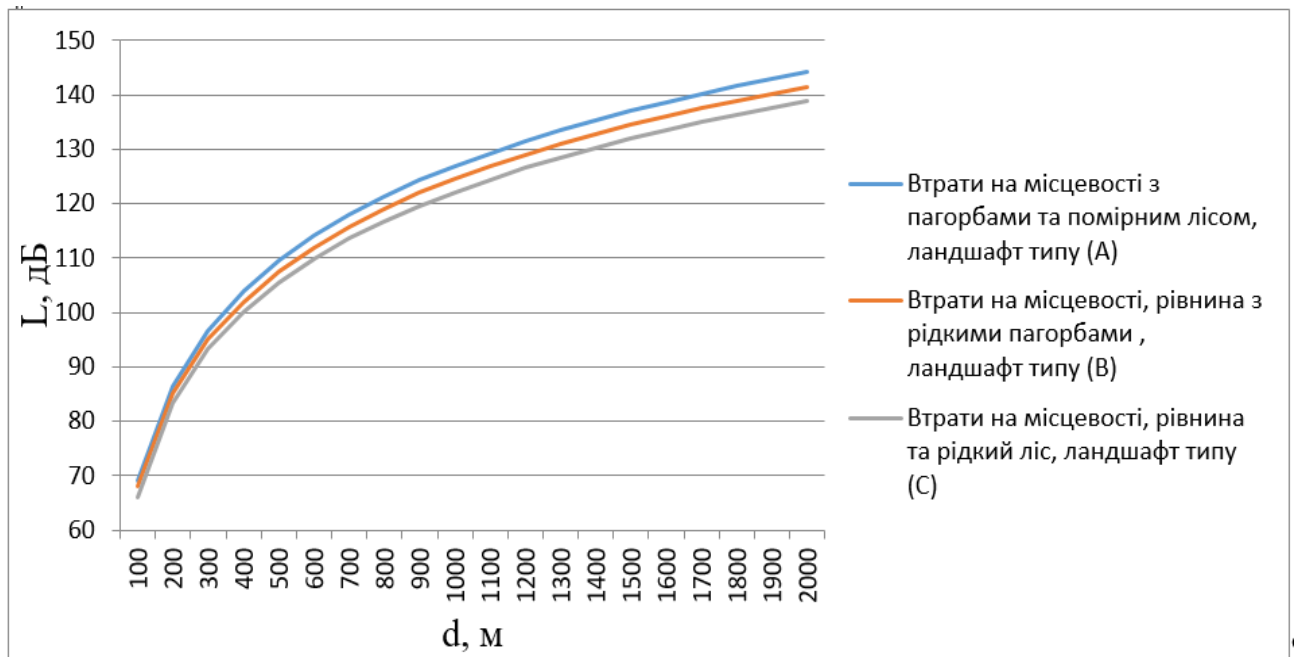


Рис. 9.2. Графік залежності величини втрат на трасі радіосигналу з різними ландшафтами місцевості

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Сайко В. Г., Казіміренко В. Я., Літвінов Ю. М. Мережі бездротового широкосмугового доступу: навч. посіб. Київ: ДУТ, 2015. 196 с.
2. Wi-Fi Planner PRO. URL: <https://tools.dlink.com/intro/wfp/> (дата звернення: 08.06.2022).
3. IEEE 802 wireless standards. URL: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/reference/IEEE-802-Wireless-Standards-Fast-Reference> (дата звернення: 09.06.2022).
4. Інформаційні матеріали сайту Wi-Fi Alliance. URL: <https://www.wi-fi.org> (дата звернення: 09.06.2022).
5. Інформаційні матеріали сайту Cisco. URL: <https://www.cisco.com> (дата звернення: 19.06.2022).
6. Інформаційні матеріали сайту WIMAX FORUM. URL: <https://wimaxforum.org> (дата звернення: 29.06.2022).
7. Соколов В. Ю., Бурячок В. Л., Тадждіні М. М. Безпека безпроводових і мобільних мереж: навч. посіб. Київ: КУБГ, 2019. 130 с.
8. Габовда О. В., Садовнікова Т. М. Аналіз стану мобільних мереж 4-го покоління та перспективи їх впровадження в Україні. *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. № 2 (2). С. 4–9.
9. Bogachuk I., Sokolov V. Yu., Buriachok V. Monitoring Subsystem for Wireless Systems based on Miniature Spectrum Analyzers. *Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T'2018)*: in V Int. Sc. and Pract. Conf., 9–12 Oct. 2018. Kharkiv: IEEE, 2018. P. 581–585.
10. Михалевський Д. В., Гузь М. Д. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. № 1. С. 195–199.
11. Трубочанінова К. А., Крощенко Д. О. Метод попереднього планування безпроводової локальної мережі стандарту IEEE 802.11. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. № 2. С. 27–32.
12. Чернега В., Платтнер Б. Безпроводні локальні комп'ютерні мережі: навч. посіб. Київ: Кондор, 2018. 238 с.

13. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі: навч. посіб. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
14. David D. Coleman, David A. Westcott. CWNA Certified Wireless Network Administrator Study Guide: Exam CWNA-107, 5th Edition. Wilay, 2018. 1024 p.
15. Matthew S. Gast. 802.11ac: A Survival Guide. O'Reilly Media, 2013. 154 p.
16. Ajay R. Mishra. Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G: Evolution to 5G, 2nd Edition. Wilay, 2018. 440 p.
17. Alejandro Aragón-Zavala. Indoor Wireless Communications: From Theory to Implementation. Wilay, 2017. 440 p.
18. Serkov A., Tkachenko V., Kharchenko V., Pevnev V., Trubchaninova K. A Method to Enhance the Bandwidth and Noise Immunity of IoT When Exposed to Natural and Intentional Electromagnetic Interference. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2020: Proceedings*, 2021. P. 527–532.
19. Горбатий І. В., Бондарєв А. П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. 336 с.
20. Gordon Colbach. Wireless Networking: Introduction to Bluetooth and WiFi. 2017. 185 p.
21. David A. Westcott, David D. Coleman. CWNA Certified Wireless Network Administrator Study Guide. Sybex, 2021. 1088 p.
22. Marlon Buchanan. The Home Network Manual: The Complete Guide to Setting Up, Upgrading, and Securing Your Home Network (Home Technology Manuals). Buchanan Holdings, 2022. 183 p.
23. Wolfgang Osterhage. Wireless Network Security: Second Edition. CRC Press, 2018. 186 p.
24. Ramon Fontes, Christian Rothenberg. Wireless Network Emulation with Mininet-WiFi. Christian Esteve Rothenberg, 2019. 234 p.

25. Ільченко М. Ю., Кравчук С. О. Телекомунікаційні системи: монографія. Київ: НВП «Наукова думка» НАН України, 2017. 734 с.

26. Gordon Colbach. The WiFi Networking Book: WLAN Standards: IEEE 802.11 bgn, 802.11n , 802.11ac and 802.11ax. 2019. 107 p.

27. Порівняльна характеристика безпроводових систем стандартів 802.11 за пропускнуою здатністю та продуктивністю / Т. М. Наритник, П. Г. Акопян, В. Г. Сайко та ін. *Вісник Університету «Україна»*. 2019. № 2 (23). С. 75–87.

28. Мерлак В. Ю., Узун Д. Д. Експериментальні дослідження функціонування Wi-Fi маршрутизаторів в умовах перешкод. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2017. № 1. С. 84–89.

29. Brett Rice. Wimax Systems: Current Technologies. Willford Press. 2022. 239 p.

## Навчальний посібник

**Трубчанінова** Карина Артурівна,  
**Жученко** Олександр Сергійович,  
**Лисечко** Володимир Петрович

### БЕЗДРОТОВІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ

Відповідальний за випуск Трубчанінова К. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

---

Підписано до друку 13.07.2022 р.

Умовн. друк. арк. 5,0. Тираж . Замовлення № .

Видавець та виготовлювач Український державний університет  
залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.