

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Оптимізація мереж WiMAX для забезпечення безпроводного доступу  
в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку»

Виконав: студент 2-го курсу,  
групи ТКС-22м  
спеціальності 172 – Телекомунікації та  
радіотехніка

Грицаюк Д.Ю.

Керівник: к.т.н., професор каф. ІКСТ  
Барась С.Т.

« 7 » грудня 2023 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ІРТС  
Осадчук Я.О.

« 7 » грудня 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

Кичак В.М.  
д.т.н., проф.

« 11 » 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації

(шифр і назва)

Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІКСТ**

**д.т.н., професор В.М. Кичак**

**“ 19 ” 09 2023 року**

## **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Грицаюку Дмитру Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація мереж WiMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку

керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 18. 09. 2023 року № 247

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

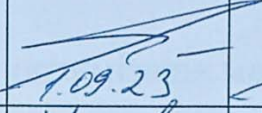
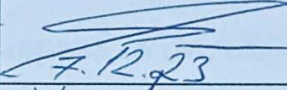
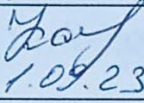
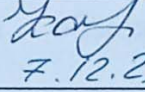

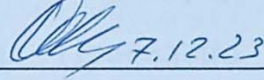
3. Вихідні дані до роботи Дальність дії - до 60 км; максимальна швидкість передачі даних до 70 Мбіт/с на сектор однієї базової станції; робоча частота 2-11 ГГц; спектральна ефективність до 5 біт/сек/Гц; розширені можливості роботи поза прямою видимістю; швидкість доступу в інтернет в межах сектора базової станції на клієнтських пристроях - до 10 Мбіт/с; зона дії одного сектора базової станції в умовах щільної забудови – від 800 до 1500 метрів;

4. Зміст текстової частини: Основні характеристики стандарту WiMAX (фізичний рівень, MAC-рівень, базова модель мережі); планування мережі WiMAX; оптимізація мережі WiMAX для реалізації послуг інтернет-доступу (розрахунок частотних каналів, допустимого навантаження БС, кількості БС, пропускної здатності); аналіз ефективності мережі WiMAX; моделювання системи; економічна частина, охорона праці та безпека життєдіяльності.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) структура базової моделі мережі WiMAX; схема поділу зони радіо покриття на стільники; залежність часу затримки пакетів від інтенсивності вхідного навантаження при зміні кількості пакетів даних та при зміні розміру

запиту смуги пропускання; залежності BER від  $E_b/N_0$ , при передачі кодованого та некодованого сигналу; залежності завадостійкості схем.

#### 6. Консультанти розділів роботи

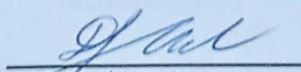
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С.Т., професор кафедри ІКСТ	 1.09.23	 7.12.23
Аналіз економічної ефективності розробки	Кавецький В.В. к.е.н., доцент	 1.09.23	 7.12.23
Охорона праці та безпека життєдіяльності	Федебієва С.В. д.т.н., професор	 1.09.23	 7.12.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Огляд основних характеристик стандарту	17.09.2023р.	
3.	Планування мережі. Аналіз методів ослаблення співканальних завад	06.10.2023р.	
4.	Оптимізація мережі WiMAX для реалізації послуг інтернет-доступу	27.10.2023р.	
5.	Аналіз ефективності мережі. Комп'ютерне моделювання	10.11.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	17.11.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	24.11.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	01.12.2023р.	
9.	Нормоконтроль МКР	04.12.2023р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	11.12.2023р.	

Студент

  
(підпис)

Грицаюк Д.Ю.

Керівник роботи

  
(підпис)

Барась С.Т.

## АНОТАЦІЯ

Оптимізація мереж WiMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку. Магістерська кваліфікаційна робота / Д. Ю. Грицаюк – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 118 с., 35 рис., 31 табл., 30 бібл. – українською мовою.

Метою роботи є підвищення ефективності та оптимізація мережі WiMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку. Виконано аналіз основних характеристик стандарту та планування мережі з ослабленим рівнем співканальних завад. Проведено оптимізацію мережі для реалізації послуг інтернет-доступу з розрахунками основних характеристик та пропускної здатності. Виконано аналіз ефективності мережі та моделювання системи широкосмугового доступу WiMAX.

Проведені економічні розрахунки та виконано розділ з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

## ABSTRACT

Optimization of WiMAX networks to provide wireless access in regions with limited communication infrastructure. Master's qualification thesis / D. Yu. Hrytsauk – Vinnytsia: VNTU, 2023. – 118 p., 35 fig., 31 tables, 30 the bible - In ukrainian.

The goal of the work is to improve the efficiency and optimization of the WiMAX network to provide wireless access in regions with limited communication infrastructure. The analysis of the main characteristics of the standard and network planning with a weakened level of co-channel interference was performed. The network was optimized for the implementation of Internet access services with calculations of the main characteristics and bandwidth. Analysis of network efficiency and modeling of the WiMAX broadband access system was performed.

Economic calculations were carried out and the section on labor protection and life safety was completed.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНДАРТУ WiMAX .....	8
1.1 Особливості стандарту IEEE 802.16e .....	8
1.2 Частотні діапазони стандарту IEEE 802.16.....	9
1.3 Фізичний рівень .....	10
1.4 MAC-рівень .....	14
1.5 Архітектура побудови мережі WiMAX .....	17
1.5.1 Базова модель мережі.....	17
1.5.2 Стики та інтерфейси .....	20
1.6 Висновки до розділу.....	23
2 ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ WiMAX.....	24
2.1 Принципи побудови мережі для населеного пункту .....	24
2.2 Методи ослаблення співканальних завад .....	33
2.3 Характеристика каналу зв'язку .....	38
2.4 Висновки до розділу.....	41
3 ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ WiMAX ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПОСЛУГ ІНТЕРНЕТ-ДОСТУПУ .....	42
3.1 Вибір характеристик радіоінтерфейсу.....	42
3.2 Розрахунок частотних каналів .....	43
3.3 Визначення розмірності кластера .....	44
3.4 Розрахунок частотних каналів для обслуговування абонентів БС .....	47
3.5 Розрахунок допустимого навантаження БС.....	48
3.6 Розрахунок числа абонентів, які обслуговуються однією БС .....	48
3.7 Розрахунок кількості БС .....	49
3.8 Розрахунок радіуса зони обслуговування БС .....	49
3.9 Розрахунок пропускної здатності.....	49
3.10 Висновки до розділу.....	53
4 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ WiMAX .....	54
4.1 Принципи надання послуг .....	55

4.2	Розрахункова модель протоколу WiMAX .....	57
4.3	Чисельний аналіз ефективності .....	59
4.4	Висновки до розділу.....	61
5	МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ WiMAX.....	62
5.1	Оцінка впливу модуляційної схеми.....	64
5.2	Вплив багатопроменевого поширення сигналу.....	66
5.3	Вплив допоміжних технологій АМС .....	70
5.4	Висновки до розділу.....	73
6	АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ.....	75
6.1	Оцінювання наукового ефекту .....	75
6.2	Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи .....	78
6.2.1	Витрати на оплату праці .....	78
6.2.2	Відрахування на соціальні заходи .....	81
6.2.3	Сировина та матеріали .....	81
6.2.4	Розрахунок витрат на комплектуючі.....	83
6.2.5	Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт .....	84
6.2.6	Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт.....	84
6.2.7	Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.....	85
6.2.8	Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	86
6.2.9	Службові відрядження.....	87
6.2.10	Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	88
6.2.11	Інші витрати.....	88
6.2.12	Накладні (загальновиробничі) витрати.....	88
6.3	Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	90
6.4	Висновки до розділу .....	91
7	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....	92
7.1	Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	92

7.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	95
7.2.1	Мікроклімат.....	95
7.2.2	Склад повітря робочої зони.....	96
7.2.3	Виробниче освітлення .....	97
7.2.4	Виробничий шум.....	98
7.2.5	Виробничі випромінювання.....	99
7.3	Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження області працездатності РЕС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій .....	100
7.3.1	Дія іонізуючих випромінювань на радіоелектронні системи.....	100
7.3.2	Оцінка стійкості роботи РЕС в умовах дії іонізуючих випромінювань..	100
7.4	Висновки до розділу.....	102
	ВИСНОВКИ.....	103
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	105
	Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал .....	108
	Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	117

## ВСТУП

*Актуальність теми.* В даний час до систем широкосмугового доступу прикута особлива увага операторів зв'язку та розробників нового обладнання. Бездротові мережі на базі технології WiMAX мають виняткові переваги по оперативності розгортання, охопленню території, надійності роботи в регіонах з малорозвиненою інфраструктурою, якості надання Інтернет-послуг у тому числі і мобільним абонентам [1, 2].

На сьогоднішній день стандарт IEEE 802.16, що лежить у основі WiMAX, продовжує розвиватися і удосконалюватися, через що особливої актуальності набуває вирішення завдань підвищення ефективності його функціонування. У самому стандарті вже закладено деякі можливості при його застосуванні. Зокрема, стандартом передбачено 256 типів керуючих повідомлень, з них використовується лише 48. Однак для суттєвого підвищення ефективності застосування нових керуючих команд буде недостатньо. Необхідні принципові зміни на самому MAC-рівні стандарту.

В наш час неможливо уявити щоденну діяльність без засобів зв'язку, що передбачає, очевидно, і доступ в Інтернет за допомогою смартфона, планшета, ноутбука та інших пристроїв. Популярною послугою є мобільний доступ в Інтернет. Потреба людей в даній послугі зростає з кожним роком, тому безпроводні мережі широко розвинені і представлені такими технологіями як Wi-Fi, комплексом рішень 3g, 4g, LTE, 5g. До цих технологій слід віднести і технологію WiMAX. Вони здатні забезпечити мобільний зв'язок у будь-який час, в будь-якому місці і з будь-якого пристрою [3].

*Аналіз останніх досліджень.* WiMAX – це представник безпроводної мережі рівня населеного пункту (WMAN). Ця технологія може бути чудовою альтернативою забезпечення інтернет-послуг у тих випадках, коли має місце обмежена інфраструктура зв'язку. Вона вважається однією з найбільш передових і перспективних технологій бездротової передачі даних [3].



Технологія WiMAX будується на досягненнях технологій бездротового доступу (Wi-Fi) та стільникових мереж. Від Wi-Fi у WiMAX перейшла, зокрема, технологія ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (OFDM). Вона забезпечує високі швидкості передачі інформації в умовах багатопробеневого поширення хвиль. Як і в стандартах стільникового зв'язку, у WiMAX використовують найсучасніші методи надлишкового кодування та повторну передачу неприйнятих пакетів [2, 4].

Стандарт 802.16d забезпечує функціонування як у зоні прямої видимості між антенами БС та АС, так і поза нею. У цій версії використовується модуляційна схема OFDM. Діапазон частот 10-66 ГГц - у межах прямої видимості та нижче 11 ГГц - поза прямою видимістю.

Стандарт 802.16e орієнтований на рухомих користувачів. Розрахований на застосування в діапазонах частот нижче 6 ГГц, Він підтримує функції роумінгу та хендовера, а ще важлива його перевага – відсутність для зв'язку вимоги прямої видимості.

*Мета та постановка задачі.* Метою даної роботи є підвищення ефективності та оптимізація мережі WiMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз основних характеристик стандарту;
- планування мережі з ослабленим рівнем співканальних завад;
- оптимізація мережі для реалізації послуг інтернет-доступу;
- аналіз ефективності мережі на основі протоколу WiMAX;
- моделювання системи широкосмугового доступу WiMAX;
- економічні розрахунки;
- охорона праці та безпека життєдіяльності.

*Об'єкт дослідження* є процеси передачі та прийому цифрових сигналів.

*Предмет дослідження* є методи та засоби, які забезпечують підвищення ефективності та оптимізацію мережі WiMAX для безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку.

*Методи досліджень* базуються на використанні: теорії передачі інформації, теорії ортогональних сигналів та аналізу імовірно-часових характеристик протоколів з фіксованими форматами кадрів.

*Новизна одержаних результатів:*

а) запропоновано оптимізацію параметрів мережі для реалізації послуг інтернет-доступу з урахуванням принципу комбінованого планування мережі (FFR);

б) на основі аналізу імовірно-часових характеристик протоколу WiMAX показано необхідність динамічної адаптації формату кадру в процесі зміни навантаження.

*Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи.* Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на ЛІІ науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2023 році.

*Практичне значення.* Практичне значення роботи полягає в можливості використання її результатів при плануванні та експлуатації мережі безпроводного доступу, а також у навчальному процесі.

## 1 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНДАРТУ WiMAX

### 1.1 Особливості стандарту IEEE 802.16e

Стандарт широкопasmового бездротового доступу IEEE 802.16-2004 з'явився у 2004 році [1]. Потенційно вважалося, що при цьому стануть доступними засоби високошвидкісного обміну даними телефонний зв'язок і телебачення. Але для цього необхідно виділення частотного ресурсу, побудова інфраструктури мереж тощо. Крім цього стандарт IEEE 802.16-2004 був орієнтований на фіксований доступ. Наприкінці 2005 року був затверджений стандарт IEEE 802.16e. IEEE 802.16e – це набір виправлень існуючого стандарту 802.16-2004 та доповнення «Фізичний та MAC-рівні для спільної мобільної та фіксованої роботи в діапазонах, що ліцензуються» [2]. Саме ці "доповнення" зробили стандарт IEEE 802.16e "мобільним WiMAX". В результаті він став в один ряд з технологіями стільникового зв'язку та інших перспективних технологій бездротового доступу.

Стандарт IEEE 802.16e з введеними доповненнями давав можливість обслуговувати не тільки так званих номадичних ("кочівних"), але і власне рухомих абонентів. Номадичні абоненти в момент сеансів зв'язку перебувають у зоні одного і того ж сегменту базової станції, але в інший час переміщуються в межах дії мережі. Рухомі абоненти мають доступ до мережі в процесі руху. При цьому необхідні процедури передачі абонента між різними сегментами однієї БС, а також від однієї базової станції до іншої. Це функції хендовера - так званої естафетної передачі.

Мобільність абонентів впливає на управління ресурсами мережі та їх оперативний перерозподіл, потрібні інші вимоги до вторинного використання частотного ресурсу. В новій редакції стандарту зазначено пропорційне зменшення частотної смуги каналу, а також впровадження технології багатоканальних антенних систем (MIMO). У мобільних пристроях необхідно знизити енергоспоживання – це також визначають спеціальні режими та

процедури нового стандарту. Стандарт IEEE 802.16e наділений можливостями покращення якості послуг (QoS). Ці питання для технології WiMAX відіграють першорядну роль.

Таким чином, у цій роботі спираємось на стандарт IEEE 802.16e, оскільки інтернет-послуги в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку не виключають, а навпаки, передбачають мобільність користувачів.

## 1.2 Частотні діапазони стандарту IEEE 802.16

Діапазони частот стандарту 802.16 - 2...11 ГГц і 10-66 ГГц. Частоти 10-66 ГГц використовуються фактично між базовими станціями, тобто у разі прямої видимості. У табл. 1.1 зазначені характеристики стандарту.

Таблиця 1.1 – Характеристики стандарту [2]

Стандарт	Прийнятий міс. рік	Смуги частот, ГГц	Мобільність	Схема передачі	Швидкість передачі	Ширина каналу, МГц
802.16	12.2001	11-66	нема	Одна несуща	32-134,4 Мбіт/с	20, 25, 28
802.16-2004	06.2004	2-11	нема	Одна несуща або 256 чи 2048 OFDM	1-75 Мбіт/с	1,75; 3,5; 7; 14; 1,25; 5; 10; 15; 8,75
802.16e	12.2005	2-11 (фікс) 2-6 (моб)	є	Одна несуща або 256 чи 128, 512, 1024, 2048 OFDM	1-75 Мбіт/с	1,25; 5; 10; 20

У технології WiMAX радіосигнали передаються у повітряному середовищі, наближеному максимально до земної поверхні. При цьому змінюються ті чи інші параметри сигналу. Отже, мають місце спотворення

сигналів. Земна атмосфера не є ідеальним середовищем для поширення сигналів. На робочих частотах довжина хвилі до 15 см, тому явище дифракції майже не спостерігається. Умови функціонування мережі WiMAX такі, що має місце або пряма видимість (LOS - Line of Sight), або її відсутність (NLOS - Non Line of Sight). У межах міської забудови практично відсутня пряма видимість. Технології передачі, які використовує стандарт 802.16, наведено у табл. 1.2 [2].

Таблиця 1.2 – Технології передачі в умовах відсутності прямої видимості

Технології передачі	Діапазони, ГГц	Додаткові технології	Варіанти дуплекса
WirelessMAN-SC	10-66		Часовий, частотний
WirelessMAN-SCa	Нижче 11, ліцензов.	AAS, ARQ, STC. Мобільний	Часовий, частотний
WirelessMAN-OFDM	Нижче 11, ліцензов.	AAS, ARQ, Mesh. STC. Мобільний	Часовий, частотний
WirelessMAN-OFDMA	Нижче 11, ліцензов.	AAS, ARQ, HARQ, STC. Мобільний	Часовий, частотний
WirelessMAN	Нижче 11, ліцензов.	AAS, ARQ, Mesh. STC.	Часовий

У таблиці 1.2 введені такі позначення:

AAS - adaptive antenna system; використання для збільшення ємності мережі та покращення покриття більш ніж однієї антени на станціях;

ARQ – automatic repeat request; технологія та інформаційний пакет, що використовується в ній, які забезпечують повторну передачу неприйнятих пакетів;

HARQ – hybrid automatic repeat request; технологія повторної передачі даних, характерна для систем зі зворотним зв'язком;

STC – space/time coding; просторово-часове кодування.

### 1.3 Фізичний рівень

Відмінною рисою стандарту WiMAX IEEE 802.16e є використання технології ортогонального частотного розділення (ОЧРД - OFDMA - OFDM Access). При цьому реалізується принцип адаптивного використання частотного ресурсу - виділення окремим базовим та абонентським станціям

лише частини каналного ресурсу у відповідній смузі робочих частот. При цьому повний каналний ресурс розподіляється між кількома сусідніми базовими станціями, що у свою чергу забезпечує м'який хендовер.

Інформація фізично передається як безперервна послідовність кадрів. Довжина кадру - (2 (2,5) ... 20) мс. Інформаційна ємність є похідною від символної швидкості та методу модуляції. Кадр складається з преамбули, керуючої секції та послідовності пакетів з даними. Стандартом IEEE 802.16 передбачений дуплексний режим роботи. Висхідні та низхідні канали можуть мати як частотний FDD, так і часовий TDD поділ.

Якщо використовується часовий дуплекс каналів, зокрема, то кадр поділений на низхідний і висхідний субкадри з адаптивною зміною їх тривалості у процесі роботи залежно від смуг пропускання. На рис. 1.1. наведено структуру кадру WiMAX при часовому дуплексі [16].

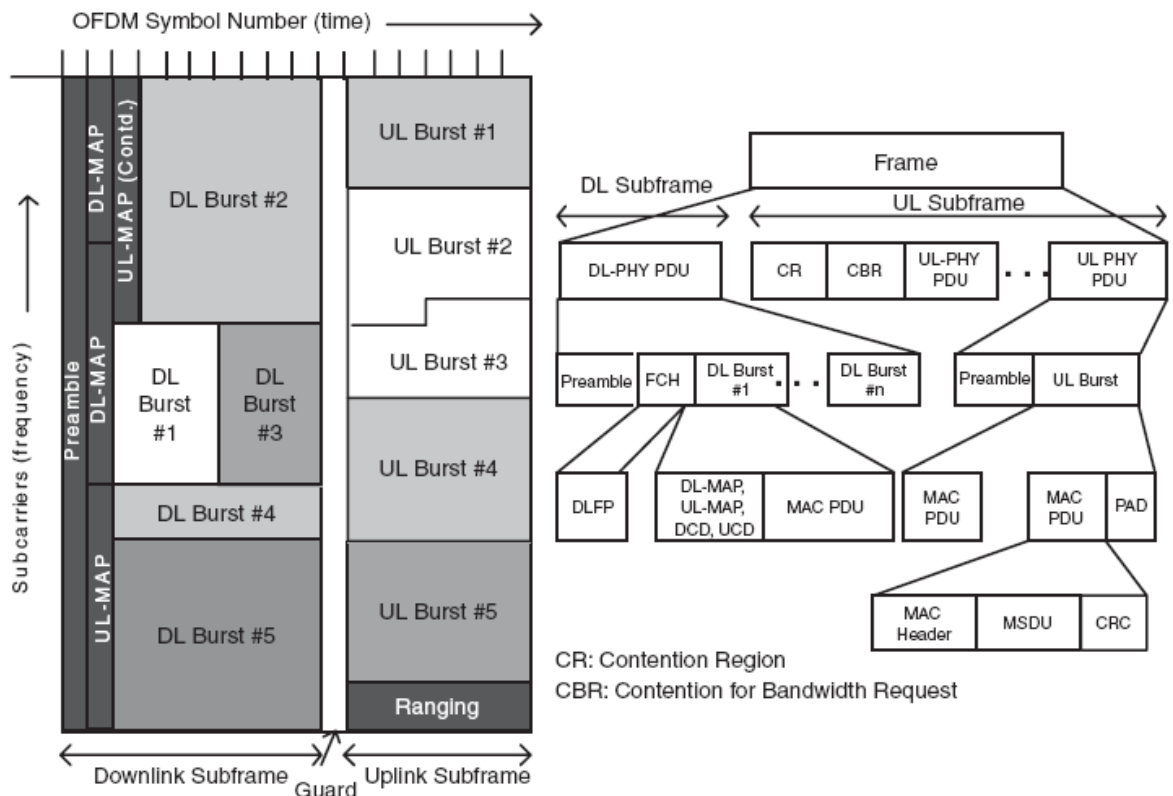


Рисунок 1.1 - Поділ каналного ресурсу при часовому дуплексі

У стандарті 802.16 число піднесущих є похідним від значення робочої смуги. При цьому рознесення частот між піднесущими зберігається постійним і

не змінюється також активна довжина символу. У стандарті 802.16е визначені смуги частот 1,25; 5; 10 та 20 МГц. (табл. 1.3). Через це технологію ОЧРД в 802.16е називають масштабованим ОЧРД (МОЧРД) [2, 3].

Таблиця 1.3 – Характеристики ОЧРД

Параметр	Характеристики ОЧРД			
	1,25	5	10	20
Смуга частотного каналу, МГц	1,25	5	10	20
Число піднесущих	128	512	1024	2048
Відношення $T_g/T_b$	1/32; 1/16; 1/8; 1/4			
Розширення смуги	28/25			
Рознесення під несущих, кГц	10,94	10,94	10,94	10,94
Активна довжина символу, мкс	91,4	91,4	91,4	91,4
Захисний проміжок, мкс, при $T_g/T_b=1/8$	11,4	11,4	11,4	11,4
Довжина OFDM-символу, мкс	102,9	102,9	102,9	102,9

У таблиці 1.4 наведені варіанти розподілу піднесущих для передачі даних і пілотних сигналів [5]. Один підканал складається з 48 піднесущих. На цих піднесущих передаються дані. Є також додаткові пілотні піднесущі і захисні піднесущі, що розташовані по краях частотного каналу.

Таблиця 1.4 – Варіанти розподілу піднесущих для передачі даних

Число піднесущих	128	512	1024	2048
Число під несущих в підканалі	48	48	48	48
Число підканалів	2	8	16	32
Число під несущих для передачі даних, $N_{дан}$	96	384	768	1536
Сталі пілотні під несущі	1	6	11	24
Змінні пілотні під несущі	9	36	71	142
Захисні під несущі (ліворуч/праворуч)	11/10	43/42	87/86	173/172

На рисунку 1.2 наведена схема розміщення піднесущих в режимі FUSC. Розподіл піднесущих частот для передачі даних і пілотних повідомлень демонструє рисунок 1.3. Піднесущі, що формують один канал, можуть бути суміжними.

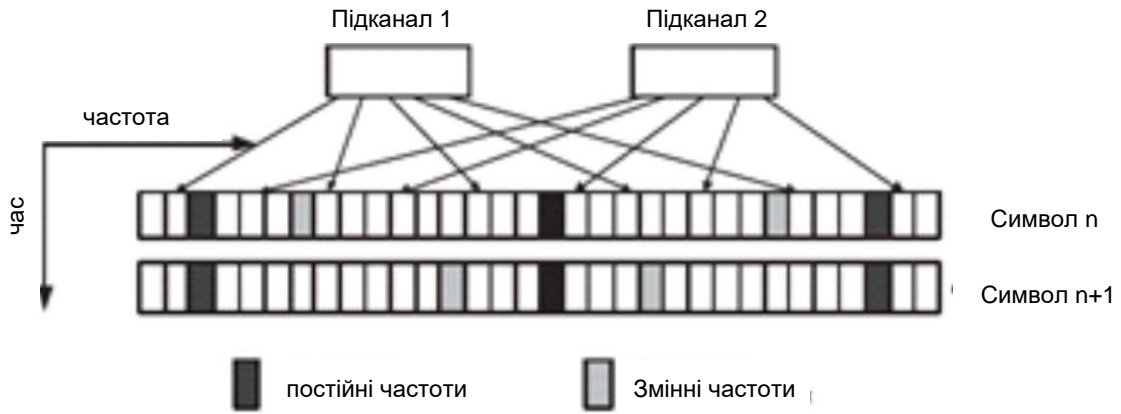


Рисунок 1.2 - Схема розміщення піднесущих в режимі FUSC

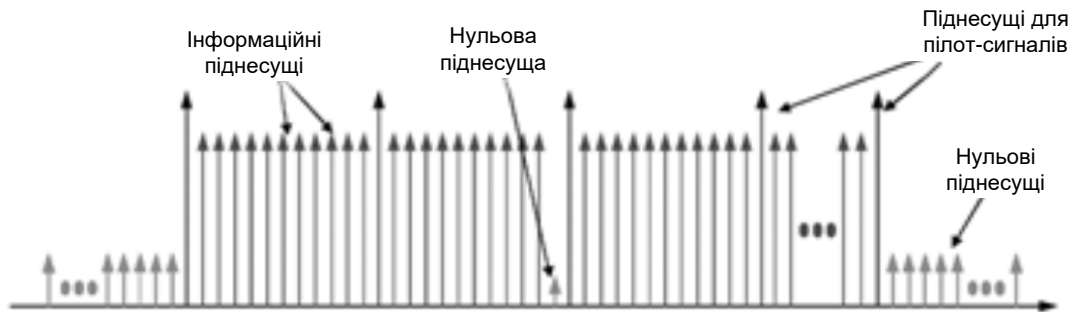


Рисунок 1.3 - Розподіл піднесущих частот

При PUSC (Partial Usage of Subcarriers) у напрямку вниз мінімальною каналною одиницею є кластер. Кожен кластер - це 14 розташованих поруч піднесущих. Формально один кластер завжди складений із 2-х послідовних ОЧР знаків, тобто з 28 піднесущих, де на 24 передають дані, а на 4 - пілотні сигнали (рисунок 1.4). Як і при FUSC, ліворуч і праворуч по краях частотного знаходяться захисні піднесущі. Розподіл піднесущих при PUSC пояснює таблиця 1.5 [7]. Один підканал складається з двох кластерів (рисунок 1.4).

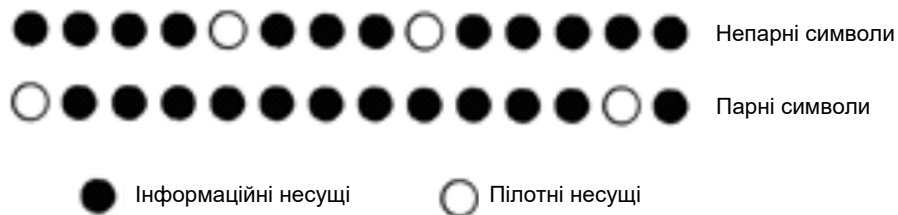


Рисунок 1.4 - Структура кластера при PUSC



Таблиця 1.5 - Розподіл піднесиць при PUSC

Смуґа частотного каналу, МГц	1,25	5	10	20
Число піднесуциць	128	512	1024	2048
Число під несущих у кластері	14	14	14	14
Число кластерів	6	30	60	120
Число підканалів	3	15	30	60
Піднесуциць, що використовуються для передачі даних	72	360	720	1440
Пілотні піднесуциць	12	60	120	240
Захисні під несущі (ліворуч/праворуч)	22/21	46/45	92/91	184/183

Мінімальною одиницею каналного ресурсу при PUSC у напрямку нагору є елемент - тайл (tile). Кожен тайл - це 4 піднесуциць тривалістю 3 ОЧР. 8 піднесуциць всередині елемента використовуються для передачі даних, 4 - для передачі пілотних сигналів.

У подальшому проводиться розбивка на підканалі; при передачі нагору 6 тайлів утворюють один підканал. Профілі пакетів (burst) залежать від виду модуляції та схеми надлишкового кодування.

#### 1.4 MAC-рівень

Фізичний рівень семирівневої моделі ВВС стандарту IEEE 802.16 відповідає за сигнальні потоки даних між БС та АС. Що стосується завдань, пов'язаних з управлінням роботою системи та формуванням структур даних, що передаються, вирішуються на каналному рівні - MAC-рівні. Тут формується транспортне середовище для різноманітних послуг (сервісів).

Механізм підтримки сервісів верхнього рівня. Важливо мати єдиний для всіх додаток до протоколу MAC-рівня, незалежно від особливостей фізичного каналу (рисунок 1.5). При цьому спрощується зв'язок міської мережі передачі з терміналами кінцевих користувачів мережі WiMax.

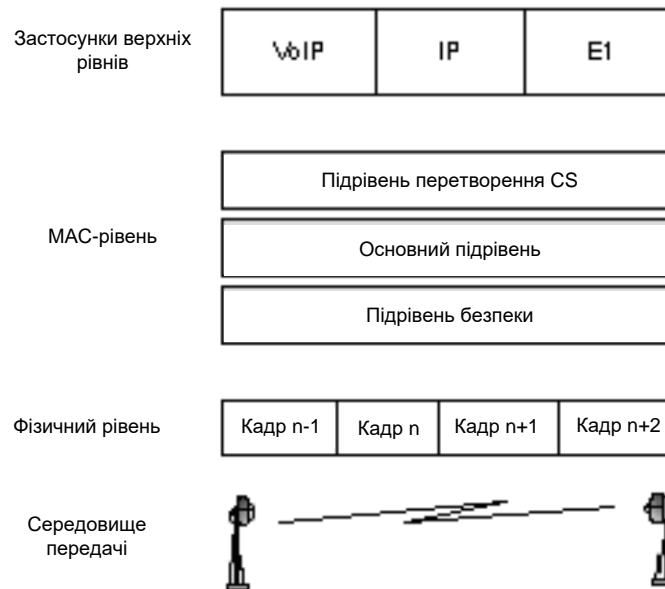


Рисунок 1.5 - Структура MAC-рівня стандарту IEEE 802.16

Фізично середовища передачі у різних фрагментах міської мережі передачі можуть бути різні, але структура даних єдина. Для сотень різних терміналів кінцевих користувачів необхідні різні послуги (додатки): з'єднання по протоколу IP, передача голосу і даних з часовим поділом, пакетна передача мови через IP тощо. На якість послуг кожного окремого сервісу не повинна впливати мережа IEEE 802.16. Це завдання для алгоритмів та механізмів доступу MAC-рівня.

Структурно MAC-рівень IEEE 802.16 поділено на три підрівні (рисунок 1.5):

- рівень перетворення сервісу CS (Convergence Sublayer);
- основний підрівень CPS (Common Part Sublayer);
- підрівень захисту PS (Privacy Sublayer).

Криптозахист даних та механізми автентифікації/запобігання несанкціонованому доступу реалізують на підрівні захисту. Для цього передбачені набори алгоритмів криптозахисту та протокол керування ключем шифрування. Цим процесом управляє базова станція, яка може передавати у процесі авторизації ключ АС, використовуючи схему роботи «клієнт (АС) – сервер (БС)».

Трансформація потоків даних протоколів верхніх рівнів передачі

відбувається на підрівні перетворення сервісу через мережі IEEE 802.16. Передбачено свій механізм перетворення до кожного типу додатків верхніх рівнів. Специфікації стандарту містять механізми роботи в режимі пакетної передачі та АТМ. Пакетна передача - це досить широкий набір різних пакетів типу IP, PPP та IEEE Std 802.3 (Ethernet).

Мета роботи на CS-підрівні - оптимізація переданих потоків даних кожного додатка верхнього рівня з урахуванням їхньої специфіки. Розрізняють 4 типи трафіку, які відрізняються різними вимогами до затримок сигналу:

UGS - Unsolicited Grant Service – передача практично в реальному часі. В одному напрямку допустима затримка не перевищує 5 - 10 мс, коефіцієнт помилок при цьому -  $BER = 10^{-6} \dots 10^{-4}$ ;

rtPS – Real Time Polling Service – пакети змінної довжини (MPEG відео) у потоках реального часу.

nrtPS-Non-Real-Time Polling Service - передача файлів у широкосмуговому режимі при підтримці потоків змінної довжини.

BE - Best Effort - решта трафіку.

Для додатків, у яких періодичність та розмір пакетів фіксовані (наприклад, телефонії за Е1), передбачений механізм доступу до каналу без вимоги UGS (Unsolicited Grant Service). Цей механізм означає, що БС надає АС із заданим періодом для передачі даних інтервали фіксованого розміру, які відповідають швидкості потоку даних. Якщо в ході роботи АС змінюються умови доступу, то за допомогою спеціального підзаголовка MAC це виконується. У підзаголовку є опція «Опитай мене», за допомогою якої АС робить запит у БС стосовно нової смуги. У цьому підзаголовку є спеціальний біт індикації переповнення вихідного буфера передавача АС, що призводить до втрати даних (slip). БС може збільшити смугу даної АС, відреагувавши таким чином на появу цього запиту.

Технології, що використовуються у стандарті 802.16, вимагають відповідного управління радіоканалом, тобто управлінням на фізичному рівні. Це управління залежить від індивідуальних особливостей каналу конкретного

абонента та його потреб у пропускній здатності. Рівень керування радіоканалом RLC (Radio Link Control) забезпечує як ці можливості, так і традиційні функції керування потужністю випромінювання.

## 1.5 Архітектура побудови мережі WiMAX

### 1.5.1 Базова модель мережі

Специфікації стандарту 802.16 визначають сигнальний обмін та передачу трафіку лише на радіоінтерфейсі. Що стосується з'єднання БС з Інтернетом, бездротовими мережами тощо, то рішення тут за оператором спільно з виробником. Для уніфікації та певної оптимізації мережі запропоновано її базову архітектуру, рисунок 1.6 [16].

На цьому рисунку показано базову модель мережі NRM (network reference model) WiMAX. Вона є логічним поданням мережевої архітектури. Три логічні частини, на які поділяє систему NRM.

1. Мобільні станції, за допомогою яких абоненти мають доступ до мережі;
2. ASN (access services network) складається з однієї або кількох базових станцій, якими управляє один або кілька шлюзів ASN (ASN-GW). Це мережа доступу до послуг, що є власністю оператора.
3. CSN (connectivity services network) - підмережа оператора. Вона забезпечує необхідні комутаційні функції та функції безпеки, забезпечує вихід на IP та інші мережі для реалізації абонентських послуг. Абонент може перебувати у роумінгу або його обслуговує оператор домашньої мережі. Якщо він у роумінгу, то його обслуговує оператор візитної мережі; при цьому відбувається обмін сигнальною інформацією CSN візитного та домашнього оператора.

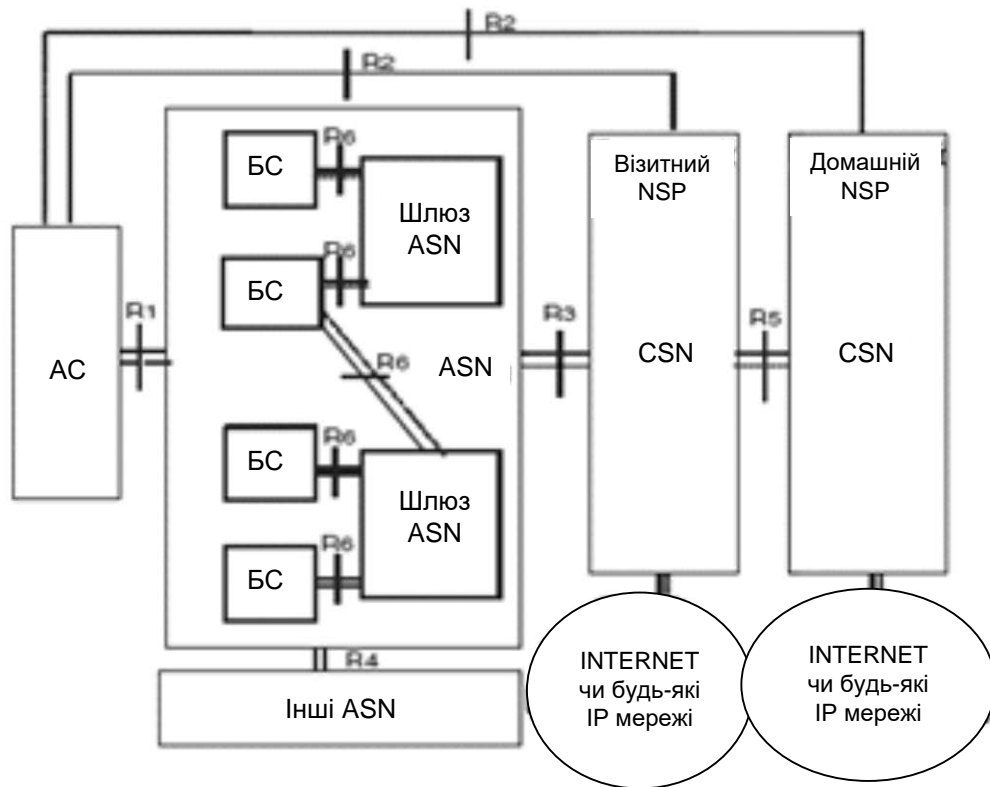


Рисунок 1.6 - Базова модель мережі

ASN виконує такі функції [16, 17]:

- з'єднання на рівні L2 з AC;
- пошук та вибір мережі на основі переваг абонента про CSN/NSP;
- забезпечення безпеки: тимчасове зберігання профілів користувачів, передача даних серверу безпеки про пристрої, користувачів та послуги;
- організація наскрізних IP-з'єднань між AC та CSN;
- управління радіоресурсом (RRM) відповідно до класу трафіку та необхідної якості обслуговування;
- забезпечення мобільності, тобто. виконання процедур пейджингу, хендовера та локалізації.

WiMAX Forum визначив різні способи організації ASN, що отримали назву профілів. Існують профілі А, В, С. Шлюз ASN може бути організовано по-різному, оскільки він є логічним пристроєм. Профіль В ASN включає BS та шлюз ASN. Профілі А і С наділені функціями управління мобільністю та радіоресурсами між BS та шлюзом ASN.

Функціонально БС підтримує інтерфейс IEEE 802.16e з АС. Додаткові функції, що виконуються БС в обох профілях, включають розподіл для висхідного та низхідного каналів, класифікацію трафіку та SFM (управління сервісним потоком). При цьому повинні виконуватися вимоги якості обслуговування для різних класів трафіку. БС також підтримує тунельний протокол у напрямку шлюзу ASN, управляє статусом АС (активний, непрацюючий), забезпечує за допомогою сервера DHCP динамічними адресами. БС також забезпечує всі рівні захисту, передбачені стандартом. Для балансу навантаження БС може бути підключена одночасно до двох шлюзів.

Шлюз ASN є основним елементом мережі. Він під час сеансу організує пейджинг АС та хендовер абонентам, керує доступом до мережі. У шлюзі відкрито базу даних, що містить ключі шифрування та профілі абонента. Також виконується авторизація потоку послуг згідно з профілем абонентів та якістю обслуговування.

Поділ функцій ASN між БС і шлюзом ASN наведено у таблиці 1.6. Поділ відповідає профілям ASN, встановленим WiMAX Forum. Профіль В містить інтеграцію у одному елементі. Його доцільно використовувати у невеликих мережах. Профілі А та С складають організацію шлюзу у вигляді окремого функціонального вузла. Між профілями А та С є незначні відмінності. Шлюз ASN виконує функцію перемикачання при хендовері, у профілі С за хендовер відповідає БС, а у профілі А - шлюз ASN. Динамічний перерозподіл радіоресурсу між різними БС у профілі управління радіоресурсами здійснює шлюз ASN. У профілі С радіоресурс кожної БС фіксований.

Таблиця 1.6 – Розподіл функцій ASN між базовими станціями

Процедура	Функція	Назва об'єкта ASN		
		Профіль С		
Профіль А	Профіль В	Профіль С		
Безпека	Аутентифікатор	Шлюз ASN	ASN	Шлюз ASN
Ретранслятор аутентифікації	БС	ASN	БС	
Розподільник ключів	Шлюз ASN	ASN	Шлюз ASN	
Отримувач ключів	БС	ASN	БС	
Мобільність	Маршрутизація потоку даних	Шлюз ASN і БС	ASN	Шлюз ASN і БС

## Продовження таблиці 1.6

Процедура	Функція	Назва об'єкта ASN		
		ASN	БС	
Керування хендовером	Шлюз ASN	ASN	БС	
Сервер контексту (буфер)	Шлюз ASN і БС	ASN	Шлюз ASN і БС	
ПЗ мобільного інтернету	Шлюз ASN	ASN	Шлюз ASN	
Керування радіоресурсами	Контролер радіоресурсів	Шлюз ASN	ASN	БС
ПЗ контролера	БС	ASN	БС	
Пейджинг	ПЗ пейджингу	БС	ASN	БС
Керування пейджингом	Шлюз ASN	ASN	Шлюз ASN	
QoS	Авторизація сервісного потоку	Шлюз ASN	ASN	Шлюз ASN
Керування сервісним потоком	БС	ASN	БС	

## Функції CSN:

- виділення для АС IP-адрес для сеансів зв'язку;
- організація сервера автентифікації, авторизації та обліку для безпеки в мережі;
- організація передачі трафіку з необхідною якістю надання послуг. Якщо абонент знаходиться у роумінгу, то CSN домашнього оператора підтримує профіль послуг абонента;
- білінг наданих абоненту послуг;
- тунелювання потоків між CSN різних операторів з метою забезпечення роумінгу;
- керування мобільністю (хендовер між БС, керованими різними ASN);
- вихід на мережу Інтернет з метою забезпечення таких сучасних послуг як передача мультимедійної інформації, локалізація абонентів та забезпечення якості комп'ютерних послуг.

## 1.5.2 Стики та інтерфейси

WiMAX NWG (network working group - група розробки мережі) розробила RP (reference points - стики та інтерфейси), тобто концептуальні сполуки між різними функціональними елементами: ASN, CSN, АС, БС. Стики не завжди є

фізичними з'єднаннями, а лише у випадках, коли функціональні елементи розташовані у різних місцях, тобто у різних фізичних пристроях. Слід зазначити, що WiMAX Forum продовжує роботу щодо сумісності розроблених RP на основі специфікованих нормативних протоколів з метою забезпечення максимальної пропускної спроможності мережі. У табл. 1.7 представлені розроблені RP. Логічне уявлення архітектури WiMAX показано на рис. 1.7 [14, 16].

Таблиця 1.7 – Стики та інтерфейси

Стик	Кінцеві точки	Опис
R1	АС і БС	Організує радіоінтерфейс на основі IEEE 802.16e
R2	АС і CSN	Для аутентифікації, авторизації, управління конфігурацією IP хоста та управління мобільністю. Це логічний інтерфейс АС та CSN
R3	ASN і CSN	Підтримка AAA, переліку послуг, можливість керування мобільністю. R3 також забезпечує тунелювання IP даних між ASN та CSN
R4	ASN і CSN	Набір протоколів управління та організації наскрізних каналів, що починаються/закінчуються в різних пристроях всередині ASN, які координують мобільність АС між ASN. У Release 1 інтерфейс R4 забезпечує взаємодію між різнотипними ASN
R5	CSN і CSN	Набір протоколів управління та організації наскрізних каналів для взаємодії між домашньою та візитною мережами
R6	BS і шлюз ASN	Набір протоколів управління та організації наскрізних каналів взаємодії між БС та шлюзом ASN. Протоколи організації наскрізних каналів забезпечують передачу даних усередині структури ASN або тунельних з'єднань між БС та шлюзом ASN
R7	ASN-GW-DP і ASN-GW-EP	Опціональний набір протоколів у площині управління для координації між двома групами функцій, визначених у R6 для складних розгалужених структур WiMAX
R8	БС і БС	Набір потоків повідомлень площини управління і, можливо, команд для створення наскрізних каналів між БС для організації швидких та безшовних хендверів. ПЗ організації наскрізних каналів складається з протоколів, які дозволяють передавати дані між БС, залученими в хендвер, та певної АС. ПЗ площини управління складається з протоколу управління, специфікованого в IEEE 802.16e, і додаткових протоколів, які дозволяють керувати передачею даних між БС, залученими в хендвер, і певної АС



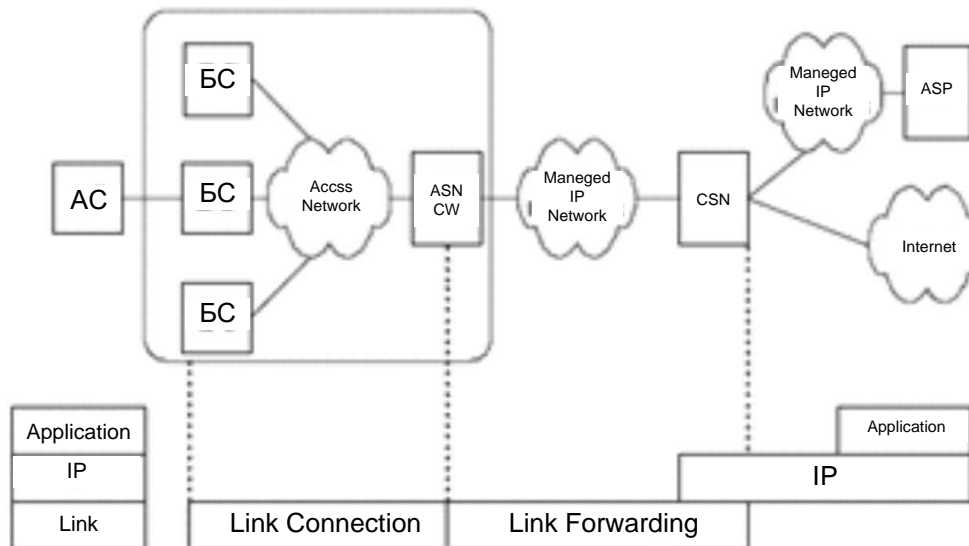


Рисунок 1.7 - Логічне уявлення архітектури WiMAX

Архітектура мережі WiMAX схожа на архітектуру багатьох IP мереж доступу, де інфраструктуру рівня L2 (рівня з'єднань) використовують при концентрації трафіку індивідуальних користувачів, де знаходяться елементи, які забезпечують кінцеві пристрої IP адресами для доступу до додатків і послуг. В даному випадку ASN є інфраструктурою каналного рівня, що забезпечує концентрацію каналів, а CSN надає абонентам адреси IP і забезпечує доступ до IP додатків.

WiMAX Forum пропонує два варіанти протокольного обміну у транспортній мережі (рис. 1.8, рис. 1.9). Відмінність між рішеннями полягає в організації інтерфейсу R6 в площині користувача (площині передачі даних). У будь-якому варіанті дані між BC та шлюзом ASN передають на основі тунельного протоколу GPE (Generic Routing Encapsulation). На рис. 1.8 поверх нього слідує протокол IP-Ethernet, але в рис. 1.9 можливі інші технології передачі IP пакетів. Відмінності полягають у тому, що перед передачею пакетів по радіоінтерфейсу організують конвергенцію (обробку заголовків) або лише на рівні Ethernet, або безпосереднього лише на рівні IP. На інтерфейсі R3 під час передачі даних використовують локальну маршрутизацію з урахуванням IP протоколів, використовуючи технологію IP-over-IP.

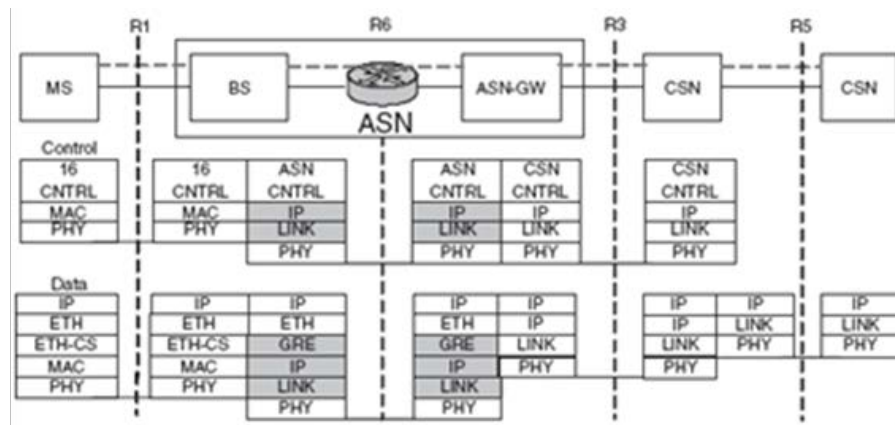


Рисунок 1.8 - Стек протоколів передачі інформації у транспортній мережі WiMAX з використанням Ethernet

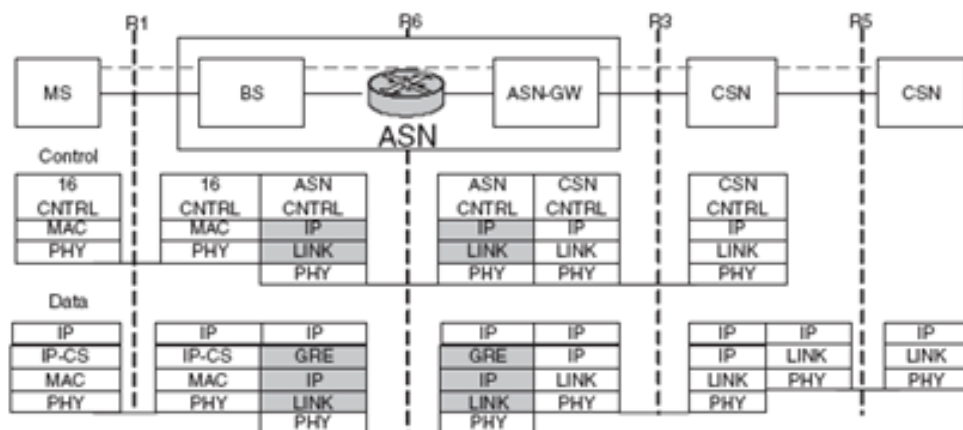


Рисунок 1.9 - Стек протоколів передачі інформації у транспортній мережі WiMAX з використанням IP-протоколів

## 1.6 Висновки до розділу

Наведені особливості стандарту WiMAX. Показано, що найбільш прийнятною для роботи в умовах обмеженої інфраструктури зв'язку може бути версія стандарту IEEE 802.16e. Привабливість його полягає у можливості працювати за умови наявності або відсутності прямої видимості, а також в режимі, коли потрібно мати доступ до мережі безпосередньо в процесі руху. Виконано аналіз частотного ресурсу стандарту, його функціонування на фізичному та MAC-рівні, розглянуті основні аспекти архітектури мережі, варіанти стиків та інтерфейсів.

## 2 ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ WiMAX

### 2.1 Принципи побудови мережі для населеного пункту

Для конкретизації планування мережі WiMAX будемо орієнтуватися на достатньо відоме місто у Вінницькій області – Хмільник. Його населення складає біля 30000 жителів, площа – 20,5 км<sup>2</sup>. Це значний історичний центр Поділля, важливий туристичний осередок держави. На території міста знаходиться 5 промислових підприємств. Діяльністю у сфері проводового електрозв'язку та у сфері бездротового електрозв'язку займається ПП «ВІНАСТЕРІСК», на технічній базі якого можливо побудувати мережу.

У мережах стандарту мобільного WiMAX, зона покриття однієї базової станції позначається шестикутником. Ці фігури найкраще апроксимують кругову форму зони радіопокриття базової станції на рівній місцевості. При цьому краї шестикутників добре апроксимують межі зон покриття. На практиці зона покриття не має правильної кругової форми, оскільки вона залежить від структури місцевості. Стільники рівного розміру неможливі і з технічних причин. Отже, планування стільників є складне завдання, в ході вирішення якого за допомогою спеціалізованого обладнання в сучасних системах проводять польові вимірювання.

Можна використати складне спеціалізоване програмне забезпечення, яке імітує поширення електромагнітних хвиль на цифровій моделі місцевості. Тоді з певною точністю стільники можна спроектувати на основі обробки даних цифрової карти місцевості. Один з підходів полягає в тому, що хвилі розглядаються як світлові промені, які відбиваються і розсіюються на різних перешкодах місцевості з певними коефіцієнтами відбиття та розсіювання. Цей підхід, який називають методом трасування променів, вимагає великих обчислювальних ресурсів та точних даних про місцевість. Слід зазначити, що пакети професійного програмного забезпечення для проектування стільників використовують більш складні моделі поширення хвиль.

Найбільш точні результати при обмежених обсягах вимірювань можна отримати, якщо калібрувати моделі поширення сигналів у програмному забезпеченні [5].

Ключовим у роботі стільникової системи (принцип повторного використання частот) полягає в багаторазовому використанні одних і тих самих частотних каналів у різних стільниках, розташованих у різних кластерах системи. Група з  $N$  стільників, що використовує всі доступні частоти несущих, виключаючи при цьому їх повторне використання, називається стільниковим кластером (Cell cluster).

Для аналізу розміру та особливостей кластера розглянемо геометричні властивості набору шестикутників, зображених на рис. 2.1.

На рисунку позначено через  $r$  радіус кола, описаного навколо кожного шестикутника. З іншого боку  $r$  - це відстань від центру шестикутника до його вершини. Для рівностороннього трикутника зі стороною  $r$  відстань між двома сусідніми шестикутниками однакова, яку будемо вважати одиницею довжини. У системі координат з кутом між осями  $60^\circ$ , відстань від початку координат до центру будь-якого шестикутника становить:

$$R = \sqrt{3} \cdot r \cdot \sqrt{i^2 + ij + j^2}, \quad (2.1)$$

де  $i$  та  $j$  - координати центру шестикутника, що розглядається, виражені в прийнятих одиницях довжини, що дорівнюють  $\sqrt{3}r$ . Для відповідних комбінацій значень  $i$  та  $j$  у таблиці 2.1 представлені кластери [9].

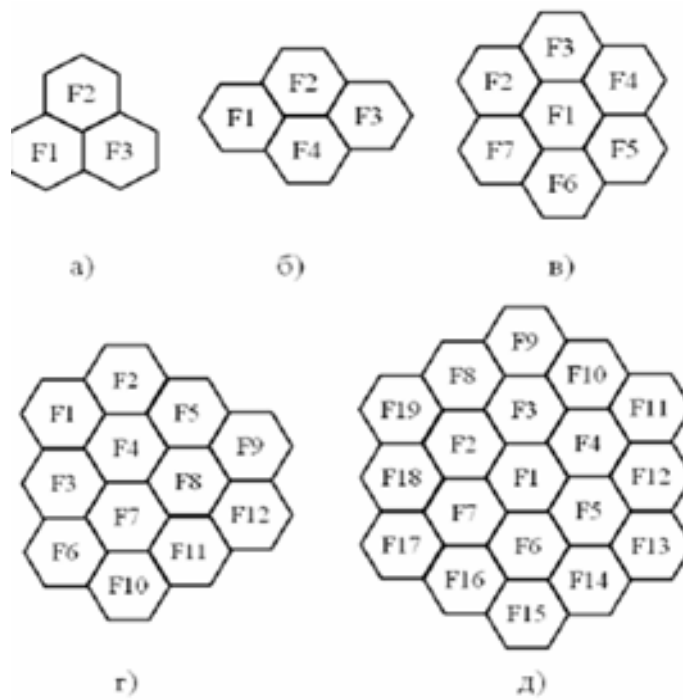


Рисунок. 2.1 - Побудова багатоелементних стільникових кластерів:  
 а) триелементного, б) чотириелементного, в) семиелементного,  
 г) дванадцятиелементного, д) дев'ятнадцятиелементного

Таблиця 2.1 – Розмірність кластерів відповідно до комбінацій  $i$  та  $j$

Кластери, (C)	$i$	$j$
1	0	0
3	1	1
4	2	0
7	2	1
9	3	0
12	2	2
13	3	1
16	4	0
19	3	2
21	4	1
27	3	3

Вираз (2.1) впливає з теореми косинусів, яка визначає, що квадрат довжини сторони  $R$ , що лежить навпроти кута, утвореного сторонами з довжинами  $u$  і  $v$ , дорівнює [9, 10]:

$$R^2 = u^2 + v^2 - 2uv\cos\alpha. \quad (2.2)$$

Для випадку, що відповідає рисунку 2.2,  $u = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot r$ ,  $v = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot r$ , та  $\alpha = 120^\circ$ . Отже,  $i = 3$  та  $j = 2$ .

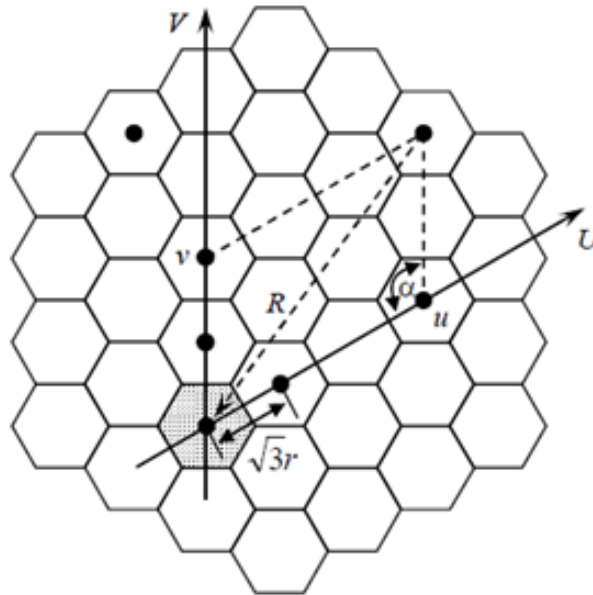


Рисунок 2.2 - Поділ зони радіопокриття на стільники

Вважатимемо стільник, розташований у початку зображеної на рис. 2.2 системи координат, опорним. Побудуємо навколо нього стільниковий кластер. Інші кластери розташовуються навколо нього таким чином, щоб області не мали розривів та не перекривалися.

Спробуємо визначити, скільки стільників у кластері дає компактне покриття. Врахуємо, що відстань від центру опорного стільника до центральних стільників сусідніх кластерів становить  $R$ .

У кожному стільнику такий самий набір частотних каналів, як і у опорного стільника. Кожен кластер апроксимуємо одним великим шестикутником, площа якого дорівнює сумі площ всіх стільників, що належать кластеру. Це зображено на рис. 2.3.

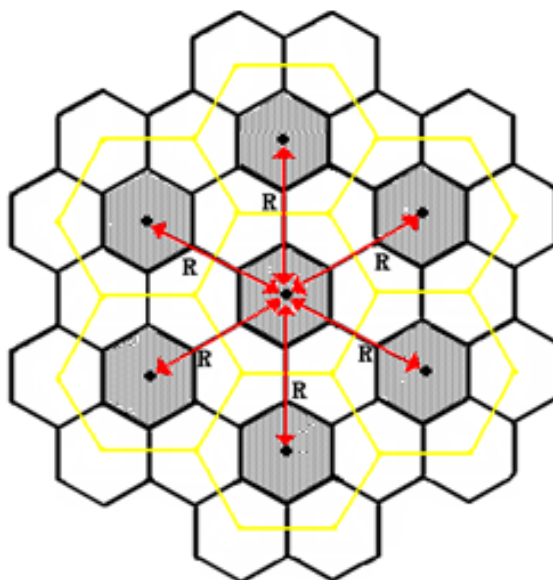


Рисунок 2.3 - Апроксимація кластерів великими трикутниками

Площа одного гексагонального стільника радіусу  $r$  дорівнює [5, 6]:

$$S_r = \frac{3}{2} \sqrt{3} \cdot r^2, \quad (2.3)$$

а площа великого шестикутника, що складається з  $N$  площ шестикутників, центри яких розташовані на відстані  $R$  один від одного і мають радіус  $r$ , становить:

$$S_R = \frac{3}{2} \sqrt{3} \left( \frac{R}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{3R^2}{2\sqrt{3}}. \quad (2.4)$$

Необхідно, щоб виконувалася наступна рівність

$$S_R = NS_r. \quad (2.5)$$

Кількість  $N$  стільників у кластері визначимо підставивши (2.1) і (2.4) в (2.5). Отримаємо вираз:

$$T = i^2 + j^2 + ij. \quad (2.6)$$

Кількість стільників у кластері строго не визначена. Кластер, що утворює мережеву структуру, може мати до дванадцяти і більше стільників.

На рис. 2.3 зображено кластер з  $N = 3$  стільниками, для яких  $i = 1$  і  $j = 1$ . Користуючись (2.1) і (2.6), можна отримати важливе співвідношення, яке буде використано в подальших міркуваннях:

$$Q = R/r. \quad (2.7)$$

Якщо при розробці системи не враховувалося кількість стільників у кластері, їх розташування на місцевості і каналний розподіл, то в такій системі спостерігатиметься істотний вплив один на одного каналів у різних стільниках, що використовують одні й ті самі несучі частоти. Ці явища називаються співканальними перешкодами. Вони залежать від параметра  $Q$ , визначеного у виразі (2.7).

Параметр  $Q$  називається коефіцієнтом ослаблення співканальних завад. Якщо  $Q$  збільшується, то рівень співканальних завад зменшується, оскільки збільшується відстань, що розділяє стільники з однаковими частотами, або зменшується їх розмір. Ця відстань залежить, очевидно, від відношення потужності сигналу  $P_s$  до потужності завади  $P_I$ . У свою чергу, це відношення залежить від кількості стільників  $K_o$ , що впливають один на одного, згідно з формулою [8]:

$$v^2 = \frac{P_s}{P_I} = \frac{P_s}{\sum_{k=1}^{K_o} P_{I_k}}, \quad (2.8)$$

де  $P_{I_k}$  - середня потужність перешкод, що генеруються  $k$ -им стільником.

На рис. 2.4 зображена типова конфігурація взаємодіючих стільників. Шість стільників, розташованих у першому ярусі, взаємодіють з центральним стільником, який вважається опорним. Таким чином  $K_o = 6$ .



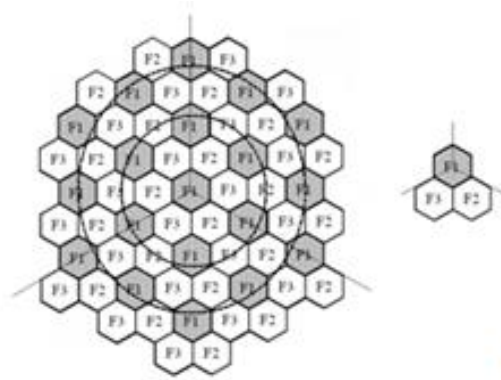


Рисунок 2.4 - Розподіл у просторі інтерферуючих стільників

Якщо структура побудована на основі типових кластерів з  $N=3, 7, 9, 12, 19$ , то кількість стільників  $K_o$ , що впливають один на одного, завжди буде дорівнювати 6 (рис. 2.5).

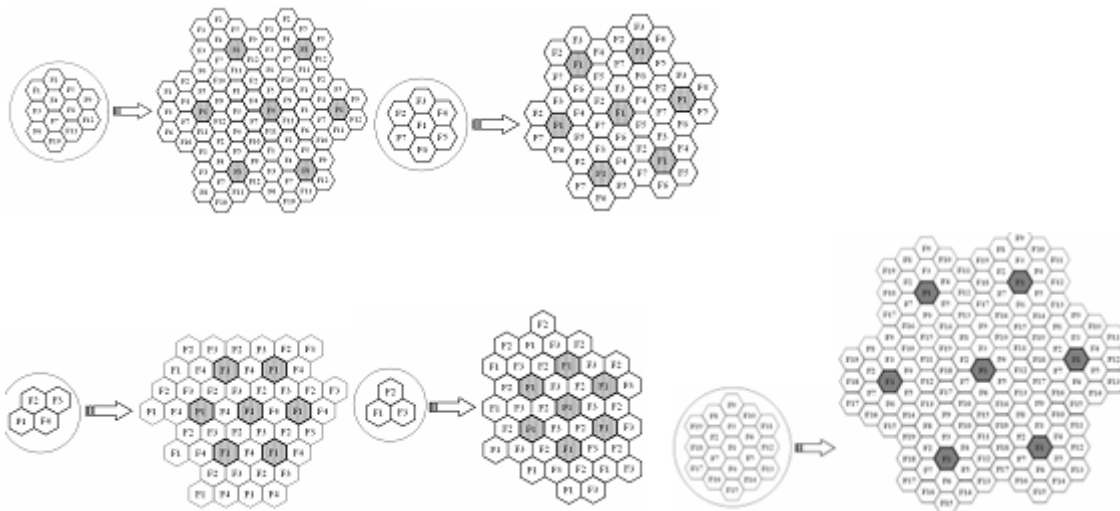


Рисунок 2.5 - Розподіл кластерів з регулярною структурою

Далі врахуємо, що впливом стільників другого ярусу на центральний стільник через велику відстань між ними можна знехтувати. Співканалні завади спотворюють і сигнал, що приходить на базову станцію центрального стільника, і сигнали, що приймаються рухомими станціями, які зараз знаходяться в цьому стільнику. Нехай базові станції формують сигнали однакової потужності. Тоді відношення потужності цього сигналу до потужності співканалних завад на границі центрального стільника становить [10, 11]:

$$v^2 = \frac{P_S}{P_I} = \frac{r^{-\gamma}}{\sum_{k=1}^{K_0} R_k^{-\gamma}}. \quad (2.9)$$

При поширенні у вільному просторі  $\gamma=2$ , при двопробеновому поширенні  $\gamma=4$ . Значення  $\gamma$  лежить в інтервалі від 2 до 5,5 залежно від умов поширення.

Аналіз (2.9) показує, що співвідношення «сигнал/співканальна завада» для зазначеного припущення залежить тільки від відстаней між базовими станціями, що використовують одні й ті самі частотні канали, геометричних властивостей розподілу стільників, та радіуса зони радіопокриття базової станції.

Припустимо, що в зображеній на рис. 2.3 системі всі відстані  $R_k$  дорівнюють  $R$ . Тоді з (2.9) випливає [12], що

$$v^2 = \frac{P_S}{P_I} = \frac{r^{-\gamma}}{6R^{-\gamma}} = \frac{Q^\gamma}{6}. \quad (2.10)$$

$$Q = \left(6 \frac{P_S}{P_I}\right)^{1/\gamma} = (6v^2)^{1/\gamma}. \quad (2.11)$$

Формула (2.11) характеризує взаємозв'язок відношення відстані між стільниками, що використовують одні й ті самі частоти, до радіусу стільника, з відношенням «сигнал/співканальна перешкода». У традиційних стільникових системах відношення потужностей  $P_S/P_I$  вибирається таким, щоб забезпечити якість передачі мови, хоча б для 75% користувачів на 90% області покриття системи [5].

Якщо прийняти  $\gamma=4$ , то з формули (2.11) отримаємо розрахункове значення коефіцієнта  $Q = 3$ .  $Q$  залежить від кількості  $N$  стільників у кластері, тому при підстановці  $Q = 3$  у формулу (2.7) отримаємо  $N = 3$ .

Як змінюється коефіцієнт співканальних завад  $Q$  залежно від числа елементів у кластері  $N$ , наведено в табл. 2.2 [13].

Таблиця 2.2 - Коефіцієнт зменшення соканальних завад у залежності від числа елементів у кластері

Кількість стільників у кластері	3	4	7	12	19
Коефіцієнт зменшення співканальних завад	3,00	3,46	4,58	6,00	7,55

Відношення сигнал/завада, що дорівнює 3.00, є недостатнім для чинних стандартів, тобто недостатньою слід вважати тристільникову структуру.

Тепер граничний випадок, рисунок 2.6. Відстані між рухомою станцією, розташованою в точці А на межі стільника, і всіма базовими станціями, що впливають, приблизно дорівнюють  $(R-r)$ ,  $(R-r)$ ,  $(R-r/2)$ ,  $R$ ,  $(R+r/2)$ ,  $(R+r)$ . Для цього варіанта отримаємо [12, 13]:

$$\frac{P_S}{P_I} = \frac{r^{-\gamma}}{2(R-r)^{-\gamma} + \left(R - \frac{r}{2}\right)^{-\gamma} + R^{-\gamma} + \left(R + \frac{r}{2}\right)^{-\gamma} + (R+r)^{-\gamma}}.$$

В результаті

$$\frac{P_S}{P_I} = \frac{1}{\frac{2(Q+1)^\gamma + (Q-1)^\gamma}{(Q^2-1)^\gamma} + \frac{\left(Q + \frac{1}{2}\right)^\gamma + \left(Q - \frac{1}{2}\right)^\gamma}{\left(Q^2 - \frac{1}{4}\right)^\gamma} + \frac{1}{Q^2}}. \quad (2.12)$$

При  $Q=3$  та  $\gamma=4$  значення  $P_S/P_I$  становить 12,6, що приблизно дорівнює 11 дБ. Точні відстані від точки А до центрів інтерферуючих стільників дають дещо краще значення  $P_S/P_I$ , проте воно все ж таки буде меншим необхідних 18 дБ. На практиці через неідеальне розташування базових станцій, спотворення, які обумовлені нерівностями місцевості, та багатопроменеве поширення це відношення буде ще гіршим. Отже, ще очевидніше, що розраховане значення  $Q = 3$  буде недостатньо.

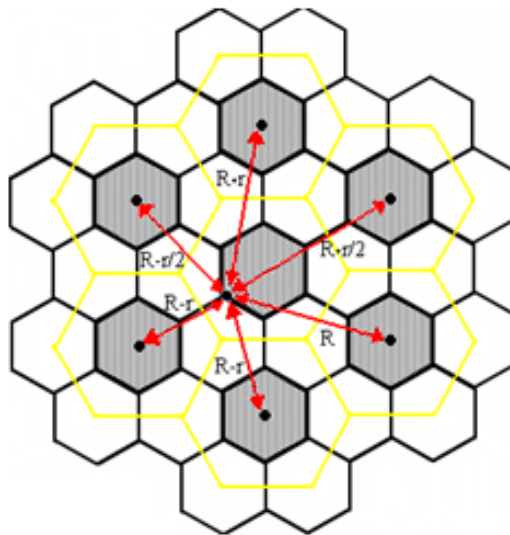


Рисунок 2.6 - Найгірший випадок співканальних перешкод при  $N=3$

На рис. 2.6 та у формулі (2.12) розглядається найгірша ситуація, оскільки рухома станція знаходиться на максимально можливому віддаленні від базової станції її власного стільника. Тому наведена вище оцінка вважається дуже песимістичною. Тим не менш, саме такий підхід до розробки систем дозволяє досягти високої надійності.

Існує декілька основних шляхів вирішення проблеми недостатньої величини параметра  $Q$  для кластера. Розглянемо їх за умови, що антени базових станцій мають горизонтальну діаграму спрямованості.

## 2.2 Методи ослаблення співканальних завад

Необхідно так оптимізувати мережу, щоб був використаний найбільший частотний діапазон і при цьому збережено співвідношення сигнал/шум на мінімально допустимому рівні.

Існує декілька основних шляхів вирішення проблеми недостатньої величини параметра  $Q$  для кластера.

Перший шлях - це збільшення кількості стільників у кластері. Стільникова структура дозволяє збільшити пропускну здатність всієї системи шляхом збільшення кількості стільників, зменшення розмірів стільників та

зменшення потужності передавачів. Однак поряд з очевидними перевагами, зменшення радіуса стільника має і недоліки [11]:

- на одній площі доводиться розміщувати більшу кількість БС та антен, що приводить до додаткових фінансових витрат;
- оскільки стандарт WiMAX відноситься до частотно-часового поділу каналів, то збільшення в кластері стільників призведе до зниження кількості каналів в окремих стільниках та зниження трафіку.

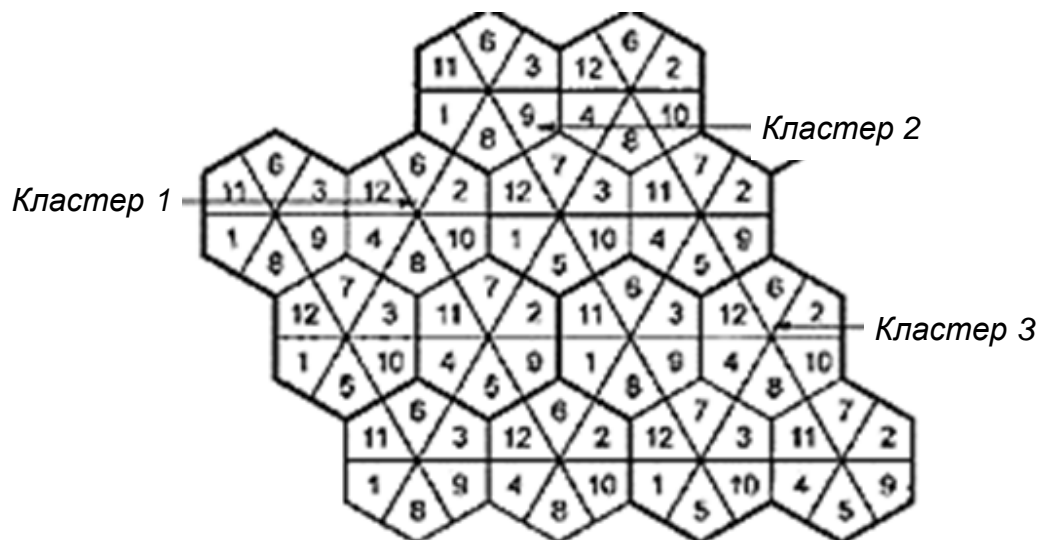


Рисунок 2.7 – Група стільників з використанням антен з діаграмою спрямованості  $60^\circ$

Друге рішення полягає в ослабленні співканальних перешкод при використанні секторних антен з шириною діаграми спрямованості в  $60^\circ$ . Кожний стільник поділяється на шість секторів. На рисунку 2.7 зображена група стільників з використанням антен з діаграмою спрямованості  $60^\circ$ .

При використанні секторних структур стільників, значно знижується вплив співканальних перешкод сусідніх БС, що працюють на одних і тих же частотах. Але, так само є і недолік - на кожен сектор припадає окремий антенно-фідерний тракт, що також передбачає додаткові фінансові витрати.

Розглянемо третій варіант, який найбільше підходить для реалізації мережі WiMAX – це комбіноване планування стільників.

Для розв'язання проблем, пов'язаних з співканальними перешкодами на

краю стільника, у стандарті WiMAX запропоновано метод комбінованого повторного використання частоти (FFR), тобто комбіноване планування стільників. У FFR користувачі, що знаходяться на краю стільника, використовують частину всіх доступних підканалів, у той час як користувачі всередині, тобто в центрі стільника користуються всіма доступними підканалами. Користувачі, що знаходяться на краю стільника, працюють з частотами Reuse-3 (надалі буде позначатися як R3), тоді як користувачі в центрі стільника працюють з частотами Reuse-1 (R1). У процесі передачі кадру користувачі R3 згруповані у зону R3, яка відокремлена у часі від зони R1. Перевага методу FFR полягає у наданні користувачам на краю стільників кращої якості сигналу, за рахунок фізичного відокремлення від джерела перешкод. Покращена якість сигналу також надасть більш високу пропускну здатність користувачів на краю стільника. Однак це досягається за рахунок менш ефективного спектрального розподілу ресурсів. Таким чином, важливо проаналізувати, чи переважають переваги над недоліками.

Структура кадру має часовий та частотний розподіл ресурсів для зон R1 та R3. Заголовок управління кадрами та протокол доступу до середовища (FCH/MAP), надає інформацію про розподіл підканалів, яка дозволяє користувачам визначати місцезнаходження свого блоку ресурсу в межах кадру. Крім того, FCH/MAP здійснює передачу сигналів, таку як перемикання зональних інформаційних елементів, які вказують точки перемикання між зонами R1 та R3.

У стандарті WiMAX, як було зазначено вище, використовують дуплексний часовий поділ каналів (TDD) [6]. У TDD, передачу інформації у висхідному (UL) і низхідному (DL) каналах виконують послідовно через відрізки часу, які відокремлені один від одного захисним інтервалом. Таким чином, кадр, що передається, розділений на два субкадра. Крім того, в межах субкадра існують зони для частоти R1 та R3 (так звані зони R1 та R3). Вони мають спільні межі для всіх стільників, що працюють в мережі, таким чином, міжзональні перешкоди між R1 та R3 виключені.

Однак можливі динамічні зміни меж зон, залежно від переміщення користувачів та навантажень у стільнику. Один з ключових аспектів методу FFR: своєчасне перемикання із зони в зону та призначення абоненту зони R1 або R3, яке має відповідати якості сигналу та змін розташування МС. Базова станція (БС) повинна отримувати регулярну сигнальну послілку від мобільної станція (МС), на основі якої БС вирішує, в яку із зон надати R1 або R3. При швидкому русі МС швидкість оновлення обробки сигнальних послілок має бути більшою.

Надання зон базовою станцією БС для конкретного користувача може бути засноване на декількох параметрах. Ці параметри мають бути визначені із сигналів послілок від МС до БС [7]. Як впливає зі сказаного, принцип FFR суттєвіший, для вирішення проблем, пов'язаних, із співканальними перешкодами користувачів, що знаходяться на краю стільника. Отже, параметри призначення зон, розглядаються від БС до МС. БС працює одночасно з обома зонами, як з R1, так і R3, налаштовуючи поріг переходу із зони в зону. Однак, головний недолік принципу призначення зон полягає в тому, що якість сигналу не обов'язково корелює з відстанню від БС через ефекти, відомі як швидкі завмирання і затінення.

У процесі оцінки стандарту WiMAX одним із найважливіших параметрів є охоплення і досить хороша якість сигналу, який описує відсоток користувачів, які можуть бути обслужені.

Проведені дослідження комбінованого планування стільників. У порівнянні з іншими принципами планування Reuse1 і Reuse3 [8] були отримані такі результати: пропускна здатність FFR виявилось краще на 18% порівняно з Reuse3, але гірше на 13% ніж Reuse1.

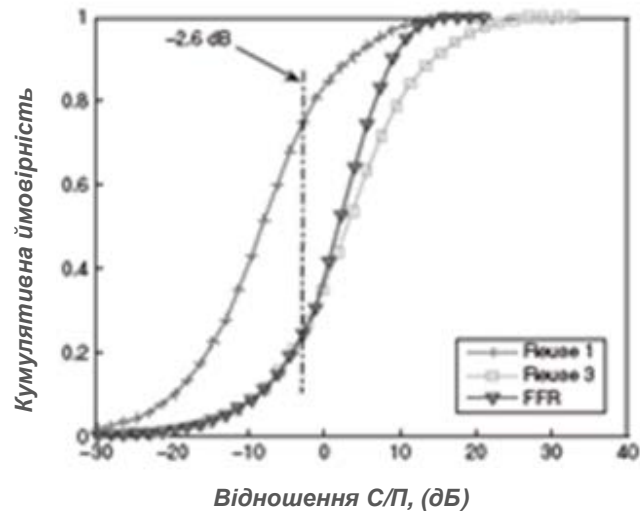


Рисунок 2.8 - Характеристика користувачів, що обслуговуються на відстані від БС до 300 м

Також були досліджені покриття та якість сигналу, що приймається на різних ділянках стільника. У центрі стільника на відстані, що не перевищує 300 метрів від БС (рис. 2.8) отримані наступні результати: при Reuse1 число користувачів, які можуть бути обслужені, досягло 76%. Однак при FFR, кількість користувачів, що обслуговуються в центрі стільника збільшується до 96%. Порівняння з Reuse3 не доцільно, оскільки пропускна здатність набагато нижча ніж при Reuse1 та FFR.

Розглянемо можливу кількість користувачів на краю стільників. Результати, отримані на краях стільників такі, що при Reuse1 число користувачів, що обслуговуються, досягає тільки 25%, у випадку FFR воно досягло 76%, що є досить високим показником. Рисунок 2.9 ілюструє результати, отримані на краю стільника, на відстані від 800 до 1000 м.



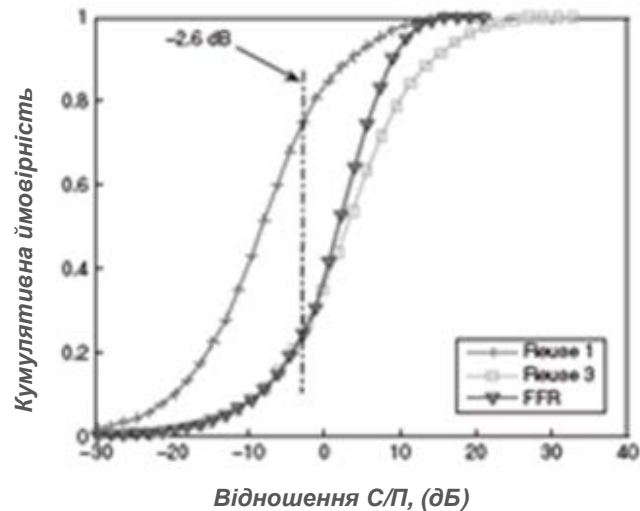


Рисунок 2.9 - Характеристика користувачів, що обслуговуються на відстані 800 - 1000 м від БС

Результати досить переконливі - FFR є оптимальним методом для планування мереж WiMAX.

### 2.3 Характеристика каналу зв'язку

Визначення параметрів каналу має ключове значення при розробці будь-якої системи зв'язку. Властивості каналу, спотворення і перешкоди, що вносяться, а також допустима ширина спектра переданого сигналу визначають максимальну швидкість передачі при заданій якості. Отже, маємо завдання визначити параметри каналу передачі у цій системі.

Розглянемо основні поняття при поширенні радіохвиль.

Енергія радіосигналу від точкового випромінювача поширюється сферично, рисунок 2.10. Прийнятий сигнал МС від передавальної антени БС на відстані  $d$  обернено пропорційний площі сфери.

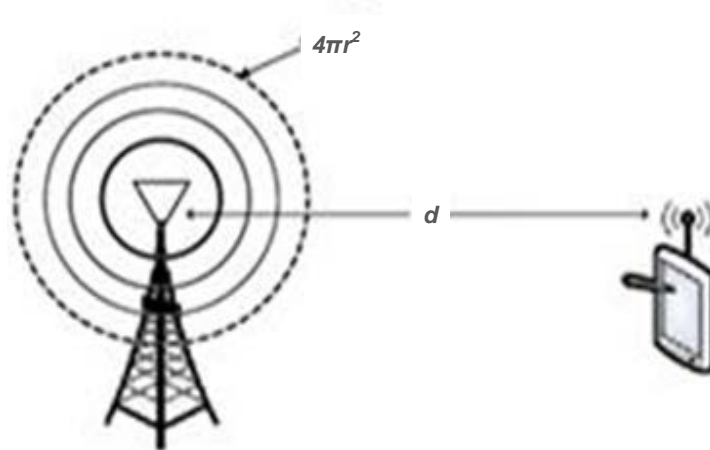


Рисунок 2.10 - Розповсюдження радіосигналу від точкового випромінювача

Втрати на трасі (path loss) – визначаються як будь-яке погіршення або ослаблення сигналу при його поширенні та можуть характеризуватись двома окремими параметрами: середні втрати на трасі та завмирання.

Рівень сигналу на вході приймача при прямолінійному поширенні у відкритому просторі при однопроменевій моделі [9]:

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2 G_t G_r}{(4\pi d)^2}, \quad (2.13)$$

де  $P_r$  - потужність сигналу, що приймається,  $P_t$  - потужність передавача базової станції,  $\lambda$  - довжина хвилі.  $G$  - коефіцієнт підсилення передавальної та приймальної антени.

Але в реальних умовах проходження сигналу обумовлено тим, що на шляху виникає безліч перешкод. В результаті перевідбиття від землі та інших об'єктів збільшується шлях проходження сигналу. У таких випадках фаза хвилі на приймальній антені буде відрізнятись (в межах від 0 до  $\pm\pi$ ) від фази прямого сигналу.

Потрібно враховувати три основні способи поширення радіохвиль:

- відбиття – має місце при падінні хвилі на об'єкти з розмірами набагато більшими за довжину хвилі. Спостерігаються, наприклад, відбиття від землі, стін будівель тощо;

- дифракція – явище виникнення вторинних хвиль під час падіння радіохвилі на перешкоду з гострими краями. Дифракцією обумовлено наявність поля за перешкодами у зоні геометричної тіні. На високих частотах дифракція, як і відбиток, істотно залежить від геометрії об'єкта, а також від частоти амплітуди, фази хвилі та поляризації поля;
- розсіювання – має місце при поширенні хвилі в середовищі з дрібними об'єктами (розміри менші за довжину хвилі).

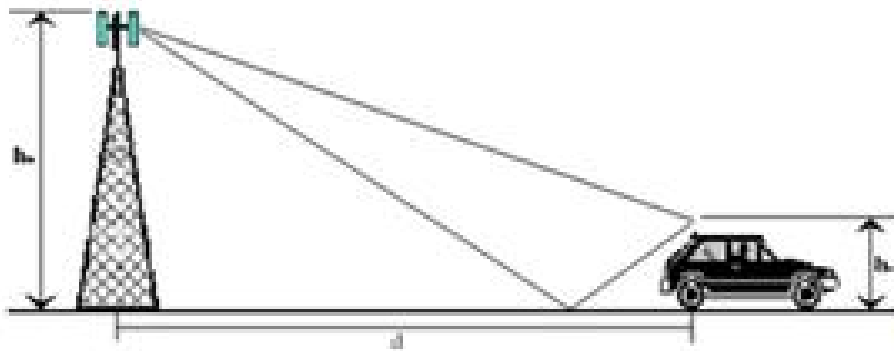


Рисунок 2.11 - Двопроменеве поширення радіосигналу.

Під час розгляду двопроменевої моделі поширення радіосигналу, рис. 2.11, (наявність прямого променя та відбитого) має місце така залежність [14]:

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r h_t^2 h_r^2}{(d)^4}. \quad (2.14)$$

У даному випадку велику роль грає висота підвісу антени  $h$  (у формулі дві висоти підвісу – для передавальної антени та приймальної). Чим вище знаходяться антени, тим краще. Довжина хвилі зникла з формули. Залежність потужності від відстані стає  $(d)^4$  (обернена залежність), тому втрати енергії зі збільшенням відстані стають значнішими порівняно з однопроменевим поширенням.

Для того, щоб узагальнити всі різноманітні параметри навколишнього середовища, використовують емпіричну формулу втрат на трасі [14]:

$$P_r = P_t P_0 \left( \frac{d_0}{d} \right)^\alpha. \quad (2.15)$$

Формула 2.15 узагальнює різні ефекти в 2-х параметрах: експонента втрат на трасі та втрати через відстань, які зазвичай приводяться до 1 метра.

#### 2.4 Висновки до розділу

Виконано аналіз та кластерну побудову мережі WiMAX з урахуванням реалізації принципу повторного використання частот. Показано, що планування стільників є складне завдання, в ході вирішення якого в сучасних системах проводять польові вимірювання за допомогою спеціалізованого обладнання.

Якщо при розробці системи не враховувати кількість стільників у кластері, їх топографічне розташування і розподіл каналів, то в такій системі спостерігатиметься істотний вплив один на одного каналів у різних стільниках, що використовують одні й ті самі несущі частоти – будуть мати місце співканальні завади. Їх рівень залежить від розмірності кластера. З метою ослаблення співканальних завад необхідно збільшувати кількість стільників у кластері, або використовувати секторні антени, або виконати комбіноване планування мережі на основі комбінованого повторного використання частот на границях стільників (FFR).

## 3 ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ WiMAX ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПОСЛУГ ІНТЕРНЕТ-ДОСТУПУ

### 3.1 Вибір характеристик радіоінтерфейсу

Базова станція WiMAX є модульним рішенням, яке може при необхідності доповнюватися різними блоками, наприклад, модулями для зв'язку з магістральною мережею провайдера. У мінімальній конфігурації встановлюється модуль радіоінтерфейсу та модуль з'єднання з провідною мережею.

При виборі устаткування WiMAX крім його технічних показників і ціни важливе значення має діапазон робочих частот. Найперспективнішими з погляду майбутнього розвитку технології WiMAX є діапазони в районі 2,4, 3,5 та 5,6 ГГц [16].

Обладнання повинне проводитися спеціалізованою компанією, яка має досвід розробки та виробництва бездротового обладнання, що є деякою гарантією якості.

Технічні характеристики обладнання, що надаються виробником, повинні бути достатньо повними, щоб по них можна було зробити висновок про його можливості.

Подання таких характеристик говорить про професіоналізм співробітників і певною мірою гарантує, що йдеться про оригінальний продукт, а не перепродаж маловідомого бренду під торговою маркою продавця.

Бажано, щоб базова станція мала можливість секторування та поетапного нарощування продуктивності, для чого вона повинна мати можливість підключення зовнішньої антени. Тоді на першому етапі достатньо однієї базової станції з антеною з круговою характеристикою спрямованості, на наступному - двох, з антенами з шириною діаграми 180°, і так далі.

Устаткування має бути сертифіковано. Має бути можливість отримання дозволу використання частот в діапазонах, використовуваних устаткуванням.

Система повинна мати прийнятну вартість, причому в першу чергу важлива мінімальна вартість абонентського обладнання.

Принцип дії Mobile WiMAX ідентичний мережам стільникового зв'язку: кілька розташованих базових станцій Mobile WiMAX утворюють стільник, стільники об'єднуються між собою в кластери і забезпечують безперервне покриття цілого міста. Устаткування Mobile WiMAX забезпечує більшу швидкість передачі даних, порівняно зі стільниковими мережами. Її можна порівняти зі швидкістю доступу в провідних мережах. Основні характеристики WiMAX пристрою [16]:

- дальність дії - до 60 км;
- максимальна швидкість передачі даних до 70 Мбіт/с на сектор однієї базової станції;
- робоча частота 2-11 ГГц;
- спектральна ефективність до 5 біт/сек/Гц;
- покриття: розширені можливості роботи поза прямою видимістю значно покращують якість покриття зони, що обслуговується;
- швидкість доступу в інтернет в межах сектора базової станції на клієнтських пристроях - до 10 Мбіт/с;
- зона дії одного сектора базової станції в умовах щільної забудови – від 800 до 1500 метрів;
- мобільність: миттєве перемикання клієнтського Mobile WiMAX обладнання між базовими станціями при швидкості руху мобільного абонента до 120 км/год.

### 3.2 Розрахунок частотних каналів

Загальна кількість частотних каналів, виділених для розгортки мережі зв'язку в даному місці, визначається за формулою [7]:

$$N_K = \frac{\Delta F}{F_K} = \frac{2.4 \cdot 10^6}{1500} = 128, \quad (3.1)$$

де  $\Delta F$  – частотний спектр;  $F_k$  – смуга частот, зайнята одним частотним каналом системи (частотне рознесення між каналами).

### 3.3 Визначення розмірності кластера

Для визначення необхідної розмірності кластера при заданих значеннях  $p_0$  і  $p_t$  використовують співвідношення [7, 8]

$$p(C) = \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_1}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \right] \cdot 100, \quad (3.2)$$

де  $p(C)$  – відсоток часу, протягом якого співвідношення (потужність сигналу)/(потужність перешкоди) на вході приймача MS перебуватиме нижче захисного відношення  $p_0$ .

Інтеграл є табульованою Q-функцією [8, 9]:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_1}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx. \quad (3.3)$$

Нижня межа цього інтегралу має вигляд [9]:

$$X_1 = \frac{10 \lg\left(\frac{1}{\beta_e}\right) - \rho_0}{\alpha_p}, \quad (3.4)$$

де  $\rho_0$  та  $\alpha_p$  виражені в дБ;

$\beta_e$  – визначається співвідношенням:

$$\beta_e = \left( \sum_{i=1}^M \beta_i \right) \exp\left[ \frac{\gamma^2(\alpha^2 - \alpha_e^2)}{2} \right]. \quad (3.5)$$

У свою чергу значення  $\alpha_p$  та  $\alpha_e$  визначаються за формулами [9]:

$$\alpha_p^2 = \alpha^2 + \alpha_e^2, \quad (3.6)$$

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left\{ 1 + [\exp(\gamma^2 \alpha^2) - 1] \frac{\sum_{i=1}^M \beta_i^2}{(\sum_{i=1}^M \beta_i)^2} \right\}. \quad (3.7)$$

$\alpha$  – параметр, який визначає діапазон випадкових флуктуацій рівня сигналу у точці прийому.

Коефіцієнт  $\beta_i$  є медіанним значенням загасання радіохвиль на  $i$ -му напрямку збільшення перешкоди. Ці коефіцієнти обернено пропорційні чверті ступеня відстані до джерела перешкоди. Величина  $M$  означає кількість базових станцій, які «заважають», розташованих у сусідніх кластерах.

Спочатку розглянемо випадок для антени з круговою ХС, де

$$\varphi = 360^0, N_S = 1, \dots, i \beta_1 = \beta_2 = (q - 1)^{-4}, \beta_3 = \beta_4 = q^{-4},$$

$$\beta_5 = \beta_6 = (q + 1)^4,$$

де  $N_S$  – число секторів.

Виберемо значення  $C=3$ .

$$\gamma = 0,1 \ln 10 = 0,23.$$

$$q = \sqrt{3 \cdot C}. \quad (3.8)$$

$$q = \sqrt{3 \cdot 3} = 3.$$

Визначимо  $\alpha_e^2$ .

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{0,23^2} \ln \left\{ 1 + [\exp(0,23^2 \cdot 5^2) - 1] \frac{\sum_{i=1}^6 \beta_i^2}{(\sum_{i=1}^6 \beta_i)^2} \right\} = 16,364.$$

Обчисливши квадратний корінь, отримуємо:

$$\alpha_e = \sqrt{16,364} = 4,045 \text{ дБ.}$$

Звідси випливає:

$$\alpha_p = \sqrt{5^2 + 4,045^2} = 6,43 \text{ дБ.}$$

$$\beta_e = (\sum_{i=1}^6 \beta_i) \exp \left[ \frac{0,23^2 (5^2 - 4,045^2)}{2} \right] = 643,908 \text{ дБ.}$$



Тепер обчислимо нижню межу Q-функції:

$$X_1 = \frac{10 \lg \left( \frac{1}{643,908} \right) - 10}{6,431} = -5,922.$$

Цьому значенню табличного інтеграла відповідає величина, що дорівнює  $1 - 0,161 \cdot 10^{-8}$ . Це приблизно одиниця. Розрахунок за формулою (3.2) дає:

$$p(C) \approx 1 \cdot 100 = 100.$$

Значення явно більше  $\frac{p_c}{p_{ш}}(\rho_0)$ , яке із завдання дорівнює 10. Звідси випливає, що даний тип антени і обране значення кластера не підходить для зазначеного стандарту.

Тепер розглянемо випадок для спрямованої антени, яка має кут діаграми спрямованості  $\varphi = 120^\circ$ ,  $N_S=3$ ,  $M=2$ .

$$\beta_1 = (q + 0,7)^{-4}, \beta_2 = q^{-4}.$$

Виберемо значення  $C=4$ .

$$q = \sqrt{3 \cdot 4} = 3,464.$$

Визначимо  $\alpha_e^2$ .

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{0,23^2} \ln \left\{ 1 + [\exp(0,23^2 \cdot 5^2) - 1] \frac{\sum_{i=1}^2 \beta_i^2}{(\sum_{i=1}^2 \beta_i)^2} \right\} = 17,682.$$

Обчисливши квадратний корінь, отримуємо:

$$\alpha_e = \sqrt{17,682} = 4,25 \text{ дБ.}$$

Звідси випливає:

$$\alpha_p = \sqrt{5^2 + 4,25^2} = 6,533 \text{ дБ.}$$

$$\beta_e = (\sum_{i=1}^2 \beta_i) \exp \left[ \frac{0,23^2(5^2 - 4,25^2)}{2} \right] = 0,012 \text{ дБ.}$$

Тепер обчислимо нижню межу Q-функції:

$$X_1 = \frac{10 \lg \left( \frac{1}{0,012} \right) - 10}{6,533} = 1,384.$$

Цьому значенню табличного інтеграла відповідає 0,0838. Розрахунок за формулою (3.2) дає:

$$p(C) = 0,0838 \cdot 100 = 8,38.$$

Отримане значення дещо менше  $\frac{p_c}{p_{ш}}(\rho_0)$ , тому робимо висновок, що даний тип антени є найбільш оптимальним.

### 3.4 Розрахунок частотних каналів для обслуговування абонентів БС

Число частотних каналів, які використовуються для обслуговування абонентів в одному секторі, визначається за формулою:

$$n_S = \left( \frac{N_k}{C \cdot N_S} \right). \quad (3.9)$$

$$n_S = \left( \frac{128}{4 \cdot 3} \right) = 10.$$

де  $N_S$  – число секторів.

### 3.5 Розрахунок допустимого навантаження БС

Величина допустимого навантаження в одному секторі визначається співвідношенням [10]:

$$A = n_0 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( P_B \sqrt{\pi \cdot \frac{n_0}{2}} \right) \frac{1}{n_0}} \right] \quad (3.10)$$

за умови, що

$$P_B \leq \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot n_0}}, \quad (3.11)$$

де  $n_0 = n_s \cdot n_a$ ;  $n_a$  – число абонентів, які можуть одночасно використовувати один частотний радіоканал. У даному випадку  $n_a = 1$ , оскільки використовується аналоговий стандарт.

$$\sqrt{\frac{2}{\pi \cdot n_0}} = 0,252.$$

Підкорінний вираз більший, ніж величина  $P_B$ , оскільки  $0,11 < 0,252$ .

$$A = 10 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( 0,11 \sqrt{\pi \cdot \frac{10}{2}} \right) \frac{1}{10}} \right] = 7,117 \text{ Ерл.}$$

### 3.6 Розрахунок числа абонентів, які обслуговуються однією БС

При заданій активності одного абонента в час найбільшого навантаження можна розрахувати число абонентів, які обслуговуються однією БС за формулою [11, 12]:

$$N_{aBTS} = \left( \frac{N_a}{N_{BTS}} \right), \quad (3.12)$$

$$N_{aBTS} = \left( \frac{7,17}{0,026} \right) 3 = 828.$$

### 3.7 Розрахунок кількості БС

Необхідна кількість базових станцій на заданій території обслуговування визначається співвідношенням [13]:

$$N_{BTS} = \left( \frac{N_a}{N_{aBTS}} \right). \quad (3.13)$$

$$N_{BTS} = \left( \frac{3600}{828} \right) = 13.$$

де  $N_a$  - задана кількість абонентів, яких обслуговує стільникова мережа зв'язку.

### 3.8 Розрахунок радіуса зони обслуговування БС

Величину радіуса можна визначити за таким виразом [11-13]:

$$R = \sqrt{1,21 \frac{S_0}{\pi \cdot N_{BTS}}}. \quad (3.14)$$

$$R = \sqrt{1,21 \frac{280}{\pi \cdot 13}} = 2.9 \text{ км.}$$

### 3.9 Розрахунок пропускної здатності

Реальна смуга пропускання 20-МГцового каналу стандарту IEEE 802.16e для модуляційної схеми OFDM становить

$$20 \cdot 28 / 25 = 22,4 \text{ МГц} \quad (3.15)$$

Рознесення 1024-х піднесущих розраховується за формулою

$$\Delta f = 22,4 \cdot 10^6 / 1024 = 21,875 \text{ кГц.} \quad (3.16)$$

Визначимо тривалість активної частини символу:

$$T_b = 1/\Delta f. \quad (3.17)$$

$$T_b = 1/21,875 \cdot 10^3 = 45,7 \text{ мкс.}$$

Визначимо тривалість захисного інтервалу.

$$T_g = \delta \cdot T_b. \quad (3.18)$$

$$T_g = 0,125 \cdot 45,7 = 5,7 \text{ мкс.}$$

Тривалість кадру 5 мс. У ньому міститься  $5 \cdot 10^{-3} / 51,4 \cdot 10^{-6} = 96$  символів.

Всі розраховані сигнальні параметри каналу для зручності можна представити у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри пакетів

Параметри	Значення
Смуга (по стандарту), МГц	20
Кількість піднесущих	1024
- для передачі трафіку	720
- пілотні піднесущі	120
- у межах захисного інтервалу	184
Рознесення піднесущих, кГц	21,875
Тривалість перетворення імпульсу, мкс	45,7
Тривалість захисного інтервалу, мкс	5,7
Тривалість символу, мкс	51,4
Всього символів у кадрі	96
Частотний резерв	28/25

При розрахунках швидкостей передачі інформації приймемо до уваги, що у низхідному (DL) субкадрі використовується лише частина з 96 символів, а саме – 72, причому з них 2 відводиться на преамбулу та MAP, тому для передачі трафіку залишається 70. У висхідному субкадрі (UL) використовується 24 символи.

Стандарт WiMAX використовує в окремих ортогональних каналах вісім модуляційних схем. Приведена до одного символу спектральна ефективність

(середнє число інформаційних бітів на символ) та імовірність використання тої чи іншої модуляційної схеми наведена у таблиці 3.2 [16, 17].

Середню швидкість передачі можна визначити, якщо буде розраховано кількість бітів, яка передається в одному DL-субкадрі. При цьому слід врахувати, що середньостатистичне число бітів на один символ становить 2,2 біта. Вище зазначалось, що для передачі трафіку використовується 720 піднесуших і на кожній передається 70 символів. Можна визначити середню кількість бітів, що приходиться на низхідний субкадр.

Таблиця 3.2 – Число бітів на символ для різних модуляційних схем

Смуґа 20 МГц	Модуляційна схема							
	4- FM, 1/2	4- FM, 3/4	16- QAM, 1/2	16- QAM, 3/4	64- QAM, 1/2	64- QAM, 2/3	64- QAM, 3/4	64- QAM, 5/6
Середнє число інф. бітів на символ	1	1,5	2	3	3	4	4,5	5
Імовірність, %	0,15	0,3	0,26	0,12	0,7	0,5	0,3	0,2

$$I_{DL} = k_i \cdot I_D. \quad (3.19)$$

$$I_{DL} = 2,2 \cdot (720 \cdot 70) = 2,2 \cdot 50400 = 110880 \text{ біт.}$$

Отже, середня швидкість передачі в низхідному напрямку [15]:

$$R_{DL} = \frac{I_{DL}}{\tau}, \quad (3.20)$$

де  $\tau$  – тривалість кадра, що становить 5 мс.

$$R_{DL} = \frac{110880}{5 \cdot 10^{-3}} = 22,18 \text{ Мбіт/с.}$$

Остаточна швидкість передачі трафіку буде дещо меншою, оскільки 10-12% каналного ресурсу виділяється для передачі сигналів сигналізації:

$$R_{DL_{\text{ост}}} = 22,18 \cdot 0,9 = 19,96 \text{ Мбіт/с.}$$

Подальші розрахунки враховують реалізацію принципу комбінованого планування мережі. Пропускна здатність в центрі і на краю стільника виявляється різною у зв'язку з тим, що в центрі стільника використовуються всі піднесущі, а на краю тільки їх третина. Крім цього, різна пропускна здатність в центрі і на краю стільника визначається різним типом модуляційних схем. На рисунку 3.1 темна частина стільника демонструє використання схем 16-QAM і 64-QAM, а світла – модуляційної схеми 4ФМ [12].

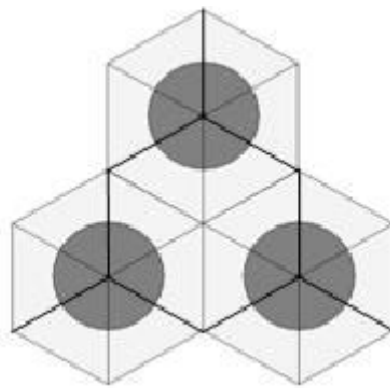


Рисунок 3.1 – Стільники при комбінованому плануванні мережі

Спочатку середня швидкість у центрі стільника. Число біт на символ вже становить 4. Для такої ж смуги пропускання:

$$I_{DL} = 4 \cdot 50400 = 201600 \text{ біт.}$$

Середня швидкість передачі в низхідному напрямку у центрі стільника:

$$R_{DL} = \frac{201600}{5 \cdot 10^{-3}} = 40,3 \text{ Мбіт/с.}$$

На краях стільників використовується третина піднесущих, тобто 240. Число біт на символ тут становить 1,5, отже:

$$I_{DLk} = 1,5 \cdot 240 \cdot 70 = 25200 \text{ біт,}$$

а середня швидкість передачі в низхідному субкадрі на краях стільників

$$R_{DLk} = \frac{25200}{5 \cdot 10^{-3}} = 5,04 \text{ Мбіт/с.}$$

Розрахуємо швидкості передачі для висхідного напрямку для центру та країв стільника. Зауважимо, що у цьому напрямку використовується не 70, а 24 символи для такої ж кількості піднесущих – 720.

Середня швидкість передачі для центру стільника:

$$R_{UL} = \frac{4 \cdot 24 \cdot 720}{5 \cdot 10^{-3}} = \frac{69120}{5 \cdot 10^{-3}} = 13,8 \text{ Мбіт/с}$$

Аналогічно середня швидкість передачі на краях стільника у висхідному напрямку:

$$R_{UL} = \frac{1,5 \cdot 24 \cdot 240}{5 \cdot 10^{-3}} = \frac{8640}{5 \cdot 10^{-3}} = 1,728 \text{ Мбіт/с}$$

### 3.10 Висновки до розділу

Виконано основні розрахунки мережі WiMAX, спрямовані на оптимізацію її параметрів для реалізації послуг інтернет-доступу. При цьому отримано: кількість частотних каналів – 128; розмірність кластера – 3 (можливе застосування лише секторної антени з діаграмою спрямованості  $\varphi = 120^0$ ); число частотних каналів для обслуговування абонентів в одному секторі – 10; допустиме навантаження в одному секторі – до 8 Ерл; кількість абонентів, що обслуговуються однією БС – 828; кількість базових станцій – 13; радіус зони обслуговування однією БС – до 3 км; середні швидкості передачі у низхідних субкадрах: 40 Мбіт/с у центрі стільника і 5 Мбіт/с на краях стільника; середні швидкості передачі у висхідних субкадрах: 14 Мбіт/с у центрі стільника і близько 2 Мбіт/с на краях стільника. При розрахунках було враховано реалізацію принципу комбінованого планування мережі (FFR).



#### 4 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ WiMAX

Інтенсивний розвиток бездротових мереж передачі даних пояснюється необхідністю якісного зв'язку з рухомими та віддаленими абонентами, а також потребою в організації оперативного обміну даними. Відсутність провідних комунікацій дозволяє користувачам мережі більш раціонально використовувати простір, дозволяє бути мобільними і при цьому мати доступ до необхідних для них мережевих послуг та даних на досить високих швидкостях.

В умовах, коли послугами мережі користуються і стаціонарні, і мобільні користувачі постає проблема ефективності колективного використання ресурсів радіоканалу. Основні складнощі при її вирішенні пов'язані з обмеженістю радіоспектру, з впливом радіоперешкод і організацією багатостанційного доступу (МД).

Методи аналізу та оптимізації роботи протоколу IEEE 802.16 важливі через необхідність підвищення його ефективності і продуктивності. Завдання аналізу імовірно-часових характеристик (ІЧХ) протоколів з фіксованими форматами кадрів класу WiMAX не вважаються аналітичними, тобто мають аналітичні рішення лише за умови суттєвих припущень, що спрощують дослідження.

Найбільш поширеним методом розрахунку ІЧХ бездротових систем є імітаційне моделювання [5, 6], а також аналітичні методи, які носять зазвичай імовірнісний характер і будуються на основі понять апарату теорії телетрафіку, ймовірностей та Марківських процесів.

Для розв'язання завдань аналізу та оптимізації було застосовано чисельно-аналітичний метод балансу інтенсивностей навантажень [5], який дозволяє врахувати вплив помилок, часу поширення, величини витрат на керування та інших факторів на показники якості та продуктивності протоколів.

Головна ідея методу полягає у зведенні моделі єдиної багатовимірної черги до еквівалентної суми лінійно незалежних (парціальних) черг за

допомогою еквівалентних законів розподілу часу обслуговування в парціальних чергах. Такий пошук еквівалентних розподілів виконується за допомогою чисельно-аналітичного методу балансу інтенсивностей навантажень. Далі визначаються функціонали для кожної парціальної черги та знаходяться вектори характеристик ГЧХ - QoS для кожної парціальної черги.

#### 4.1 Принципи надання послуг

На MAC-рівні реалізуються функції, пов'язані з формуванням структур даних, що передаються між базовою станцією (БС) та абонентськими станціями (АС), а також управлінням множинним доступом у бездротове середовище. Механізми доступу MAC-рівня також вирішують проблеми забезпечення заданої якості обслуговування QoS різних додатків, що надаються верхніми рівнями [17].

Структура пакетів даних, що формуються на основному підрівні MAC (MAC PDU) наведено на рисунку 4.1.

Спільний MAC-заголовок (6 байт)	Поле даних	Контрольна сума
---------------------------------	------------	-----------------

Рисунок 4.1 – Пакет даних MAC-рівня

Заголовок PDU складається з 6 байт і може бути двох видів - загальний та заголовок запиту на виділення смуги (BR). Якщо пакет містить поле даних, то використовується загальний заголовок, який містить ідентифікатор з'єднання (CID), тип і контрольну суму заголовка, а також інформацію про поле даних (наприклад, довжина пакета).

Передача даних на фізичному рівні здійснюється за допомогою безперервної послідовності кадрів фіксованої довжини. Кожен кадр складається з двох субкадрів - субкадр низхідного (DL - Downlink - від БС до АС) та висхідного (UL - Uplink - від АС до БС) каналів. Стандартом передбачається як частотне (FDD - frequency division duplex), так і часове (TDD — time division

duplex) розділення трафіків висхідного та низхідного каналів. Формат суперкадра при часовому дуплексуванні (TDD) представлений на рисунку 4.2 [19].

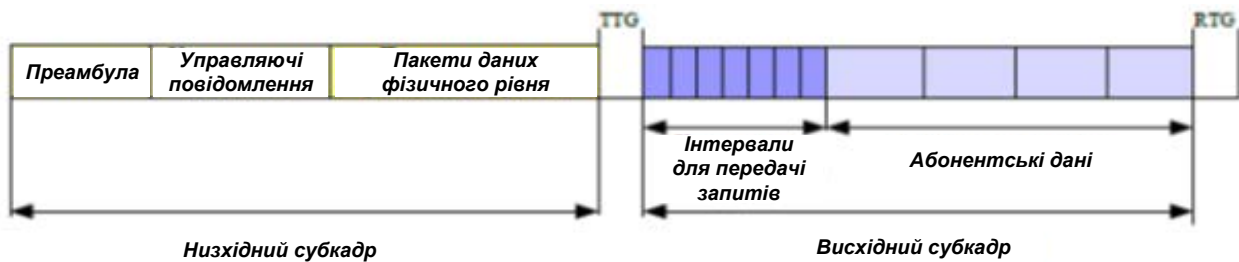


Рисунок 4.2 – Формат субкадра при часовому дуплексуванні TDD

Низхідний субкадр починається з преамбули (синхронізуюча послідовність), за якою передаються ширококомвні повідомлення управління, після яких слідує пакети фізичного рівня, що містять дані для різних АС та службові повідомлення. Пакети в низхідному субкадрі транслуються без інтервалів, тому для забезпечення можливості абонентам відрізнити один пакет від іншого, у полі керуючих повідомлень передаються карти низхідного (DL-MAP) і висхідного (UL-MAP) каналів.

Щонайменше раз на 10 секунд БС передає список профілів пакетів (список параметрів пакетів, включаючи вид модуляції, схему кодування, значення відношення сигнал/шум) у вигляді спеціальних керуючих повідомлень — дескрипторів низхідного та висхідного каналів (DCD/UCD).

БС у висхідному субкадрі для всіх абонентів, які здійснюють передачу, резервує часові інтервали (тайм-слоти), інформація про розподіл яких заноситься в карту висхідного каналу UL-MAP.

Головний принцип надання доступу до ресурсів середовища - це виділення каналу на вимогу (DAMA - Demand Assigned Multiple Access). Стандартом передбачено два види доступу - вільний і контрольований. У першому випадку станції на конкурентній основі у спеціально виділеному інтервалі передають свої запити ресурсів, відповідно, можливі колізії,

спричинені одночасною передачею запитів декількома АС. Механізм боротьби з колізіями в цьому випадку аналогічний механізму у стандарті IEEE 802.11.

Тут ми детально розглянемо систему WiMAX з контрольованим доступом, при якому БС опитує (polling) абонентські станції, визначаючи їх потреби у ресурсах середовища передачі даних.

#### 4.2 Розрахункова модель протоколу WiMAX

Наведемо характеристики часу затримки системи WiMax у висхідному каналі, що отримані для бездротового режиму з каналом 25 МГц і швидкістю фізичного потоку даних 40 Мбіт/с (модуляція QPSK). Прийнята до розгляду система з топологією «точка-багато точок» (БС – абонентські станції). Співвідношення пропускної здатності між низхідним і висхідним субкадрами у кадрі прийнято рівним 1: 1.

На рисунку 4.3 у вигляді просторово-часової діаграми представлена модель протоколу WiMax, що використовувалась для розрахунку характеристик затримки пакетів даних. Час поширення прийнято меншим, ніж тривалість одного кадру. У активної абонентської станції з'являється пакет даних для передачі. Абонентська станція повідомляє про це БС із запитом смуги пропускання у виділеному для неї інтервалі у висхідному субкадрі. Розмір кадру в стандарті IEEE 802.16 фіксований і його тривалість може складати 0,5; 1 і 2 мс. Якщо спостерігається велике навантаження на мережу, що створене іншими абонентами мережі, може виникнути ситуація, коли БС не виділить абоненту інтервал для передачі даних у найближчому кадрі (ситуація відображена на рисунку 4.3). У цьому випадку АС надсилає повторний запит, у відповідь на який БС повідомляє їй (у повідомленні UL-map), з якого моменту вона може передати свій пакет [16, 19].

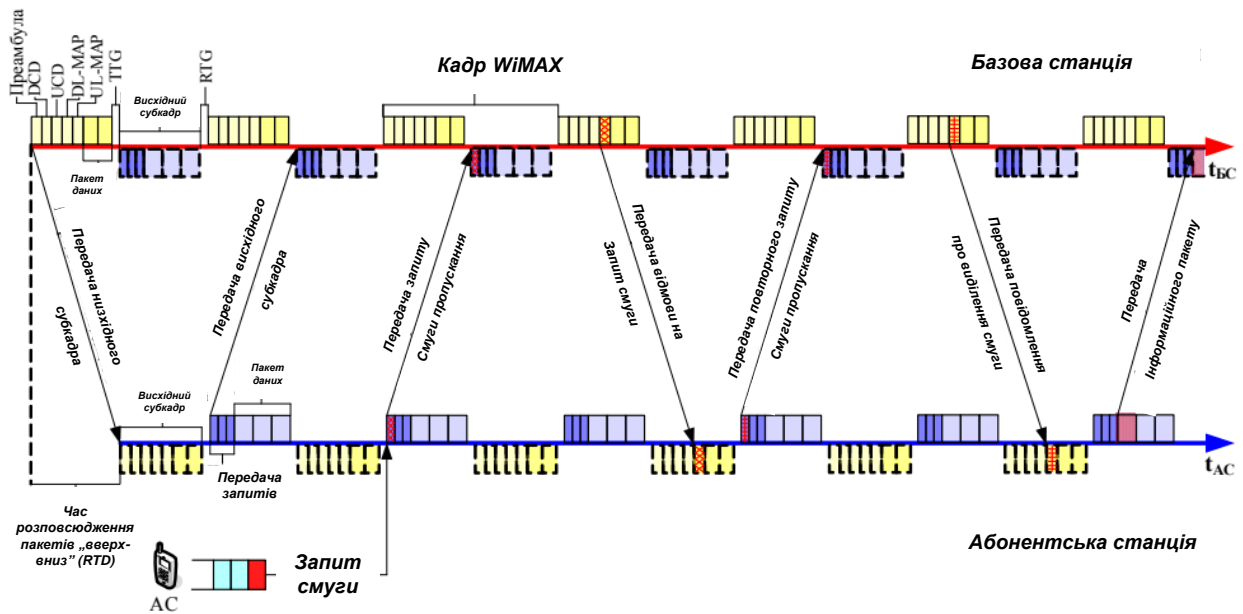


Рисунок 4.3 – Просторово-часова діаграма стандарту

З точки зору аналізу системи WiMax найбільше важливі характеристики продуктивності є характеристики часу доставки абонентських даних, оскільки саме цей параметр відображає ефективність роботи мережі. Розглянемо залежність часу доставки пакетів, від інтенсивності вхідного навантаження, у функції зміни числа пакетів абонентських даних у висхідному субкадрі (взято невеликий час поширення, який менше ніж тривалість кадра), а також при зміні величини витрат на передачу одного запиту смуги пропускання, яка відповідно до стандарту становить 6 байт (запит пропускну здатності).

Для обчислення характеристик розмір пакету абонентських даних був прийнятий рівним 1024 біти, а кількість активних абонентів була встановлена рівною 128. Основний інтерес перш за все був прикутий до впливу розміру кадру (зміна кількості інформаційних пакетів від абонентів та зміна тривалості запиту смуги пропускання  $BR$ ) на характеристики затримки за умови зміни вхідного навантаження. Для простоти в розрахунках не враховувався вплив помилок. Шуми у каналі, що ведуть до помилок і, відповідно, до повторної передачі пакетів, привели б до значної деградації характеристик часу доставки, особливо із збільшенням часу поширення сигналу.

### 4.3 Чисельний аналіз ефективності

На рисунку 4.4 представлені характеристики часу затримки пакетів, що передаються від абонентів, що побудовані в залежності від інтенсивності вхідного нормованого навантаження при зміні кількості цих пакетів  $J$ . Очевидно, що при збільшенні кількості інформаційних тактів, час початкової затримки зростає (за рахунок збільшення тривалості суперкадру WiMAX). Зростає і пропускна здатність за рахунок зміни співвідношення кількості службових та інформаційних тактів. В даному випадку вважається, що перешкод у каналі немає, і пропускна здатність досягається за рахунок збільшення ймовірності переповнення кадру при збільшенні вхідного навантаження та нестачі слотів для передачі всіх даних, наявних у абонентів [16].

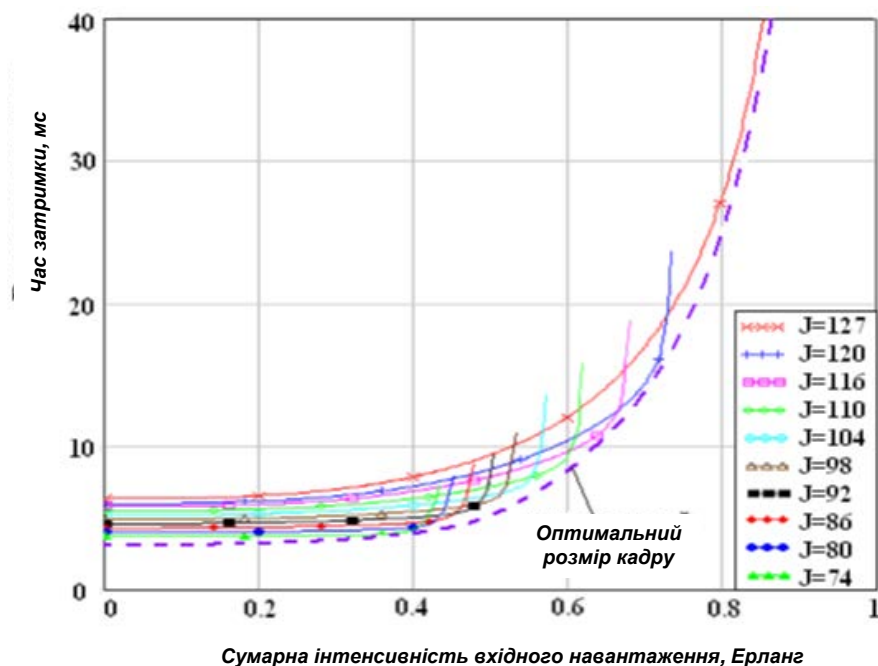


Рисунок 4.4 - Залежність часу затримки пакетів у висхідному каналі від інтенсивності вхідного навантаження при зміні кількості пакетів даних

Аналізуючи характеристики, наведені на рис.4.4, нескладно зауважити, що збільшення інтенсивності вхідного навантаження вимагає динамічної

адаптації формату кадру, збільшення кількості інформаційних тактів. Пунктирною огинаючою лінією на рисунку відображена характеристика саме такого кадру, який динамічно оптимізований під навантаження. Передбачені стандартом IEEE 802.16 три формати кадру (0,5; 1; 2 мс), очевидно, не будуть оптимальними у всьому діапазоні навантажень, а це означає, що система WiMAX працює недостатньо ефективно, використовує не всі свої ресурси через те, що на MAC-рівні не передбачено адаптацію розміру кадру під навантаження абонентів. Таким чином, залишається актуальною задача оптимізації характеристик, яка полягає в знаходженні кращого співвідношення інтенсивності вхідного навантаження та формату кадру.

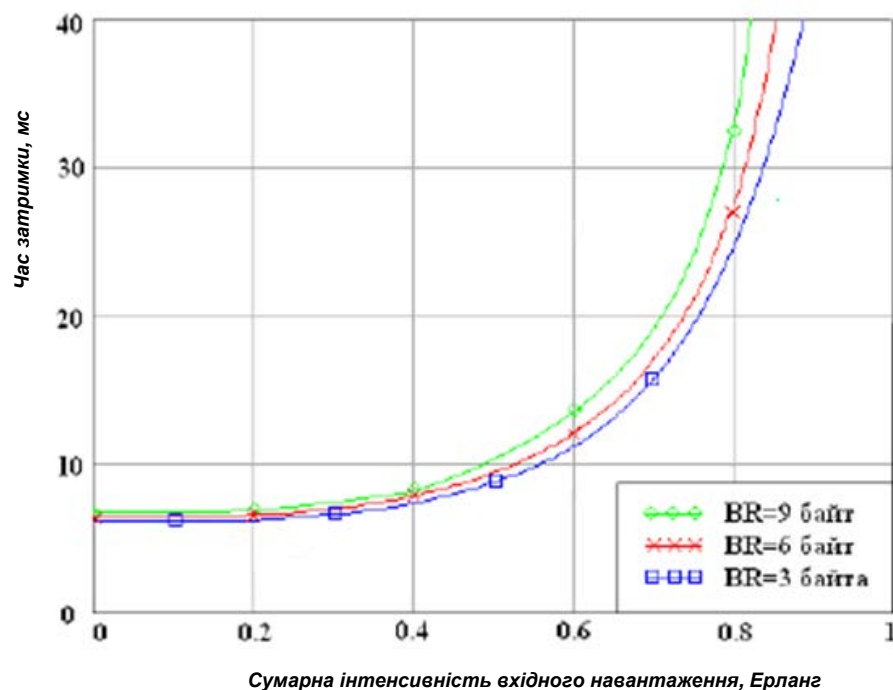


Рисунок 4.5 - Залежність часу затримки пакетів у висхідному каналі від інтенсивності вхідного навантаження при зміні розміру запити смуги пропускання BR

Ще один спосіб підвищити пропускну спроможність протоколу WiMAX, а, відповідно, і його ефективність - це зменшити витрати на управління доступом. Величина запити смуги пропускання (BR) за стандартом [4] становить 6 байт для кожної абонентської станції.

На рисунку 4.5 представлені залежності часу затримки від інтенсивності вхідного навантаження при зміні розміру запиту смуги пропускання. Графіки підтверджують дають логічний висновок у тому, що зменшення витрат на керування доступом призводить до покращення характеристик затримки за рахунок зниження часу початкової затримки (через зменшення розміру кадру) та збільшення пропускну здатності (завдяки тому, що частка абонентських даних у кадрі збільшується). Чисельний аналіз показує, що в залежності від того, скільки тактів у кадр виділяється під передачу інформаційних пакетів, зменшення розміру запиту смуги пропускання BR з 6 до 3 байт покращує пропускну спроможність на 2-11%.

#### 4.4 Висновки до розділу

Стандарт IEEE 802.16, що лежить у основі WiMAX, продовжує розвиватися і удосконалюватися, тому актуальності набуває вирішення завдань підвищення ефективності його функціонування. У самому стандарті закладена така можливість, оскільки стандартом зарезервовано 256 типів керуючих повідомлень, а використовується тільки 48. Однак для суттєвого підвищення ефективності застосування нових керуючих команд буде недостатньо. Необхідні принципові зміни на MAC-рівні.

У роботі наведені імовірно-часові характеристики протоколу WiMAX з фіксованим форматом кадру, отримані за допомогою чисельно-аналітичного методу балансу інтенсивностей навантажень, які відображають деякі можливості для підвищення ефективності цього протоколу. Залежність часу затримки від інтенсивності вхідного навантаження при зміні числа тактів, відведених під абонентські дані, демонструє необхідність динамічної адаптації формату кадру в процесі зміни навантаження. Аналогічна залежність при зміні розміру керуючих пакетів також показує можливість збільшення пропускну спроможності каналу за рахунок зменшення цього розміру (це можливо при використанні більш ефективних методів множинного доступу).



## 5 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ WiMAX

Структурна схема імітаційного моделювання системи широкосмугового доступу WiMAX наведена на рисунку 5.1. Імітувалися реальні умови. Для визначення продуктивності системи моделювання проводилося при різних сценаріях впливу загальних параметрів.

На якість функціонування системи WiMAX впливають коефіцієнт кодування, тип застосованої модуляційної схеми, схема передачі по радіоканалу (SISO/MIMO), швидкість пересування абонентського терміналу, застосування допоміжних технологій (AMC) [16].

Результати імітаційного моделювання представлені у вигляді залежності коефіцієнта помилок (BER) від співвідношення енергії одного біта  $E_b$  сигналу до спектральної щільності потужності шуму  $N_0$  в каналі передачі. Така залежність є найбільш зручною і наглядною з точки зору аналізу якості надання послуг.

При моделюванні використовувалися такі параметри каналу: частота у низхідному напрямку - 2 ГГц; пропускна здатність каналу - 20 МГц; коефіцієнт довжини циклічного префіксу -  $G = 1/16$ , що відповідає невеликій затримці поширення сигналу; тип модуляції і коефіцієнт кодування відповідають режиму AMC3. Параметри моделювання:

- зупинка моделювання - при досягненні 5 000 прийнятих помилкових біт;
- зупинка моделювання - при досягненні  $1 \cdot 10^6$  прийнятих біт;
- граничні значення співвідношення  $E_b/N_0$  - від -5 до 30 дБ з кроком 1 дБ.

За результатами моделювання виконувався аналіз впливу коефіцієнта кодування, оскільки алгоритми згорткового кодування суттєво залежать від якості каналу. При незначних завмираннях і шумах помилкові біти в каналі практично не виникають, тому можливо використовувати більш високі коефіцієнти кодування.

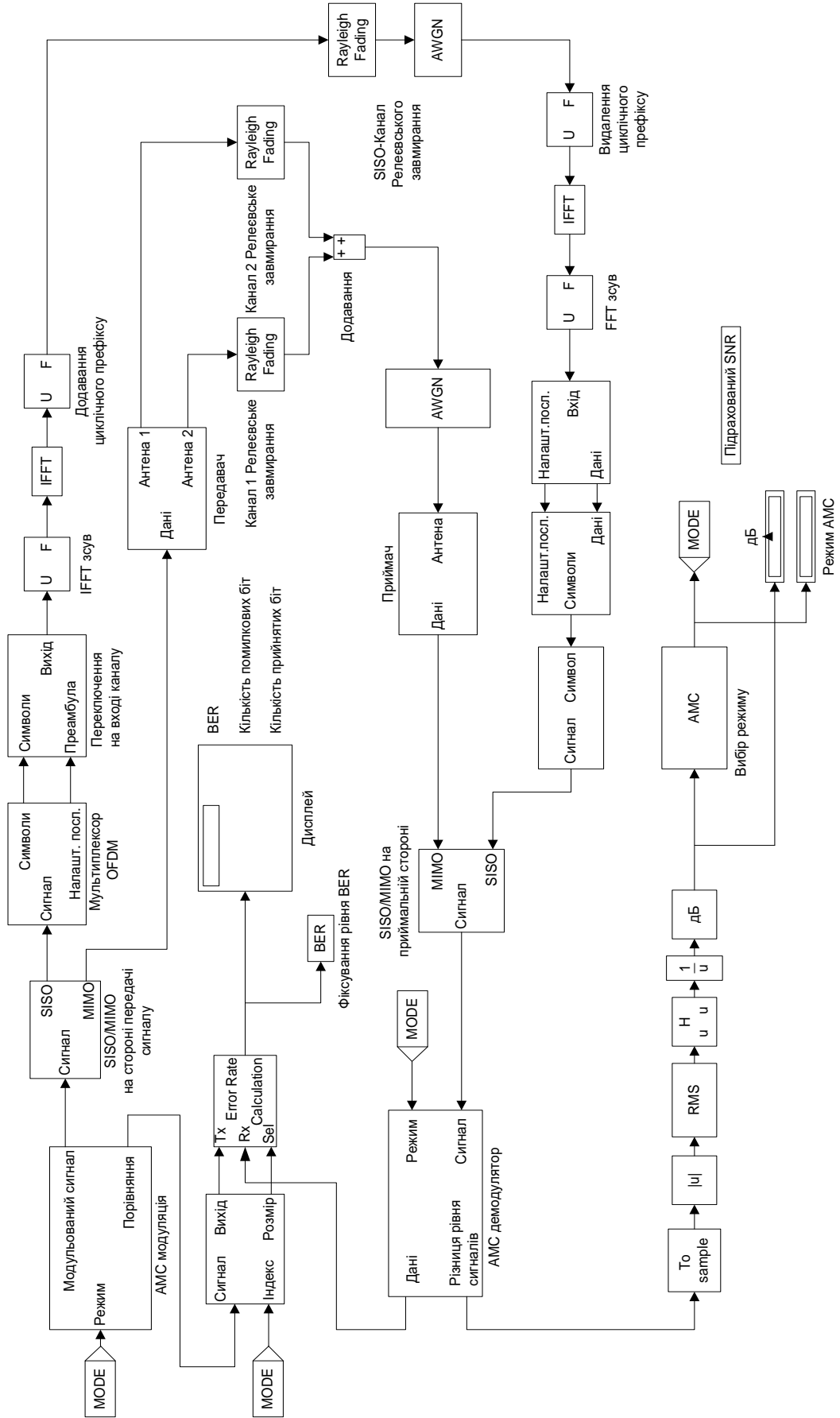


Рисунок 5.1 – Модель системи стандарту 802.16

### 5.1 Оцінка впливу модуляційної схеми

Специфікацією стандарту WiMAX визначено сім режимів роботи, які відповідають різним модуляційним схемам та трьом коефіцієнтам кодування: 1/2, 2/3, 3/4. В таблиці 5.1 наведено схеми модуляції та коефіцієнти кодування [14-16].

Таблиця 5.1 – Схеми модуляції і коефіцієнти кодування

Режим модуляції і кодування	Схема модуляції	Коефіцієнт кодування
AMC1	2-PAM	1/2
AMC2	4-QAM	1/2
AMC3	4-QAM	3/4
AMC4	16-QAM	1/2
AMC5	16-QAM	3/4
AMC6	64-QAM	2/3
AMC7	64-QAM	3/4

Аналіз моделювання показує, що зниження якості радіоканалу приводить до різкого зниження імовірності передачі. Рівень BER порядку  $10^{-4}$ , який може бути прийнятним для роботи, досягається лише при співвідношенні  $E_b/N_0$  не менше 22 дБ; для досягнення гарантованого детектування потрібно співвідношення близько 30 і більше децибел.

Залежність рівня коефіцієнта бітових помилок при зниженні коефіцієнта кодування наведена на рисунку 5.2. При виборі оптимального коефіцієнта кодування необхідно враховувати не тільки очікувану якість радіоканалу і, відповідно, рівень бітових помилок, а й необхідну інформаційну швидкість. При зниженні коефіцієнта кодування може збільшитися число додаткових біт в контрольній бітовій послідовності, що генерується блоком кодера каналу, що, в

свою чергу, призведе до зниження рівня інформаційних біт в переданому кадрі, зменшивши пропускну здатність каналу.

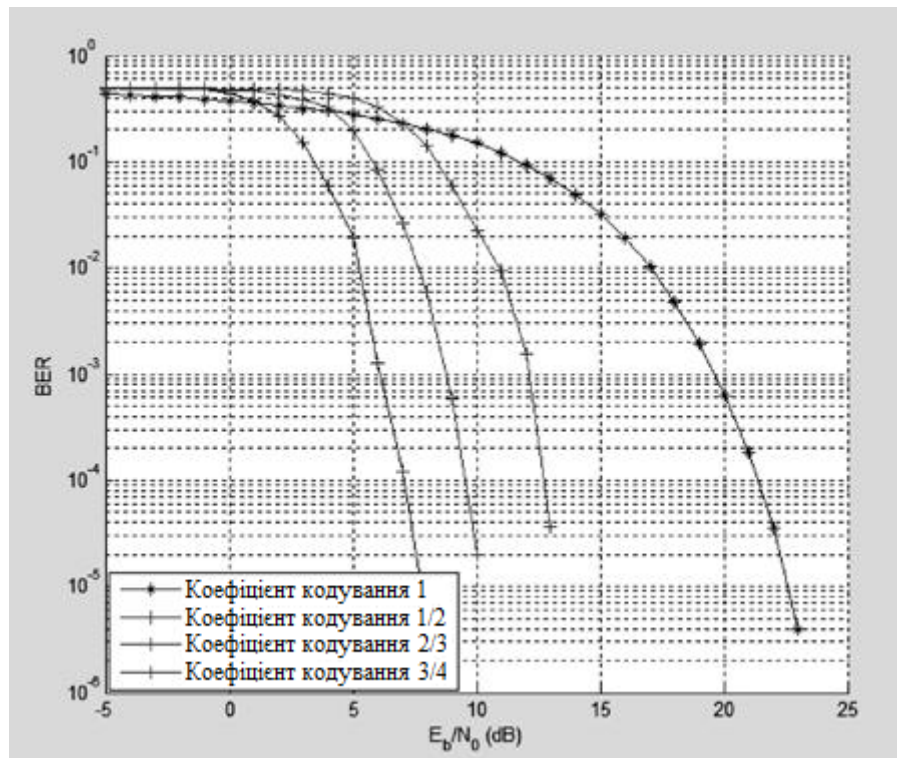


Рисунок 5.2 – Графік залежності BER від  $E_b / N_{0s}$  при передачі кодованого сигналу

При аналізі впливу модуляційної схеми зазначимо (табл. 5.1), що специфікацією стандарту передбачено сім режимів роботи, які відповідають різним видам модуляції та загальним коефіцієнтам кодування. При роботі використання кожного із зазначених режимів визначається його оптимальністю при заданих якісних параметрах каналу.

На рисунку 5.3 наведені отримані в результаті моделювання графіки залежностей коефіцієнта бітових помилок від співвідношення  $E_b / N_{0s}$  при використанні різних режимів модуляції і кодування.

Якщо співвідношення  $E_b / N_{0s}$  значне, то це говорить про те, що для передачі кожного біта витрачається велика енергія. Схеми модуляції з низькою спектральною ефективністю (2-PSK, 4-QAM) забезпечують якісну роботу при меншому значенні  $E_b / N_{0s}$ , тому є більш енергоефективними, меншою мірою

схильними до появи помилкових бітів. Теоретичне значення BER може бути оцінено за допомогою співвідношення

$$P_{bc} = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M_a}} \right) \cdot Q \cdot \left( \sqrt{\frac{3}{M_a - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (5.1)$$

де  $P_{bc}$  - ймовірність бітової помилки на несучу;  $M_a$  - визначає алфавіт схеми модуляції;  $Q(x)$  - додаткова функція Гаусівського розподілу.

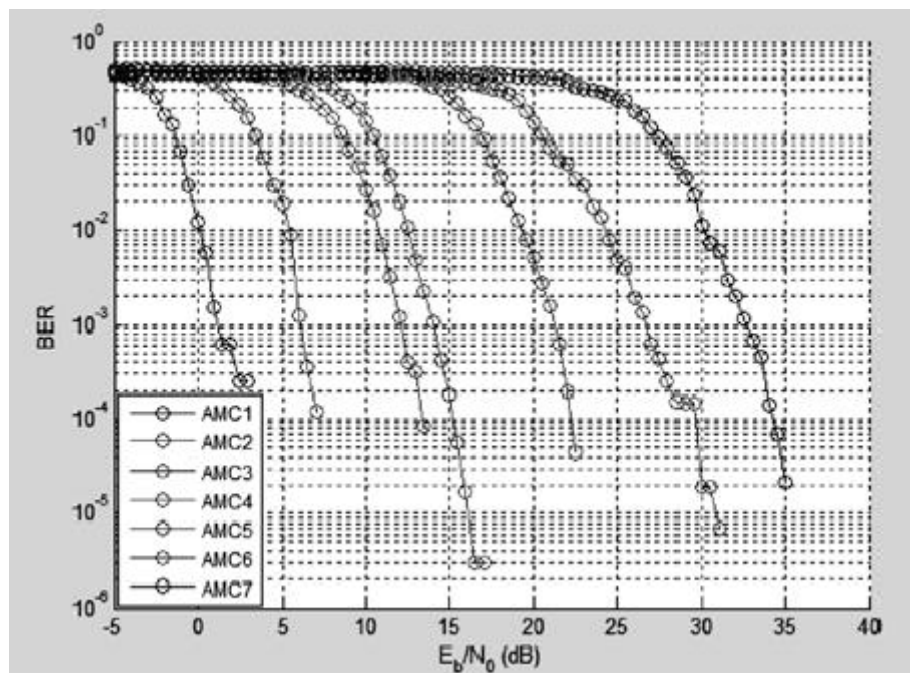


Рисунок 5.3 – Графік залежності BER від  $E_b/N_0$  при використанні різних режимів AMC

## 5.2 Вплив багатопроменевого поширення сигналу

При моделюванні впливу радіоканалу на проходження сигналу враховувалось, що ключова проблема, що виникає при передачі радіосигналу, - це його завмирання внаслідок багатопроменевого поширення. Відомо, що ефективними засобами боротьби з цим явищем є технологія MIMO та використання модуляційної схеми OFDM. Алгоритми просторового мультиплексування зменшують вплив завмирань в каналі на достовірність

переданих даних. На рисунках 5.4 та 5.5 представлені криві завадостійкості передачі даних з МІМО [19].

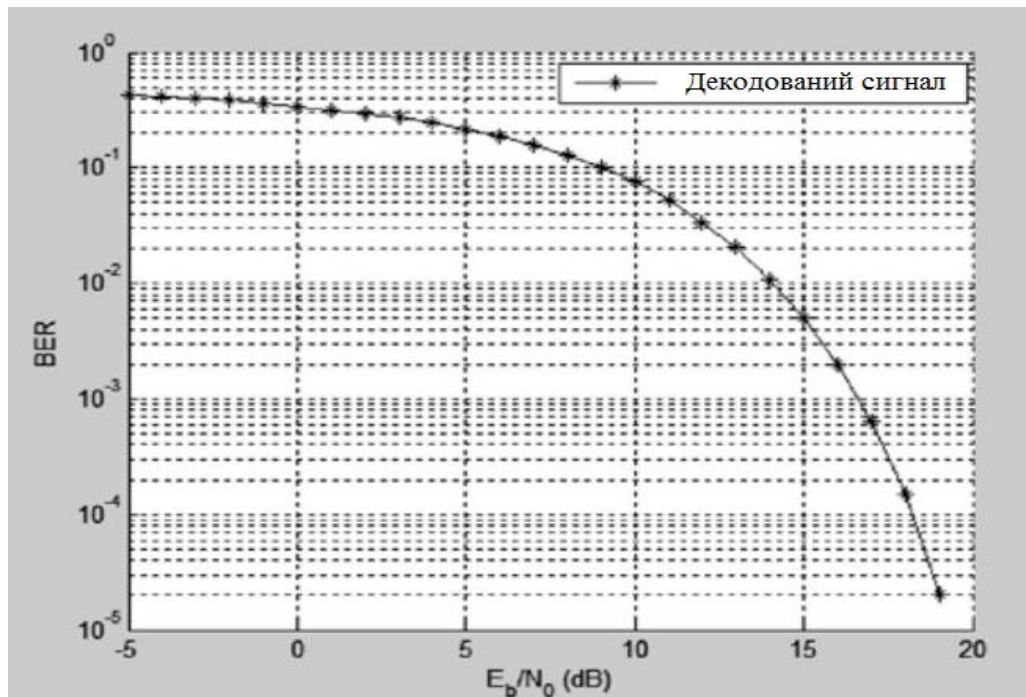


Рисунок 5.4 – Залежності BER від  $E_b/N_0$  при передачі некодованого сигналу в схемі МІМО

Аналіз кривих, представлених на рис. 5.4 і 5.5, показує, що введення додаткової передавальної антени позитивно впливає на завадостійкість передачі як некодованого інформаційного сигналу, так і закодованого на різних швидкостях.

У цілому моделювання системи з МІМО з різними параметрами, що визначали режим роботи і тип модуляції, показало, що має місце істотне зниження коефіцієнта бітових помилок при використанні технології МІМО з будь-яким з режимів АМС. Це підтверджує перевагу алгоритмів просторового мультиплексування.

Вплив технології МІМО на завадостійкість передачі сигналу в умовах, коли передавальний та приймальний пристрої зміщуються один відносно одного, ілюструється сукупністю графіків на рис. 5.6. Можна передбачити, що застосування декількох передавальних або приймальних антен повинно

ослабити вплив ефекту Доплера на передачу і спростити знаходження виду сигналу на приймальній стороні.

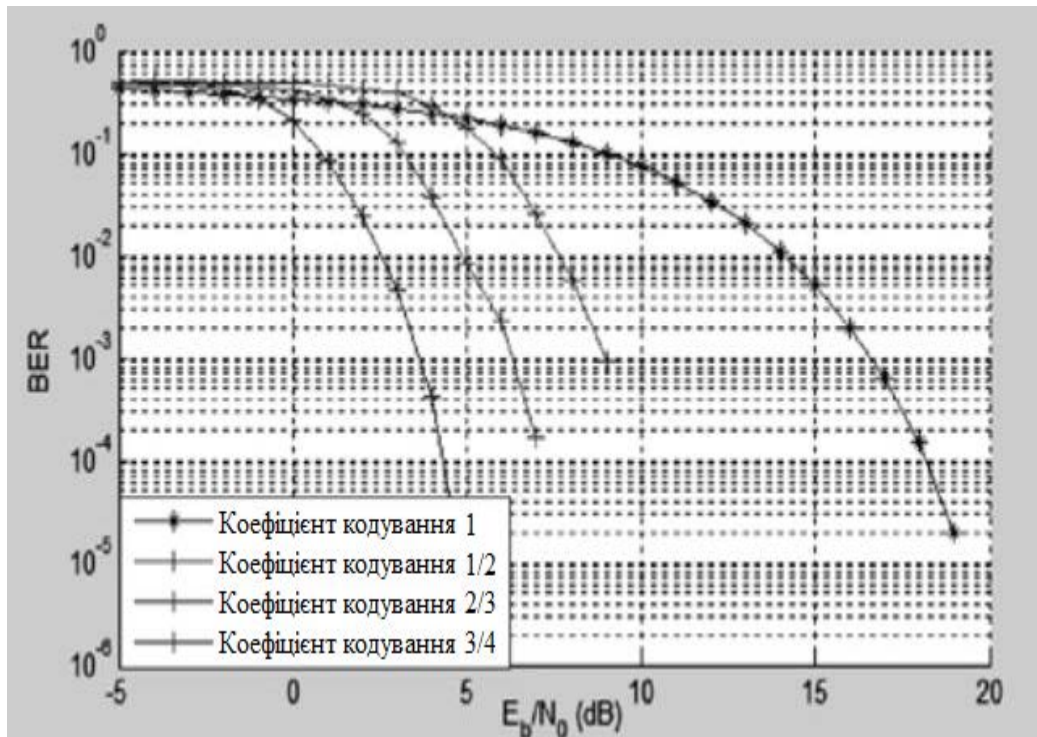


Рисунок 5.5 – Залежності BER від  $E_b / N_0$  при передачі закодованого сигналу в схемі MIMO

Зазначимо, що схема MIMO підвищує коефіцієнт ймовірності виникнення бітової помилки, якщо зростає відносна швидкість між передавальною та приймальною антенами. Це впливає з того, що при збільшенні швидкості руху канална матриця змінюється з більшою частотою, а отже, системі стає складніше впоратися із збільшеним навантаженням на функціональний блок STC. Йдеться про те, що приріст завадостійкості системи в результаті застосування технології багатоантенної передачі безпосередньо залежить від частоти зміни каналних коефіцієнтів радіоканалу.

Проведена оцінка впливу на завадостійкість технології збільшення числа передавальних і приймальних антен. Це демонструє рисунок 5.7.

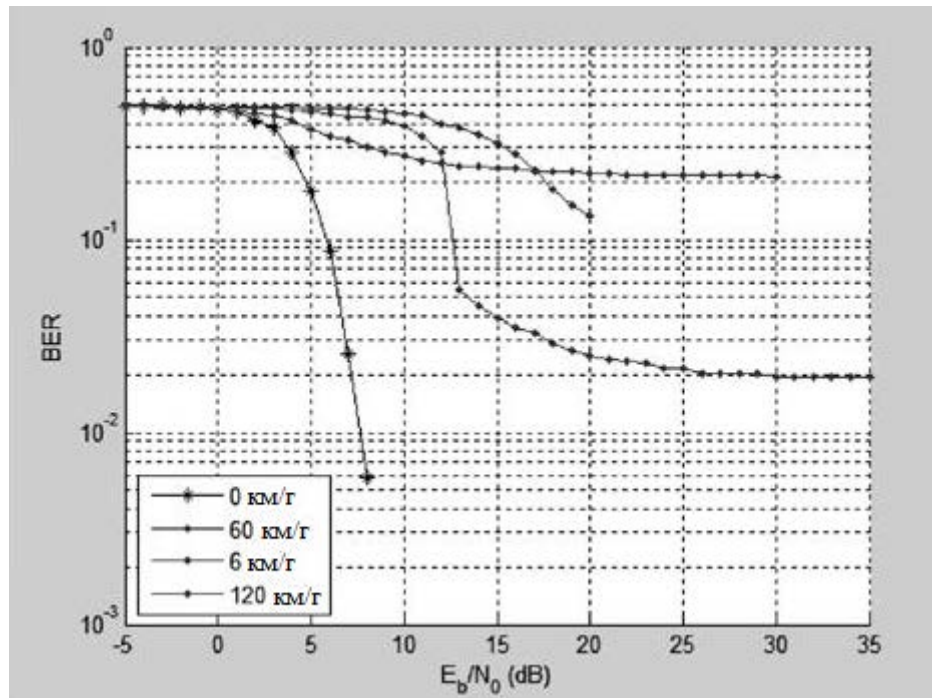


Рисунок 5.6 – Залежності завадостійкості передачі даних від швидкості пересування абонентського терміналу в схемі MIMO

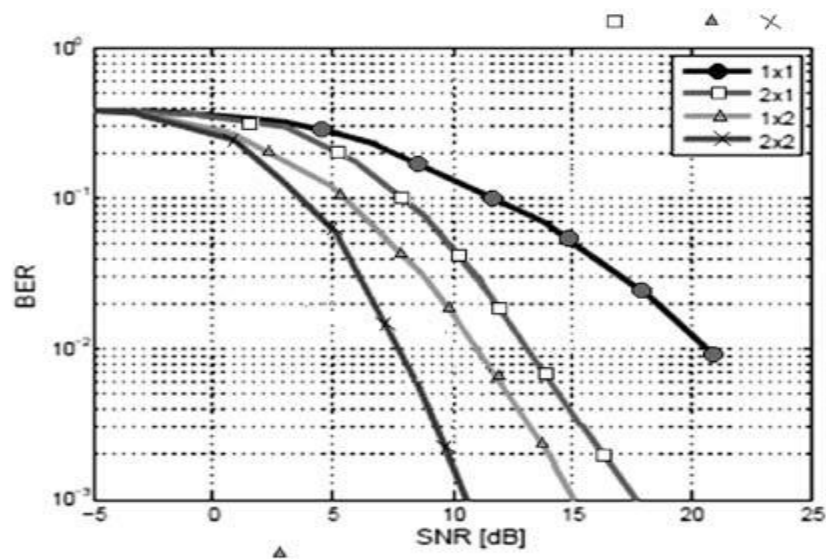


Рисунок 5.7 – Порівняння завадостійкості схем передачі даних

Ступінь впливу схеми передачі для випадку певної множини антен на завадостійкість  $D$  можна описати формулою [19]:

$$D = N_T N_R, \quad (5.2)$$



де  $N_T$  і  $N_R$  - число передавальних і приймальних антен відповідно.

З графіків, рис. 5.7, видно, що схеми передачі несиметричні. Це проявляється у тому, що схема з двома передавальними антенами відстає від схеми з двома приймальними антенами по завадостійкості приблизно на 2 дБ SNR.

Отже, переваги застосування технології MIMO при побудові системи WiMAX [16, 18]:

- збільшена стійкість до виникнення помилкових бітових блоків в прийнятому сигналі через завмирання в радіоканалі;
- збільшена пропускна здатність системи в цілому за рахунок одночасної передачі декількох символів OFDM в один період часу при використанні декількох передавальних радіоантен;
- спостерігається менша залежність від ефекту Доплера.

### 5.3 Вплив допоміжних технологій AMC

Мова йде про моделювання механізму адаптивних модуляцій і кодування з метою оцінки його впливу на завадостійкість і продуктивність системи WiMAX. Ефективність визначимо у порівнянні з аналогічними показниками, отриманими в результаті моделювання з фіксованим режимом AMC.

При моделюванні використовується динамічний режим роботи AMC і пусковий режим роботи AMC1, який означає, що передача першого пакету даних здійснюється в найбільш завадостійкому режимі, щоб забезпечити надійність передачі в умовах невизначеності канальних коефіцієнтів.

Результати моделювання наведені на рис. 5.8 [14]. Видно, що механізм AMC не дозволяє повністю усунути ймовірність бітових помилок. Він лише підтримує коефіцієнт BER на певному рівні за рахунок динамічної зміни типу модуляції і швидкості кодування. Такий підхід дозволяє автоматично вибирати більш енергетично вигідний режим роботи системи, спираючись на дані про перешкоди в радіоканалі, і в результаті система отримує схему з більш

раціональним використанням потужностей і пропускної здатності радіоканалу. При цьому може бути незначне зниження завадостійкості.

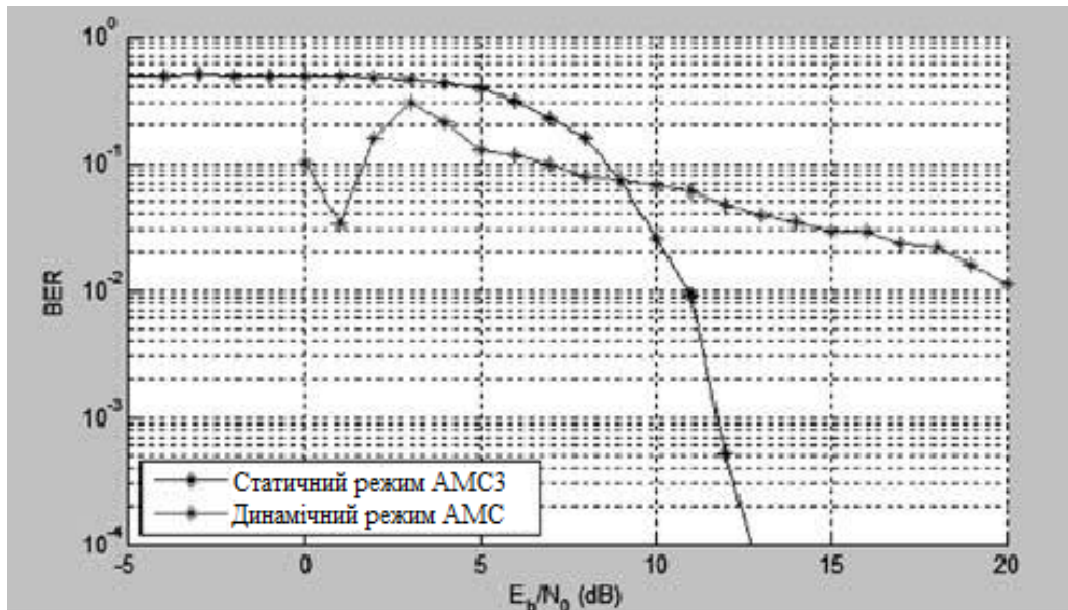


Рисунок 5.8 – Залежності коефіцієнта BER від  $E_b/N_0$  із застосуванням механізму адаптивної модуляції і кодування

Адаптація режиму АМС базується на алгоритмі, що враховує таблиця граничних значень SNR в функціональній підсистемі АМС (табл. 5.2). Цей алгоритм дозволяє вибрати режим роботи, спираючись на необхідний рівень коефіцієнта BER.

Механізм адаптивних модуляцій і кодування спрямований на зміну режимів роботи системи залежно від стану каналу. Надійність цього механізму може виявитися недостатньою, якщо будуть мати місце дестабілізуючі чинники, що виникли через функціонування передавальних або приймальних пристроїв, пов'язаних, наприклад, з ефектом Доплера.

Рисунок 5.9 демонструє, що із збільшенням швидкості руху абонентської станції коефіцієнт помилок відчутно зростає. Причина у тому, що при збільшенні частотного зсуву при швидкості руху функціональним модулям, що забезпечують реалізацію механізму АМС, необхідно набагато швидше

перемикатися з одного режиму роботи в інший. Внаслідок цього затримка зворотного зв'язку між передавачем і приймачем стає головним чинником, що визначає якість роботи всього механізму в цілому [16, 17].

Таблиця 5.2 – Граничні значення SNR для забезпечення рівнів  $BER = 10^{-1}$  і  $BER = 10^{-2}$

Режим роботи	$BER = 10^{-1}$ , дБ	$BER = 10^{-2}$ , дБ
AMC1	<3	<5
AMC2	3-6	5-7
AMC3	6-9	7-11
AMC4	9-12	11-14
AMC5	12-16	14-18
AMC6	16-18	18-20
AMC7	>18	>20

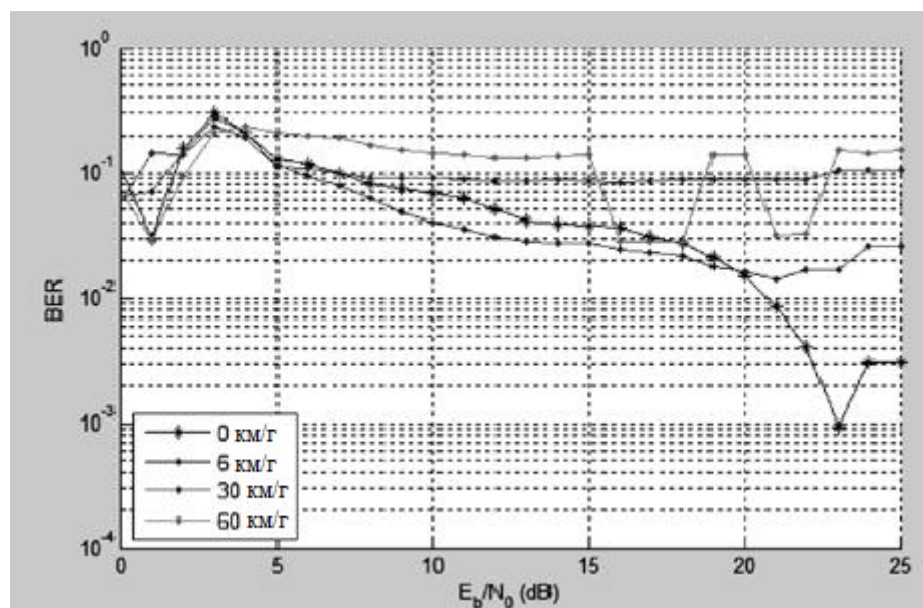


Рисунок 5.9 – Залежності коефіцієнта BER від  $E_b/N_0$  при різних швидкостях руху абонентського терміналу

Видно, що швидкість руху абонентського терміналу значною мірою впливає на завадостійкість.

Переваги технології MIMO при побудові системи WiMAX наступні: збільшення стійкості до появи в прийнятому сигналі помилкових бітових

блоків, збільшена пропускна здатність системи за рахунок одночасної передачі декількох символів OFDM в один період часу при використанні кількох передавальних антен і найкраща стійкість до впливу ефекту Доплера. Видно, що застосування механізму AMC дозволяє підтримувати коефіцієнт BER нижче деякого рівня за рахунок динамічної зміни типу модуляції і швидкості кодування, внаслідок чого можна автоматично вибирати енергетично вигідний режим роботи системи.

#### 5.4 Висновки до розділу

Проведено моделювання системи WiMAX на предмет оцінки впливу модуляційної схеми, багатопроменевого поширення сигналу та використання допоміжних технологій AMC.

Очікуваний результат стосовно використання різних модуляційних схем. Велике значення співвідношення  $E_b / N_{0s}$  передбачає значну енергію для передачі кожного біта. Схеми модуляції з низькою спектральною ефективністю (2-PSK, 4-QAM) забезпечують якісну роботу при меншому значенні  $E_b / N_{0s}$ , тому є більш енергоефективними, меншою мірою схильними до появи помилкових бітів.

Оцінка впливу завмирань внаслідок багатопроменевого поширення здійснювалась при моделюванні технології MIMO та модуляційної схеми OFDM. У цілому моделювання системи з MIMO з різними параметрами, що визначали режим роботи і тип модуляції, показало, що має місце істотне зниження коефіцієнта бітових помилок при використанні технології MIMO з будь-яким з режимів AMC. Це підтверджує перевагу алгоритмів просторового мультиплексування. Також при цьому підтверджена збільшена пропускна здатність системи в цілому за рахунок одночасної передачі декількох символів OFDM в один період часу та спостерігається менша залежність від ефекту Доплера, що важливо для мобільних абонентів.

Аналіз результатів моделювання показав, що застосування механізму АМС (механізм адаптивних модуляцій і кодування, спрямований на зміну режимів роботи системи залежно від стану каналу) дозволяє підтримувати коефіцієнт BER нижче деякого рівня за рахунок динамічної зміни типу модуляції і швидкості кодування, внаслідок чого можна автоматично вибирати енергетично вигідний режим роботи системи.

## 6 АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

### 6.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку» можна охарактеризувати

двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 6.1 та 6.2.

Таблиця 6.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	0	45	48
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	40	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>		44,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 6.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	61	61	61
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>	<b>61,0</b>		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [20]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (6.1)$$



де  $k_{нов}$ ,  $k_{теор}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{нов} = 44,3$ ,  $k_{теор} = 61,0$  балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 44,3 + 0,4 \cdot 61,00 = 51,00 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника  $E_{нау}$  проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку», даний рівень становить 51,00 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

## 6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

### 6.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій,

секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

#### Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [20]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (6.2)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=21$  дні.

$$Z_o = 16850,00 \cdot 34 / 21 = 27280,95 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	16850,00	802,38	34	27280,95
Ст. науковий співробітник	15600,00	742,86	21	15600,00
Інженер-проектувальник безпроводних мереж	14600,00	695,24	21	14600,00
Консультант (інженер служби обслуговування мереж)	15600,00	742,86	5	3714,29
Технік	7950,00	378,57	28	10600,00
Всього				71795,24

#### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (6.3)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (6.4)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo  $M_M=6700,00$  грн;

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [20];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 21$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 59,22 \cdot 7,85 = 464,90 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Встановлення допоміжного обладнання робочих місць дослідників	7,85	2	1,10	59,22	464,90
Інсталяція програмного забезпечення дослідника безпроводних мереж	7,22	3	1,35	72,68	524,77
Встановлення цифрових обчислювальних систем	5,75	4	1,50	80,76	464,36

## Продовження таблиці 6.5

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Монтаж досліджуваних модулів безпроводної мережі	6,55	5	1,70	91,53	599,50
Підготовка цифрової експериментальної моделі передачі даних	5,25	5	1,70	91,53	480,52
Формування бази даних досліджень	15,90	3	1,35	72,68	1155,66
Тестування системи зв'язку	5,00	2	1,10	59,22	296,12
Всього					3985,83

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (6.5)$$

де  $H_{\text{дод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (71795,24 + 3985,83) \cdot 10 / 100\% = 7578,11 \text{ грн.}$$

### 6.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (6.6)$$

де  $H_{\text{зн}}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (71795,24 + 3985,83 + 7578,11) \cdot 22 / 100\% = 18339,02 \text{ грн.}$$

### 6.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і

предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (6.7)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{ej}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 1,0 \cdot 139,00 \cdot 1,01 - 0,0 \cdot 0,0 = 140,39 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
USB-пам'ять Kingstar (32 ГБ) Class 10	139,00	1,0	0,0	0,0	140,39
USB-пам'ять Kingstar (64 ГБ) Class 10 A	189,00	2,0	0,0	0,0	381,78
Диск оптичний LG-10 (CD-R)	23,00	5,0	0,0	0,0	116,15

## Продовження таблиці 6.6

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Диск оптичний LG-W (CD-RW)	32,00	5,0	0,0	0,0	161,60
Картридж для принтера Canon 750AF-DX	2120,00	2,0	0,0	0,0	4282,40
Начиння канцелярське Lezard Ultra	216,00	4,0	0,0	0,0	872,64
Органайзер офісний Lezard Ultra	260,00	3,0	0,0	0,0	787,80
Папір для заміток (A5)-500/70	112,00	3,0	0,0	0,0	339,36
Папір канцелярський офісний (A4-500/80)	212,00	3,0	0,0	0,0	642,36
Флюс STANNOL 900-3302	600,00	0,010	0,000	0,00	6,06
Припій ПОСК 36-17	600,00	0,020	0,000	0,00	12,12
Всього					7742,66

## 6.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_6$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (6.8)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, грн;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_6 = 1 \cdot 3152,00 \cdot 1,01 = 3183,52 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Мережева карта Mikrotik R11e-LoRa	1	3152,00	3183,52
Кабель РК-75-4-15	5	25,00	126,25
Кабелі інтерфейсів	3	850,00	2575,50
Магазин резисторів	2	38,60	77,97
Магазин конденсаторів	2	66,50	134,33
Всього			6097,57

### 6.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (6.9)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.}i}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 18960,00 \cdot 1 \cdot 1,01 = 19149,60 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 6.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Осцилограф цифровий ОСЦ-12500УЦ	1	18960,00	19149,60
Вимірювач рівня радіосигналу Satel ARF-200	1	7699,00	7775,99
Всього			26925,59

### 6.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (6.10)$$

де  $C_{\text{инрг}}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.і}}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 7646,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 8028,30 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 6.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Прикладне програмне забезпечення розробки ТКС	1	7646,00	8028,30
Всього			8028,30

### 6.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{C_{\text{б}}}{T_{\text{е}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (6.11)$$

де  $C_{\text{б}}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;



$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_e$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (45389,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 3782,42 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Електронний комплекс аналітичної системи ПК DELL OPTIPLEX 7010 MFF / I5-13500T (N007O7010MFF)	45389,00	2	2	3782,42
Персональний комп'ютер HP PRODESK 405 G6 SFF / RYZEN3 4300G (294D5EA)	19699,00	2	2	1641,58
Спеціалізоване робоче місце дослідника	8699,00	5	2	289,97
Пристрій виводу текстової інформації	6899,00	4	2	287,46
Оргтехніка	8400,00	5	2	280,00
Приміщення лабораторії досліджень	399000,00	20	2	3325,00
ОС Windows 11	6500,00	2	2	541,67
Прикладний пакет Microsoft Office 2019	6540,00	2	2	545,00
Всього				10693,09

## 6.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{ени}}{\eta_i}, \quad (6.12)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo  $C_e = 7,50$  грн;

$K_{eni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{eni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,32 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 576,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронний комплекс аналітичної системи ПК DELL OPTIPLEX 7010 MFF / I5-13500T (N007O7010MFF)	0,32	240,0	576,00
Персональний комп'ютер HP PRODESK 405 G6 SFF / RYZEN3 4300G (294D5EA)	0,25	240,0	450,00
Спеціалізоване робоче місце дослідника	0,08	240,0	144,00
Пристрій виводу текстової інформації	0,25	4,5	8,44
Оргтехніка	0,50	2,0	7,50
Осцилограф цифровий ОСЦ-12500УЦ	0,15	110,0	123,75
Вимірювач рівня радіосигналу Satel ARF-200	0,10	110,0	82,50
Всього			1392,19

### 6.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{ce} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ce}}{100\%}, \quad (6.13)$$

де  $H_{ce}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo  $H_{ce} = 20\%$ .

$$B_{ce} = (71795,24 + 3985,83) \cdot 20 / 100\% = 15156,21 \text{ грн.}$$

6.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (6.14)$$

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{cn} = 30\%$ .

$$B_{cn} = (71795,24 + 3985,83) \cdot 30 / 100\% = 22734,32 \text{ грн.}$$

#### 6.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (6.15)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ie} = 50\%$ .

$$I_e = (71795,24 + 3985,83) \cdot 50 / 100\% = 37890,53 \text{ грн.}$$

#### 4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та

раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (6.16)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 100\%$ .

$$B_{нзв} = (71795,24 + 3985,83) \cdot 100 / 100\% = 75781,07 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_e + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_e + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 71795,24 + 3985,83 + 7578,11 + 18339,02 + 7742,66 + 6097,57 + 26925,59 + 8028,30 + 10693,09 + 1392,19 + 15156,21 + 22734,32 + 37890,53 + 75781,07 = 314139,73 \text{ грн.}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (6.18)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta = 0,9$ .

$$ZB = 314139,73 / 0,9 = 349044,15 \text{ грн.}$$

### 6.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник  $K_p$  рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (6.19)$$

де  $I$  – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo  $I = 4$ ;

$n$  – коефіцієнт використання результатів роботи;  $n = 0$ , коли результати роботи не будуть використовуватись;  $n = 1$ , коли результати роботи будуть використовуватись частково;  $n = 2$ , коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках;  $n = 3$ , коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo  $n = 3$ ;

$T_C$  – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo  $T_C = 2$ ;

$R$  – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то  $R = 4$ ; якщо результати роботи відповідають

відомому рівню, то  $R = 3$ ; якщо нижче відомих результатів, то  $R = 1$ . Прийmemo  $R = 4$ ;

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo  $B = 349044,15$  грн;

$t$  – час проведення дослідження. Прийmemo  $t = 0,17$  років, (2 міс.).

Визначення показників  $I$ ,  $n$ ,  $T_C$ ,  $R$ ,  $B$ ,  $t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [20].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 349,0 \cdot 0,17 = 8,80.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

#### 6.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку» складають 349044,15 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація мереж WIMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи  $K_p > 1$ , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

## 7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Під час оптимізації мереж WiMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку на працівника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

### 1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищена чи понижена вологість повітря;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла; понижена контрастність;
- пряма і відбита блискість.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження та розумове перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо розробку заходів щодо безпечного виконання поставленого завдання.

### 7.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Вимоги щодо організації та обладнання робочих місць: площа, відведена на одне робоче місце має становити не менше 6 кв. м., а об'єм – не менше 20 куб. м. Конструкція робочого місця повинна забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози (тобто такої, яка дозволяє працівникові виконувати роботу з мінімальним напруженням тіла, і яка дозволяє уникнути перевтоми в ході і після закінчення робочого процесу). Раціональна робоча поза має важливе значення для збереження здоров'я працівника, оскільки тривале перебування його в незручній і напруженій позі може призвести до таких захворювань, як сколіоз (викривлення хребта), варикозне розширення вен,

плоскостопість тощо. Установлено, що робота в зігнутому положенні збільшує затрати енергії на 20%, а при значному нахиленні — на 45% порівняно з прямим положенням корпусу [21, 22].

За потреби особливої концентрації уваги під час виконання робіт суміжні робочі місця операторів необхідно відділяти одне від одного перегородками висотою 1,5 - 2 м.

Робочі місця слід розташовувати відносно джерела природного світла (вікон) таким чином, щоб світло падало збоку, переважно зліва. Також робоче місце має відповідати сучасним вимогам ергономіки:

– стіл повинен мати висоту поверхні 680 - 800 мм., ширину 600 - 1400 мм. і глибину 800 - 1000 мм. (такі параметри забезпечують можливість виконання операцій в зоні досяжності працівника);

– робочий стілець робочий стілець має бути підйомно-поворотним, з можливістю регулювання висоти, бажано зі стаціонарними або змінними підлікотниками і напівм'якою нековзкою поверхнею сидіння, що легко чиститься і не електризується;

– екран комп'ютера має розташовуватися на оптимальній відстані від користувача, що становить 600 – 700 мм., але не менше за 600 мм. з урахуванням літерно-цифрових знаків і символів.

Приміщення, де здійснювалася оптимізація мереж WiMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою

інфраструктурою зв'язку за небезпекою ураження електричним струмом належить до приміщень без підвищеної небезпеки (сухе, мало заповнене, з нормальною температурою повітря, ізольованими підлогами і малим числом заземлених приладів).

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники), електропроводи та кабелі за виконанням і ступенем захисту мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю



унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, застосовувати негорючу ізоляцію.

Лінія електромережі для живлення персональних комп'ютерів і периферійних пристроїв виконується як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту.

Заземлені конструкції, що знаходяться в приміщеннях, де розміщені робочі місця операторів (батареї опалення, водопровідні труби, кабелі із заземленим відкритим екраном), надійно захищені діелектричними щитками або сітками з метою недопущення потрапляння людини під напругу.

Персональні комп'ютери і периферійні пристрої підключаються до електромережі тільки за допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. У штепсельних з'єднаннях та електророзетках, крім контактів фазового та нульового робочого провідників, мають бути спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Їхня конструкція має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше, ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним.

## 7.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 7.2.1. Мікроклімат

Стан повітря робочої зони у виробничому приміщенні називають мікрокліматом або метеорологічними умовами. Мікроклімат або метеорологічні умови виробничих приміщенні, визначаються за такими параметрами:

- температурою повітря у приміщенні, С;
- відносною вологістю повітря, %;
- рухливістю повітря, м/с;
- тепловим випромінюванням, Вт/м<sup>3</sup>.

Всі ці параметри поодинці, а також у комплексі впливають на фізіологічну функцію організму його терморегуляцію і визначають самопочуття.

Оптимізація мереж WiMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [23]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії згідно ДСН 3.3.6.042-99 [24] наведені в табл.7.1.

Таблиця 7.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для створення і автоматичної підтримки в приміщенні незалежно від зовнішніх умов допустимих значень температури, вологості, чистоти і швидкості руху повітря обладнані системами опалення та кондиціонування повітря. Систематично проводиться вологе прибирання.

### 7.2.2 Склад повітря робочої зони

Оточуюче нас повітря (атмосфера) є найважливішим фактором забезпечення життя. В природних умовах повітря, як правило, не забруднене отруйними речовинами і життю людини не загрожує. Органи чутливості людини не дозволяють з достатньою точністю визначати якість повітря і запобігати загрози отруєння.

В приміщенні, де здійснюється оптимізація мереж WiMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку, у повітрі можуть перевищувати ГДК такі речовини як вуглекислий газ, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні через відкриті вікна та заноситься на одязі і взутті працівниками.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4

Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (табл.7.3).

Таблиця 7.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см <sup>3</sup>	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для підтримки допустимих значень мікроклімату та концентрації позитивних та негативних іонів необхідно передбачати установки або прилади зволоження або штучної іонізації, кондиціонування повітря.

### 7.2.3. Виробниче освітлення

Освітлення відіграє важливу роль у житті людини. Біля 90% інформації сприймається через зоровий канал, тому правильно виконане раціональне освітлення має важливе значення для виконання всіх видів робіт. Недостатня освітленість або її надмірна кількість знижують рівень збудженості центральної нервової системи і, природно, активність усіх життєвих процесів. Раціональне освітлення є важливим фактором загальної культури виробництва. Неможливо забезпечити чистоту та порядок у приміщенні, в якому напівтемрява, світильники брудні або в занедбаному стані.

Приміщення, в яких встановлені персональні комп'ютери, повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [25]. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 7.4:

Таблиця 7.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, $e_n$ , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Штучне освітлення в досліджуваному приміщенні здійснюється системою загального рівномірного освітлення. У разі переважної роботи з документами, допускається застосування системи комбінованого освітлення (крім системи загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення).

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Штучне освітлення в приміщенні забезпечується світильниками типу РСП08×250 (однолампові) з лампами ДРЛ-250.

#### 7.2.4. Виробничий шум

Виробничий шум – це сукупність різних за гучністю і тоном звуків, які виникають у повітряному середовищі. В досліджуваному приміщенні наявний як постійний, так і непостійний шуми. Нормування непостійного шуму, а також орієнтовна оцінка загального рівня постійного шуму здійснюється скоректованим за частотою загальним рівнем звукового тиску – так званим рівнем звуку, який вимірюється в дБА за шкалою «А» шумоміра.

Непостійний шум характеризується еквівалентним рівнем звуку LA екв., що являє собою середньоквадратичний рівень звуку непостійного шуму, який має такий самий вплив на людину, як і постійний шум.

Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску не повинні перевищувати 50 дБА (табл.7.5).

Таблиця 7.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму (згідно ДСН 3.3.6.037-99 [26])

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Рівень шуму в приміщенні не перевищує допустимих значень.

### 7.2.5. Виробничі випромінювання

Розрізняють природні та штучні джерела електромагнітних полів (ЕМП). У процесі еволюції біосфера постійно перебуває під впливом ЕМП природного походження (природний фон): електричне та магнітне поля Землі, космічні ЕМП, передусім ті, що генеруються Сонцем. У період науково-технічного прогресу людство створило і все ширше використовує штучні джерела ЕМП. У теперішній час ЕМП антропогенного походження значно перевищують природний фон і є тим несприятливим чинником, чий вплив на людину з року в рік зростає.

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих за ГОСТ 12.1.045-84 [27]. Значення напруженості електромагнітних полів на робочих місцях з ВДТ мають відповідати нормативним значенням (ДСанПіН 3.3.6-2002 [28], ГОСТ 12.1.045-84 [27]). Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 [29] (табл.7.6).

Таблиця 7.6 - Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатичного поля

Види поля	Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 нм)	0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 нм)	0,01
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 нм)	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 нм	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм	35,0 — 70,0
Напруженість електричного поля відеодисплейного терміналу	20кВ/м

Для дотримання наведених нормативів слід використовувати офісну техніку з сертифікатом якості та дотримуватися встановлених режимів праці та відпочинку з ПК.

7.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи РЕС в умовах дії загрозливих факторів надзвичайних ситуацій

#### 7.3.1 Дія іонізуючих випромінювань на радіоелектронні системи

В залежності від виду випромінювання, дози радіації, природи опромінюваної речовини та умов навколишнього середовища в значній мірі залежить дія радіації на матеріали та деталі апаратури [30].

До матеріалів, з яких виготовляють елементи радіоелектронних систем (РЕС) відносять: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли тощо). При цьому метали найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Робота РЕС в умовах дії радіоактивних випромінювань має такі особливості: РЕС може раптово втратити працездатність при певних рівнях радіації (критичних); в елементах схем РЕС можуть початись зворотні і незворотні процеси.

Для запобігання цього проводяться розрахунки з безпеки роботи в умовах дії радіації та приймаються рішення щодо захисту елементів РЕС.

Для зниження рівня забруднення радіоактивними речовинами використовують дезактивацію.

7.3.2 Оцінка стійкості роботи РЕС в умовах дії іонізуючих випромінювань

Вихідні дані:  $p_5 = 37$  Р/год;  $K_{\text{носл}} = 7$ ;  $t_n = 2$  год.

Проводимо аналіз приладу і визначаємо радіоелектронні елементи, від яких залежить її функціонування: діоди, резистори, конденсатори, напівпровідники, мікросхеми, інтегральні схеми, діелектрики.

Визначаємо максимально допустимі експозиційні дози, при яких в елементах можуть виникнути незворотні зміни. Дані заносимо в таблицю 7.7.

Таблиця 7.7 – Максимально допустимі експозиційні дози елементів РЕС

№	Елементи РЕС	$D_{гр}, P$
1	Діоди	$10^5$
2	Резистори	$10^6$
3	Конденсатори	$10^6$
4	Напівпровідники	$10^5$
5	Мікросхеми	$10^5$
6	Інтегральні схеми	$5 \cdot 10^5$
7	Діелектрики	$10^4$

Проаналізувавши дані визначаємо межу стійкості  $D_{гр}$ , роботи РЕС:

$$D_{гр} = 10^4 (P).$$

Визначаємо рівень радіації через 1 год після аварії

$$p_1 = p_t \sqrt[4]{t} [P]; \quad (7.1)$$

$$p_1 = 37 \sqrt[4]{5} = 55,33 (P).$$

Визначаємо час стійкої роботи РЕС у заданих умовах

$$t_D = \left( \frac{D_{гр} K_{носл} + 2p_{1max} \sqrt{t_{II}}}{2p_{1max}} \right)^2 [\text{ГОД}]; \quad (7.2)$$



$$t_D = \left( \frac{10^4 \cdot 7 + 2 \cdot 55,33 \sqrt{2}}{2 \cdot 55,33} \right)^2 = 401934 \text{ (год)} \approx 46 \text{ (р)}.$$

Оскільки допустимий час роботи РЕС в умовах дії на них іонізуючих випромінювань більший за можливий час роботи приладу, то стійкість її забезпечується.

#### 7.4 Висновки до розділу

Досліджено стійкість роботи РЕС в умовах дії загрозливих факторів надзвичайних ситуацій. Із дослідження дії іонізуючих випромінювань на стійкість роботи РЕС можна зробити висновок, що РЕС виявилася стійкою в роботі.

## ВИСНОВКИ

Найбільш прийнятною для роботи в умовах обмеженої інфраструктури зв'язку може бути версія стандарту IEEE 802.16e. Привабливість його полягає у можливості працювати за умови наявності або відсутності прямої видимості, а також в режимі рухомої абонентської станції.

Виконано аналіз та кластерну побудову мережі WiMAX з урахуванням реалізації принципу повторного використання частот. При плануванні мережі слід враховувати кількість стільників у кластері, їх топографічне розташування та розподіл каналів. Від розмірності кластера залежить рівень співканальних завад. З метою їх ослаблення необхідно збільшувати кількість стільників у кластері, або використовувати секторні антени, або виконати комбіноване планування мережі на основі комбінованого повторного використання частот на границях стільників (FFR).

Виконано основні розрахунки мережі WiMAX, спрямовані на оптимізацію її параметрів для реалізації послуг інтернет-доступу. При цьому отримано: кількість частотних каналів – 128; розмірність кластера – 3 (можливе застосування лише секторної антени з діаграмою спрямованості  $\varphi = 120^{\circ}$ ); число частотних каналів для обслуговування абонентів в одному секторі – 10; допустиме навантаження в одному секторі – до 8 Ерл; кількість абонентів, що обслуговуються однією БС – 828; кількість базових станцій – 13; радіус зони обслуговування однією БС – до 3 км; середні швидкості передачі у низхідних субкадрах: 40 Мбіт/с у центрі стільника і 5 Мбіт/с на краях стільника; середні швидкості передачі у висхідних субкадрах: 14 Мбіт/с у центрі стільника і близько 2 Мбіт/с на краях стільника. При розрахунках було враховано реалізацію принципу комбінованого планування мережі (FFR).

У роботі наведені імовірно-часові характеристики протоколу WiMAX з фіксованим форматом кадру, отримані за допомогою чисельно-аналітичного методу балансу інтенсивностей навантажень, які відображають деякі можливості для підвищення ефективності цього протоколу. Показана

необхідність динамічної адаптації формату кадру в процесі зміни навантаження.

Проведено моделювання системи WiMAX на предмет оцінки впливу модуляційної схеми, багатопроменевого поширення сигналу та використання допоміжних технологій АМС.

Очікуваний результат стосовно використання різних модуляційних схем. Велике значення співвідношення  $E_b / N_{0s}$  передбачає значну енергію для передачі кожного біта. Схеми модуляції з низькою спектральною ефективністю (2-PSK, 4-QAM) забезпечують якісну роботу при меншому значенні  $E_b / N_{0s}$ , тому є більш енергоефективними, меншою мірою схильними до появи помилкових бітів.

Оцінка впливу завмирань внаслідок багатопроменевого поширення здійснювалась при моделюванні технології MIMO та модуляційної схеми OFDM. Показано, що має місце істотне зниження коефіцієнта бітових помилок при використанні технології MIMO з будь-яким з режимів АМС. Це підтверджує перевагу алгоритмів просторового мультиплексування. Також при цьому підтверджена збільшена пропускна здатність системи в цілому за рахунок одночасної передачі декількох символів OFDM в один період часу та менша залежність від ефекту Доплера, що важливо для мобільних абонентів.

Аналіз результатів моделювання показав, що застосування механізму АМС (механізм адаптивних модуляцій і кодування, спрямований на зміну режимів роботи системи залежно від стану каналу) дозволяє підтримувати коефіцієнт BER нижче деякого рівня за рахунок динамічної зміни типу модуляції і швидкості кодування, внаслідок чого можна автоматично вибирати енергетично вигідний режим роботи системи.

У роботі виконано також економічні розрахунки та наведено основні заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.Б. Каток. Волоконно - оптичні системи зв'язку. – К., Велар, 1999. – 483 с.
2. Основні напрямки стандартизації оптичних кабелів зв'язку / Каток В.Б., Ковтун О.С., Руденко І.Е. – Зв'язок, No 4, 2005. – с. 17-22.
3. Проектування лінійного волоконно – оптичного тракту [Електронний ресурс]: <http://ua-referat.com/>.
4. Хмелев К.Ф. Основы фотонного транспорта. – Киев: Техніка. 2008. – 680 с.
5. Бердников О.М., Щирий А.В. Напрямки побільшування швидкостей передачі лінійних трактів телекомунікаційних транспортних систем. XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 75...77.
6. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Омецінська О. Б. WDM під редакцією Катка В. Б. – Київ, 2005. – 194с.
7. Бердников О. М. Варіанти побудови мінімальної граничної дисперсії в оптичному волокні для багатохвильових систем передачі // Бердников О. М. Позняк А.А. Чіжмодій О.Я.// Сучасні інформаційні технології та кібербезпека (Київ 15-16 листопада) 2018. с. 98-99.
8. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі. Київ: „Техніка”, 2001
9. Стеклов В.К., Нові інформаційні технології: Транспортні мережі телекомунікацій. Київ: «Техніка» 2004.
10. Корнійчук В.І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі / В.І. Корнійчук, П.Д. Мосорін. – Одеса: Друк, 2001. – 363 с.
11. Г.Г. Швачич, В.В. Толстой, Л.М. Петречук, Ю.С. Іващенко, О.А. Гуляєва, О.В. Соболенко. Сучасні інформаційно-комунікаційні технології: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2017. –230 с.

12. Беркман Л.Н., Жураковський Б.Ю., Макаренко А.О. Теорія передачі даних в інфокомунікаціях. Навчальний посібник. К.: ДУТ, 2015. С. 160.

13. Телекомунікаційні системи передачі : підручник / В. М. Кичак, О. М. Шинкарук, Г. Г. Бортник, І.І. Чесановський, О.В. Стальченко. – Хмельницький: Видавництво НАДПСУ, 2016. – 424 с.

14. Сайко В. Г., Казіміренко В. Я., Літвінов Ю. М. Мережі бездротового широкосмугового доступу: навч. посіб. Київ: ДУТ, 2015. 196 с.

15. Бірюков М.Л., Стеклов В.К., Костік Б.Я. Транспортні мережі телекомунікацій: системи мультиплексування. - К.: Техніка, 2005. – 312 с.

16. Бережна О.В. Система збору даних із використанням технології WIMAX / О.В. Бережна, Т.О. Протасова, Є.С. Романенко, О.М. Гагіна // Електротехнічні системи, прилади і засоби кодування інформації (ФЕЕ2021). Матеріали та програма науково-технічної конференції. – Суми: СумДУ, 2021. - С.°95.

17. Телекомунікаційні та інформаційні мережі : Підручник [для вищих навчальних закладів] / П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко. – К.: САММІТ-Книга, 2010. – 708 с.: іл

18. Сучасні мережеві технології: Навчально-методичний посібник для студентів-провізорів очної, заочної та дистанційної форм навчання / Рижов О.А., Андросов А.І., Іванькова Н.А. - Запоріжжя: [ЗДМУ], 2018 - 68 с.

19. Горбатий І. В., Бондарев А. П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. 336 с.

20. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

21 ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.

22. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я

працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: [http://sop.zp.ua/norm\\_praor\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_praor_0_00-7_15-18_01_ua.php).

23. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

24. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

25. ДБН В.2.5-28-20018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

26. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

27. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.

28. ДСанПіН 3.3.6-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z0203-03>

29. НПАОП 0.00-7.11-12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>.

30. Методичні вказівки до самостійної та індивідуальної роботи з дисципліни "Цивільний захист та охорона праці в галузі. Частина 1. Цивільний захист" / Уклад. О. В. Поліщук, О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 32 с.

Додаток А  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖ WiMAX ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПРОВІДНОГО  
ДОСТУПУ В РЕГІОНАХ З ОБМЕЖЕНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ ЗВ'ЯЗКУ

назва магістерської кваліфікаційної роботи

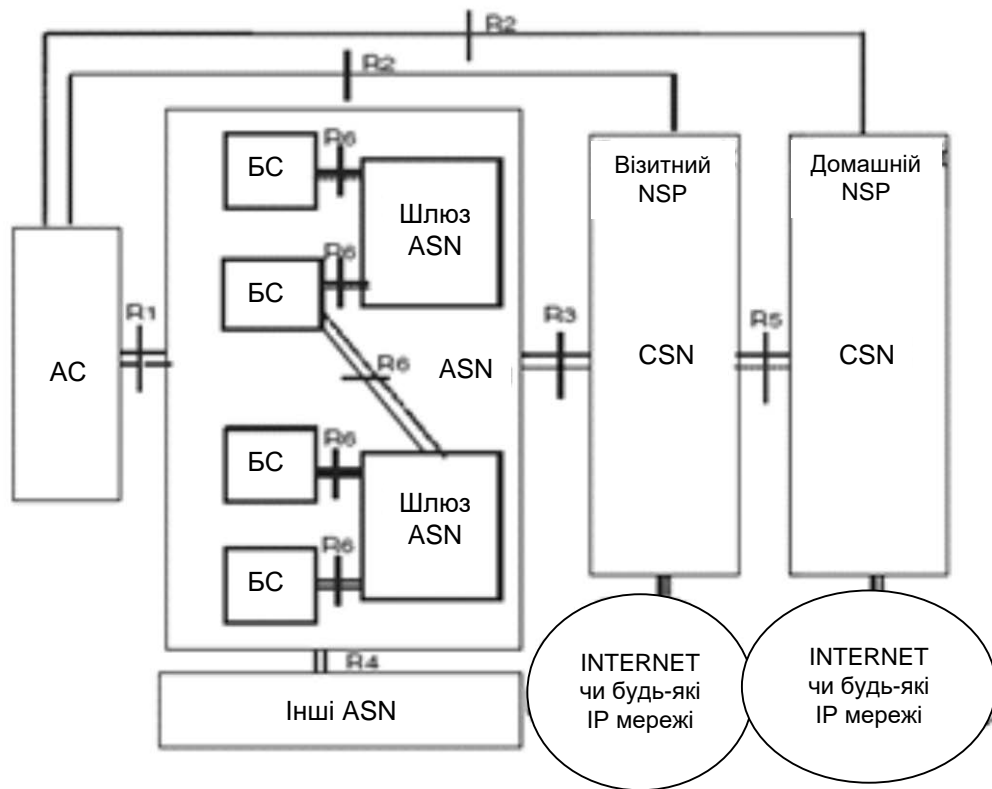
## Характеристики стандарту

Стандарт	Прийнятий міс. рік	Смуги частот, ГГц	Мобільність	Схема передачі	Швидкість передачі	Ширина каналу, МГц
802.16	12.2001	11-66	нема	Одна несуща	32-134,4 Мбіт/с	20, 25, 28
802.16- 2004	06.2004	2-11	нема	Одна несуща або 256 чи 2048 OFDM	1-75 Мбіт/с	1,75; 3,5; 7 14; 1,25; 5 10; 15; 8,75
802.16e	12.2005	2-11 (фікс) 2-6 (моб)	є	Одна несуща або 256 чи 128, 512, 1024, 2048 OFDM	1-75 Мбіт/с	1,25; 5; 10; 20

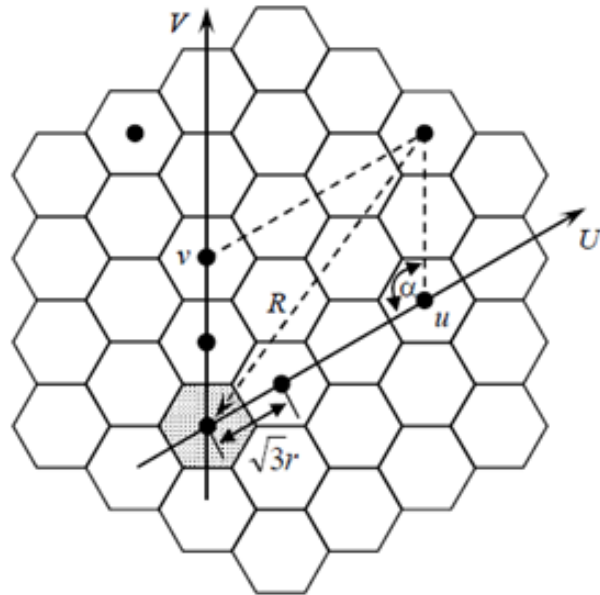


## Характеристики OFDM

Параметр	Характеристики ОЧРД			
	1,25	5	10	20
Смуга частотного каналу, МГц	1,25	5	10	20
Число піднесущих	128	512	1024	2048
Відношення $T_g/T_b$	1/32; 1/16; 1/8; 1/4			
Розширення смуги	28/25			
Рознесення під несущих, кГц	10,94	10,94	10,94	10,94
Активна довжина символу, мкс	91,4	91,4	91,4	91,4
Захисний проміжок, мкс, при $T_g/T_b=1/8$	11,4	11,4	11,4	11,4
Довжина OFDM-символу, мкс	102,9	102,9	102,9	102,9



Базова модель мережі



Поділ зони радіопокриття на стільники

## ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ WiMAX ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПОСЛУГ

### ІНТЕРНЕТ-ДОСТУПУ

(Результати розрахунку)

Кількість частотних каналів – 128;

Розмірність кластера – 3 (можливе застосування лише секторної антени з діаграмою спрямованості  $\varphi = 120^\circ$ );

Число частотних каналів для обслуговування абонентів в одному секторі – 10;

Допустиме навантаження в одному секторі – до 8 Ерл;

Кількість абонентів, що обслуговуються однією БС – 828;

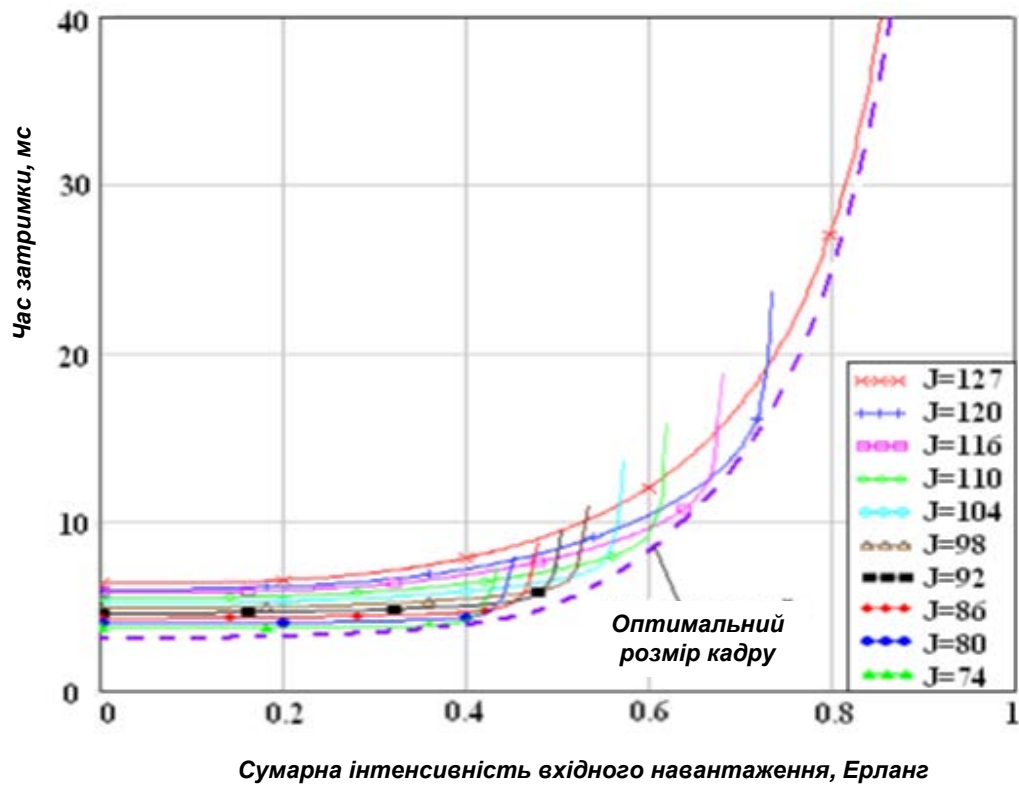
Кількість базових станцій – 13;

Радіус зони обслуговування однією БС – до 3 км;

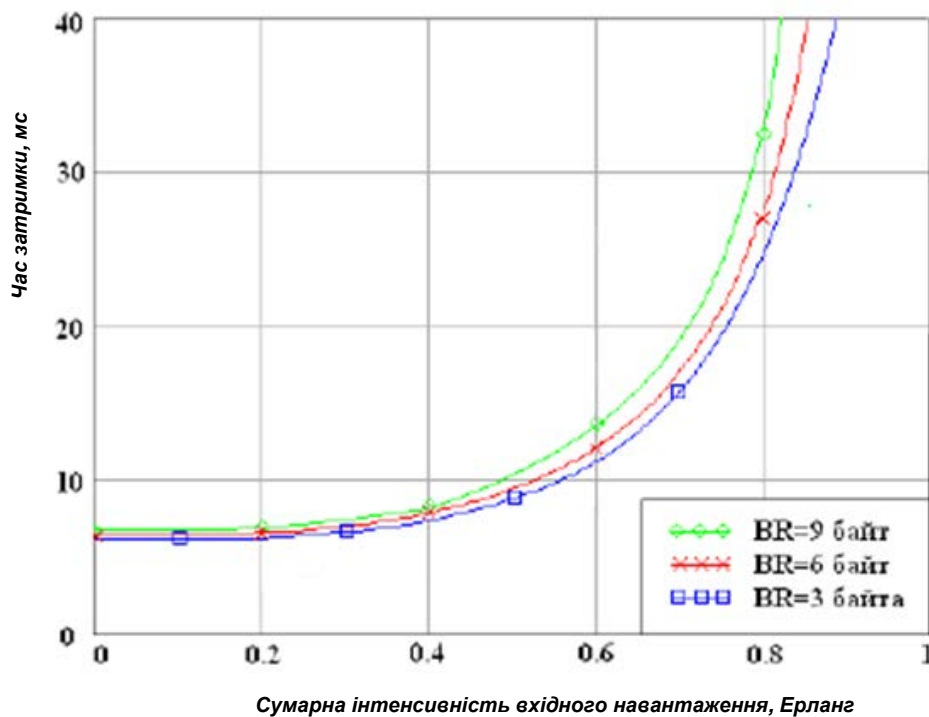
Середні швидкості передачі у низхідних субкадрах: 40 Мбіт/с у центрі стільника і 5 Мбіт/с на краях стільника;

Середні швидкості передачі у висхідних субкадрах: 14 Мбіт/с у центрі стільника і близько 2 Мбіт/с на краях стільника.

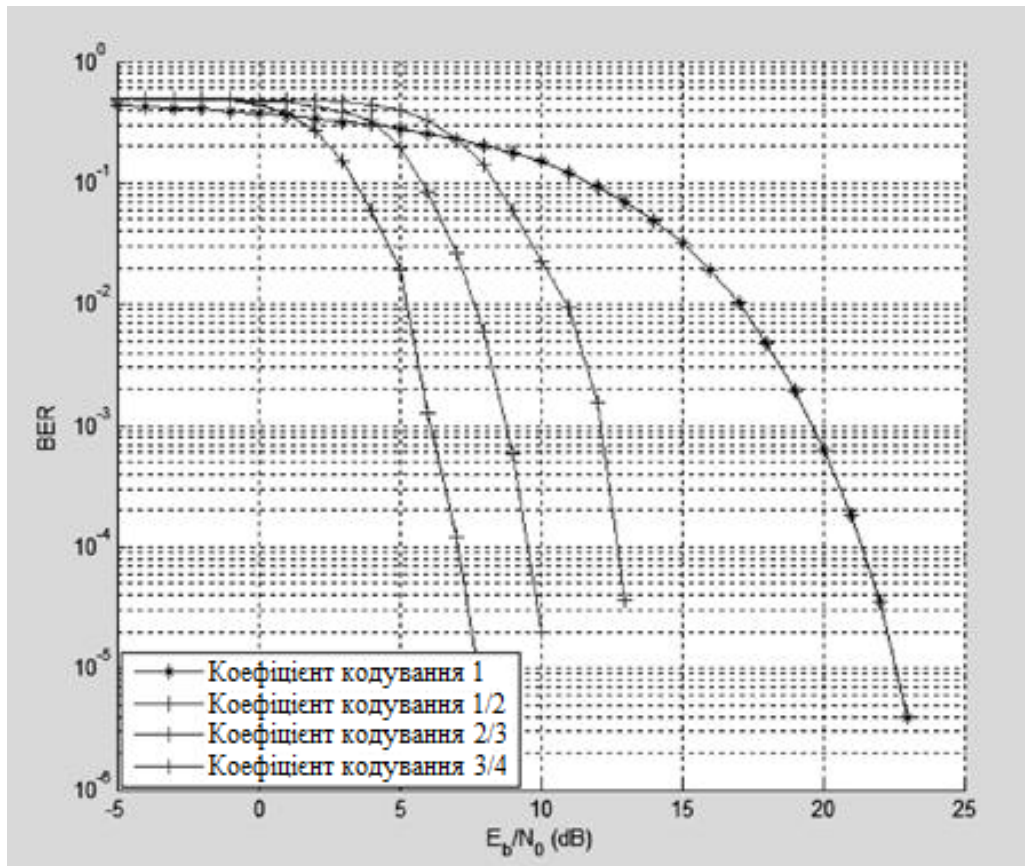
Примітка. При розрахунках було враховано реалізацію принципу комбінованого планування мережі (FFR).



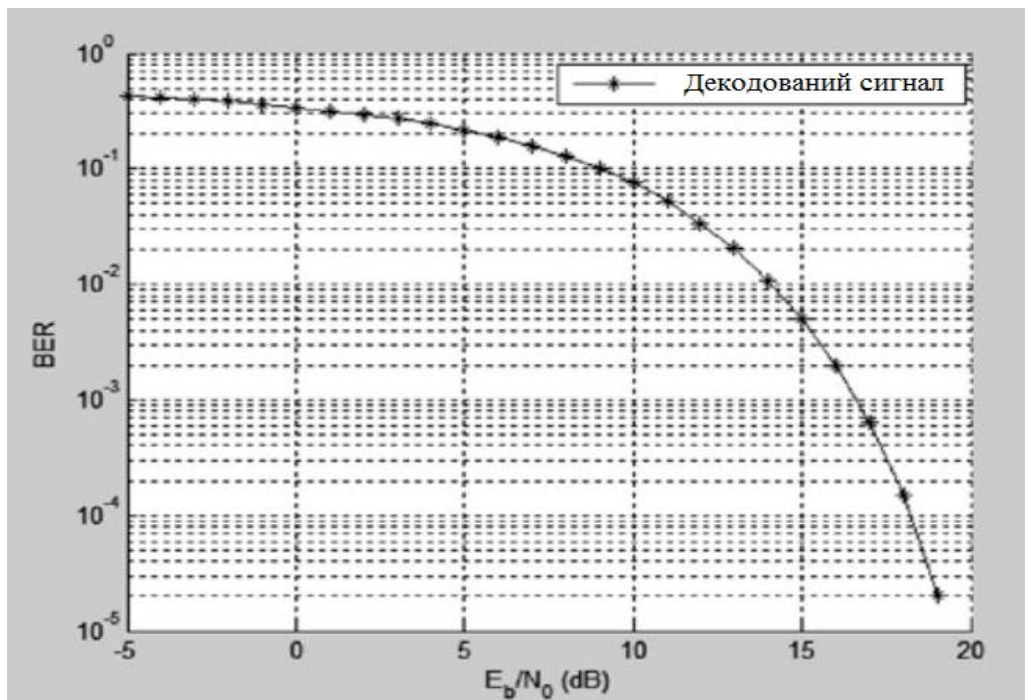
Залежність часу затримки пакетів у висхідному каналі від інтенсивності вхідного навантаження при зміні кількості пакетів даних



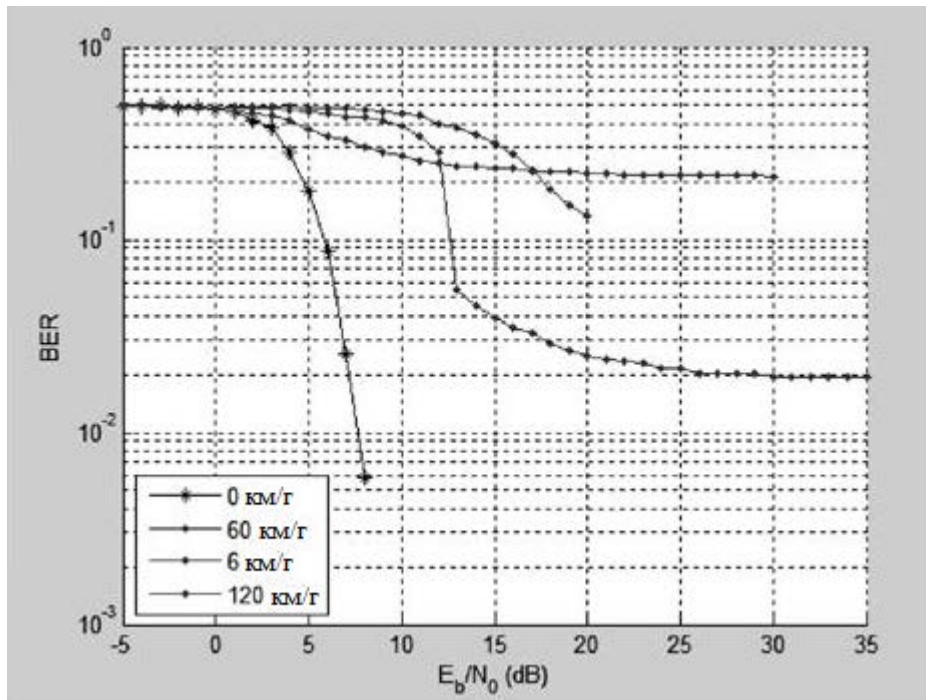
Залежність часу затримки пакетів у висхідному каналі від інтенсивності вхідного навантаження при зміні розміру запиту смуги пропускання BR



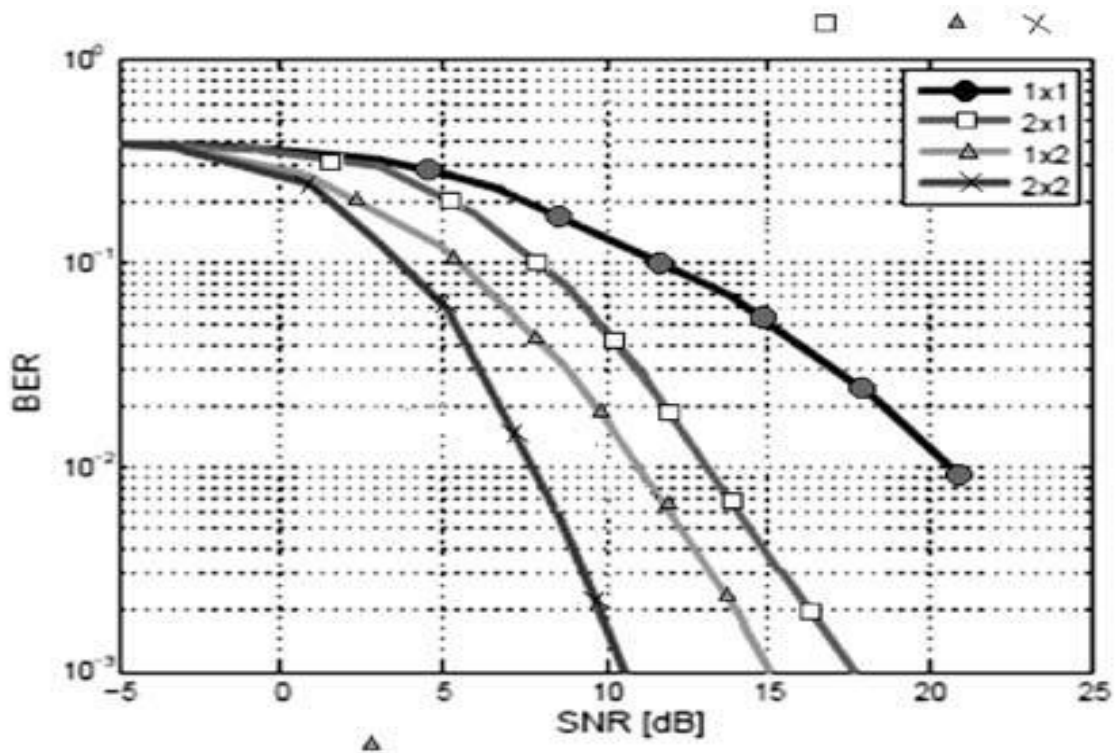
Графік залежності BER від  $E_b / N_{0s}$  при передачі кодованого сигналу



Залежності BER від  $E_b / N_0$  при передачі некодованого сигналу в схемі MIMO



Залежності завадостійкості передачі даних від швидкості пересування абонентського терміналу в схемі МІМО



Порівняння завадостійкості схем передачі даних

## Додаток Б

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ



ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Оптимізація мереж WiMAX для забезпечення безпроводного доступу в регіонах з обмеженою інфраструктурою зв'язку

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра Інфокомунікаційних систем і технологій, факультет Інформаційних електронних систем  
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність 93,73 % Схожість 6,27 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку

Васильківський М.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи

(підпис)

Грицаюк Д.Ю.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Барась С. Т.

(прізвище, ініціали)