

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

на тему:

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ В
ШИРОКОСМУГОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

08-34.МКР.008.00.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТТК-18м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

_____ Подольський О.С.

Керівник: к.т.н., проф. каф. ТКСТБ

_____ Барась С.Т.

« ____ » _____ 2019 р.

Рецензент: к.ф.м.н., проф. каф. ЕНС

_____ Кравченко Ю.С.

« ____ » _____ 2019 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем і телебачення

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Галузь знань 17– Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма Технології та засоби телекомунікацій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТКСТБ
к.т.н., професор Г.Г. Бортник
“ ___ ” _____ 2019 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Подольському Олексію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук., професор.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “02” 10 2019 року № 254

2. Строк подання студентом роботи 02 грудня 2019 року

3. Вихідні дані до роботи:

Швидкості передачі інформації $V=128$ кбіт/с – 54 Мбіт/с;

Ширина смуги пропускання каналу 1 – 20 МГц; Модуляція BPSK; QPSK; QAM-8;

QAM-16; QAM-32; QAM-64; QAM-128; QAM-256; QAM-512; DMT; OFDM;

Співвідношення $s/\pi=5, 10, 15, 20$ дБ; Діапазони частот 30 кГц - 2,2 МГц, 50-750 МГц; 2,4 ГГц; 5 ГГц; 9-11 ГГц

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд технологій широкосмугового доступу. 2. Модуляції в системах широкосмугового доступу. 3. Сучасні методи та засоби підвищення спектральної ефективності. 4. Моделювання каналу передачі з високою спектральною ефективністю. 5. Економічна частина. 6. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Осцилограма потенційного коду 2B1Q; Структурна схема BPSK-модулятора;

Структура модулятора QAM; Адаптація до заводової обстановки при DMT-

модуляції; Формувач групового OFDM-сигналу; Результати моделювання каналу

з модуляцією OFDM.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С.Т., професор кафедри ТКСТБ		
Економічна частина	Адлер О.О., доцент кафедри ЕПВМ		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Березюк О.В., доцент кафедри БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 2 вересня 2019 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	12.09.2019 р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	20.09.2019 р.	
3.	Огляд технологій широкопasmового доступу	12.10.2019 р.	
4.	Дослідження параметрів і характеристик модуляції	20.10.2019 р.	
5.	Розробка сучасних методів та засобів підвищення спектральної ефективності	03.11.2019 р.	
6.	Моделювання каналу передачі	10.11.2019р.	
7.	Аналіз економічної ефективності розробки	14.11.2019 р.	
8.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2019 р.	
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	25.11.2019 р.	
10.	Нормоконтроль МКР	02.12.2019 р.	
11.	Попередній захист МКР, рецензування МКР	06.12.2019 р.	
12.	Захист МКР ЕК	12.12.2019 р.	

Студент _____
(підпис)

Подольський О.С.

Керівник роботи _____
(підпис)

Барась С.Т.

РЕФЕРАТ

Дослідження спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях. Магістерська кваліфікаційна робота / О.С. Подольський – ВНТУ, 2019р.– 136 с., 38 рис., - українською мовою.

Ключові слова: широкосмуговий доступ, модуляція, спектральна ефективність.

Виконано огляд широкосмугових технологій та проаналізовано види модуляцій, які застосовуються у цих технологіях. Проведено аналіз методів та засобів підвищення спектральної ефективності шляхом застосування багатопозиційних методів модуляції та дана оцінка їх потенційних можливостей. Виконано моделювання каналу передачі з високою спектральною ефективністю в умовах дії завад. Дано порівняння різних видів модуляцій.

ABSTRACT

Spectral efficiency research in broadband telecommunications. Master's qualification work / O.S. Podolsky - VNTU, 2019 - 136 pp., 38 Fig. - in Ukrainian.

Keywords: broadband, modulation, spectral efficiency.

Broadband technologies are reviewed and the types of modulations used in these technologies are analyzed. The analysis of methods and means of enhancing spectral efficiency through the use of multiposition modulation methods and an assessment of their potential capabilities. Modeled transmission channel with high spectral efficiency in the conditions of interference. Comparison of different types of modulations is given.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ	10
1.1 Технологія xDSL	10
1.2 Широкопasmуговий доступ по мережах кабельного телебачення.....	11
1.3 Технологія PON на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку.....	16
1.4 Широкопasmуговий радіодоступ Wi-Fi.....	17
1.4.1 Загальні відомості	17
1.4.2 Еволюція спектральної ефективності	19
1.5 Широкопasmуговий радіодоступ WiMAX.....	22
Висновки.....	24
2 МОДУЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ...	26
2.1 Модулятор в мультисервісній телекомунікаційній системі.....	26
2.2 Модуляція потенційним кодом 2B1Q	28
2.3 Бінарна фазова модуляція BPSK	31
2.4 Квадратурна фазова модуляція QPSK	34
2.5 Квадратурно-амплітудна модуляція QAM	36
2.6 CAP-модуляція	41
2.7 Дискретна багаточастотна модуляція DMT	43
2.8 OFDM-модуляція	46
2.9 Технологія MIMO.....	51
Висновки	53
3 СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	55
3.1 Оцінка пропускнуої здатності системи зв'язку	55
3.2 Біортогональні кодові конструкції	58
3.3 Використання технології OFDM	59
3.4 Порівняльний аналіз сучасних систем широкопasmугового доступу	61
3.5 Оцінка потенційних можливостей системи зв'язку	64
Висновки	66
4 МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ З ВИСОКОЮ СПЕКТРАЛЬНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ.....	67
4.1 Побудова моделі.....	67
4.2 Результати дослідження моделі.....	73
Висновки.....	80

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	81
5.1 Аналіз комерційного потенціалу аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях.....	81
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи.....	82
5.3 Прогнозування комерційних ефектів аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях.....	86
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності.....	88
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	90
6.1 Виробнича санітарія та гігієна праці.....	90
6.2 Технічні рішення з з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження	95
6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.....	96
6.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі в умовах надзвичайних ситуацій.....	101
ВИСНОВКИ	104
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	106
ДОДАТКИ	110
Додаток А. Технічне завдання	111
Додаток Б. Осцилограма потенційного коду 2B1Q	118
Додаток В. Спрощена структурна схема та осцилограми напруг BPSK-модулятора	120
Додаток Г. Фазова обвідна QPSK-сигналу	122
Додаток Д. Структурна схема модулятора КАМ та комплексне подання формування КАМ-сигналу	124
Додаток Е. Частотна організація вхідного потоку та залежність швидкостей передачі даних для дискретної багаточастотної модуляції DMT	126
Додаток Ж. Формувач групового OFDM-сигналу	128
Додаток З. Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з гаусовим шумом	130
Додаток К. Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з вузькосмуговою завадою	132
Додаток Л. Нормовані значення виробничих чинників.....	134

ВСТУП

Актуальність теми. В контексті впровадження концепції мереж наступного покоління (NGN) актуальним завданням для телекомунікацій є забезпечення швидкісного доступу до мережі передачі даних. Технології, що забезпечують доступ до ресурсів мережі називають технологіями доступу. Комерційним терміном, який би підкреслював високу швидкість обміну даними, став «широкосмуговий доступ». Широкопasmовий доступ (ШСД) – спосіб організації доступу до ресурсів мережі на високій швидкості.

Термін «широкопasmовий доступ» використовується також для опису високошвидкісних мереж доступу, які лежать в основі мультисервісних технологій. В свою чергу технології, що забезпечують ШСД прийнято називати «широкопasmовими».

Існування технологій широкопasmового доступу, які використовують обмежену ширину смуги пропускання каналу через обмеження частотного ресурсу, вимагає спеціальних технічних рішень щодо збільшення спектральної ефективності таких каналів. Це питання багатогранне, оскільки бажання збільшити спектральну ефективність нашоувхується на зниження завадостійкості системи. Таким чином, дослідження спектральної ефективності як з точки зору її збільшення, так і з точки зору забезпечення при цьому високої завадостійкості є актуальним [1].

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження стосуються питань забезпечення необхідної завадостійкості при використанні багатопозиційних видів модуляції, а також адаптації спектральної ефективності (виду модуляції) до заводового стану каналів (підканалів) передачі даних та аналізу факторів, що обмежують швидкість і дальність зв'язку [2-5].

Мета та постановка задачі. Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка рекомендацій щодо використання багатопозиційних видів модуляції для підвищення спектральної ефективності каналів передачі інформації в умовах дії завад.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- огляд технологій широкосмугового доступу;
- аналіз залежності спектральної ефективності від виду модуляції;
- аналіз завадозахищеності багатопозиційних видів модуляції;
- дослідження впливу багатопроменевого поширення хвиль на спектральну ефективність каналів передачі;
- комп'ютерне моделювання каналів з високою спектральною ефективністю.

Об'єкт дослідження є системи широкосмугового доступу.

Предмет дослідження є спектральна ефективність каналів передачі в системах широкосмугового доступу.

Методи досліджень базуються на використанні теорії електричного зв'язку для оцінки ефективності різних видів модуляції, принципів передачі інформації для оцінки швидкості передачі інформації, теорії сигналів для оцінки ортогональності каналних сигналів, а також теорії планування експерименту і комп'ютерного моделювання для перевірки отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. Установлено, що спектральна ефективність вступає у протиріччя з завадостійкістю – використання більшої кількості позицій в модульованому сигналі (символі) робить його більш уразливим до дії різноманітних завад. Доведено, що низькопозиційні види модуляції характеризуються більшою завадостійкістю. Запропоновані найбільш пристосовану до цих протиріч DMТ-модуляцію, алгоритмом якої передбачений попередній аналіз стану каналу передачі і на основі цього оптимальний вибір типу модуляції. OFDM-модуляція дає суттєве підвищення спектральної ефективності і одночасно забезпечує стійку роботу в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль.

Практичне значення. Практичне значення роботи полягає в розробці рекомендацій стосовно вибору виду модуляції залежно від завадової обстановки для досягнення найвищої спектральної ефективності.

Крім того, результати роботи можна використовувати в навчальному процесі в дисциплінах «Сигнали та широкосмугові технології в телекомунікаціях» та «Системи доступу».

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на I Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем" і на науковій конференції ВНТУ у 2019 році.

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ

1.1 Технологія xDSL

Технологія широкосмугового доступу xDSL базується на використанні існуючих мідних абонентських ліній. xDSL (англ. digital subscriber line, цифрова абонентська лінія) - група проводових технологій, які дозволяють значно підвищити пропускну здатність абонентської лінії телефонної мережі загального користування (ТМЗК) шляхом використання ефективних лінійних кодів і адаптивних методів корекції спотворень у лінії на основі сучасних досягнень мікроелектроніки і методів цифрової обробки сигналу.

Технології xDSL з'явилися в середині 90-х років як альтернатива ISDN.

В абревіатурі xDSL символ «x» використовується для позначення першого символу в назві конкретної технології, а DSL позначає цифрову абонентську лінію DSL. Технології xDSL дозволяють передавати дані зі швидкостями, що значно перевищують ті швидкості, які доступні навіть найкращим аналоговим і цифровим модемам. Ці технології підтримують передачу голосу, високошвидкісну передачу даних і відеосигналів, створюючи при цьому значні переваги як для абонентів, так і для провайдерів. Багато технологій xDSL дозволяють суміщати високошвидкісну передачу даних і передачу голосу по одній і тій же мідній парі. Існуючі типи технологій xDSL розрізняються в основному по методах модуляції та швидкості передачі даних.

Деякі технології xDSL є оригінальними розробками, інші є просто теоретичними моделями, є також такі, що вже стали достатньо поширеними стандартами [1].

Всі технології xDSL можна поділити на дві групи – технології симетричного (SDSL) та асиметричного (ADSL) широкосмугового доступу. Перші знаходять своє застосування в корпоративному секторі, а другі призначені для надання мультимедійних послуг переважно індивідуальним користувачам.

1.2 Широкозмуговий доступ по мережах кабельного телебачення

Для початку розглянемо сутність і основні особливості кабельного телебачення. Станція кабельного телебачення отримує та обробляє різні сигнали радіопередач, супутникових програм і передач місцевих телевізійних студій. Телесигнали – це електромагнітні імпульси, або хвилі, і вони займають відведене їм місце в частотному спектрі. Для поширення телесигналів необхідний деякий носій, за допомогою якого вони проходять від станції до телевізорів клієнтів. Сигнали звичайного телебачення можуть передаватися по повітрю на різних частотах і поширюватися по системах кабельного телебачення, в яких використовуються спеціальні кабелі – коаксіальні або оптоволоконні. Кожен телевізійний сигнал передається по кабелю на своїй частоті (набір таких несущих частот і створює спектр телевізійних каналів), тому кабельне телебачення має свій власний частотний спектр. Таким чином, можна дивитися телепрограми навіть там, де неможливо приймати сигнал через ефір. Головна станція кабельного телебачення отримує різні телепрограми з ефіру, при необхідності перетворює їх (конвертує), підсумовує, підсилює і подає в кабельну магістраль. Зазвичай магістралей буває кілька (2-4). Це залежить від кількості будинків у мікрорайоні, а так само від місця розташування головної станції. Щоб підтримувати потрібний рівень сигналу в магістралі, через певну відстань (у межах 300 метрів) ставляться магістральні підсилювачі. Через спеціальні відгалужувачі сигнал з магістралі потрапляє на будинкову розводку, де остаточно підсилюється і подається до абонентів. Велика кабельна магістраль зазвичай проходить через весь мікрорайон. Кабельні відводи, які мають менший діаметр, передають сигнали з магістралі в локальну кабельну мережу, «пронизуючи» житлові і виробничі будівлі. Коли клієнт хоче підключитися до кабельного телебачення, працівники станції прокладають у його будинок кабель від найближчого відводу і підключають до телевізора. Якщо телевізор не може прийняти всі канали через несумісність кабелів або кодування сигналів, то між кабельною мережею і телевізором встановлюється спеціальний конвертор. Така організація мережі, що носить назву

«деревоподібна з відростками», дозволяє найбільш ефективно і економічно передавати весь набір телепередач від станції до клієнтів.

Для організації доступу в Інтернет за допомогою існуючих мереж кабельного телебачення необхідні спеціальні пристрої – кабельні модеми. Кабельні модеми розташовуються на відводі кабельної магістралі і виконують функції пристроїв: модему, шифратора-дешифратора інформації, маршрутизатора, мережного адаптера, SNMP-агента і навіть концентратора Ethernet. Однак такий пристрій все-таки залишається модемом, оскільки, перш за все він модулює і демодулює сигнали. Зазвичай передача і прийом інформації за допомогою кабельного модему здійснюється різними способами. При передачі інформації від станції до кабельного модему (downstream) цифрові дані модулюються стандартною для телевізійних сигналів частотою (6 МГц), на яку накладається несуча частота (від 42 до 750 МГц).

Технологія доступу по мережах кабельного телебачення передбачає використання або коаксіальних кабелів, або оптоволоконних кабелів. На відміну від xDSL, де для розширення смуги пропускання телефонної лінії використовуються спеціальні технічні заходи, в технології кабельного телебачення такої проблеми немає. Коаксіальні кабелі забезпечують передачу сигналів в діапазоні до 1 ГГц. І ще більш широкосмуговими є оптоволоконні. Це означає, що CATV більш пристосоване для широкосмугового доступу ніж телефонні лінії [4].

Принцип організації передачі інформації через CATV аналогічний принципу роботи систем ADSL. На абонентській стороні встановлюється розділювальний пристрій (сплітер), який дозволяє використовувати один або декілька частотних каналів кабельного телебачення для передачі даних. Ємність одного каналного інтервалу дозволяє передавати дані зі швидкістю від 3 Мбіт/с. При необхідності можна задіяти більшу кількість каналів.

Стандарт CATV передбачає передачу даних абонентові у мережі кабельного телебачення з максимальною швидкістю до 42 Мбіт/с. (при ширині смуги пропускання 6 МГц і використанні багатопозиційної амплітудної модуляції QAM-

256) і отримання даних від абонента зі швидкістю до 10,24 Мбіт/с. Він покликаний змінити поширені раніше рішення на основі фірмових протоколів передачі даних і методів модуляції, несумісних один з одним, і повинен гарантувати сумісність апаратури різних виробників.

Прийняті ITU документи передбачають також три варіанти застосування, що враховують специфічні особливості американського, європейського і японського ринків послуг CATV і поширені в цих регіонах стандарти (NTSC, PAL, SECAM).

Існує декілька версій специфікації DOCSIS, таблиця 1.1:

DOCSIS 1.0, DOCSIS 1.1, DOCSIS 2.0, DOCSIS 3.0, EURODOCSIS

Таблиця 1.1 - Швидкість передачі, встановлена версіями протоколу

Version	DOCSIS		EuroDOCSIS	
	Downstream	Upstream	Downstream	Upstream
1.x	42.88 (38) Mbit/s	10.24 (9) Mbit/s	55.62 (50) Mbit/s	10.24 (9) Mbit/s
2.0	42.88 (38) Mbit/s	30.72 (27) Mbit/s	55.62 (50) Mbit/s	30.72 (27) Mbit/s
3.0 4channel	+171.52 (+152) Mbit/s	+122.88 (+108) Mbit/s	+222.48 (+200) Mbit/s	+122.88 (+108) Mbit/s
3.0 8channel	+343.04 (+304) Mbit/s	+122.88 (+108) Mbit/s	+444.96 (+400) Mbit/s	+122.88 (+108) Mbit/s

EURODOCSIS регламентує прийнятий для Європи розподіл частот прямого і зворотного каналу, обумовлює роботу зі смугою 8 МГц.

Архітектура DOCSIS включає два основних компоненти: кабельний модем, що міститься в споживача, та комутаційну систему кабельних модемів (CMTS), розміщену у провайдера кабельного телебачення.

Мережа широкопasmового доступу на базі DOCSIS будується за топологією «точка-багато точок», рис. 1.1. Для передачі даних від CMTS до абонентів і в зворотному напрямку використовуються відповідні телевізійні канали, рис. 1.2.

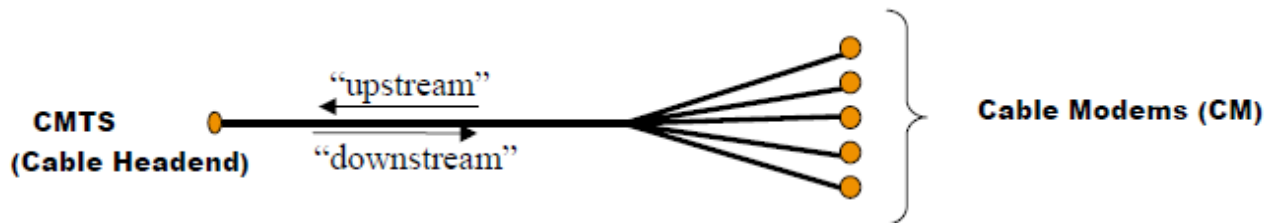


Рис. 1.1 – Топологія мережі DOCSIS

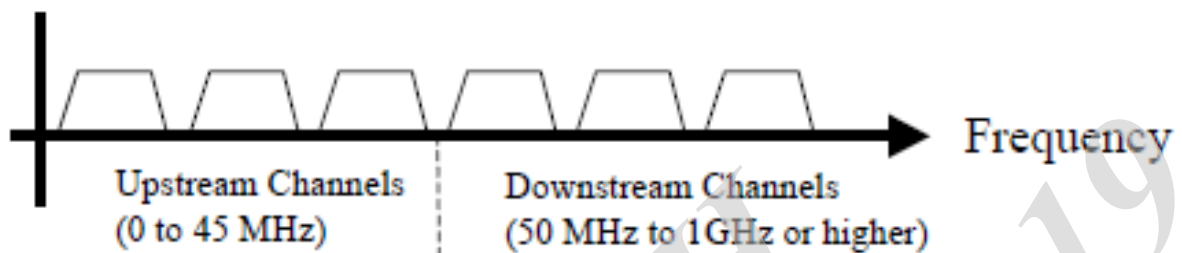


Рисунок 1.2 – Частотний розподіл каналів передачі даних

Сигнали даних передаються по кабельній системі разом з сигналами кабельного телебачення і не заважають телепередачам. Є кілька схем модуляції, але найбільш популярні з них дві – квадратурна фазова маніпуляція (QPSK), яка забезпечує швидкість передачі 10 Мбіт/с) і квадратурно-амплітудна модуляція QAM-64, яка забезпечує швидкість передачі до 36 Мбіт/с. Зворотний сигнал від модему до станції (upstream) передавати складніше. Це пов'язано з тим, що у звичайній дуплексній кабельній мережі зворотний сигнал (Upstream) може передаватися на частотах від 5 до 40 МГц. Такому сигналу можуть перешкодити радіошуми і радіопередачі, а також непідключена антена або погане з'єднання коаксіальних кабелів. Оскільки кабельна мережа має деревоподібну форму, всі шуми з усіх відгалужень збираються разом і перешкоджають поширенню зворотного сигналу. Більшість виробників планує використовувати QPSK або аналогічну схему модуляції для передачі в прямому напрямку, оскільки цей метод краще підходить для сильно зашумленого навколишнього середовища, ніж високочастотні методи модуляції. Недолік же QPSK очевидний - нижча швидкість передачі, ніж при використанні схеми модуляції QAM [6].

Висока спектральна ефективність повинна мати місце в першу чергу в прямому каналі, у якому інформація передається до споживача. Прямий канал

створюється на одній з частот від 42 до 750 МГц. При цьому забезпечується символна швидкість близько 6 Мбіт/с для DOCSIS і близько 8 Мбіт/с для EURODOCSIS. Стандарт передбачає використання двох видів модуляції: QAM-64 або QAM-256. Для першого виду модуляції одним символом переноситься 6 біт інформації, тому швидкість передачі становить 30,34 Мбіт/с (реальна символна швидкість 5,06 Мсимв/с), для другого виду – 8 біт інформації, тому швидкість передачі становить 42,88 Мбіт/с (реальна символна швидкість 5,36 Мсимв/с).

Зворотний канал створюється на одній з частот у діапазоні від 5 до 42 МГц і займає одну з наведених смуг частот: 0,2 МГц, 0,4 МГц, 0,8 МГц, 1,6 МГц, 3,2 МГц. Для наведених значень смуг реальні символні швидкості будуть такими (відповідно): 160 ксимв/с, 320 ксимв/с, 640 ксимв/с, 1280 ксимв/с, 2560 ксимв/с. Стандарт передбачає використання двох видів модуляції: QPSK або QAM-16. Для першого виду модуляції одним символом переноситься 2 біти інформації, тому швидкість передачі становить відповідно: 290 кбіт/с, 580 кбіт/с, 1150 кбіт/с, 2300 кбіт/с, 4600 кбіт/с; для другого виду – 4 біти інформації, тому швидкість передачі становить відповідно: 580 кбіт/с, 1160 кбіт/с, 2300 кбіт/с, 4600 кбіт/с, 9200 кбіт/с.

Отже, у прямому каналі спектральна ефективність становить близько 5 біт/Гц, а у зворотному – близько 3 біт/Гц [6].

1.3 Технологія PON на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку

Оптична мережа широкосмугового доступу (ОМШСД) передбачає використання волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Поняттям FTTx описується загальний підхід до організації кабельної інфраструктури мережі доступу, в якій від вузла зв'язку до певного місця (точка "x") доходить оптика, а далі, до абонента, - мідний кабель (можливий і варіант, при якому оптика прокладається безпосередньо в будинок абонента). Таким чином, FTTx - це тільки фізичний рівень, проте фактично дане скорочення охоплює ціле сімейство технологій і різного мережного обладнання.

Архітектура OMШСД може бути типу «точка-точка» і «точка-багато точок».

Архітектура «точка-точка» P2P (point-to-point) надає кожному абоненту окреме волокно оптичного кабелю. Для реалізації цієї архітектури використовується технологія Ethernet. Цей варіант набув поширення в Європі.

Архітектура «точка-багато точок» використовується при значному віддаленні абонента або абонентів від вузла надання послуг. В цьому випадку через одне волокно оптичного кабелю передається груповий абонентський потік, який розділяється на індивідуальні абонентські потоки, що передаються далі абонентам по окремих волокнах оптичного кабелю. Для реалізації цієї архітектури використовується технологія пасивних оптичних мереж PON (Passive Optical Networks). Цей варіант набув поширення в Америці та Японії [7].

При використанні технології пасивних оптичних мереж PON для розгортання мереж FTТх оптоволоконна лінія розподіляється між абонентами за допомогою пасивних оптичних розгалужувачів з коефіцієнтом розділення від 1:4 до 1:128.

Таблиця 1.2 – Характеристики технологій PON

	BPON	EPON	GPON
Стандарт	ITU-T G.983	IEEE803.2ah	ITU-T G.984
Швидкість	Downstream до 622 МБіт/с Upstream до 155 МБіт/с	Симетрично 1,25 ГБіт/с	Downstream до 2,5 ГБіт/с Upstream до 2,5 ГБіт/с
Downstream, λ (нм)	1490 і 1550	1550	1490 і 1550
Upstream, λ (нм)	1310	1310	1310
Технологія передачі	ATM	EPON	ATM, Ethernet, TDM

У стандартній оптичній мережі PON на стороні провайдера зв'язку використовуються OLT (Optical Line Terminal), а як абонентські пристрої застосовуються ONT (Optical Network Terminal), або пристрої оптичної мережі

(Optical Network Unit (ONU)). ONT призначений для використання окремим кінцевим користувачем. Пристрій ONU зазвичай спільно використовується групою користувачів. Голосові сервіси, послуги передачі даних і відео підводяться від ONT та ONU до абонента кабелями, що прокладені в приміщенні абонента [8].

Існує кілька різних стандартів мережі PON, які базуються на використанні транспортних технологій ATM та Ethernet. В таблиці 1.2 наведено основні характеристики найбільш поширених технологій PON.

Варто зазначити, що технологія широкопasmового доступу на основі використання оптоволоконних кабельних ліній не потребує високої спектральної ефективності, оскільки такі мережі не мають особливих обмежень частотного ресурсу. Саме тому ця технологія зазначена у даному розділі як важлива і найперспективніша, але предметом дослідження вона не являється.

1.4 Широкопasmовий радіодоступ Wi-Fi

1.4.1 Загальні відомості

Бездротова локальна мережа WLAN - вид локальної обчислювальної мережі (LAN), що використовує для зв'язку і передачі даних між вузлами високочастотні радіохвилі, а не кабельні з'єднання. Це гнучка система передачі даних, яка застосовується як розширення або альтернатива кабельної локальної мережі всередині однієї будівлі або в межах певної території.

Мережа WLAN забезпечує не прив'язану до окремих приміщень мережу і доступ в Інтернет. Мережа WLAN дає змогу користувачам переміщатися по території підприємства або організації, залишаючись підключеними до мережі. Бездротову мережу можна побудувати там, де не можна протягнути кабелі; технологія WLAN полегшує тимчасову установку мережі і її переміщення.

Дальність дії радіочастот, особливо в приміщеннях, залежить від характеристик виробу (в тому числі від потужності передавача), конструкції

приймача, завадозахищеності і шляхів проходження сигналу. Взаємодія радіохвиль із звичайними об'єктами будівлі, наприклад, зі стінами, металевими конструкціями і навіть людьми, може вплинути на дальність поширення сигналу, і таким чином, змінити зону дії конкретної системи. Бездротові мережі використовують радіочастоти, оскільки радіохвилі всередині приміщення проникають через стіни та перекриття. Область охоплення систем WLAN з найпростішими антенами досягає 300м, маючи антени з великим посиленням - до 7 км в залежності від кількості та виду перешкод. За допомогою додаткових точок доступу можна розширити зону дії, і тим самим забезпечити свободу пересування.

Точка доступу об'єднує кабельну і бездротову мережу і дозволяє клієнтам останньої отримати доступ до ресурсів кабельної мережі. Кожна точка доступу розширює загальну обчислювальну потужність системи. Користувачі можуть переміщатися між точками доступу, не втрачаючи з'єднання з мережею, - як і при підключенні до мережі за допомогою стільникового телефону. Іншими словами, точка доступу - це програмно-апаратний пристрій, який виконує роль концентратора для клієнта бездротової мережі і забезпечує підключення до кабельної мережі [10].

Кількість користувачів, які може підтримувати одна система WLAN, практично необмежена. Його можна збільшувати, просто встановлюючи нові точки доступу. За допомогою перекриття точок доступу, налаштованих на різні частоти (канали), безпроводну мережу можна розширити за рахунок збільшення числа користувачів в одній зоні. Каналів, які перекриваються і не створюють взаємних завад, одночасно може бути встановлено не більше трьох; ці канали втричі збільшать кількість користувачів мережі. Подібним чином можна розширювати бездротову мережу, встановлюючи точки доступу в різних частинах будівлі. Це збільшує загальне число користувачів і дає їм можливість переміщатися по будівлі або території організації.

Кількість користувачів у цьому випадку залежить, в першу чергу, від завантаженості трафіка. У мережі WLAN смуга пропускання ділиться між

користувачами так само, як і у кабельній мережі. Виходячи з числа користувачів продуктивність мережі залежить також від роду завдань, що вони їх виконують.

1.4.2 Еволюція спектральної ефективності

У технології Wi-Fi є кілька сторін, які завжди хотілося доопрацювати, щоб зробити її більш досконалою. Серед них: питання безпеки, проблеми розподілу трафіку між декількома клієнтами, а також швидкість передачі даних. Втім, що стосується останнього, тут було знайдено рішення MIMO [13].

Розвиток бездротових мереж, доступних для широкого застосування, почалося зі стандарту 802.11b, який був примітний тим, що майже не залежав від радіоперешкод, оскільки радіопередача йшла в невеликому НВЧ-діапазоні білим шумом. Або, кажучи іншими словами, сигнал, який передається від передавача до приймача, проходив відразу кількома підканалами (у випадку з 802.11b їх 11), причому передача кожного біта даних передбачалася спеціальним алгоритмом, завдяки якому прийом невеликої ділянки спектра і подальше декодування «фоновому шуму» дозволяли однозначно відновити вихідну послідовність даних. Цей механізм модуляції отримав назву методу прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS). В результаті фізична пропускна здатність каналу для обладнання 802.11b склала близько 11 Мбіт/с, а реальна пропускна здатність, яка з цілком зрозумілих причин не перевищує половини фізичної (зокрема, для IP-трафіку), обмежувалася 5 Мбіт/с в хороших умовах прийому. При всій привабливості даної технології пропускної здатності мережі в кілька мегабіт за секунду недостатньо, наприклад, для роботи в мультисервісному режимі.

Були запропоновані нові стандарти, які згодом отримали назву 802.11a і 802.11g (в порядку появи на ринку). Для нас цікавіший другий стандарт, оскільки він має зворотну сумісність з пристроями 802.11b, які до сих пір встановлені в багатьох ноутбуках, роутерах та точках доступу. Крім того, поки-що не можна використовувати частоти в діапазоні 5 МГц без ліцензії, в той час як смуга 2,4 ГГц, на якій працюють 802.11b і 802.11g, абсолютно відкрита для приватного

використання всередині приміщень (на мережу, яка працює за межами будівлі, необхідний відповідний дозвіл галузевого міністерства).

Стандарт 802.11g використовує інший принцип модуляції, більш досконалий – OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним поділом). Принцип роботи пристрою для реалізації такого стандарту досить простий: в обладнанні встановлюється більш потужний математичний процесор, він розбиває сигнал на кілька потоків даних, які одночасно передаються на різних частотах, проте дотримуючись дозволеного законом діапазону. Сама модель ортогонального частотного поділу дозволяє уникнути перехресних перешкод для різних підканалів, що розширює смугу пропускання в стільки разів, скільки незалежних каналів використовується в системі. Нескладний підрахунок показує, що каналів при такій передачі даних виявляється п'ять.

Але оскільки реальна пропускна здатність для пристроїв 802.11g обмежувалася значенням 20 Мбіт/с, потрібно нове рішення. У деяких компаній виникла ідея застосування технології Smart Antenna, яка має на меті використання трьох антен для організації більш надійного і стабільного з'єднання між точкою доступу і клієнтським адаптером, що, природно, призводить до підвищення дальності дії мережі і невеликого зростання реальної пропускної здатності в рамках фізичних характеристик стандарту. І тільки коли ця методика почала застосовуватися, виникло питання, як зробити бездротову мережу в тому ж діапазоні ще більш продуктивною, домогтися підвищення пропускної здатності без розширення частотного спектру.

Відповіддю стала реалізація першого чіпа з підтримкою кодування і передачі даних відповідно до ідеології MIMO від компанії Airgo Networks. Аббревіатура MIMO (Multiple Input Multiple Output) означає "множинний вхід, множинний вихід". Тобто будь-яку систему, що працює за принципом MIMO, можна розглядати як багатоканальний прилад, який поєднує в собі можливості кількох одноканальних.

Технологія передачі даних, реалізована в чіпах Airgo, очевидно, також вимагає потужного математичного процесора, оскільки на цей раз, крім модуляції

OFDM (вона також необхідна), чіп повинен кодувати дані спеціальним чином, щоб ті могли створити два незалежних потоки, які згодом можуть бути розглянуті як окремі канали Wi-Fi.

Ідея полягає в тому, що передавач, так само як і приймач, володіє двома незалежними антенами, які передають і приймають один з потоків даних, закодованих для мережі MIMO. Між відповідними антенами створюється канал, який слугує фізичним транспортом для одного з потоків даних. Техніка Wi-Fi MIMO використовує неоднорідність приміщень і ефекти відбиття, що дозволяє зробити потоки даних незалежними. Таким чином, в чистому полі MIMO дасть набагато менше ефекту, ніж в офісі, і подібний підхід з наукової точки зору слід вважати дуже конструктивним. Що стосується інтерпретації даних, завдяки деяких хитрощів з модуляцією і глибшою математичною обробкою кодованих даних як на етапі передачі, так і на етапі прийому, стає можливим збереження практично повної пропускну здатності кожного з каналів, інтерференція і взаємні перешкоди для яких вирішуються за допомогою технології Smart Antenna.

Стандарт 802.11ac прийнятий в 2014 році, а пристрої з його підтримкою з'явилися раніше. У ньому значно збільшена швидкість передачі даних (теоретично, до 6.7 Гбіт/с). Досягається це завдяки збільшеній ширині каналів (до 160 МГц), кількості потоків (до 8) і нової поліпшеної модуляції QAM-256. Звичайно, не всі нововведення стандарту стали доступні відразу. Реалізація на точках доступу і клієнтських станціях відбувається поетапно. Перша хвиля пристроїв підтримує канали 80 МГц, модуляцію QAM-256 і два-три просторових потоки. Корпоративні точки доступу другої хвилі, що з'явилися у 2015 році, підтримують ширину каналу до 80 МГц і до чотирьох просторових потоків, що дає швидкість 1.7 Гбіт/с. Також, для другої хвилі пристроїв додана підтримка багатокористувацького просторового мультиплексування MultiUser-MIMO (MU-MIMO). Ця технологія дозволяє передати кілька потоків інформації декільком користувачам одночасно. Зараз практично будь-який новий пристрій з бездротовою Wi-Fi мережею підтримує як мінімум першу хвилю стандарту.

Аналіз показує, що еволюція стандартів супроводжувалась еволюцією спектральної ефективності: з 0,5 біт/Гц для стандарту 802.11b до 20 біт/Гц для стандарту 802.11ac [17].

1.5 Широкополосний радіодоступ WiMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – перспективний напрямок розвитку широкополосних технологій бездротового доступу.

Маючи широкий вибір технологій, складно одночасно дотриматись трьох основних вимог: високої пропускної здатності, надійності і мобільності. Розв'язати таке завдання може наступне покоління бездротових технологій – WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), стандарт IEEE 802.16.

Завдання технології WiMAX полягає в тому, щоб надати універсальний бездротовий доступ для широкого спектру пристроїв (робочих станцій, побутової техніки "розумного дому", портативних пристроїв і мобільних телефонів) та їх логічного об'єднання – локальних мереж. Слід зазначити, що дана технологія має ряд переваг: у порівнянні з проводимим (xDSL), безпроводовими або супутниковими системами мережі WiMAX повинні дозволити операторам і сервіс-провайдерам охопити не тільки нових потенційних користувачів, але і розширити спектр інформаційних і комунікаційних технологій для користувачів, які вже мають фіксований (стаціонарний) доступ.

Стандарт об'єднує технології рівня оператора зв'язку (для об'єднання багатьох підмереж і надання їм доступу до Internet), а також технології "останньої милі" (кінцевого відрізка від точки входу до мережі провайдера до комп'ютера користувача), що створює універсальність і, як наслідок, підвищує надійність системи [21].

Дальність охоплення є суттєвим показником системи радіозв'язку. На даний момент більшість безпроводових технологій широкополосної передачі даних вимагають наявності прямої видимості між об'єктами мережі. WiMAX завдяки використанню технології OFDM створює зони покриття в умовах

відсутності прямої видимості від клієнтського обладнання до базової станції, при цьому відстані обчислюються кілометрами.

З'єднання між базовою станцією та клієнтським приймачем проводиться в НВЧ діапазоні 2-11 ГГц. Дане з'єднання в ідеальних умовах дозволяє передавати дані зі швидкістю до 20 Мбіт/с і не вимагає, щоб станція знаходилася на відстані прямої видимості від користувача. Цей режим роботи базової станції WiMAX близький до стандарту 802.11 (Wi-Fi), який широко використовується.

Між сусідніми базовими станціями встановлюється постійне з'єднання з використанням надвисокої частоти 10-66 ГГц радіозв'язку прямої видимості. Дане з'єднання в ідеальних умовах дозволяє передавати дані зі швидкістю до 120 Мбіт/с. Обмеження по умові прямої видимості, зрозуміло, не є перевагою, проте воно накладається тільки на базові станції, які беруть участь в цілісному покритті району, що цілком можливо реалізувати при розміщенні обладнання.

Як мінімум одна з базових станцій може бути постійно пов'язана з мережею провайдера через широкосмугове швидкісне з'єднання. Фактично, чим більше станцій мають доступ до мережі провайдера, тим вища швидкість і надійність передачі даних. Однак навіть при невеликій кількості точок система здатна коректно розподілити навантаження за рахунок стільникової топології.

За структурою мережі стандарту IEEE 802.16 дуже схожі на традиційні мережі мобільного зв'язку: тут теж є базові станції, які діють в радіусі до 50 км, при цьому їх також не обов'язково встановлювати на вишках. Для них цілком підходять дахи будинків, потрібно лише дотримання умови прямої видимості між станціями. Для з'єднання базової станції з користувачем необхідна наявність абонентського обладнання.

На фізичному рівні в стандарті IEEE 802.16-2004 визначені три методи передачі даних: метод модуляції однієї несучої (SC), метод ортогонального частотного мультиплексування (OFDM) і метод множинного доступу на основі такого мультиплексування (OFDMA).

Специфікація фізичного рівня WirelessMAN-OFDM є найбільш цікавою з точки зору практичної реалізації. Вона базується на технології OFDM, що значно

розширює можливості обладнання, зокрема, дозволяє працювати на відносно високих частотах в умовах відсутності прямої видимості. Крім того, вона містить підтримку топології «кожен з кожним» (MESH), при якій абонентські пристрої можуть одночасно функціонувати і як базові станції, що значно спрощує розгортання мережі і допомагає подолати проблеми прямої видимості.

Основне призначення мереж WiMAX – це надання послуг корпоративним і індивідуальним абонентам по високошвидкісній і високоякісній бездротовій передачі даних, голосу і відео на відстань в кілька десятків кілометрів.

У мережах WiMAX реалізовані найостанніші досягнення науки і техніки в області радіозв'язку, телекомунікацій і комп'ютерних мереж. Стандарт IEEE 802.16 визначає застосування:

- на фізичному (радіо) рівні широкопasmового радіосигналу OFDM з безліччю піднесущих;
- на каналному рівні використовується сучасний протокол множинного (багатостанційного) доступу Time Division Multiply Access (TDMA) і Scalable OFDM Access (SOFDMA);
- на мережному (транспортному) рівні в мережах WiMAX застосовується IP протокол передачі даних, який широко використовується в більшості сучасних мереж передачі даних, у тому числі, в мережі Інтернет.

Застосування у системах WiMAX модуляції OFDM забезпечує найвищу у класі бездротових технологій широкопasmового доступу спектральну ефективність та можливість роботи без вимоги прямої видимості.

Висновки

Технології широкопasmового доступу залежно від типу лінії зв'язку ділять на дротові та бездротові. Технології, що використовують дротові лінії зв'язку, у свою чергу ділять на декілька класів. Перший клас – технології, що використовують металеві пари провідників, другий – технології з використанням коаксіального кабелю, третій – технології, що використовують оптоволоконний кабель. Бездротові технології також можна поділити на класи. Стационарний

радіодоступ (Wi-Fi, WiMAX), передача даних за допомогою стільникових мереж (GPRS, EDGE, EVDO, HSPDA) та супутникового зв'язку (VSAT).

Спектральна ефективність системи оцінюється максимально можливою швидкістю передачі даних (кількість переданих біт/с) системи в одиниці смуги займаних частот в один Герц. Ця характеристика є інтегральною, оскільки вона пов'язує між собою швидкість передачі інформації та ширину смуги пропускання широкосмугового каналу. Очевидно, користувача цікавить швидкість передачі інформації і чим вона вища, тим комфортніше він себе почуває. Відомо, що досягти високої швидкості передачі даних можна за рахунок використання широкосмугових каналів або застосуванням багатопозиційних видів модуляції, коли один символ переносить більше одного біта інформації. Часто частотний ресурс є обмеженим, тому доводиться вирішувати проблему досягнення високої швидкості саме шляхом використання ефективних видів модуляції. Але слід мати на увазі, що чим вища ефективність модуляції, тим нижча її завадостійкість. Отже, аналіз досяжних значень спектральної ефективності в системах широкосмугового доступу слід проводити одночасно з аналізом реальної завадостійкості відповідної технології.

На сьогоднішній період найкращі результати щодо спектральної ефективності вдається отримати на основі використання модуляції OFDM – ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням. В основі цієї технології лежить використання ортогональних піднесущих, які створюються у виділеній для відповідної технології широкосмугового доступу смузі частот. Аналогічним видом модуляції є DMT-модуляція – дискретна частотна модуляція.

Для великої кількості ортогональних піднесущих в обох вищеназваних технологіях постає проблема забезпечення відсутності міжканальної інтерференції, тобто збереження ортогональності сигналів на піднесущих. Шлях розв'язання цієї проблеми – використання символів підвищеної тривалості.

2 МОДУЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ

2.1 Модулятор в мультисервісній телекомунікаційній системі

Проблеми підвищення ефективності використання частотного ресурсу привели до використання багатопозиційної модуляції [8, 31] при передачі сигналів. При заданій ширині смуги частот ΔF , рис. 2.1, швидкість передачі даних V_s , а в результаті - і інформаційна ефективність системи, може бути збільшена за рахунок збільшення кількості бінарних елементів, що припадають на один символ багатопозиційної модуляції (БПМ).

Таким чином, підвищуючи число позицій M в сузір'ї БПМ, вдається економити частотний ресурс ΔF зі збереженням швидкості передачі інформації, або ж повністю використовувати наявний частотний ресурс ΔF зі збільшенням швидкості передачі інформації. При цьому із застосуванням БПМ на приймач покладається додаткове навантаження, оскільки приймач повинен розпізнати один з $M = 2^m$ можливих елементів, де m - число біт на символ.

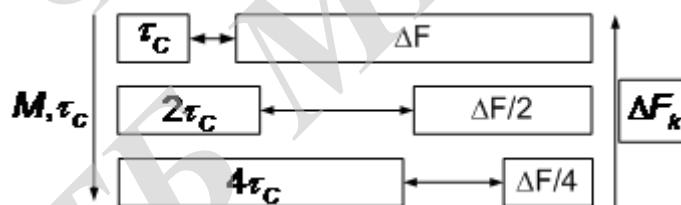


Рисунок 2.1 – Економія частотного ресурсу із збереженням швидкості передачі при збільшенні рівня БПМ

Багатопозиційна модуляція дозволяє передавати в одному повідомленні дві і більше одиниць біт, в зв'язку з чим підвищується швидкість передачі в дискретному каналі зв'язку, рис. 2.2. Наприклад, широке застосування знайшли такі види БПМ як QPSK (2 біт/символ), QAM-16 (4 біт/символ), QAM-64 (6 біт/символ) тощо [15].

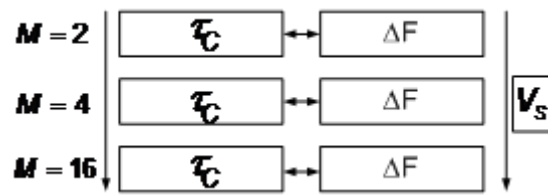


Рисунок 2.2 – Збільшення швидкості передачі при задіянні всього доступного діапазону частот

Збільшення кількості сигнальних точок ансамблю сигналів БПМ, де кожна точка є поданням амплітуди і фази гармонійного коливання, призводить до ускладнення розрізнення сигнальних точок в приймачі, оскільки відстань між точками зменшується. В результаті, поряд з підвищенням швидкості передачі при використанні БПМ, зі збільшенням числа переданих одиниць на символ, стійкість системи, а в результаті - достовірність передачі, погіршуються [14]. Таким чином, при збільшенні числа двійкових одиниць на символ БПМ, необхідно контролювати достовірність переданих повідомлень, яка залежить від енергетичного параметра каналу в точці прийому, оскільки зниження вірогідності передачі нижче значень $p = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ веде до зниження інформаційної ефективності системи передачі, яка залежить від продуктивності дискретного джерела і пропускної здатності каналу.

БПМ може забезпечити підвищення частотної ефективності та інформаційної ефективності при такій же тривалості сигналу передачі в незмінній смузі частот [17].

Неможливо однозначно сказати, яка модуляція використовуватиметься у якихось конкретних умовах для якихось технологій широкосмугового доступу. Важливо також розуміти, що не може бути встановлений якийсь один вид модуляції, який найкращим чином вирішуватиме задачу підвищення спектральної ефективності. У той же час, оскільки частотний спектр являє собою унікальний природний ресурс, то вимоги до спектру, що використовується системою передачі, будуть невпинно зростати. Тому вибір найбільш ефективного способу модуляції при розробці систем широкосмугового доступу продовжує залишатися

одним з найважливіших питань. Основне завдання будь-якої системи зв'язку - передача інформації від джерела повідомлення до споживача найбільш економічним чином. Тому вибирають такий тип модуляції, який зводить до мінімуму дію перешкод і спотворень, досягаючи тим самим максимальної інформаційної швидкості і мінімального коефіцієнта помилок. Отже, розглянемо різні типи модуляції, враховуючи не тільки здатність підвищення спектральної ефективності, але і стійкість до багатопроменевого поширення радіосигналів, наявність інтерференції, досягну дальність передачі і складність реалізації.

2.2 Модуляція потенційним кодом 2B1Q

Алгоритм 2B1Q є один з варіантів реалізації амплітудно-імпульсної модуляції з чотирма рівнями вихідної напруги без повернення до нульового рівня. Алгоритм формування коду наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Алгоритм формування коду 2B1Q

Кодова група	Кодова напруга
00	- 2,5 В
01	- 0,833 В
10	+ 2,5 В
11	+ 0,833 В

Для формування лінійного коду вхідний інформаційний потік ділиться на кодові групи по два біти в кожній. Позитивна полярність означає, що перший біт дорівнює 1, а негативна, що він дорівнює 0. Другий біт інтерпретується як 1 при низьких рівнях напруги і як 0 при високих рівнях. Таким чином, закодований відповідно до правил 2B1Q сигнал являє собою послідовність напруг, що стрибкоподібно змінюються, з чотирма можливими рівнями, рис. 2.3.

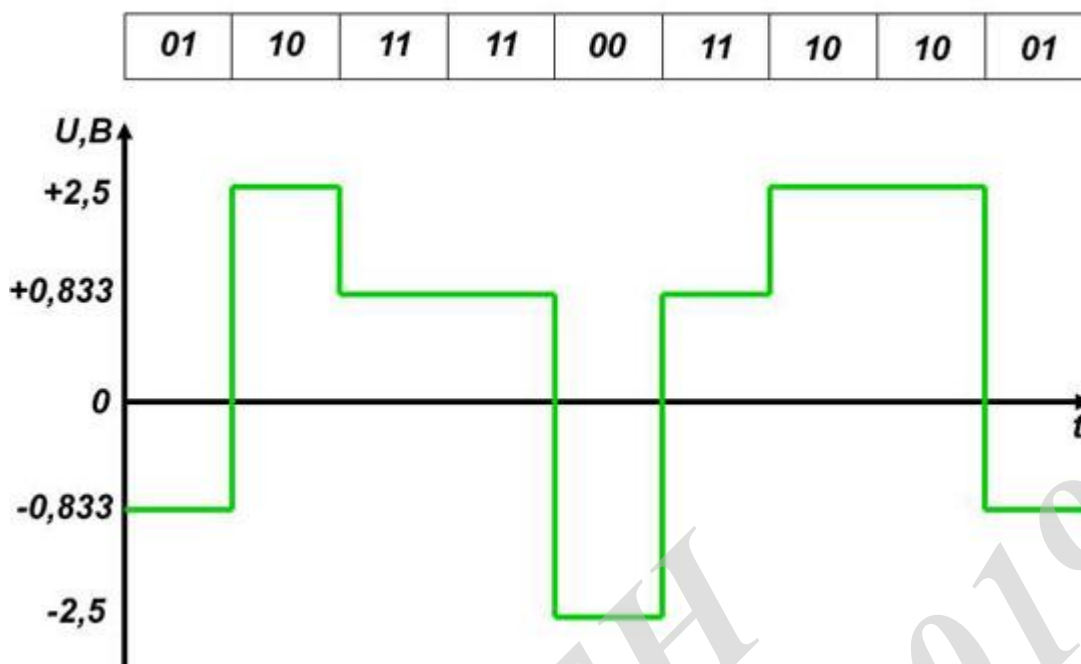


Рисунок 2.3 – Приклад формування коду 2B1Q

Спектр лінійного сигналу симетричний і досить високочастотний, присутні також низькочастотні і постійна складові. Зазначимо, як впливають на передачу коду 2B1Q різні чинники. У міських умовах створюється велика кількість низькочастотних наводок, наприклад при пуску потужних електричних машин (метро, трамваї тощо), електрозварювання, крім того, в кабелях зв'язку створюється велика кількість імпульсних перешкод (набір номера, передача сигналів сигналізації тощо). Комплекти ВІС (великих інтегральних схем), що реалізують технологію 2B1Q, використовують досить складні методи корекції спотворень в низькочастотній області спектра і забезпечують задовільну якість передачі. Разом з тим кодування 2B1Q все ж залишається чутливим до спотворень, оскільки сигнал має постійну складову, а максимум енергетичного спектра припадає на низькі частоти.

Великий розкид частот в спектрі сигналу 2B1Q веде до виникнення труднощів, пов'язаних з груповим часом затримки. Мікропроцесорна обробка, втім, допомагає вирішити і ці проблеми, хоча алгоритм обробки сигналу істотно ускладнюється. Серйозний вплив на передачу надає радіочастотна інтерференція.

Радіопередачі в діапазонах довгих і середніх хвиль, робота потужних радіорелейних ліній викликають наведення на кабельну лінію і заважають передачі коду 2B1Q, якщо є спільні ділянки спектрів. Цей фактор особливо негативно позначається при використанні апаратури HDSL для з'єднання студій і радіопередавальних центрів, а також при монтажі обладнання в приміщеннях або в безпосередній близькості телерадіоцентрів. Спектр коду 2B1Q містить високочастотні складові, максимум енергії передається в першій "пелюстці", ширина її пропорційна швидкості у лінії [12].

Як уже зазначалося, загасання сигналу в кабелі зростає зі збільшенням його частоти, тому в залежності від необхідної дальності застосовується одна з трьох швидкостей лінійного сигналу (784, 1168 або 2320 кбіт/с). Технологія 2B1Q для передачі потоку 2 Мбіт/с використовує одну, дві або три пари мідного кабелю. По кожній з пар передається частина потоку з вищезгаданими швидкостями. Найбільша дальність роботи досягається при використанні трьох пар (близько 4 км по жилі 0,4 мм), найменша - при роботі по одній парі (менше 2 км). З огляду на те, що дистанція роботи систем HDSL (кодування 2B1Q), що використовують одну пару, не задовольняє базовим вимогам по дальності, такі системи не знайшли широкого поширення. Системи, що працюють за трьома парам, до сих пір досить широко використовуються, проте поступово витісняються системами, які застосовують технологію CAP і забезпечують ту ж дальність по двох парах. З систем з кодуванням 2B1Q найбільшого поширення мають системи, що працюють по двох парах.

На думку більшості експертів, з технічної точки зору технологія 2B1Q дещо поступається більш пізній технології лінійного кодування - CAP. Однак у світі до сих пір проводиться велика кількість обладнання, що використовує 2B1Q. Ураховуючи, що даний вид модуляції знайшов застосування практично лише в технології xDSL, насиченість ринку відповідним обладнанням пов'язано з такими чинниками.

По-перше, довжина абонентських ліній в США і Західній Європі, як правило, досить невелика, тому дальності 2B1Q цілком достатньо. Якість кабелю

в вищезазначених регіонах також досить висока, що знижує вплив різних чинників, що заважають. По-друге, важливою перевагою технології 2B1Q є її дешевизна. Близько десяти великих виробників ВІС поставляють комплексні рішення для створення обладнання HDSL за технологією 2B1Q. Наявність конкуренції, природно, позитивно позначається на ціні мікросхем і готових модулів приймачів.

На завершення зазначимо, що збільшення спектральної ефективності при використанні цього виду модуляції пов'язане з тим, що кожен символ модульованого сигналу переносить 2 біта інформації.

2.3 Бінарна фазова модуляція BPSK

Розглянемо сигнал у вигляді послідовності імпульсів цифрової інформації, як це показано на рисунку 2.4.

На верхньому графіку показаний уніполярний цифровий сигнал, в якому інформаційному логічному нулю відповідає $b(t) = 0$, а на нижньому графіку біполярний цифровий сигнал $b_0(t)$, в якому інформаційному логічному нулю відповідає $b_0(t) = -1$.

Сигнал $b(t) = s_m(t)$ є модулюючим і він подається на фазовий модулятор, що формує несуче коливання з дев'ятією фази, що дорівнює π радіан. Оскільки $b_0(t)$ приймає тільки значення рівні 0 і 1, то синфазна $I(t)$ і квадратурна $Q(t)$ компоненти комплексної обвідної $z(t) = I(t) + jQ(t)$ BPSK-сигналу відповідно дорівнюють:

$$I(t) = \cos(\pi \cdot b(t)) = \pm 1$$

$$Q(t) = \sin(\pi \cdot b(t)) = 0.$$

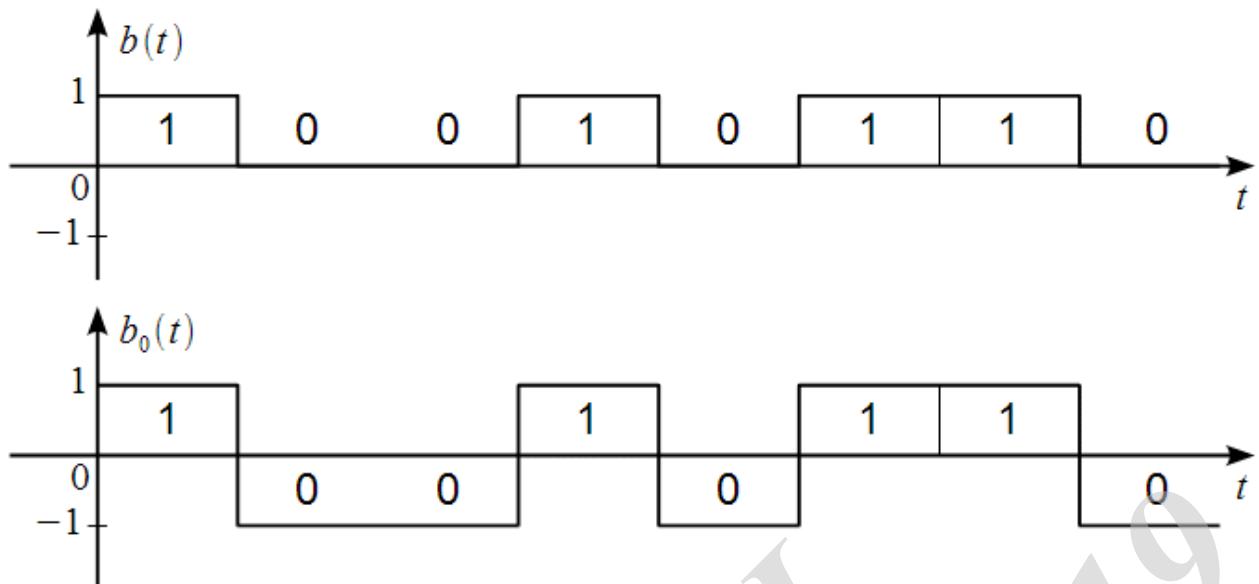


Рисунок 2.4 – Уніполярний та біполярний цифровий сигнал

Тоді BPSK-сигнал можна записати:

$$S(t) = I(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - Q(t) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = b_0(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

а структурна схема модулятора спрощується, рис. 2.5.

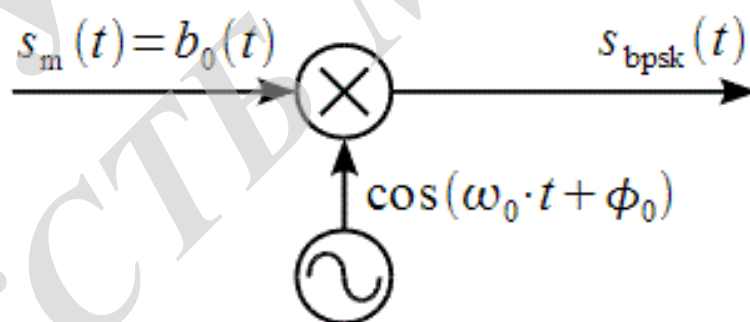


Рисунок 2.5 – Спрощена структурна схема BPSK-модулятора

На рис. 2.6 наведені осцилограми напруг, які пояснюють роботу BPSK-модулятора.

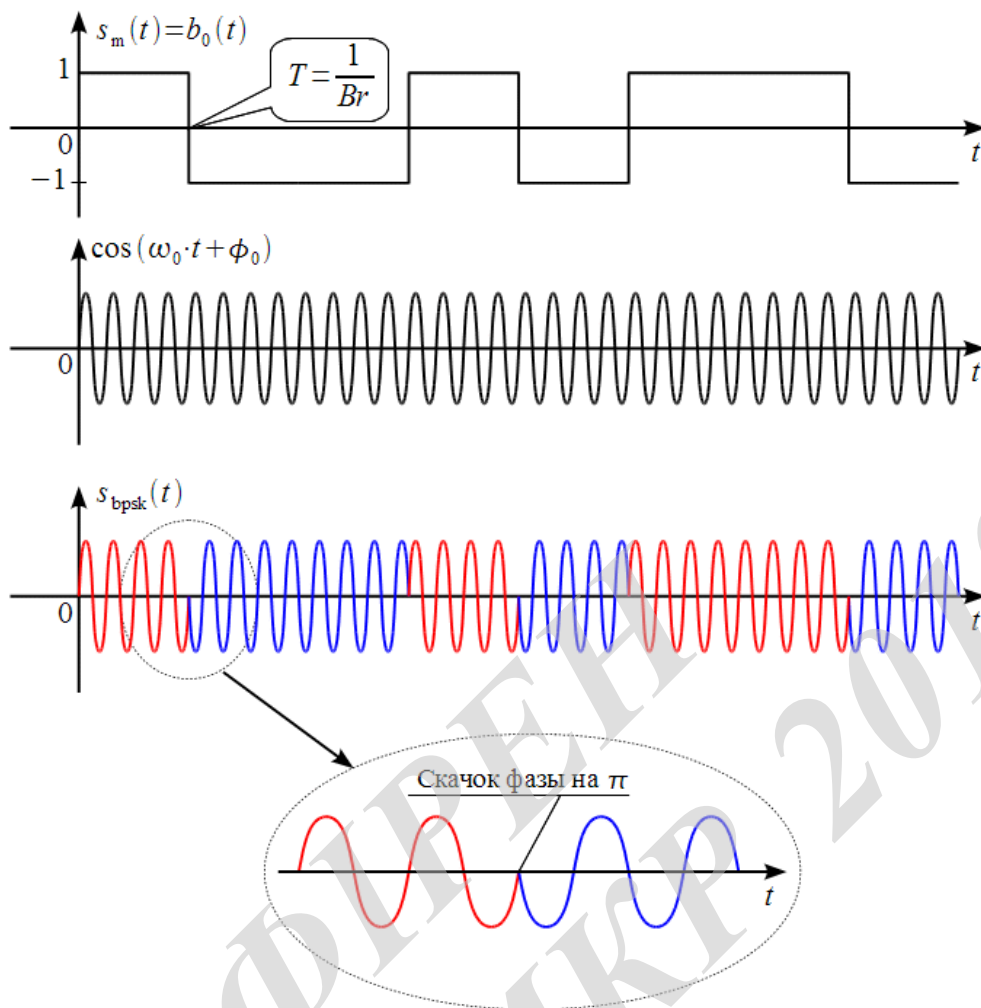


Рисунок 2.6 – Осцилограми напруг BPSK-модулятора

Інформація передається зі швидкістю B_r біт/с, тривалість одного імпульса цифрової інформації дорівнює $T = 1/B_r$. Вихідний модулюючий сигнал $b(t) = s_m(t)$ множиться на несуче коливання і формується фазоманіпульований сигнал зі стрибком фази на π . Таким чином, BPSK-модуляція це фазова маніпуляція, яка збігається з балансною амплітудною модуляцією при біполярному цифровому модулюючому сигналі [18].

Спектр BPSK-сигналу являє собою перенесений на несучу частоту спектр цифрового біполярного модулюючого сигналу $b_0(t)$..

Зауважимо, що BPSK-модуляція є найбільш завадостійкою, тому вона застосовується в таких каналах xDSL, у яких співвідношення сигнал/шум є мінімальним. При цьому інформаційна швидкість передачі залишається рівною

модуляційній (символьній), яка є похідною від ширини смуги пропускання каналу.

2.4 Квадратурна фазова модуляція QPSK

QPSK-модуляція будується на основі кодування двох біт інформації, що передається одним символом. При цьому символна швидкість в два рази нижча швидкості передачі інформації. На рис. 2.7 показано, як один символ кодує відразу два біти.

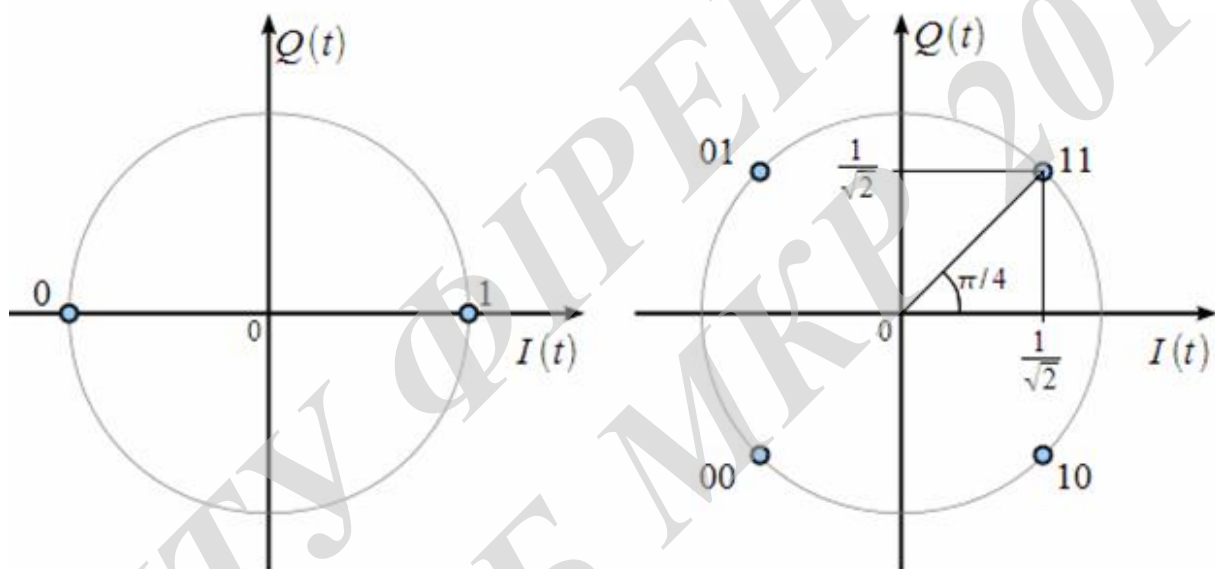


Рисунок 2.7 – Векторна діаграма BPSK и QPSK сигналів

На рис. 2.7 показані векторні діаграми BPSK і QPSK сигналів. BPSK сигнал був розглянутий раніше, і ми говорили, що один символ BPSK кодує один біт інформації, при цьому на векторній діаграмі BPSK всього дві точки на синфазній осі $I(t)$, які відповідають нулю і одиниці інформації, що передається. Квадратурний канал $Q(t)$ у випадку з BPSK завжди дорівнює нулю. Точки на векторній діаграмі утворюють сузір'я фазової маніпуляції. Для того щоб здійснити кодування одним символом двох біт інформації, необхідно, щоб сузір'я складалося з чотирьох точок, як це показано на векторній діаграмі QPSK, рис. 2.7.

Кодування здійснюється наступним чином: бітовий потік ділиться на парні і непарні біти, тоді $I(t)$ буде кодувати парні біти, а $Q(t)$ - непарні. Два біти, що послідовно йдуть один за одним у початковому бітовому потоці, кодуються одночасно синфазним $I(t)$ і квадратурним $Q(t)$ сигналами. Це показано на осцилограмах, наведених на рис. 2.8 для інформаційного потоку «1100101101100001».

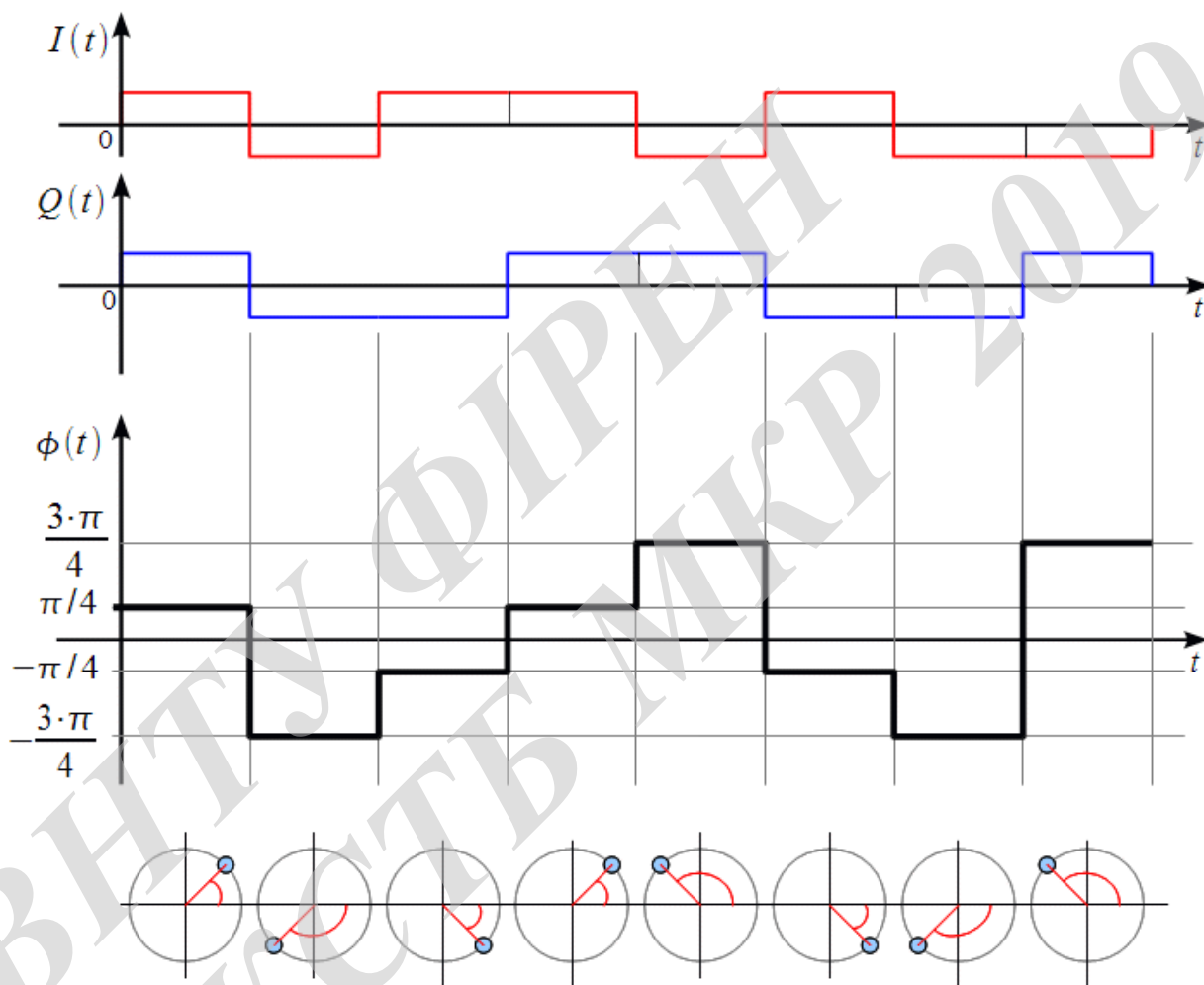


Рисунок 2.8 – Фазова обвідна QPSK-сигналу

Фазова обвідна являє собою ступінчасту функцію часу, що зазнає розривів у моменти зміни параметрів символу QPSK. При цьому в межах одного символу векторна діаграма QPSK знаходиться завжди в одній точці сузір'я, як це показано внизу рисунка, а при зміні символу – стрибкоподібно переходить в точку, що

відповідає наступному символу. Оскільки у QPSK всього чотири точки в сузір'ї, то фазова обвідна може приймати всього чотири значення.

Амплітудна обвідна QPSK-сигналу також може бути отримана з комплексної обвідної:

$$a(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}$$

Зазначимо, що амплітудна обвідна QPSK-сигналу дорівнює одиниці всюди, за винятком моментів зміни символів, що передаються, тобто в моменти перескоку фази та переходу у наступну точку сузір'я.

Враховуючи, що QPSK-модуляція використовує лише чотири різновиди символів, прив'язаних до чотирьох значень фази, можна стверджувати, що її завадостійкість є достатньо високою, хоча і нижчою у порівнянні з BPSK-модуляцією. У той же час вона забезпечує збільшення інформаційної швидкості вдвічі відносно швидкості символівної, яка, як відомо, залежить суто від ширини смуги пропускання каналу.

2.5 Квадратурно-амплітудна модуляція QAM

Алгоритм квадратурно-амплітудної модуляції QAM є різновидом багатопозиційної амплітудно-фазової модуляції. Цей алгоритм широко використовується в технології xDSL.

При використанні алгоритму QAM переданий сигнал кодується одночасними змінами амплітуди синфазної $I(t)$ і квадратурної $Q(t)$ компонент несущого гармонійного коливання. Результуючий сигнал $Z(t)$ формується при додаванні цих коливань. Таким чином, QAM-сигнал може бути поданий співвідношенням:

$$Z_m(t) = I_m \cdot \cos(2\pi f_c t) + Q_m \cdot \sin(2\pi f_c t),$$

де t – змінюється в діапазоні $[(m-1) \cdot \Delta t .. m \cdot \Delta t]$; m – порядковий номер дискретного відліку часу; Δt – крок квантування вхідного сигналу за часом; p – крок квантування вхідного сигналу за амплітудою; α_m і β_m – модуляційні коефіцієнти.

$$I_m = \alpha_m \cdot p$$

$$Q_m = \beta_m \cdot p$$

Цей же сигнал також може бути поданий в комплексному вигляді:

$$Z = I + j \cdot Q$$

або

$$Z_m = A_m \cdot \exp(2\pi f_c t + \phi_m),$$

де $A_m = \sqrt{Q_m^2 + I_m^2}$ – алгоритм зміни амплітуди модульованого сигналу;

$\phi_m = \arctg\left(\frac{Q_m}{I_m}\right)$ – алгоритм зміни фази модульованого сигналу.

Таким чином, при використанні квадратурної амплітудної модуляції інформація кодується одночасними змінами амплітуди і фази несущого коливання.

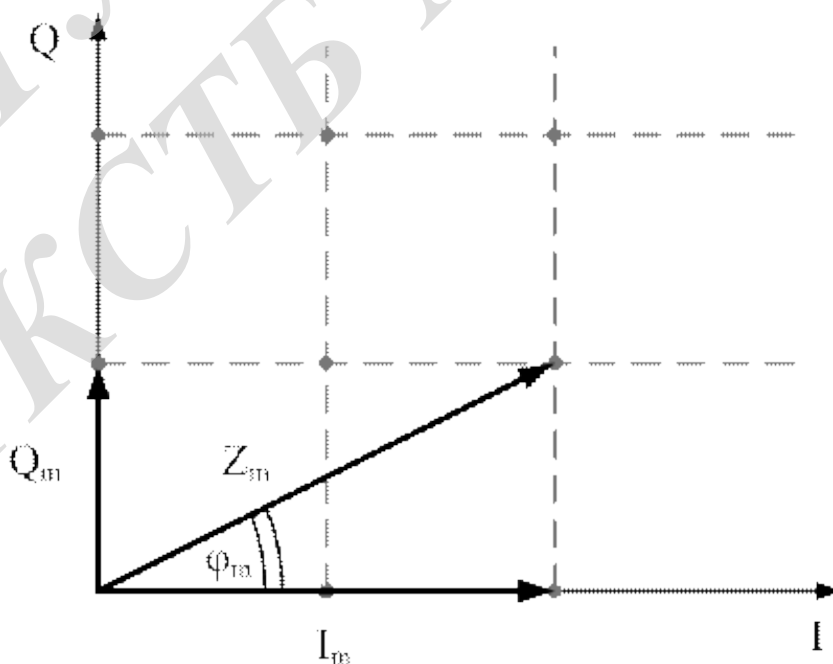


Рисунок 2.9 – Комплексне подання QAM

На рисунку 2.9 зображено принцип формування результуючого коливання шляхом додавання векторів квадратурної та синфазної складових. Амплітуда вектора Z_m визначається співвідношенням для A_m , а кут, який цей вектор утворює з віссю абсцис, визначається співвідношенням $\phi_m = \arctg\left(\frac{Q_m}{I_m}\right)$.

Для даного алгоритму важливо, що при модуляції синфазної і квадратурної складових несущого коливання використовується одне і те ж значення дискрета зміни амплітуди. Тому кінці векторів модульованого коливання утворюють прямокутну сітку на фазовій площині дійсної і уявної складових вектора модульованого сигналу. Число вузлів цієї сітки визначається типом використовуваного алгоритму QAM. Схему розташування вузлів на фазовій площині модульованого QAM коливання прийнято називати сузір'ям.

На рисунку 2.10 наведено спрощену структуру модулятора QAM-сигналу.

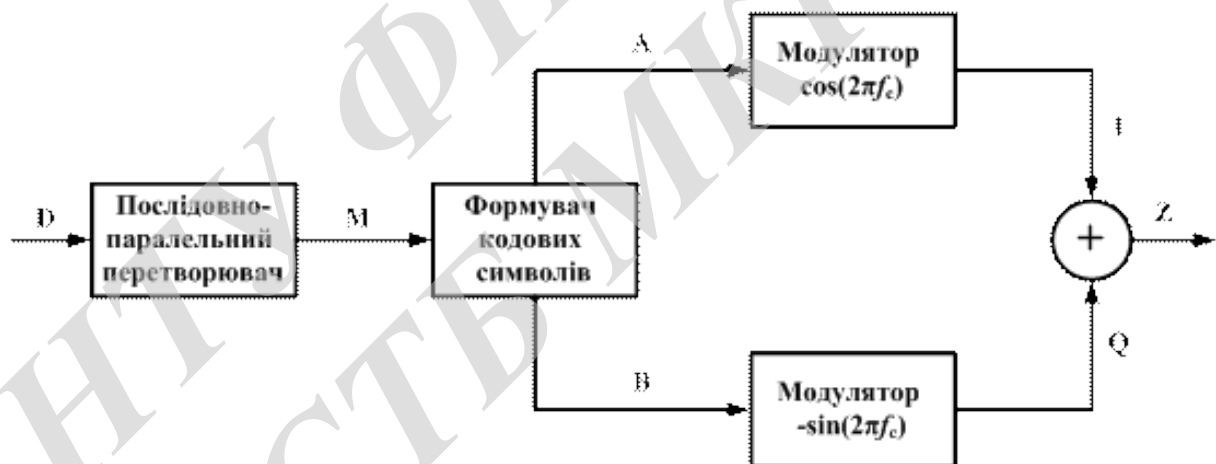


Рисунок 2.10 – Структура модулятора QAM

В технології xDSL набули поширення декілька типів QAM: від алгоритму модуляції QAM-4, який має назву QPSK, до алгоритмів QAM-16, 32, 64, 128 і 256.

Алгоритм квадратурної амплітудної модуляції, по суті, є різновидом алгоритму гармонічної амплітудної модуляції і тому має такі важливі властивості:

- ширина спектра QAM-коливання не перевищує ширини спектра модулюючого сигналу;

- положення спектра QAM-коливання в частотній області визначається частотою несущого коливання.

Ці властивості алгоритму забезпечують можливість побудови на його основі високошвидкісних xDSL систем передавання даних по двопроводовій лінії з частотним розділенням прийнятого (downstream) і переданого (upstream) інформаційних потоків.

Конкретна реалізація алгоритму QAM-N визначає значення таких параметрів:

- розмірності модуляційного символу, що визначається як двійковий логарифм від кількості точок сузір'я N [біт];
- символної швидкості [Бод];
- центральної частоти f_0 .

Завадостійкість алгоритму QAM обернено пропорційна його спектральній ефективності. Дія завад призводить до виникнення неконтрольованих змін амплітуди і фази переданого по лінії сигналу. При збільшенні кількості кодових точок на фазовій площині відстань між ними R зменшується, рис. 2.11, отже зростає ймовірність помилкового розпізнавання спотвореного прийнятого вектора z_m^* на приймальній стороні.

Граничний рівень допустимих амплітудних і фазових спотворень модульованого сигналу QAM є колом діаметром R , рис. 2.9. Центр цього кола збігається з вузлом квадратурної сітки на фазовій площині. Заштриховані області на рисунку відповідають координатам спотвореного вектора модульованого QAM-коливання при дії на корисний сигнал завади, відносний рівень якої визначається співвідношенням SNR від 20 до 30 дБ [20].

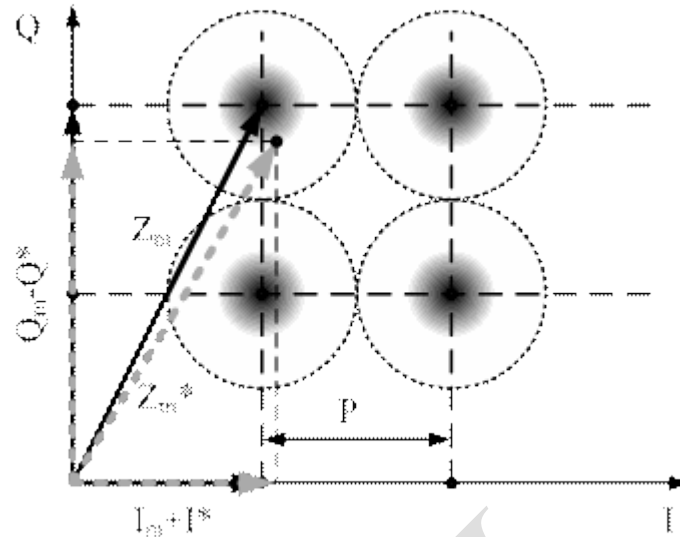


Рисунок 2.11 – Вплив дії завад на сигнал QAM у комплексній площині

На рис. 2.12 суцільними лініями зображено залежності очікуваного значення BER від співвідношення SNR для різних варіантів алгоритму QAM. Використання додаткового кодування (пунктирні лінії), дозволяє підвищити завадостійкість модульованого сигналу.

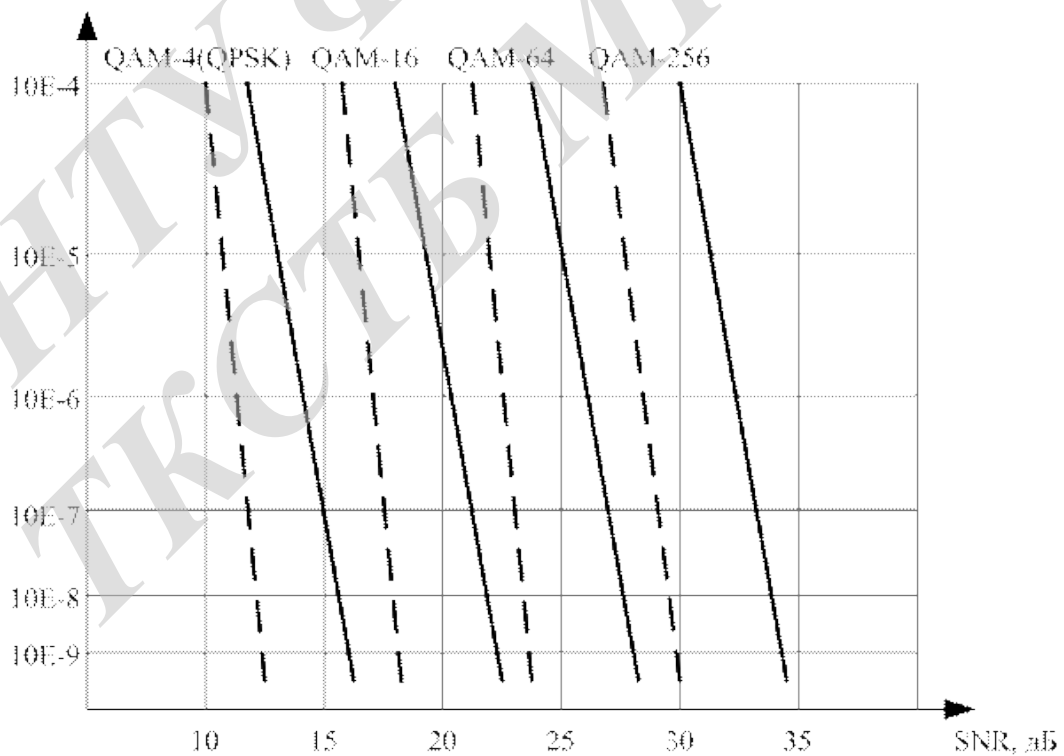


Рисунок 2.12 – Залежність інтенсивності помилкових бітів від відношення сигнал/шум

Алгоритм квадратурної амплітудної модуляції є відносно простим для реалізації і в той же час достатньо ефективним алгоритмом лінійного кодування xDSL-сигналів. Сучасні реалізації цього алгоритму забезпечують достатньо високі показники спектральної ефективності. Як вже було зазначено вище, обмеженість спектра, відносно високий рівень завадостійкості QAM-сигналу забезпечують можливість побудови на основі цієї технології високошвидкісних систем передачі даних.

До недоліків алгоритму можна віднести відносно невисокий рівень корисного сигналу в спектрі модульованого коливання. Цей недолік є загальним для алгоритмів гармонійної амплітудної модуляції і виражається в тому, що максимальну амплітуду в спектрі модульованого коливання має гармоніка з частотою несущого коливання.

2.6 CAP-модуляція

Алгоритм амплітудно-фазової модуляції з придушенням несущої (CAP) є таким методом модуляції, що найбільш широко використовується на DSL-лініях. Алгоритм CAP є одним з різновидів алгоритму QAM, його особливість полягає в спеціальній обробці модульованого інформаційного сигналу перед його відправкою в лінію. В процесі цієї обробки зі спектра модульованого сигналу вилучається складова, яка відповідає частоті несущої QAM. Після того, як приймач приймає сигнал, він спочатку відновлює несущу частоту, а після цього - потік даних. Такі маніпуляції зі спектром виконуються для того, щоб зменшити частку неінформативної складової в спектрі сигналу, що передається. Це, в свою чергу, робиться для того, щоб забезпечити більшу дальність поширення сигналу і зменшити рівень перехресних перешкод між сигналами, які передаються по одному кабелю.

Реалізація алгоритму CAP полягає у тому, що з модульованого сигналу вилучається та гармонійна складова, яка повинна була використовуватися для перенесення корисного сигналу. Однак, якщо більш детально розглянути схему

формування сигналу, стане зрозуміло, що алгоритм САР при формування лінійного коду практично нічим не відрізняється від класичних алгоритмів гармонійної амплітудної модуляції.

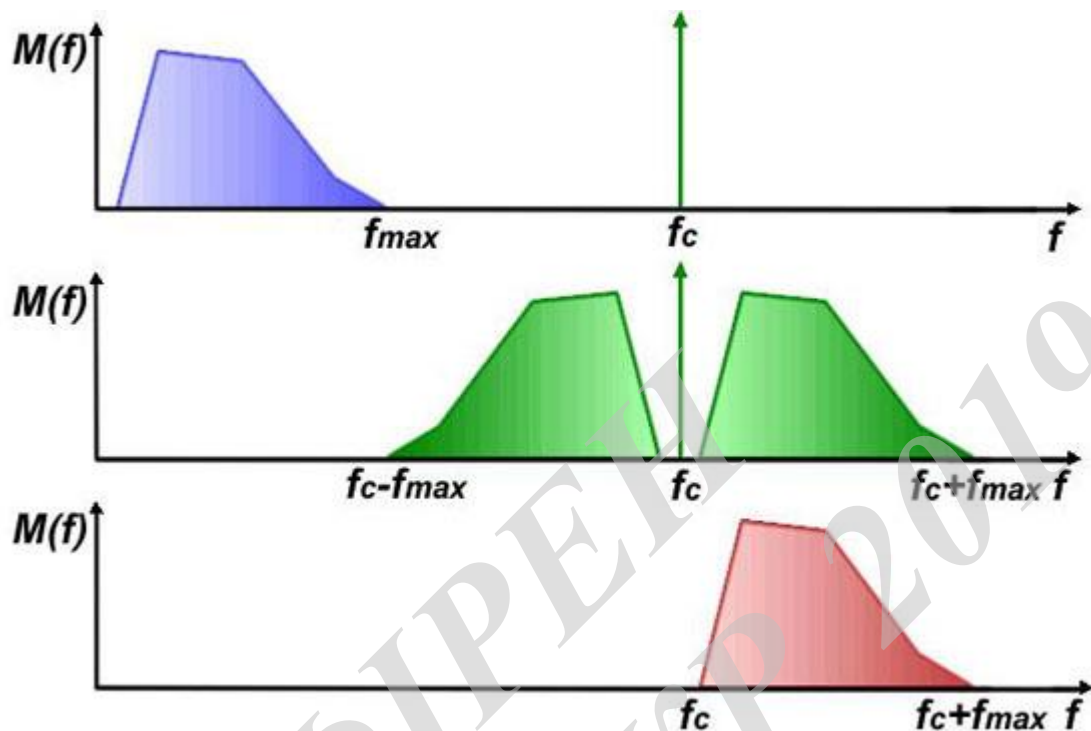


Рисунок 2.13 – Алгоритм модуляції САР

На першому графіку, рис. 2.13, наведений спектр переданого корисного сигналу. Максимальна частота цього сигналу має значення f_{max} . Частота несущого коливання має значення f_c . Після виконання процедури гармонійної амплітудної модуляції спектр корисного сигналу переноситься в область частоти f , де створюються верхня і нижня бокові смуги. Це показано на другому графіку, рис. 2.13. Для відновлення переданого сигналу на приймальній стороні досить передати лише одну з дзеркальних компонент спектра модульованого сигналу. Гармоніка з частотою f також є компонентом спектра модульованого сигналу, однак при відновленні сигналу без неї також можна обійтися. Теоретично, амплітуда цієї гармоніки несе інформацію про рівень постійної складової сигналу, що передається. В силу цього дана гармоніка не є інформативною, і її втрата не вплине на якість відновленого сигналу. Хоча видалення гармоніки f з переданого сигналу веде до виникнення певних труднощів при відновленні сигналу, ця

процедура цілком виправдана, оскільки дозволяє істотно знизити рівень неінформативного сигналу, що передається в лінію. На нижньому графіку показаний спектр модульованого колювання, який сформований відповідно до принципів алгоритму CAP [15].

Оскільки алгоритм амплітудно-фазової модуляції з придушенням несучої є, по суті, алгоритмом типу QAM, йому властиві всі позитивні якості, властиві цьому класу алгоритмів - відносна простота реалізації і висока спектральна ефективність. Безсумнівним достоїнством алгоритму CAP є висока енергетична ефективність сформованого сигналу. Саме цей алгоритм теоретично здатний забезпечити максимальні значення SNR і, отже, передачу сигналу на найбільшій відстані. Всі ці корисні якості алгоритму модуляції CAP дозволяють застосовувати його для побудови ефективних і економічних приймально-передавальних пристроїв широкого спектру технологій DSL - від SDSL до VDSL.

2.7 Дискретна багаточастотна модуляція DMT

Дискретна багаточастотна модуляція DMT (Discret Multi Tone) передбачає поділ робочого діапазону частот на певну кількість піддіапазонів. Зокрема в технології ADSL смуга частот поділяється на 256 піддіапазонів шириною 4312,5 Гц. Використання модуляції DMT дозволяє встановлювати на кожній несучій певний рівень передачі в залежності від співвідношення сигнал-шум.

Алгоритм DMT комбінується з QAM:

- в процесі настройки параметрів передачі/прийому на окремій несучій встановлюється рівень передачі сигналу в DMT;
- після визначення рівня передачі сигналу на кожній несучій встановлюється допустимий для даного рівня сигнал/шум алгоритм модуляції QAM. За рахунок цього регулюється рівень завадостійкості передачі і допустимої швидкості передачі на несучій.

На відміну від QAM, даний алгоритм використовує не одну частоту, а групу несучих частот. При використанні цього алгоритму модуляції весь розрахунковий

діапазон частот лінії ділиться на кілька ділянок шириною по 4,3125 кГц. Кожна з цих ділянок використовується для організації незалежного каналу передачі даних.

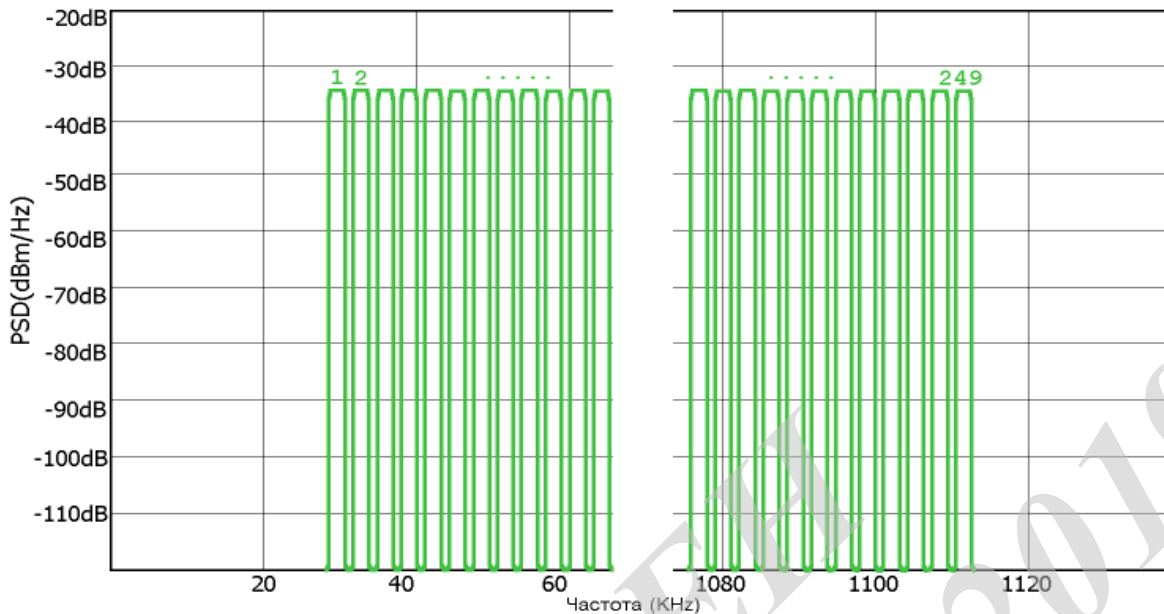


Рисунок 2.14 – Частотна організація вхідного потоку стандарту DMT

На рис. 2.14 представлений варіант частотної організації вхідного потоку стандарту DMT для варіанту з придушенням луносигналів (echo cancellation). Для даного варіанту в напрямку абонента організується 249 частотних каналів. Крім того, для цього варіанту характерно перекриття частотних діапазонів, які використовуються для вхідного і вихідного інформаційних потоків.

На етапі перевірки якості лінії передавач, виходячи з рівня перешкод в частотному діапазоні ділянки, для кожного з каналів вибирає підходящу модуляційну схему. На чистих каналах з малим рівнем шумів можуть бути використані алгоритми з великими значеннями, наприклад, QAM-64, в той час, як на більш зашумлених ділянках можуть застосовуватися більш прості алгоритми модуляції, наприклад QPSK. Очевидно, що використання такого принципу регулювання швидкості передачі даних дозволяє найбільш точно узгодити параметри модульованого сигналу з параметрами лінії, по якій сигнал буде передаватися. При передачі даних інформація розподіляється між незалежними каналами пропорційно до їх пропускної спроможності, приймач виконує

операцію демультимплексування і відновлює вихідний інформаційний потік. Рисунок 2.15 ілюструє описаний вище процес адаптації.

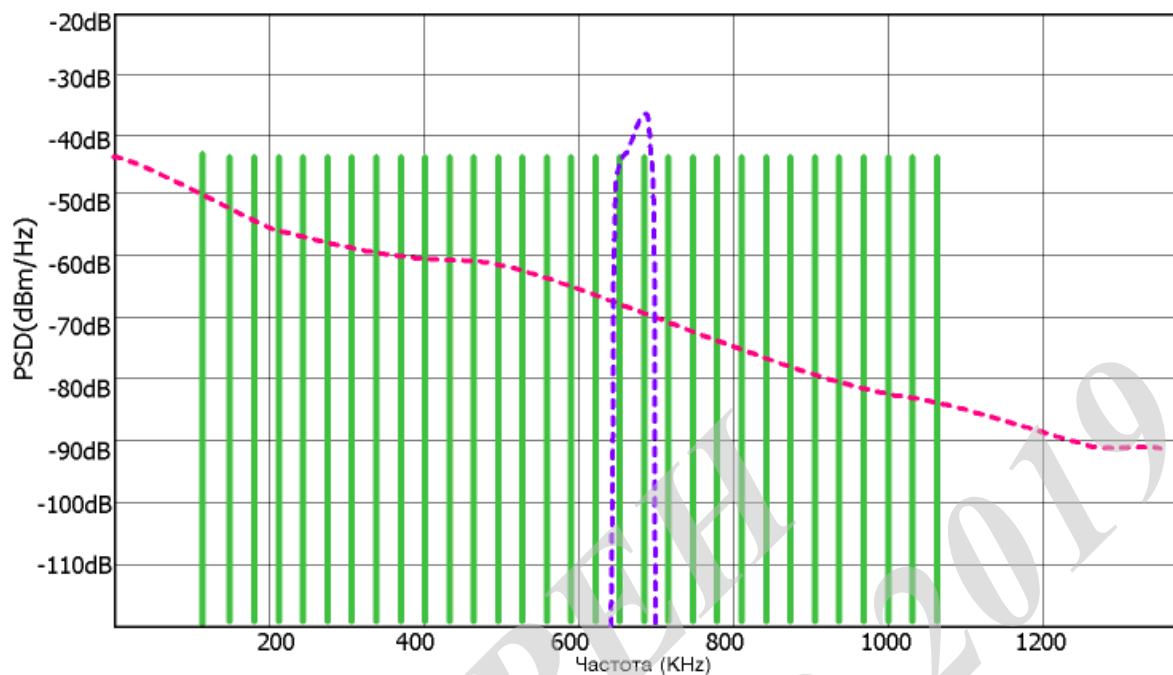


Рисунок 2.15 – Адаптація до стану каналу

На представленому вище рисунку позначена неадаптована частотна характеристика DMT-передавача та виділена крива залежності загасання в лінії від частоти переданого сигналу. Показана також частотна перешкода, яка постійно діє в порівняно невеликій ділянці в межах робочого діапазону частот передавача [16].

Після виконання операцій узгодження пропускної здатності елементарних каналів з наведеними частотними характеристиками лінії залежність швидкостей передачі даних від частотного номера елементарного каналу буде відповідати кривим, які наведені на рис. 2.16.

Рисунки 2.15 та 2.16 відповідають одній заводській обстановці у каналі передачі.

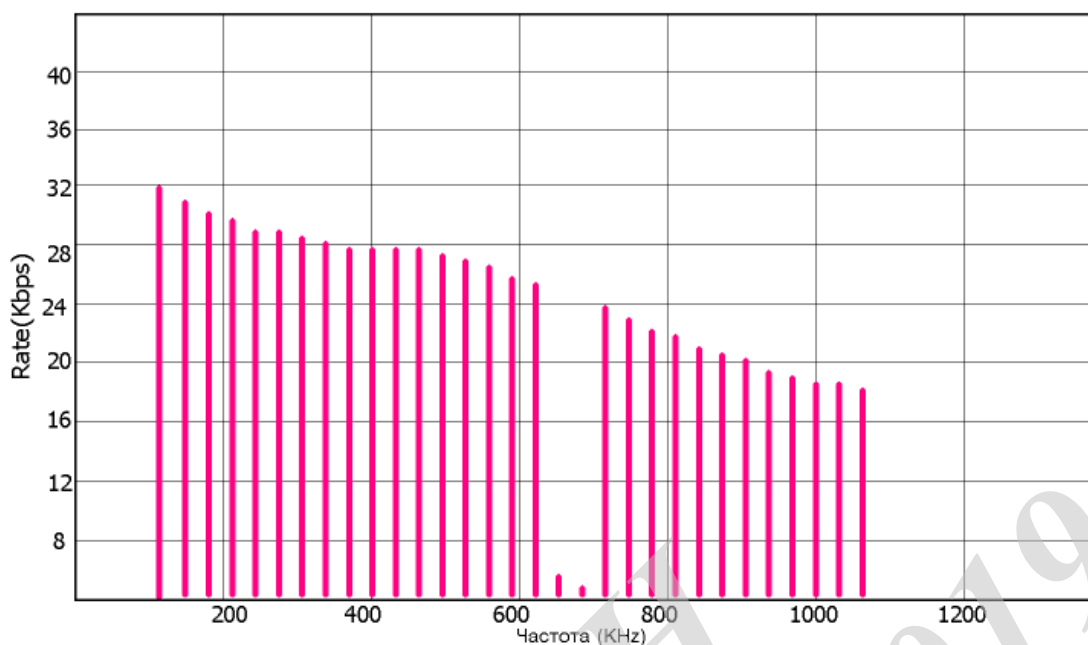


Рисунок 2.16 – Залежність швидкостей передачі даних

Алгоритм модуляції DMT являє собою подальший розвиток ідеї, яка була покладена в основу алгоритмів QAM. У силу цього він, безумовно, здатний забезпечити високу швидкість і надійність передачі даних. До додаткових переваг цього алгоритму відносяться можливість оперативної і точної адаптації приймально-передавальних пристроїв до характеристик лінії.

До недоліків алгоритму модуляції DMT відносяться його громіздкість і недостатня технологічність. Алгоритм DMT є найбільш складним для апаратної реалізації серед всіх алгоритмів, які в даний час використовуються для формування лінійного коду пристроїв DSL.

2.8 OFDM-модуляція

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – це мультиплексування з ортогональним частотним поділом сигналів, або канал зі схемою модуляції OFDM – це тип фізичного каналу для високошвидкісної передачі даних.

Концепція даного методу модуляції, в основному, базується на відомому з середини 50-х років методі модуляції з багатьма піднесуцими (Multi-carrier

modulation - ЧСЧ), проте враховує новітні досягнення останніх десятиліть в області цифрових методів передачі інформації і високоефективних методів модуляції, що забезпечують високі якісні характеристики систем зв'язку при наявності перешкод, доплерівських зсувів частот, завмирань сигналів тощо.

Згідно К. Шеннону, максимальна швидкість передачі інформації в реальних каналах досягається, коли спектральна щільність потужності $S_t(f)$ переданого сигналу у всій смузі F_k задовольняє умові:

$$S_t(f) = \begin{cases} K_0 - \frac{N(f)}{K^2(f)}, & f \in F_k \\ 0, & f \notin F_k \end{cases},$$

де константа K_0 вибирається з умови:

$$\int_{F_k} S_t(f) df \leq P_{cp},$$

де P_{cp} – середня потужність передавача.

У методі OFDM достатньо ефективно використовується розбиття послідовності символів даних на паралельний потік із збільшенням тривалості кожного символу.

При OFDM символи даних часто беруться з алфавітів раніше розглянутих багатопозиційних видів модуляції: BPSK, QPSK, QAM тощо. Ці символи передаються піднесущими, які встановлюються на інтервалі одна від одної, який забезпечує їх ортогональність:

$$\Delta f = \frac{1}{T_S} \Gamma u,$$

де T_S – тривалість символу, що забезпечує їх ортогональність при прямокутній формі модулюючих відеоімпульсів, незважаючи на випадкові фази, обумовлені модуляцією даними. Вибір іншої форми обвідної модулюючих відеоімпульсів дає можливість отримати більш компактну спектральну щільність

потужності, однак тягне за собою порушення ортогональності піднесущих і збільшення ймовірності появи помилок.

Передана послідовність символів даних x_{mk} розбивається на блоки з N символів. Кожен блок з N послідовних символів перетвориться в блок з N паралельних символів тривалістю $T = NT_x$ кожен. Отримані символи модулюють N відповідних піднесущих частот:

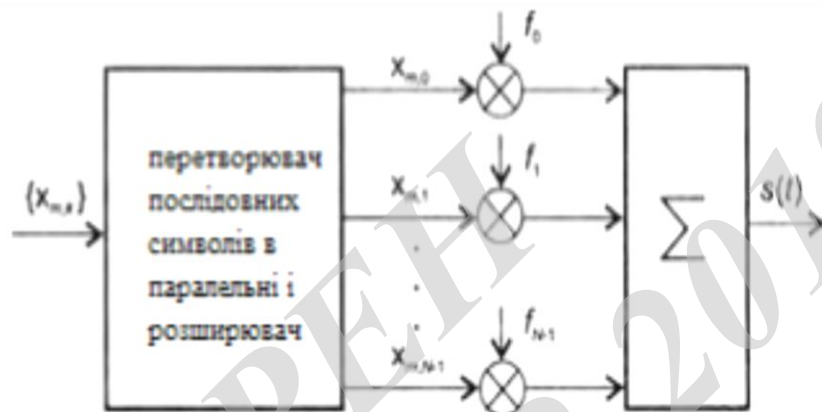


Рисунок 2.17 – Формувач групового OFDM-сигналу

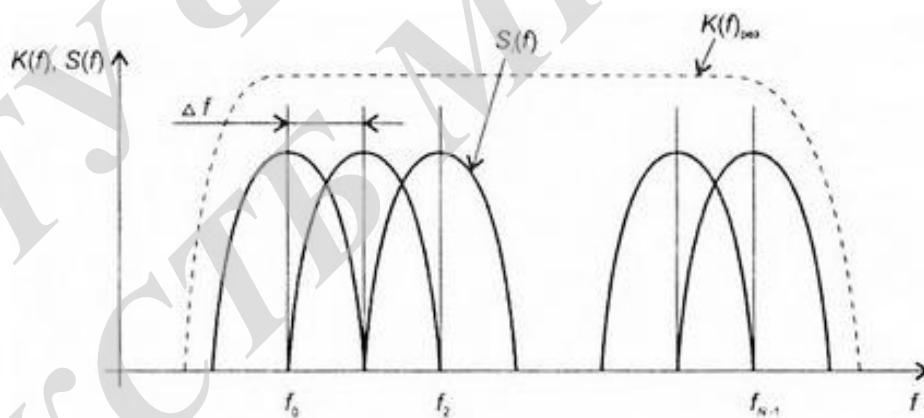


Рисунок 2.18 – Взаємне розташування ортогональних піднесущих частот

Якщо довжина блоку N обрана так, що $T = NT_S \gg LT_S$, де LT_S - тривалість імпульсної характеристики каналу під несучої частоти, то міжсимвольна інтерференція (накладання сусідніх блоків один на одного) значно знижується. Вона може бути виключена повністю за рахунок невеликого зниження пропускної

здатності, якщо між послідовно модульованими OFDM-блоками вставити захисний інтервал $GT_S \geq LT_S$.

Головним достоїнством методу OFDM, який зумовив його широке застосування, є та обставина, що модуляція і демодуляція сигналів можуть бути виконані в дискретній формі з використанням дискретного, отже, і швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [14].

Іншою важливою перевагою методу OFDM є простота зниження впливу міжсимвольної інтерференції (МСІ).

За технологією OFDM в дозволеній смузі частот (вона може мати ширину 1,5, 10, 20, 25 і 28 МГц) генеруються N піднесущих частот. Інформація, що передається і має швидкість передачі R біт/с, розпаралелюється на потоки, число яких дорівнює числу піднесущих. Тривалість бітового інтервалу $T_b = 1/R$. Перед модуляцією кожен імпульс паралельного потоку розтягується в часі в N разів, так що тривалість біта стає NT_b . Кожен імпульс з паралельного потоку модулює "свою" піднесущу. Приклад формування спектра радіосигналу наведений на рис. 2.19.

У сумарному сигналі спектри частково перекриваються. Причому перекриття спектру відбувається таким чином, що максимум спектральної щільності для будь-якої піднесущої завжди відповідає мінімальному значенню (теоретично нульовому) першої пелюстки сусідніх піднесущих і всіх бічних пелюсток. У цьому випадку скалярний добуток сусідніх спектрів не дорівнює нулю тільки на частотах максимальних значень спектрів піднесущих. У цьому сенс ортогональності, і це дозволяє виділити спектральні компоненти піднесущих із загального сигналу за допомогою перетворення Фур'є. Кажуть, що система зв'язку з OFDM найбільш чутлива до тремтіння частот піднесущих і їх фаз [15].

Враховуючи, що потік переданих даних розподіляється по множині частотних підканалів і передача ведеться паралельно на всіх цих підканалах, висока швидкість передачі досягається саме за рахунок одночасної передачі даних по всіх каналах, а швидкість передачі в окремому підканалі може бути і не високою. Якщо швидкість передачі позначити S_i в i -ому частотному каналі, то сумарна швидкість передачі в N каналах буде рівною

$$S = \sum_{i=1}^N S_i .$$

Оскільки в кожному з частотних підканалів швидкість передачі даних можна зробити не занадто високою, це створює передумови для ефективного придушення міжсимвольної інтерференції.

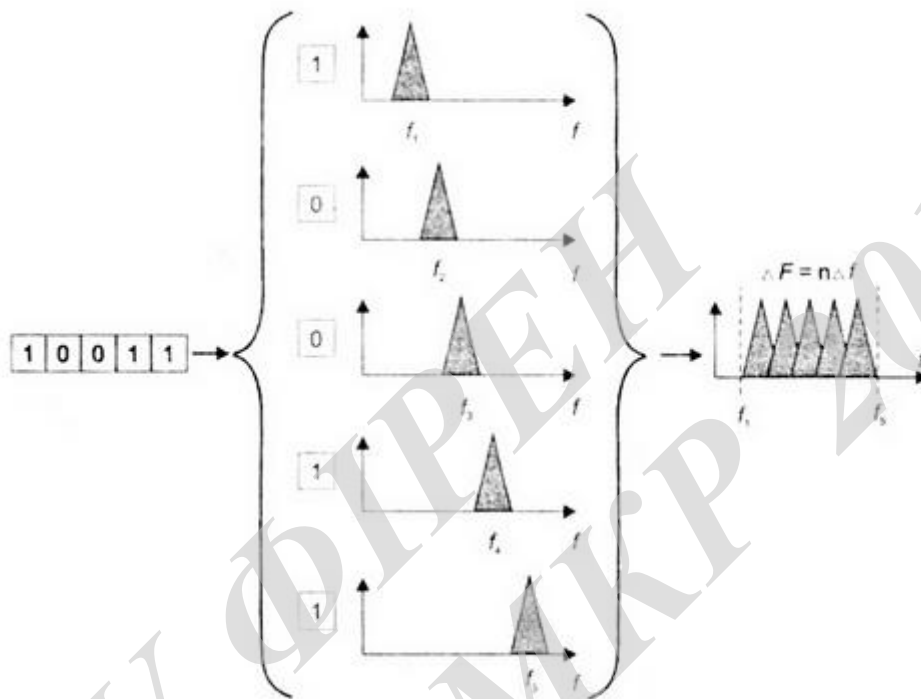


Рисунок 2.19 – Формування спектра OFDM-сигнала

При частотному поділі каналів необхідно, щоб ширина окремого каналу була, з одного боку, досить вузькою для мінімізації спотворення сигналу в межах окремого каналу, а з іншого - досить широкою для забезпечення необхідної швидкості передачі. Крім того, для економного використання всієї смуги каналу, що розділяється на підканали, бажано як можна більш щільно розташувати частотні підканали, але при цьому уникнути міжканальної інтерференції, щоб забезпечити повну незалежність каналів один від одного, тобто забезпечити їх ортогональність. Несучі сигнали всіх частотних підканалів (а точніше, функції, що описують ці сигнали) ортогональні один одному. Це означає, що скалярний

добуток сигналів у цих каналах повинен бути рівним нулю. У нашому випадку це виражається простим співвідношенням:

$$\int_0^T \sin 2\pi f_l t \cdot \sin 2\pi f_k t = 0, k \neq l$$

де T - період символу, f_k, f_l - несущі частоти каналів k і l .

Ортогональність несущих сигналів можна забезпечити у тому випадку, якщо за час тривалості одного символу несущий сигнал буде здійснювати ціле число коливань.

Неважно помітити, що OFDM дуже схоже з DMT-модуляцією, яка розглядалася в попередньому підрозділі. Крім практично різної кількості підканалів, що використовуються у межах виділеного частотного ресурсу, ці технології ще відрізняються тим, що процедура встановлення з'єднання в стандарті ADSL, де застосовується DMT-модуляція, передбачає діагностику підканалів з метою встановлення фактичних співвідношень с/ш. Технологія OFDM не передбачає такої процедури, хоча реальний стан підканалів дав би можливість диференціювати види модуляції у них.

2.9 Технологія MIMO

Надзвичайно широкого поширення набули технології широкосмугового радіодоступу, зокрема технологія Wi-Fi. Це спонукає до постійного її удосконалення в напрямку розв'язання проблем розподілу трафіка між декількома клієнтами, підвищення безпеки, а також збільшення швидкості передачі мультимедійної інформації. Стосовно останнього, то тут знайшлося рішення MIMO.

Абревіатура MIMO (Multiple Input Multiple Output) означає "множинний вхід, множинний вихід". Тобто будь-яку систему, що працює за принципом MIMO, можна розглядати як багатоканальний прилад, який поєднує в собі можливості кількох одноканальних.

Ідея полягає в тому, що передавач, так само як і приймач, володіє двома незалежними антенами, які передають і приймають один з потоків даних, закодованих для мережі MIMO. Між відповідними антенами створюється канал, який виконує роль фізичного транспорту для одного з потоків даних. Техніка Wi-Fi MIMO використовує неоднорідність приміщень і ефекти відбиття, що дозволяє зробити потоки даних незалежними.

Таким чином, у чистому полі, наприклад, MIMO дасть набагато менше ефекту, ніж в офісі, і подібний підхід з наукової точки зору слід вважати дуже конструктивним. Що стосується інтерпретації даних, завдяки деяким хитрощам з модуляцією і більш щільною математичною обробкою кодіваних даних як на етапі передачі, так і на етапі прийому, стає можливим збереження практично повної пропускної здатності кожного з каналів, інтерференція і взаємні перешкоди для яких вирішуються завдяки використанню пари антен. Зауважимо, що розподіл каналів відбувається за рахунок просторового рознесення антен та математичних операцій над сигналом, який прийнято різними антенами. Цей сигнал буде різним через багатопроменеве поширення радіохвиль. Відомо, що ефект багатопроменевого поширення завжди негативно впливав на передачу даних у мережі, але у випадку технології MIMO він виявився корисним і «працює» на збільшення швидкості. Стандарт 802.11n підтримує MIMO і забезпечує швидкість до 600 Мбіт/с.

У більшості випадків швидкість 600 Мбіт/с є не більше, ніж маркетинговим прийомом і нереалізована на практиці, оскільки фактично її можна досягти тільки між стаціонарними точками доступу, встановленими в межах однієї кімнати при хорошому співвідношенні сигнал/шум.

Ще один крок у напрямку збільшення швидкості передачі був запропонований у стандарті 802.11ac: максимальна швидкість, передбачена стандартом, складає до 6,93 Гбіт/с, однак фактично така швидкість ще не досягнута ні на одному обладнанні, представленому на ринку. Збільшення швидкості досягнуто за рахунок збільшення смуги пропускання до 80 і навіть до 160 МГц. Така смуга не може бути надана в діапазоні 2,4 ГГц, тому стандарт

802.11ac функціонує тільки в діапазоні 5 ГГц. Ще один фактор збільшення швидкості - збільшення глибини модуляції до 256 рівнів на один символ (8 біт на 1 бод).

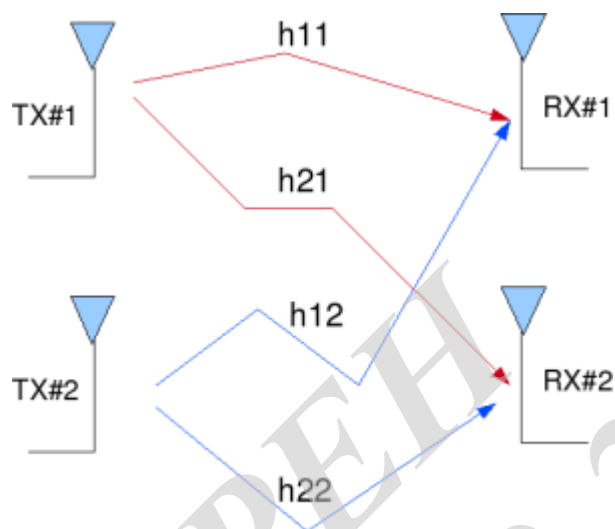


Рисунок 2.20 – Матриця багатопроменевого поширення радіохвиль

На жаль, така глибина модуляції може бути отримана тільки поблизу точки доступу через підвищені вимоги щодо співвідношення сигнал/шум. Зазначені поліпшення дозволили домогтися збільшення швидкості до 867 Мбіт/с. Решта збільшення отримано за рахунок раніше згаданих потоків MIMO 8x8: $8 \cdot 867 \times 8 = 6,93$ Гбіт/с. Технологія MIMO була вдосконалена: вперше в стандарті Wi-Fi інформація в одній мережі може передаватися двом абонентам одночасно з використанням різних просторових потоків.

Висновки

Розділ присвячений розгляду місця модулятора в мультисервісній системі, оскільки саме від цього пристрою значною мірою залежить вирішення проблеми підвищення спектральної ефективності. Неможливо заздалегідь однозначно сказати, який вид модуляції використовуватиметься для певних технологій широкопasmового доступу. Причиною цього є те, що підвищення спектральної

ефективності має мати місце не будь-якою ціною. Кінцевим результатом повинна бути не тільки швидка, але і якісна передача інформації, а це можливо, якщо забезпечений достатній рівень завадостійкості вибраного типу модуляції.

Проведений аналіз показав, що зазвичай спектральна ефективність вступає у протиріччя з завадостійкістю – використання більшої кількості позицій в модульованому сигналі (символі) робить його більш уразливим до дії різноманітних завад і, навпаки, низькопозиційні види модуляції характеризуються більшою завадостійкістю. Найбільш пристосована до цих протиріч DMT-модуляція, алгоритмом якої передбачений попередній аналіз стану каналу передачі і на основі цього оптимальний вибір типу модуляції. Необхідно також відзначити OFDM-модуляцію, яка дає суттєве підвищення спектральної ефективності і одночасно забезпечує стійку роботу в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль.

Введення додаткових каналів передачі, задеклароване технологією MIMO, не тільки збільшує спектральну ефективність систем радіодоступу, але і робить це з використанням у минулому негативного явища багатопроменевого поширення сигналів. Отже, вибір найбільш ефективного способу модуляції при розробці систем широкосмугового доступу продовжує залишатися одним з найважливіших питань.

3 СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Залежно від призначення і умов функціонування системи радіозв'язку її ефективність оцінюється на підставі тих чи інших показників (критеріїв), основними з яких є енергетичний і спектральний. Відповідно, найважливішими характеристиками будь-якої системи радіозв'язку є енергетична та спектральна ефективності, що характеризують, відповідно, енергетичні витрати і смугу займаних частот, необхідних для передачі повідомлень.

На жаль, одночасне досягнення граничних значень цих показників ефективності виявляється неможливим, тому в кожному конкретному випадку побудови системи радіозв'язку доводиться керуватися компромісними міркуваннями при оптимізації характеристик режимів функціонування системи.

3.1 Оцінка пропускної здатності системи зв'язку

Будь-який сигнал можна розглядати як функцію часу, або як функцію частоти. Вид функції показує, як змінюються параметри сигналу. Якщо функція має безперервний характер, то говорять про безперервний сигнал. Якщо ця функція має дискретний вигляд, то говорять про дискретний сигнал. Частотне представлення функції базується на тому факті, що будь-яка залежність може бути представлена у вигляді ряду Фур'є

$$s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi f t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi f t), \quad (3.1)$$

де $f = 1/T$ - частота, a_n та b_n – амплітуди n -ї гармоніки.

Характеристика каналу, яка визначає спектр частот, фізичне середовище, з якої виконана лінія зв'язку, і здатна пропускати сигнал без істотного зниження

потужності, називається пропускною здатністю. Максимальну швидкість, з якою можлива передача даних через канал, називають пропускною спроможністю каналу, або бітовою швидкістю. Згідно теореми Найквіста існує взаємозв'язок між пропускною здатністю каналу і шириною його смуги пропускання

$$V_{\max} = 2F \log M, \quad (3.2)$$

де V_{\max} - максимальна швидкість передачі даних, F - ширина смуги пропускання каналу, виражена у Гц, M - кількість рівнів сигналу, які використовуються при передачі. Тоді необхідну смугу частот визначають з виразу

$$F = \frac{V_{\max}}{2 \log M}. \quad (3.3)$$

Якщо передавач використовує більш ніж 2 стійких стани сигналу для кодування даних, то пропускна здатність лінії підвищується, оскільки за один такт роботи передавач передає кілька біт вихідних даних. Багаторівневий сигнал формується шляхом розбиття вихідного бінарного сигналу на групи з n символів, причому число рівнів багаторівневого сигналу визначається числом можливих комбінацій символів в межах групи. Такий багаторівневий сигнал, що передається в заданій смузі частот і з заданою вірогідністю помилки, здатний забезпечити більш високу швидкість передачі вихідного двійкового сигналу, однак при цьому потрібно забезпечити суттєве збільшення співвідношення сигнал / шум. Число рівнів у загальному вигляді дорівнює 2^n . Тоді 3 біта вихідного бінарного сигналу в групі дозволяють сформувати 8-рівневий сигнал, 4 біта - 16-рівневий тощо. В одному тактовому інтервалі багаторівневого сигналу буде передаватися інформація, що міститься в 2-х, 3-х або 4-х бітах вихідного бінарного сигналу.

Оцінка необхідної смуги частот для досягнення швидкості передачі $V_{\max} = 10^9$ б/с при $M=2$ здійснюється згідно з виразом:

$$F = \frac{1 \cdot 10^9}{2 \log 2} \cdot$$

Формула Найквіста явно не враховує наявність шуму, і побічно його вплив відбивається у виборі кількості станів інформаційного сигналу. Для підвищення пропускної здатності каналу бажано збільшити цю кількість до високих показників. На практиці це неможливо виконати через вплив шуму в каналі зв'язку. Можна збільшити пропускну здатність лінії ще в два рази, використовуючи для кодування даних не 4, а 16 рівнів. Однак якщо амплітуда шуму часто перевищує різницю між сусідніми 16-ма рівнями, то приймач не зможе стійко розпізнавати передані дані. Тому кількість можливих станів сигналу фактично обмежується співвідношенням потужності сигналу і шуму, а формула Найквіста визначає граничну швидкість передачі даних у тому випадку, коли кількість станів вже вибрано з урахуванням можливостей сталого розпізнавання сигналів приймачем. Наведені співвідношення дають граничне значення пропускної здатності лінії, а ступінь наближення до цієї межі залежить від конкретних методів фізичного кодування. Відома теорема К. Шеннона, згідно з якою максимальна швидкість передачі даних по каналу з шумом дорівнює

$$V_{\max} = F \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (3.4)$$

де $\frac{S}{N}$ - співвідношення сигнал-шум у каналі.

Визначимо необхідну смугу частот для необхідних умов

$$F = \frac{V_{\max}}{\log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)} \quad (3.5)$$

Тут вже неважливо кількість рівнів в сигналі і підвищити пропускну здатність у лінії можна за рахунок застосування раціонального виду модуляції,

тобто за рахунок збільшення частотної ефективності виділеної смуги пропускання при цьому смуга пропускання, каналу зв'язку є дорогим ресурсом.

3.2 Біортогональні кодові конструкції

Вищеописані розрахунки показують недосяжність даної швидкості в умовах відсутності будь-яких перетворень з сигналом. Найбільш доцільними маніпуляціями з сигналом є знаходження оптимального поєднання кодування і модуляції [10].

Процедура кодування сигналу полягає в перетворенні набору сигналів (що представляють набір повідомлень) у вдосконалений набір сигналів. Найбільш популярні з кодів сигналу називаються ортогональними і біортогональними кодами. У процесі кодування кожен сигнал набору намагаються виконати настільки несхожим на інші, наскільки це можливо, щоб для всіх пар сигналів коефіцієнт взаємної кореляції мав найменше можливе значення, яке дорівнює

$$Z_{ij} = \frac{1}{E} \sum_0^T S_i(t) \cdot S_j(t) dt = \begin{cases} 1 \text{ ідè } i = j \\ 0 \text{ ідè } i \neq j \end{cases} \quad (3.6)$$

де Z_{ij} є коефіцієнтом взаємної кореляції, а величина E - енергією сигналу, яка виражається таким чином.

$$E = \sum_0^T S_i^2(t) dt \quad (3.7)$$

Строго ця умова виконується тоді, коли сигнали антикорелюють ($Z_{ij} = -1$).

Цього можна досягти лише в тому випадку, якщо в наборі всього два значення ($M = 2$) і вони антиподні один одному. Взагалі, всі коефіцієнти взаємної кореляції можна зробити рівними нулю. У цьому випадку набір буде ортогональним.

Набори антиподних сигналів є оптимальними в тому сенсі, що всі сигнали максимально віддалені один від одного.

Відстань d між векторами сигналів визначається як $d = 2\sqrt{E}$, де E -енергія сигналу на інтервалі T .

Якщо порівняти просторові характеристики ортогональних сигналів з характеристиками антиподних сигналів, можна сказати, що доцільність застосування останніх висока. Відстань ортогональних сигналів складає $d = 2\sqrt{E}$.

Одна з переваг біортогональних кодів перед ортогональними полягає в тому, що при передачі аналогічної інформації розмір кодового слова біортогональних кодів вдвічі менше розміру кодового слова ортогональних кодів. Отже, при використанні біортогональних кодів вимоги до смуги пропускання вдвічі легші, ніж при використанні ортогональних кодів. Оскільки антиподні вектори сигналів мають кращі просторові характеристики, ніж ортогональні, це означає, що біортогональні коди кращі ортогональних. Для однакових, аналогічних енергетично біортогональних сигналів ймовірність помилки в кодовому слові (символі) можна оцінити так

$$P_E(M) \leq (M - 2)Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right) + Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right). \quad (3.8)$$

Описані біортогональні коди значно знижують імовірність помилки у порівнянні з ортогональними кодами і вимагають лише половину смуги пропускання ортогональних кодів. Це дозволяє підвищити завадостійкість системи і ефективно використовувати частотний ресурс.

3.3 Використання технології OFDM

Технологія OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing - мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів) знаходить широке застосування в протоколах бездротового зв'язку. Основна перевага даної технології полягає в тому, що вона дозволяє реалізувати високу швидкість

передачі даних, має високу спектральної ефективність і створює передумови для ефективного придушення такого паразитного явища, як багатопроменева інтерференція сигналів, що виникає в результаті багаторазових відбиттів сигналу від природних перешкод, в результаті чого один і той же сигнал потрапляє в приймач різними шляхами. Отже, в точці прийому результуючий сигнал являє собою суперпозицію (інтерференцію) багатьох сигналів, що мають відмінні амплітуди і зміщені один відносно одного за часом, що призводить до спотворення прийнятого сигналу. Багатопроменева інтерференція властива будь-якому типу сигналів, але особливо негативно вона позначається на широкосмугових сигналах. Щоб уникнути впливу багатопроменевого поширення, в технології OFDM потік переданих даних розподіляється по безлічі частотних ортогональних один одному підканалів і передача ведеться паралельно на всіх підканалах. При цьому під ортогональністю каналів мається на увазі, що несучі частоти кожного каналу ортогональні один одному. Для реалізації методу OFDM в передавальних пристроях використовується зворотне швидке перетворення Фур'є (ОБПФ), що переводить попередньо мультиплексований на N-каналів сигнал з часового уявлення в часове [19].

У таблиці 3.1 представлені виграші для різних видів модуляції. Видно, що зі збільшенням числа сигнальних сузір'їв збільшується виграш, однак при наявності перешкод збільшення сузір'їв тягне різке збільшення ймовірності помилки на біт.

Таблиця 3.1 – Аналітичні виграші при різних видах модуляції

Вид модуляції	Виграш
ФМ-2	0,5
ФМ-4	1
QAM-8	1,5
QAM-16	2
QAM-32	2,5

3.4 Порівняльний аналіз сучасних систем широкосмугового доступу

Одним із способів досягнення необхідної швидкості є оптимізація сучасних технологій. Найбільший інтерес представляють собою системи Wi-Fi, WiMAX, HSPA і LTE. Порівняльний аналіз дозволить виділити плюси і мінуси систем і виробити комплексне рішення.

Одним із значних переваг передових бездротових систем, таких як WiMAX є спектральна ефективність. Наприклад, 802.16-2004 (фіксований) має спектральну ефективність 3,7 (біт/с)/Гц, а інші 3,5-4G бездротові системи володіють приблизно однаковою спектральною ефективністю. Помітна перевага WiMAX виходить від об'єднання SOFDMA зі smart-технологіями. Це збільшує спектральну ефективність за рахунок багаторазового використання smart-топологій розгортання мережі.

Пряме використання частот при організації домену полегшує використанням MIMO-AAS в порівнянні з CDMA/WCDMA-методами, в результаті чого створюються більш ефективні системи.

Технологія HSPA передбачає частотне дуплексування (FDD) з шириною кожного дуплексного каналу 5 МГц. У низхідному каналі використовується модуляція QPSK або 16-QAM, пікова швидкість 14 Мбіт/с.

У висхідному каналі модуляція BPSK, пікова швидкість 5,8 Мбіт/с.

При порівнянні мобільних WiMAX і HSPA+ можна зробити такі висновки:

- мобільний WiMAX має у порівнянні з HSPA+ пікові швидкості в низхідному каналі при однаковій модуляції, швидкості кодування і ширині каналу. При цьому у мобільного WiMAX в висхідному каналі пікова швидкість вище в 2-3 рази;

- система HSPA+ обмежена шириною каналу 2x5 МГц в традиційних спектральних умовах мереж 3G. Мобільний WiMAX підтримує ширину каналу до 20 МГц, частотне та часове розділення каналів. Його частотні профілі плануються в діапазонах 700, 1700, 2300, 2500 і 3500 МГц.

Наступним кроком еволюції систем 3GPP є системи Long Term Evolution (LTE). Їх відрізняє технологія OFDMA в низхідному каналі і SC-FDMA - у висхідному. Модуляція - до 64-QAM, ширина каналу - до 20 МГц, розділення каналів TDD і FDD. Застосовані адаптивні антенні системи, гнучка мережа доступу. Мережева архітектура повторює повністю IP-мережу. В системі LTE застосовуються технології і методи, які вже застосовуються у мобільному WiMAX, тому слід очікувати подібної ефективності систем LTE.

Системи LTE - це революційне поліпшення 3G. LTE являє собою перехід від систем CDMA до систем OFDMA, а також перехід до повністю IP-системи з комунікацією пакетів. Тому впровадження цієї технології на існуючих мережах стільникового зв'язку означає необхідність нових радіочастотних ресурсів для отримання переваги від широкого каналу.

Якщо мережа WiMAX ґрунтується повністю на IP-протоколах IEEE, то мережа LTE складніша, включає більше протоколів, у тому числі спеціальні протоколи 3G.

Висновки порівняння WiMAX і LTE:

- специфікації IMT-Advanced ще не повністю визначені;
- стандарт IEEE802.16m буде повністю відображати специфікації і вимоги IMT-Advanced;
- мобільний WiMAX і LTE мають схожі характеристики. В обох видах на лінії від бази використовується OFDMA з багаторівневою модуляцією і кодуванням. Пікові швидкості практично однакові при однакових кратностях модуляції і швидкостях коригуючого коду. В обох використовується і FDD, і TDD розділення каналів при ширині каналу до 20 МГц. В обох використовується MIMO великої кратності і зменшення затримки;
- пропускна здатність і спектральна ефективність мобільного WiMAX має кращі параметри, ніж LTE;
- для мереж LTE і WiMAX необхідний новий спектр;
- для обох мереж потрібні багаторежимні абонентські пристрої.

Порівняння і плутанина між WiMAX і Wi-Fi є частими, оскільки обидва вони пов'язані з бездротовим зв'язком і доступом в Інтернет.

WiMAX використовує спектр, щоб забезпечити підключення за топологією точка-точка до зовнішньої мережі. Різні 802.16 стандарти передбачають різні види доступу з портативних комутаторів (по аналогії з бездротовим телефоном) для фіксованого (альтернатива проводового доступу, де бездротові точки підключення кінцевих користувачів зафіксовані в регіоні). Wi-Fi використовує неліцензійний спектр для надання доступу до мережі. Технологія Wi-Fi більш популярна в пристроях кінцевих користувачів. WiMAX і Wi-Fi мають абсолютно різні механізми якості обслуговування (QoS). WiMAX використовує механізм, заснований на зв'язку між базовою станцією і пристроєм користувача. Кожне з'єднання засноване на конкретних алгоритмах планування. Wi-Fi має механізм QoS, аналогічний фіксованій Ethernet, де пакети можуть отримувати різні пріоритети.

Широкопasmовим бездротовим мережам необхідний широкий частотний спектр, який можна знайти тільки в діапазоні від 10 до 66 ГГц. Міліметрові хвилі володіють однією цікавою властивістю, якої бракує довшим мікрохвилям: вони поширюються не на всіх напрямках (як звук), а за прямими лініями (як світло). Отже, на базовій станції повинно бути встановлено безліч антен, що покривають різні сектори навколишньої території. У кожному секторі будуть свої користувачі. Сектори не залежать одне від одного, чого не скажеш про стільниковий радіозв'язок, у якому сигнали поширюються відразу в усіх напрямках.

Оскільки потужність сигналу переданих міліметрових хвиль сильно зменшується зі збільшенням відстані від передавача (тобто базової станції), то і співвідношення сигнал/шум також знижується. З цієї причини 802.16 використовує три різних схеми модуляції в залежності від відстані до абонентської станції. Якщо абонент розташований недалеко від БС, то застосовується QAM-64 з шістьма бітами на відлік. На середній відстані використовується QAM-16 і 4 біта/бод. Якщо абонент розташований далеко, то працює схема QPSK з 2 бітами на відлік. Наприклад, для типової смуги спектра 25

МГц QAM-64 дає швидкість 150 Мбіт/с, QAM-16 - 100 Мбіт/с, а QPSK - 50 Мбіт/с. Таким чином, чим далі знаходиться абонент від базової станції, тим нижча швидкість передачі даних.

Стандарт 802.16 забезпечує гнучкість розподілу смуги пропускання. Застосовуються дві схеми модуляції: FDD (дуплексний зв'язок з частотним розділенням каналів) і TDD (дуплексний зв'язок з часовим розділенням каналів).

3.5 Оцінка потенційних можливостей системи зв'язку

Як зазначалося раніше, оцінка необхідної смуги частот не враховує інформативність переданого повідомлення. Сучасні технології на даний момент досягли коефіцієнта ефективності використання частотного ресурсу (спектральної ефективності) рівного 8 біт/с/Гц. Нехай заданий коефіцієнт використання частотного ресурсу $K_{\text{аєє}} = 8 \text{ біт/с/Гц}$, при цьому необхідно досягти швидкості $V_{\text{max}} = 10^9 \text{ біт/с}$, тоді необхідна смуга частот визначається як

$$\Delta F = \frac{V_{\text{max}}}{K_{\text{аєє}}} \quad (3.8)$$

Для зазначених вище умов отримуємо смугу частот ΔF :

$$\Delta F = \frac{10^9}{8} = 125 \cdot 10^6 \text{ Гц.}$$

Для збільшення пропускної здатності доцільно використовувати технологію OFDM. Визначимо необхідну кількість каналів, за умови, що піднесущі знаходяться один від одного на частотному інтервалі $\Delta f = 10^3 \text{ Гц}$. Тоді

$$N_{\text{ofdm}} = \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (3.9)$$

Звідси отримуємо необхідну кількість каналів

$$N_{ofdm} = \frac{125 \cdot 10^6}{10^3} = 125 \cdot 10^3 \text{ каналів.}$$

Тобто для досягнення необхідної швидкості необхідно 125 тис. каналів. Нехай на службові канали в системі буде виділено - 25 тис. каналів. Тоді час передачі всієї інформації інформаційними та службовими каналами має вигляд

$$\Delta T = \frac{1}{\Delta f}. \quad (3.10)$$

Визначимо час передачі:

$$\Delta T = \frac{1}{10^3} = 10^{-3} \text{ с.}$$

Якщо застосовується QAM-16, то за один такт передається 4 розряди по 100 тис. каналів, тоді гранична швидкість визначається співвідношенням:

$$V_{\max} = \frac{R \cdot N_{ofdm}}{\Delta T}. \quad (3.11)$$

Отримаємо:

$$V_{\max} = \frac{4 \cdot 100 \cdot 10^3}{10^{-3}} = 400 \cdot 10^6 \text{ біт/с.}$$

При зменшенні числа службових каналів отримане значення швидкості передачі даних зростає. Для отримання асимптотичної оцінки рівень шуму в наведених розрахунках приймався мінімальним. Очевидно, що зі збільшенням чинників, що заважають, швидкість передачі даних об'єктивно знижується і в умовах навмисних перешкод може виявитися мінімально можливою.

Висновки

Оцінка досяжних значень швидкості передачі даних при заданій достовірності в умовах впливу перешкод показує, що найбільш раціональними шляхами досягнення високої швидкості обміну даними є розширення смуги створюваного каналу зв'язку і використання складних видів модуляції в форматі QAM-сигналів. Другий шлях є найбільш раціональним через обмеженість частотного ресурсу. З огляду на умови функціонування систем обміну даними в умовах перешкод природного характеру і перешкод антропогенного типу виникає доцільність розвитку таких систем як системи з елементами структурної або параметричної адаптації. Застосування QAM-сигналів спільно з технологією OFDM може займати діапазон від QAM-2 (в умовах інтенсивних перешкод) до QAM-32 (в сприятливих умовах). Показана можливість досягнення швидкості обміну даними на рівні до 100 Мбіт/с.

4 МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ З ВИСОКОЮ СПЕКТРАЛЬНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ

4.1 Побудова моделі

Одним з основних методів підвищення швидкості передачі в сучасних системах є застосування багатопозиційних видів модуляції, таких як КАМ-64 та КАМ-256, але їх використання пов'язане із значним зниженням завадостійкості. Найбільш завадостійкими модуляціями є малопозиційні BPSQ та QPSK, але їх параметри не дозволяють забезпечити швидкість передачі, необхідну для сучасних систем при низьких вимогах до ширини смуги частот [4]. В свою чергу, методи розширення спектру дозволяють використовувати класичні методи цифрової модуляції з перекриттям по спектру із малопотужними широкоспектральними сигналами практично без взаємного впливу завад.

Для дослідження спектральної ефективності каналу передачі доцільно застосувати таку схему: джерело сигналу – модулятор – канал передачі – демодулятор сигналу – приймач сигналу. Схема джерела сигналу (Data source) для моделювання в середовищі Simulink зображена на рисунку 4.1.

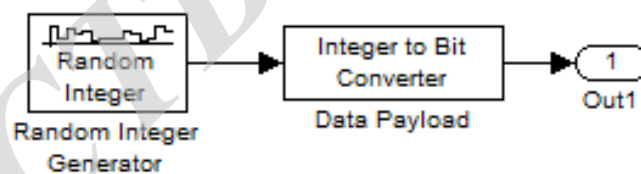


Рисунок 4.1 – Модель джерела сигналу

Як видно із вище наведеної схеми, джерело сигналу, в даному випадку, складається з генератора випадкових чисел та перетворювача бінарної послідовності в послідовність цілих чисел заданої довжини. На рисунку 3.2 зображена схема модулятора КАМ-64.

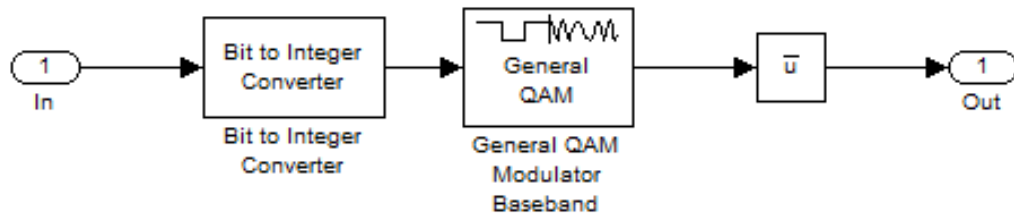


Рисунок 4.2 – Дослідна модель модулятора КАМ

Дана схема включає в себе послідовно-паралельний перетворювач, власне модулятор КАМ із заданими параметрами та математичної функції $V = \text{conj}(Z)$, яка інвертує масив комплексно-спряжених значень для елементів Z . Для програмування КАМ-64 використаємо комплексні значення рівня амплітуди та фази, приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Комплексні значення амплітуди та фази для модулятора КАМ-64

	X-4	X-3	X-2	X-1	X+1	X+2	X+3	X+4
Y+4	0.4629+ +0.4629i	0.4629+ +0.1543i	0.4629+ +0.7715i	0.4629+ +1.0801i	0.4629- -0.4629i	0.4629- -0.1543i	0.4629- -0.7715i	0.4629- -1.0801i
Y+3	0.1543+ +0.4629i	0.1543+ +0.1543i	0.1543+ +0.7715i	0.1543+ +1.0801i	0.1543- -0.4629i	0.1543- -0.1543i	0.1543- -0.7715i	0.1543- -1.0801i
Y+2	0.7715+ +0.4629i	0.7715+ +0.1543i	0.7715+ +0.7715i	0.7715+ +1.0801i	0.7715- -0.4629i	0.7715- -0.1543i	0.7715- -0.7715i	0.7715- -1.0801i
Y+1	1.0801+ +0.4629i	1.0801+ +0.1543i	1.0801+ +0.7715i	1.0801+ +1.0801i	1.0801- -0.4629i	1.0801- -0.1543i	1.0801- -0.7715i	1.0801- -1.0801i
Y-1	-0.4629+ +0.4629i	-0.4629+ +0.1543i	-0.4629+ +0.7715i	-0.4629+ +1.0801i	-0.4629- -0.4629i	-0.4629- -0.1543i	-0.4629- -0.7715i	-0.4629- -1.0801i
Y-2	-0.1543+ +0.4629i	-0.1543+ +0.1543i	-0.1543+ +0.7715i	-0.1543+ +1.0801i	-0.1543- -0.4629i	-0.1543- -0.1543i	-0.1543- -0.7715i	-0.1543- -1.0801i
Y-3	-0.7715+ +0.4629i	-0.7715+ +0.1543i	-0.7715+ +0.7715i	-0.7715+ +1.0801i	-0.7715- -0.4629i	-0.7715- -0.1543i	-0.7715- -0.7715i	-0.7715- -1.0801i
Y-4	-1.0801+ +0.4629i	-1.0801+ +0.1543i	-1.0801+ +0.7715i	-1.0801+ +1.0801i	-1.0801- 0.4629i	-1.0801- -0.1543i	-1.0801- -0.7715i	-1.0801- -1.0801i

На рисунку 4.3 зображене сузір'я КАМ-64, яка відповідає значенням, наведеним в таблиці 4.1.

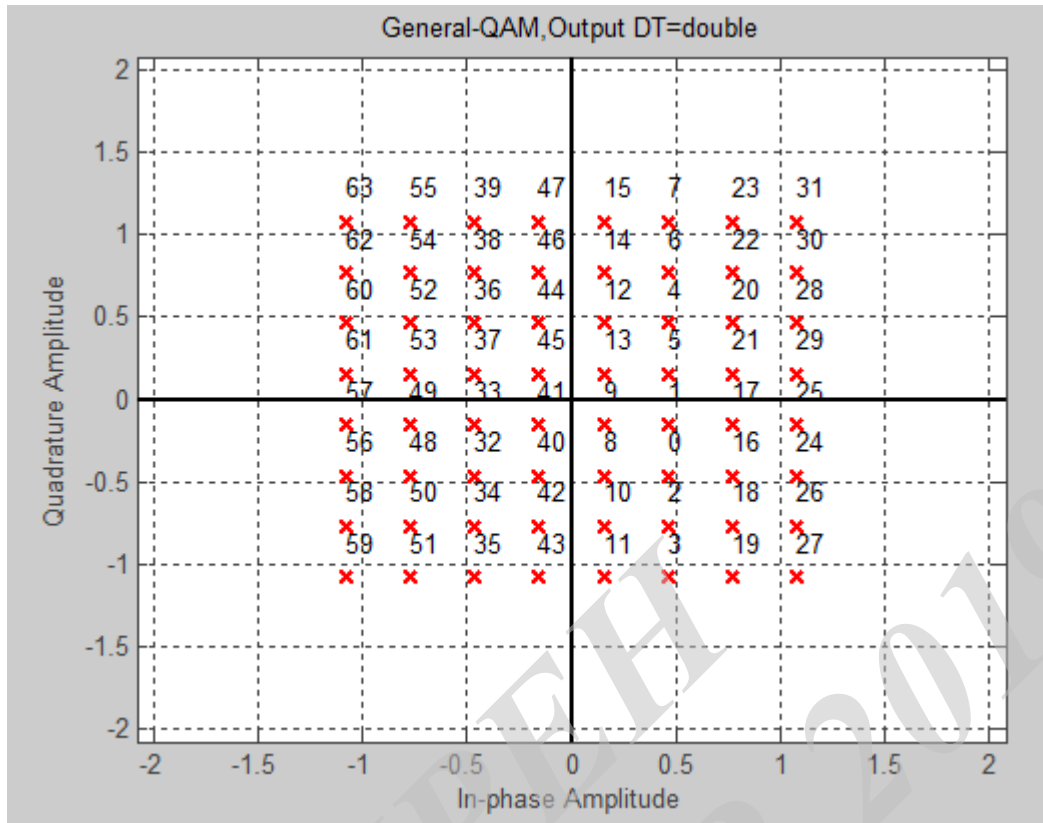


Рисунок 4.3 – Сузір'я КАМ-64

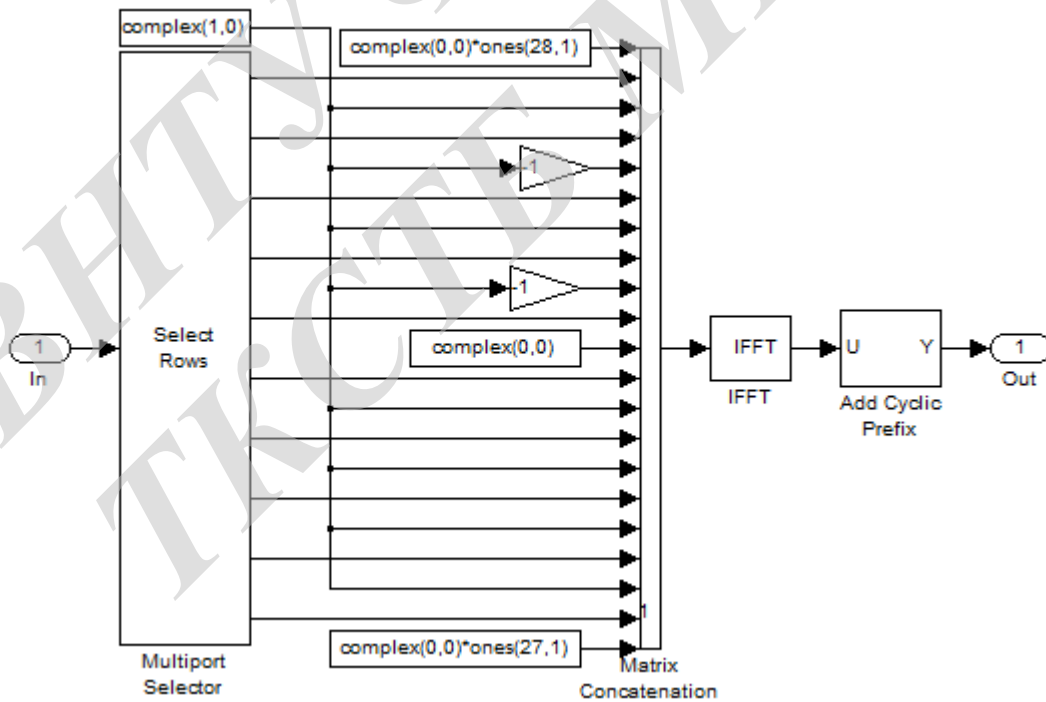


Рисунок 4.4 – Модулятор OFDM

На рис. 4.4 зображена схема модулятора OFDM. Вона включає в себе блок вибору рядків матриці, блок конкатенації матриці, блок швидкого перетворення Фур'є та блок для включення циклічного префіксу [4].

На рис. 4.5 зображена схема демодулятора OFDM. Вона включає в себе блок для вилучення циклічного префіксу, блок швидкого перетворення Фур'є, блок зміни статусу кадра та блоки видалення пілотних частот.

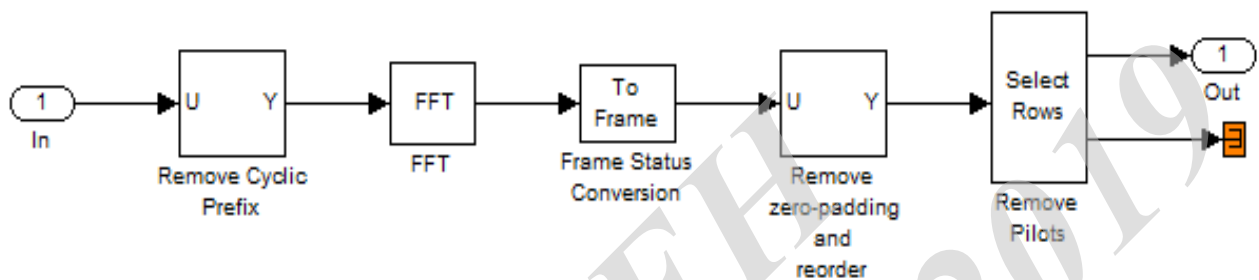


Рисунок 4.5 – Демодулятор OFDM

На рис. 4.6 зображена схема демодулятора QAM-64. Вона включає в себе математичний блок, який перетворює матрицю комплексно-спряжених значень у послідовність комплексних чисел, власне демодулятор QAM та перетворювач цілочислених значень у бітову послідовність.

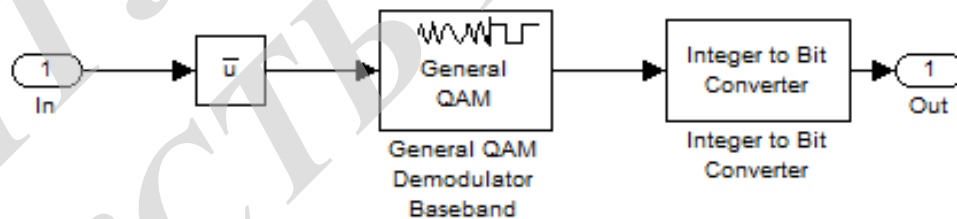


Рисунок 4.6 – Демодулятор QAM

На рис. 4.7 зображена схема приймача сигналу. Вона включає в себе паралельно-послідовний перетворювач, вихід якого підключений до пристрою NULL.

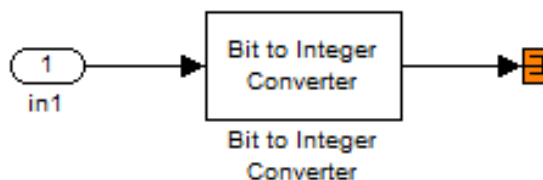


Рисунок 4.7 – Приймач сигналу

Основний аналіз прийнятого сигналу проводиться блоком System Performance Tests. Його схема представлена на рис. 4.8.

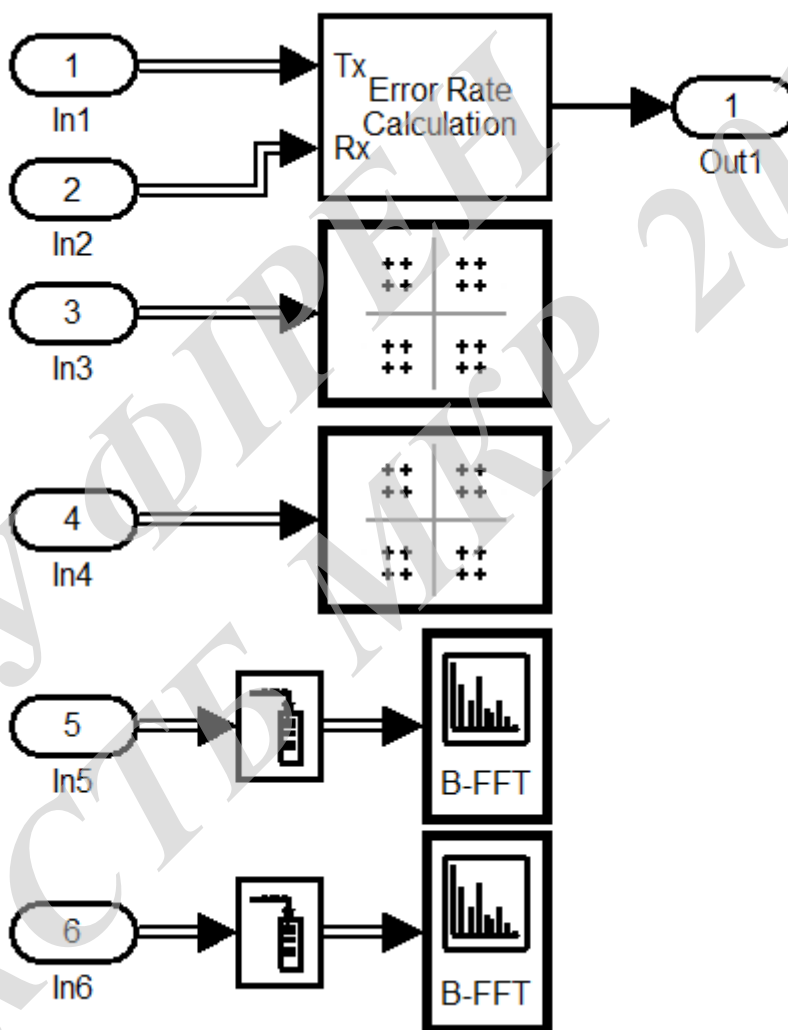


Рисунок 4.8 – Схема блоку дослідження прийнятого сигналу

До його складу входять два блоки Sink Blok для відображення комплексних чисел на площині X-Y та блок Error Rate Calculation, призначений для підрахунку кількості бітових помилок та їх відносної частоти виникнення. Вихід даного

модуля буде підключений до індикатора абсолютної та відносної кількості бітових помилок [22].

Кожен з вище наведених блоків перетворимо у модуль Simulink та з'єднаємо модулі у послідовності, зображеній на рисунку 4.9.

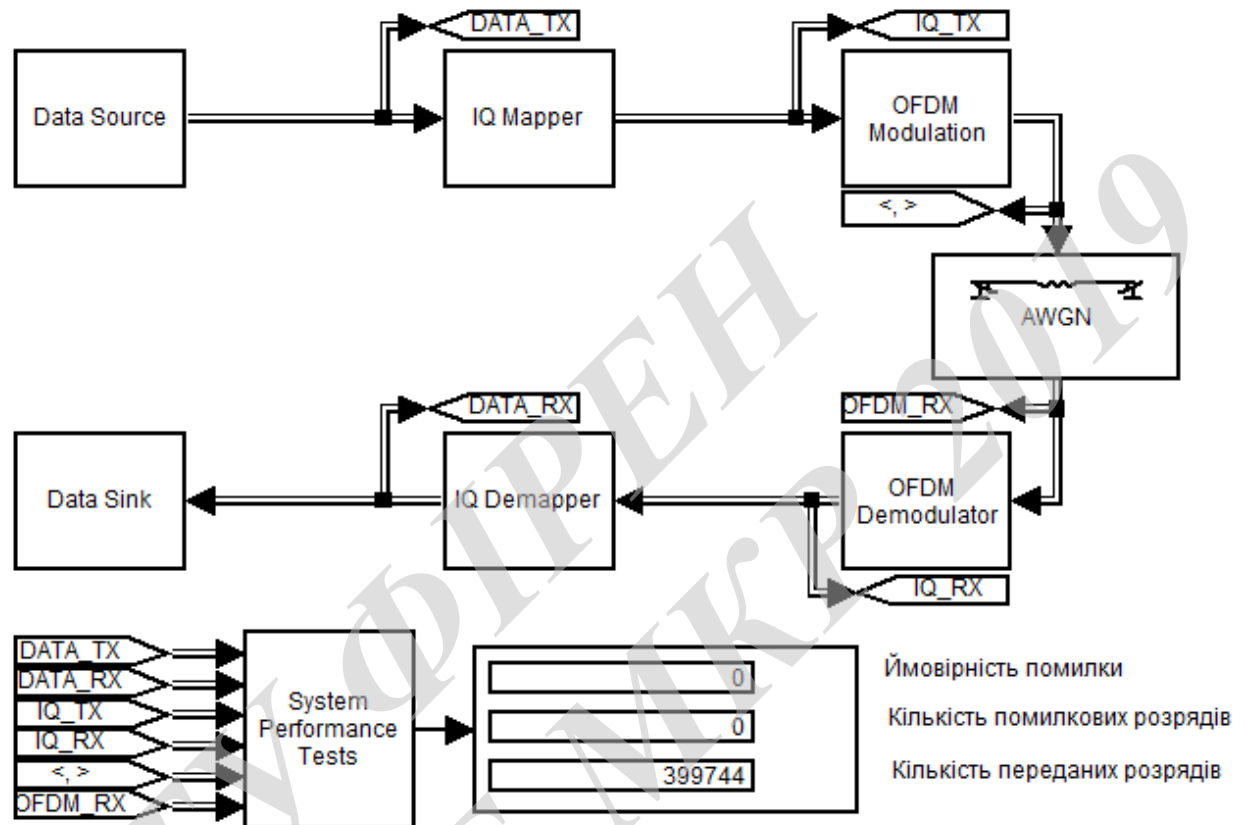


Рисунок 4.9 – Загальна схема для дослідження модуляції КАМ-64 з використанням технології OFDM

Для дослідження впливу на завадостійкість методу розширення спектру OFDM при використанні інших видів модуляції достатньо змінити блоки модулятора/демодулятора КАМ-64 на блоки для моделювання відповідної модуляції. Також потрібно змінити довжину кодового слова у блоках послідовно-паралельного та паралельно-послідовного перетворення. Так, для КАМ-64 довжина кодового слова складатиме 6 біт на символ, для КАМ-16 – 4 біта на символ, для QPSK – 2 біта на символ, для BPSK – 1 біт на символ.

Для дослідження впливу власне модуляції OFDM на завадостійкість каналу виключимо зі схеми модулятор та демодулятор OFDM. Відповідна схема представлена на рисунку 4.10.

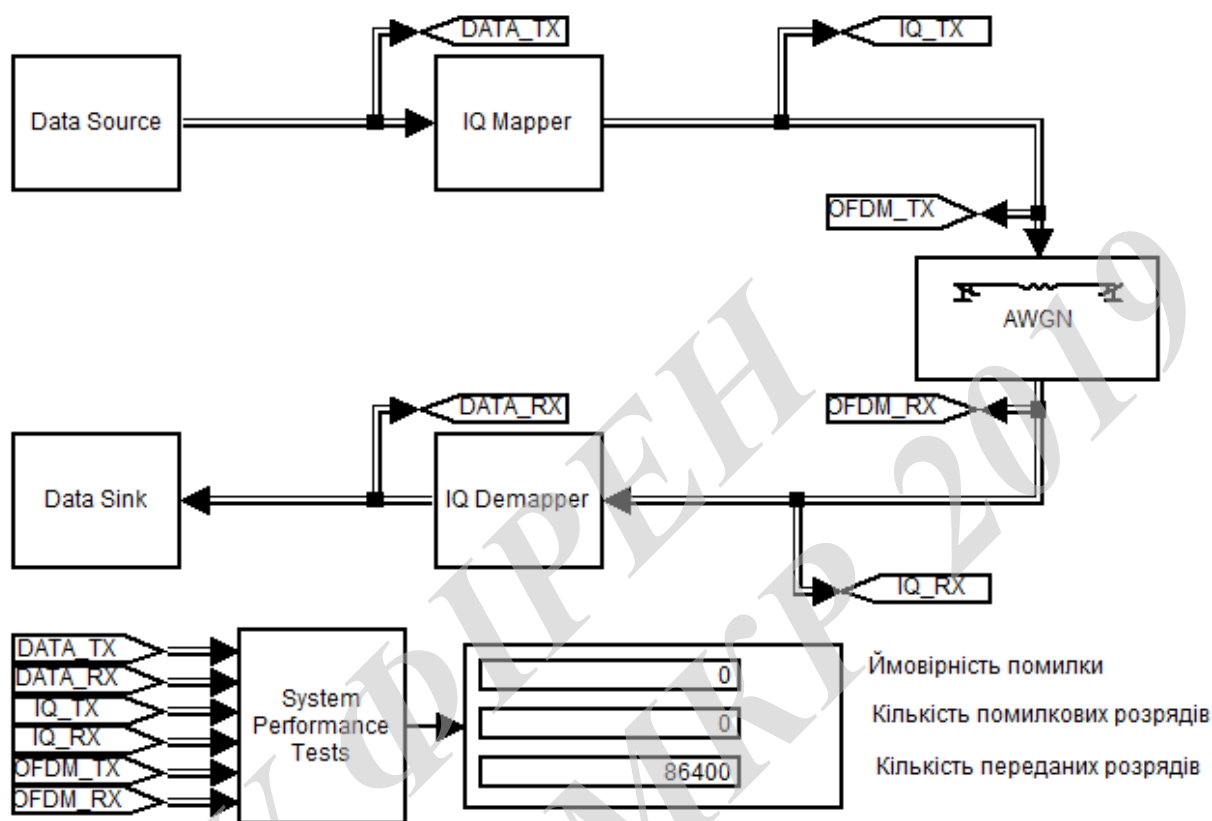


Рисунок 4.10 – Загальна схема для каналної модуляції без використання OFDM

4.2 Результати дослідження моделі

Для визначення ефективності OFDM при різних видах завад виконаємо порівняння моделей, зображених на рисунках 4.9 та 4.10 при використанні чотирьох видів модуляції (BPSK, QPSK, QAM-16 та QAM-64) та двох видів завад в каналі (в каналі з шумом Гауса (AWGN) та в каналі із вузькосмуговою завадою). Для цього виконаємо аналіз при зміні рівня сигнал/шум в каналі AWGN від 0 до 30 дБ з кроком 3 дБ. Результати моделювання відображені в таблиці 4.2 та на графіку, представленою на рисунку 4.11 [24].

Таблиця 4.2 – Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з гаусовим шумом при використанні OFDM

Рівень S/N в каналі, дБ	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
КАМ-64	0,415	0,378	0,326	0,264	0,198	0,135	0,071	e-4	0	0	0	0	0
КАМ-16	0,436	0,368	0,315	0,222	0,121	0,060	0,011	0	0	0	0	0	0
QPSK	0,456	0,391	0,219	0,106	0,024	0	0	0	0	0	0	0	0
BPSK	0,445	0,159	0,025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

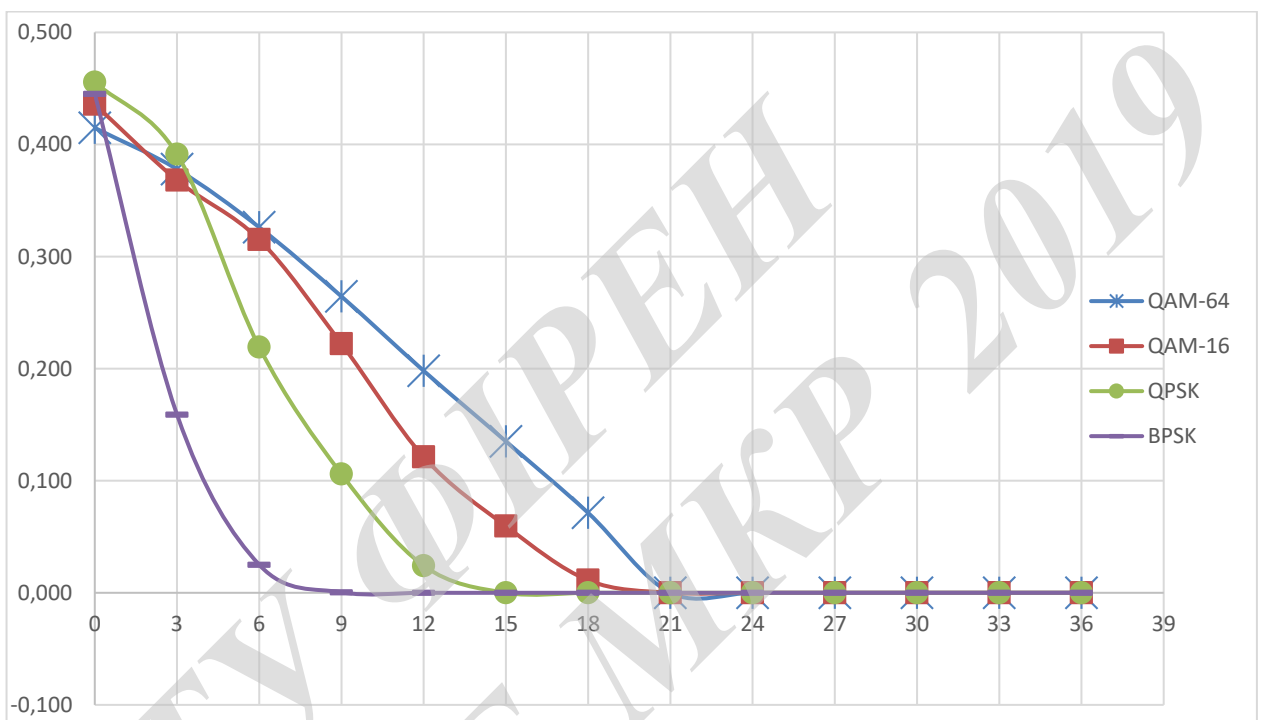


Рисунок 4.11 – Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з гаусовим шумом при використанні OFDM

Проведемо дослідження залежності ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з гаусовим шумом без використання OFDM. Відповідні результати наведені в таблиці 4.3 та на рисунку 4.12.

Як видно з результатів моделювання, використання розширення спектру OFDM у каналі з гаусовим шумом призводить до значного підвищення ймовірності помилки. Це пояснюється тим, що при розширенні спектру знижується абсолютне значення амплітуди інформаційного сигналу, а для гаусового шуму характерний неперервний спектр з рівномірним розподілом енергії по всій частотній області, тобто на кожен частотну складову сигналу

OFDM гаусів шум впливає однаково. Це приводить тільки до погіршення параметрів сигналу із розширеним спектром.

Таблиця 4.3 – Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з гаусовим шумом без використання OFDM

Рівень S/N в каналі, дБ	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
КАМ-64	0,225	0,100	0,008	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0
КАМ-16	0,321	0,120	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
QPSK	0,280	0,080	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BPSK	0,180	0,050	e-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

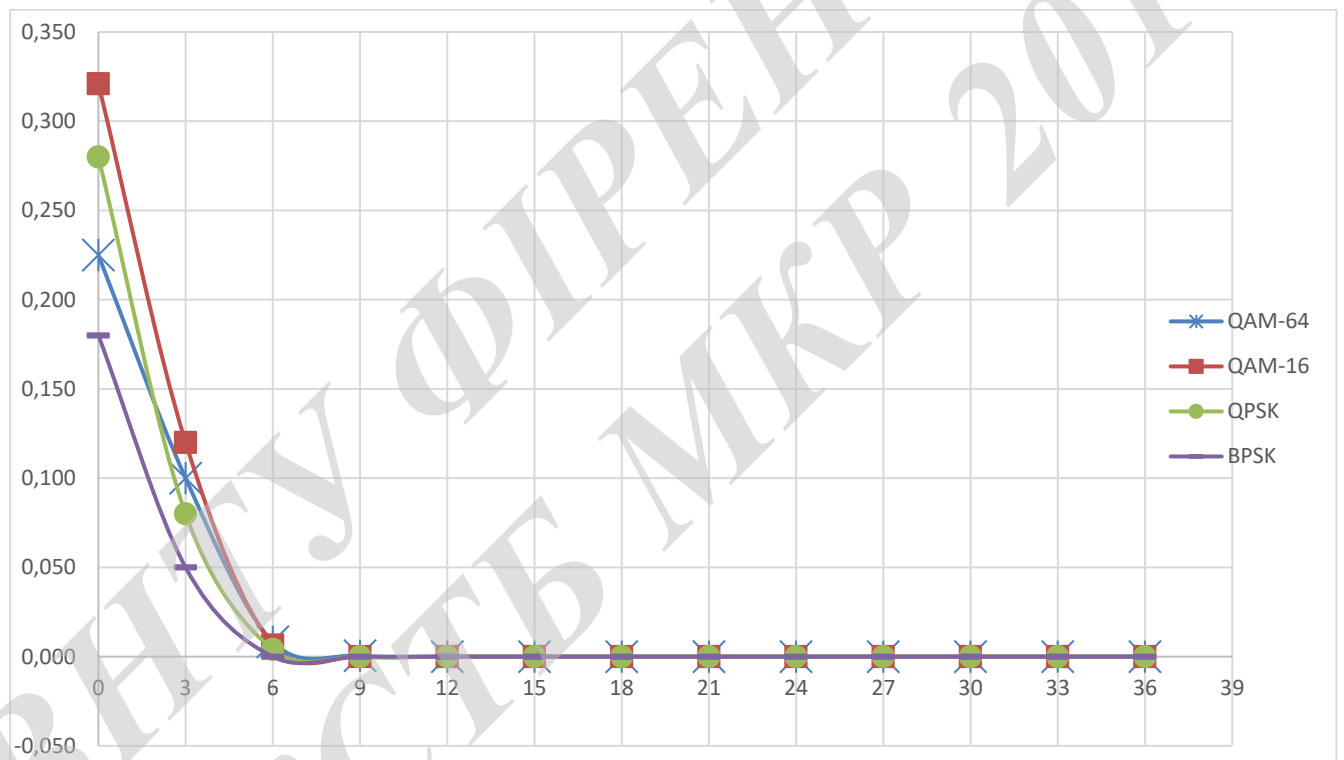


Рисунок 4.12 – Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з гаусовим шумом без використання OFDM

Але в реальних каналах зв'язку потужність гаусового шуму залишається порівняно низькою, значну роль грають інші завади: інтерференція з відбитим сигналом, ефект Доплера, потужні сигнали від інших систем та їх гармоніки тощо. Саме для усунення впливу таких завад використання розширення спектру є ефективним [31]. Проведемо аналіз системи при дії вузькосмугової завади на частоті несущого коливання. Потужність завади будемо змінювати в межах від 0

до 36 дБ. Результати моделювання при використанні розширення спектра представлені в таблиці 4.4 та на рисунку 4.13.

Таблиця 4.4 – Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з вузькосмуговою завадою при використанні OFDM

Рівень S/N в каналі, дБ	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
КАМ-64	0,421	0,386	0,334	0,272	0,211	0,149	0,101	0,057	0,025	0,009	0	0	0
КАМ-16	0,459	0,423	0,369	0,246	0,145	0,079	0,024	0	0	0	0	0	0
QPSK	0,456	0,391	0,219	0,106	0,024	0	0	0	0	0	0	0	0
BPSK	0,461	0,176	0,029	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0

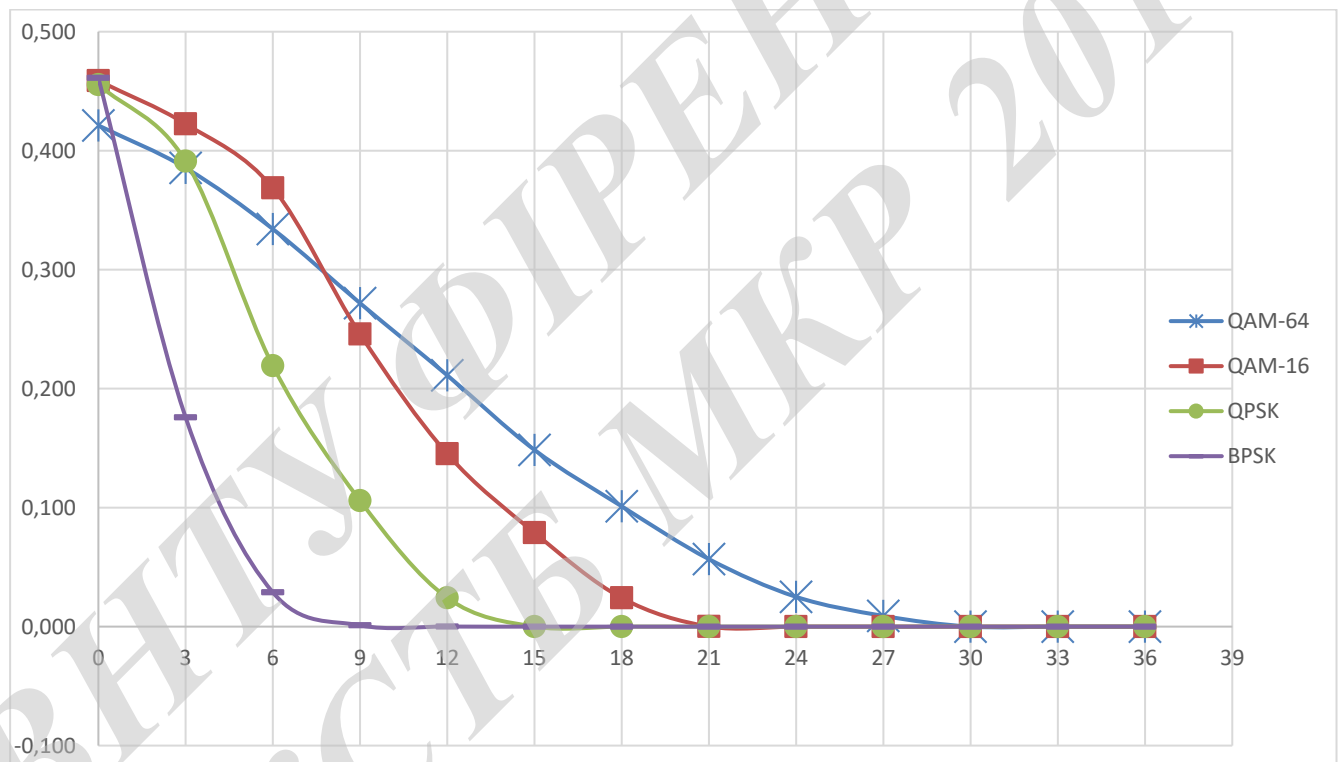


Рисунок 4.13 – Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з вузькосмуговою завадою при використанні OFDM

Результати дослідження залежності ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з вузькосмуговою завадою без використання OFDM наведені в таблиці 4.5 та на рисунку 4.14.

Отже, як видно з результатів моделювання, використання розширення спектра дозволяє ефективно боротися із впливом вузькосмугових завад. Навіть у

випадку, коли рівень завади більший рівня корисного сигналу, сигнал з розширеним спектром може бути переданий без спотворень, особливо при використанні мало позиційних завадостійких модуляцій, таких як BPSK та QPSK.

Таблиця 4.5 – Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з вузькосмуговою завадою без використання OFDM

Рівень S/N в каналі, дБ	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
КАМ-64	0,495	0,488	0,478	0,462	0,446	0,397	0,297	0,126	0,021	0,006	0,005	0	0
КАМ-16	0,485	0,477	0,466	0,453	0,430	0,355	0,195	0,016	0	0	0	0	0
QPSK	0,488	0,476	0,457	0,447	0,426	0,325	0,185	0,019	0	0	0	0	0
BPSK	0,475	0,445	0,431	0,411	0,367	0,256	0,131	0,006	0	0	0	0	0

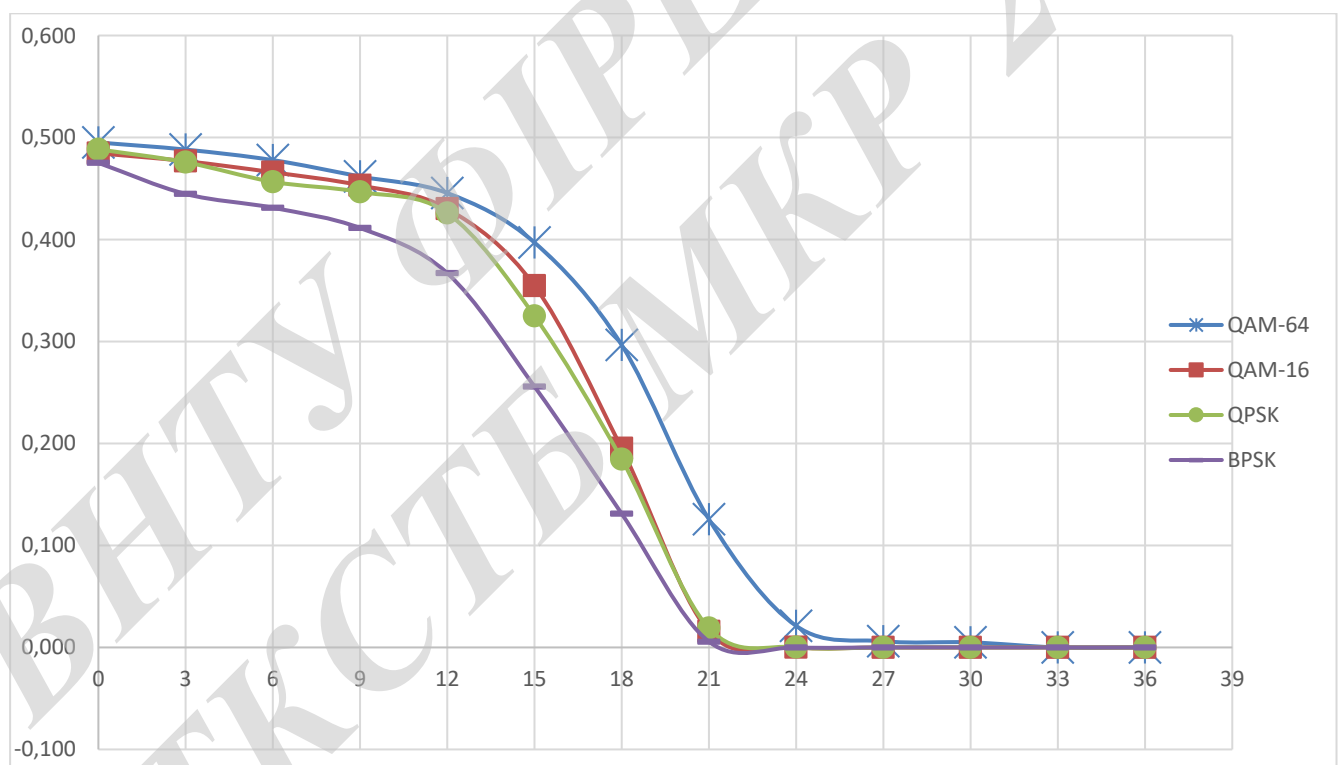


Рисунок 4.14 – Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з вузькосмуговою завадою без використання OFDM

Для дослідження спектральної ефективності сигналу OFDM використаємо блоки Spectrum Scope. Спектри сигналу на виході модулятора OFDM та після проходження через канал зв'язку зображені на рисунках 4.15 та 4.16 відповідно. Використана модуляція QPSK, швидкість передачі становить 384 біт/с.

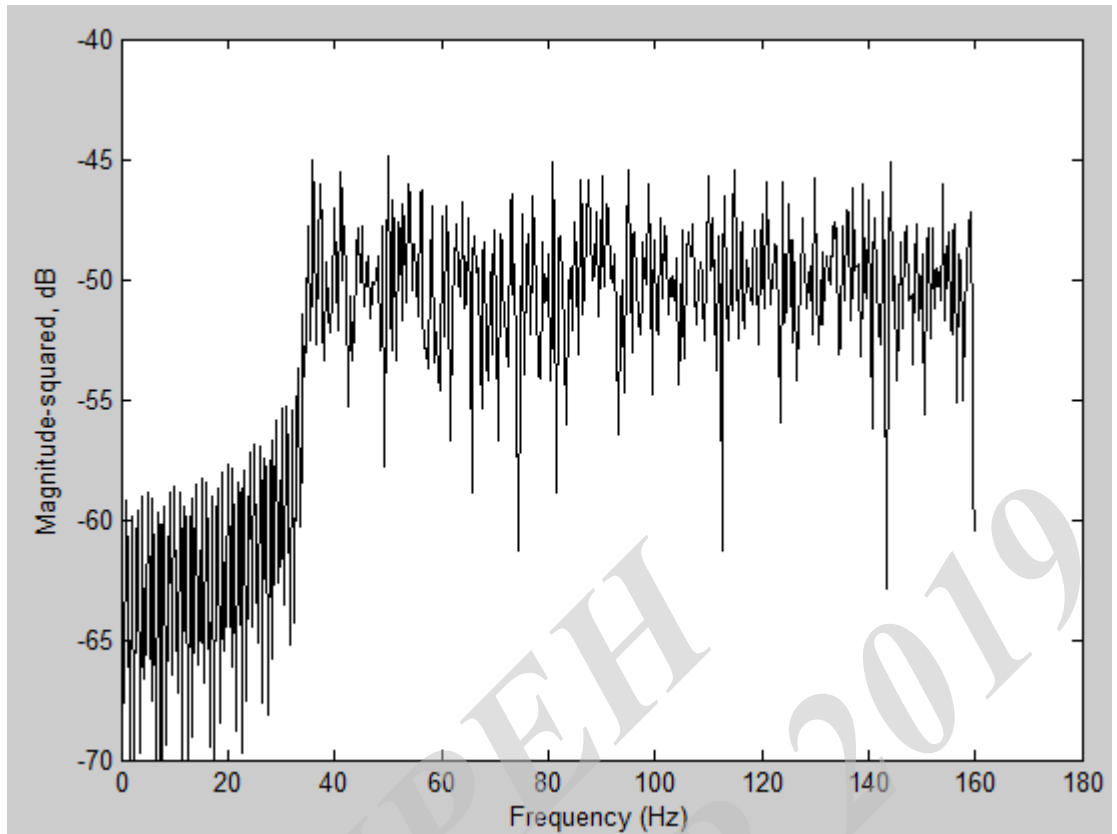


Рисунок 4.15 – Спектр сигналу на виході модулятора OFDM

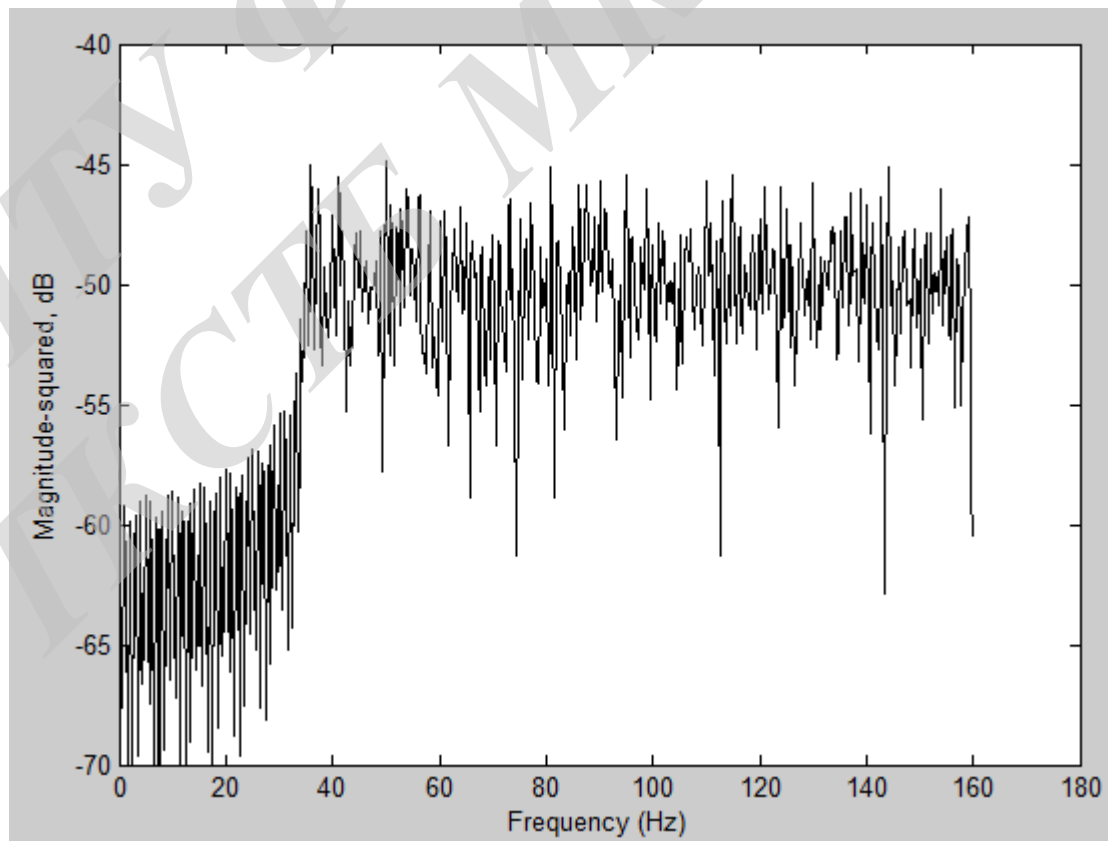


Рисунок 4.16 – Спектр сигналу OFDM після передачі каналом зв'язку

Як видно з рисунків, ширина ефективного спектру OFDM становить:

$$160 - 40 = 120 \text{ Гц.}$$

Визначимо загальну спектральну ефективність системи:

$$E_{\Phi} = \frac{384}{120} = 3,2 \frac{\text{Біт}}{\text{с} \cdot \text{Гц}}.$$

Оскільки була використана модуляція QPSK зі спектральною ефективністю, рівною 2, спектральна ефективність власне OFDM становить:

$$E_{\Phi_{OFDM}} = \frac{3,2}{2} = 1,6 \frac{\text{Біт}}{\text{с} \cdot \text{Гц}}.$$

Аналогічно визначаємо спектральну ефективність при використанні інших видів модуляції [24].

Результати моделювання наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Порівняння основних параметрів досліджених видів модуляції

	BPSK	BPSK OFDM	QPSK	QPSK OFDM	QAM-16	QAM-16 OFDM	QAM-64	QAM-64 OFDM
Відношення сигнал/шум в гаусовому каналі при $p < 10^{-6}$, дБ	6	12	9	18	12	21	12	24
Відношення сигнал/шум в каналі з вузькосмуговою завадою при $p < 10^{-6}$, дБ	24	12	27	18	36	21	39	24
Спектральна ефективність, біт/с/Гц	1	1,6	2	3,2	4	6,4	6	9,6

Висновки

Отже, використання модуляції OFDM дозволяє підвищити спектральну ефективність та підвищити завадостійкість системи зв'язку. Це досягається шляхом передачі сигналу не як єдиного високошвидкісного потужного коливання, а як ряду малопотужних вузькосмугових сигналів, рознесених в частотному спектрі. Така конфігурація вихідного модульованого сигналу дозволяє компенсувати складні умови в каналі, такі як вузькосмугові завади та частотно-селективні затування, пов'язані з багатопроменевим характером поширення радіосигналу. Також низька символна швидкість в межах кожної піднесущої дозволяє використовувати більші захисні інтервали між символами, що дає можливість ефективно боротися з міжсимвольною інтерференцією.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Аналіз комерційного потенціалу аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях, створеної в результаті науково-технічної діяльності. В результаті оцінювання можна буде зробити висновок щодо напрямів (особливостей) організації подальшого її впровадження з врахуванням встановленого рейтингу.

Для проведення технологічного аудиту залучимо 3-х незалежних експертів. У нашому випадку такими експертами будуть керівник магістерської роботи та провідні викладачі випускової та споріднених кафедр.

Результати оцінювання комерційного потенціалу аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях заносимо до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. - Результати оцінювання комерційного успіху аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

Критерії	Експерти		
	Барась С.Т., к.т.н., професор	Осадчук О.В. д.т.н., професор	Гаврілов Д.В. к.т.н., доцент
Бали, виставлені експертами			
1	2	2	2
2	3	1	3
3	2	2	3
4	3	1	2
5	3	2	3
6	2	2	2
7	3	2	3
8	2	2	2
9	3	2	1
10	3	3	3

11	2	2	3
12	3	3	2
Сума балів	31	24	29
Середньоарифметична сума балів, СБ	28		

За даними таблиці 5.1 робимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях. При цьому користуємося рекомендаціями, наведеними в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 50	Високий

Таким чином, робимо висновок, щодо рівня комерційного потенціалу нашої аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях – середній.

5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи

5.2.1 Розрахунок витрат, що стосуються виконавців аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

Основна заробітна плата кожного із розробників (дослідників) Z_0 , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (5.1)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.

У 2019 році величини окладів (разом з встановленими доплатами і надбавками) рекомендується брати в межах (5000...10000) грн. за місяць; T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = (21...23)$ дні; t – число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Зроблені розрахунки зводимо до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Заробітна плата розробників

Посада	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	10000	455	5	2275
Інженер-програміст	7500	341	5	1705
Консультанти	5000	227	5	1135
Всього:				5115

Додаткова заробітна плата Z_d всіх розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховується як (10...12)% від суми основної заробітної плати всіх розробників та робітників, тобто:

$$Z_d = 0,1 \cdot (Z_p + Z_0) = 0,1 \cdot (5115) = 511,5 \text{ грн.} \quad (5.2)$$

Нарахування на заробітну плату N_{zp} розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

де Z_0 – основна заробітна плата розробників, грн.; Z_p – основна заробітна плата робітників, грн.; Z_d – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників,

грн.; β – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

$$\begin{aligned} \text{Нзп} &= 0,22 \cdot (Зр + Зо + Зд) = 0,22 \cdot (5115 + 511,5) = \\ &= 1238 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень А, які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

Дані відрахування розраховують по кожному виду обладнання, приміщенням тощо.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування А в цілому бути розраховані за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot \text{На}}{100} \cdot \frac{T}{12'}$$

де Ц – загальна балансова вартість всього обладнання, комп'ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.; На – річна норма амортизаційних відрахувань. Для нашого випадку можна прийняти, що На = (10...25)%; Т – термін, використання обладнання, приміщень тощо, місяці.

Таблиця 5.4 - Амортизаційні відрахування

Найменування	Ціна, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, м.	Сума амортизації
Комп'ютер	7900	20	1	132
Лабораторний стенд	22000	20	1	367
Всього				499

Витрати на силову електроенергію $В_e$, якщо ця стаття має суттєве значення для виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$В_e = В \cdot П \cdot \Phi \cdot Кп, \text{ грн}$$

V – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2019 р. $V \approx 8,45$ грн./кВт; Π – установлена потужність обладнання, кВт; Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин, K_{Π} – коефіцієнт використання потужності; $K_{\Pi} < 1$.

Потужність обладнання складає – 0,5 кВт.

Кількість годин роботи складає – 700 годин.

Коефіцієнт викор. потужності -0,9.

$V_e=2662$ грн.

Інші витрати V_{in} охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо.

Інші витрати I_v можна прийняти як (100...300)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які були виконували дану роботу, тобто:

$$I_v = 3 \cdot (Z_o + Z_p) = 3 \cdot (5115 + 511,5) = 16880 \text{ грн.} \quad (5.4)$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати на виконання даної частини (розділу, етапу) роботи – V .

$$V = 26906 \text{ грн.}$$

5.2.2 Розрахунок загальних витрат на аналіз спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

Загальна вартість всієї наукової роботи визначається за Взаг формулою:

$$V_{\text{заг}} = \frac{I_v}{\alpha} = \frac{16880}{0,6} = 28133 \text{ грн,} \quad (5.5)$$

де α – частка витрат, які безпосередньо здійснює виконавець даного етапу роботи, у відн. одиницях.

5.2.3 Прогнозування витрат на аналіз спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

Прогнозування загальних витрат ЗВ на аналіз спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{Взаг}{\beta} = \frac{28133}{0,5} = 56267 \text{ грн,} \quad (5.6)$$

де β – коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання даної роботи.

Так, якщо розробка знаходиться: на стадії науково-дослідних робіт, то $\beta \approx 0,1$; на стадії технічного проектування, то $\beta \approx 0,2$; на стадії розробки конструкторської документації, то $\beta \approx 0,3$; на стадії розробки технологій, то $\beta \approx 0,4$; на стадії розробки дослідного зразка, то $\beta \approx 0,5$; на стадії розробки промислового зразка, $\beta \approx 0,7$; на стадії впровадження, то $\beta \approx 0,9$.

5.3 Прогнозування комерційних ефектів аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

З метою прогнозування комерційних ефектів від аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях складемо таблицю вихідних показників, за рахунок яких і відбуватиметься отримання комерційного ефекту.

Таблиця 5.5 – Вихідні дані для прогнозування комерційного ефекту від аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

Рік реалізації аналізу	1	2	3
Кількість од. реалізації, шт.	200	500	700

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_i для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, розраховується за формулою:

$$\Delta \Pi_i = \sum_1^n (\Delta \Pi_0 \cdot N + \Pi_0 \cdot \Delta N)_i \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right) \quad (5.7)$$

де $\Delta \Pi_0$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році. Зазвичай таким показником може бути ціна одиниці нової розробки; N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки; ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки; Π_0 – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки; n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки; λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. У 2018 р. ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт – 0,8333. З 2014 року ставка податку на додану вартість встановлена на рівні 17%, а коефіцієнт – 0,8547; ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати – 0,2...0,3; v – ставка податку на прибуток. У 2018 році – 21%, у 2013 році – 19%, а з 2014 року – 16%.

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_i протягом першого року складе:

$$\Delta \Pi_1 = 17296 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_i протягом другого року складе:

$$\Delta \Pi_2 = 82030 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства протягом третього року складе:

$$\Delta \Pi_3 = 111560 \text{ грн.}$$

5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності

5.4.1 Визначення абсолютної ефективності вкладених інвестицій у аналіз спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

Для цього користуються формулою:

$$E_{абс} = (ПП - PV), \quad (5.8)$$

де ПП – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство (організація) від реалізації результатів наукової розробки, грн.; PV – теперішня вартість інвестицій $PV = ЗВ$, грн.

У свою чергу, приведена вартість всіх чистих прибутків ПП розраховується за формулою:

$$ПП = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t} \quad (5.9)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.; t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДДКР, роки; τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,1; t – період часу (в роках) від моменту отримання чистого прибутку до точки „0”.

$$ПП = 167334 \text{ грн.},$$

$$E_{абс} = 167334 - 56267 = 111067 \text{ грн.}$$

Оскільки $E_{абс} > 0$, то результат від проведення наукових досліджень та їх впровадження принесе прибуток, але це також ще не свідчить про те, що інвестор буде зацікавлений у фінансуванні аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях.

5.4.2 Розрахунок відносної ефективності вкладених коштів в НДДКР аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

Для цього користуються формулою:

$$E_B = \sqrt[3]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1$$

де $E_{абс}$ – абсолютна ефективність вкладених інвестицій, грн.; PV – теперішня вартість інвестицій $PV = 3B$, грн.; $T_{ж}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_B = 0,44$$

Далі, розрахована величина E_B порівнюється з мінімальною (бар'єрною) ставкою дисконтування, що дорівнює:

$$\tau = d + f, \quad (5.10)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2019 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$; f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05 \dots 0,1)$, але може бути і значно більше.

$$E_B = 0,44 \geq \tau = 0,2 + 0,1 = 0,3.$$

Оскільки величина $E_B > \tau_{мін}$, то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

5.4.3 Розрахунок терміну окупності коштів, вкладених в аналіз спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях

Термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій $T_{ок}$ можна розрахувати за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{0,44} = 2,3 \text{ роки.} \quad (5.11)$$

Оскільки $T_{ок} < 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування аналізу спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях є доцільним.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Захист працівників під час трудового процесу від небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які справляють негативний вплив на здоров'я, життя та працездатність людини, гарантування належних умов праці є основними завданнями охорони праці, як складової безпеки життєдіяльності.

У цьому розділі проводиться розгляд небезпечних, шкідливих [1] і уражаючих для людини та навколишнього довкілля факторів, які виникають при проведенні дослідження спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях. Тут висвітлюються, зокрема, технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці, визначення допустимого часу перебування в зоні дії ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження, безпека в надзвичайних ситуаціях.

6.1 Виробнича санітарія та гігієна праці

6.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат

Визначаємо для приміщення для проведення дослідження спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іб.

Згідно із [2] допустимі параметри мікроклімату у робочій зоні для холодного та теплого періодів року наведені в таблиці Л.1 додатку Л.

При опроміненні менше 25% поверхні тіла працівника, допустима інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м^2 .

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК) в повітрі робочої зони і підлягає систематичному контролю для запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в таблиці Л.2 додатку Л.

При використанні ЕОМ джерелом зараження повітря є також іонізація молекул речовин, які містяться в повітрі. Рівні додатних та від'ємних іонів мають відповідати [4] та приведені в таблиці Л.3 додатку Л.

Для забезпечення нормованих параметрів мікроклімату і складу повітря робочої зони передбачено такі заходи:

- 1) в приміщенні повинна бути встановлена система кондиціонування для теплого і опалення для холодного періодів року;
- 2) припливно-витяжна система вентиляції, а при несприятливих погодних умовах кондиціонування.

6.1.2 Виробниче освітлення

З метою забезпечення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях великі вимоги висуваються щодо якісних та кількісних показників освітлення.

З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводиться робота з дослідження спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях, згідно [3] визначаємо, що вони відносяться до IV розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – великий та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд зорових робіт 2.

Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) і мінімальні значення освітленості при штучному освітленні приведені в таблиці Л.4 додатку Л.

Так як приміщення знаходиться у м. Вінниця (2-га група забезпеченості природним світлом), а світлові пройми орієнтовані за азимутом 315° , то для таких умов КЕО розраховується за формулою [3, 4]

$$e_N = e_n m_N [\%], \quad (6.1)$$

де e_n – табличне значення КЕО для бокового освітлення, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

За відомими значеннями отримаємо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N,6} = 1,5 \cdot 0,9 = 1,4 (\%);$$

$$e_{N,c} = 0,9 \cdot 0,9 = 0,8 (\%).$$

З метою встановлення нормованих значень показників освітлення запропоновано:

1) при недостатньому природному освітлені в світлий час доби доповнення штучним за допомогою люмінесцентних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;

2) застосування штучного освітлення у темний час доби.

6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що під час експлуатації пристроїв крім усього іншого обладнання застосовується устаткування, робота якого генерує шум та вібрацію, необхідно передбачити захист від шуму та вібрації.

Встановлено, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях може містити робочі місця із шумом та вібрацією, що створюється рухомими елементами ЕОМ.

З метою попередження травмування працюючих від дії шуму він підлягає нормуванню. Основним документом з питань промислового шуму, що діє на території нашої країни, є [5], у відповідності з яким допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні шуму на робочих місцях у промислових приміщеннях не повинні бути більшими ніж значення, що приведені у таблиці Л.5 додатку Л. Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці Л.6 додатку Л для локальної вібрації.

Для поліпшення віброакустичного клімату у приміщенні запропоновано:

1) оздоблення стін спеціальними перфорованими плитами, панелями з метою шумопоглинання;

2) передбачено використовувати в приміщенні штори із щільної тканини.

6.1.4 Виробничі випромінювання

Аналіз умов праці показав, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження може містити електромагнітні випромінювання.

Гранично допустимі рівні електромагнітних полів наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Гранично допустимі значення електромагнітних полів на робочих місцях згідно [14]

Параметри та одиниці вимірювання	Граничні значення в діапазонах частот					
	1-10 кГц	10-60 кГц	0,06-3 МГц	3-30 МГц	30-50 МГц	50-300 МГц
$E_{Гд}$, В/м	1000	700	500	300	80	
$E_{H_{Гд}}$, $(В/м)^2 \cdot год$	120000	40000	20000	7000	800	
$H_{Гд}$, А/м	75	57	50	–	3,0	–
$E_{H_{H_{Гд}}}$, $(А/м)^2 \cdot год$	675	390	200	–	0,72	–

З метою забезпечення захисту і досягнення нормованих рівнів випромінювань необхідно застосовувати екранні фільтри та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат.

Виконати розрахунок допустимого часу перебування в зоні дії електромагнітного випромінювання, якщо фактична напруженість електричного поля $E_{\phi} = 38$ В/м, а фактична напруженість магнітного поля $H_{\phi} = 12$ А/м.

Допустимий час перебування будемо визначати як найменший із допустимих часів перебування для джерел електричної та магнітної складових ЕМВ, відповідно

$$T = \min\{T_E, T_H\} \text{ [год]}, \quad (6.2)$$

де T_E – допустимий час в зоні дії джерела електричного поля, год;

T_H – допустимий час в зоні дії джерела магнітного поля, год.

Допустимий час перебування в зоні дії електричної та магнітної складових електромагнітного випромінювання визначається за формулою

$$T_E = \frac{EH_{Ez\delta}}{E_\phi^2} \text{ [год]}, \quad (6.3)$$

$$T_H = \frac{EH_{Hz\delta}}{H_\phi^2} \text{ [год]}, \quad (6.4)$$

де $EH_{Ez\delta}$ – гранично допустиме енергетичне навантаження на організм протягом робочого дня, $(\text{В/м})^2 \cdot \text{год}$;

E_ϕ – фактична напруженість електричного поля, В/м;

$EH_{Hz\delta}$ – гранично допустиме енергетичне навантаження на організм протягом робочого дня, $(\text{А/м})^2 \cdot \text{год}$;

H_ϕ – фактична напруженість магнітного поля, А/м.

Для діапазону частот 0,06-3 МГц вибираємо $EH_{Ez\delta} = 20000 (\text{В/м})^2 \cdot \text{год}$;

$EH_{Hz\delta} = 200 (\text{А/м})^2 \cdot \text{год}$.

Після підстановки відомих значень у формули (6.3, 6.4, 6.2), одержимо:

$$T_E = \frac{20000}{38^2} = 13,85 \text{ (год)};$$

$$T_H = \frac{200}{12^2} = 1,38889 \text{ (год)};$$

$$T = \min\{13,85; 1,38889\} = 1,38889 \text{ (год)}.$$

Таким чином, допустимий час перебування працівника в зоні дії електромагнітного випромінювання не повинен перевищувати 1,38889 год.

6.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження

На теперішньому етапі розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень широкого використання на робочому місці набули ЕОМ. Наявність великої кількості прикладних програм сприяє тому, що ЕОМ є основним робочим інструментом інженера в галузі радіотехніки.

6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Розташування робочих місць, оснащених ЕОМ здійснюється в приміщеннях з однобічним розташуванням вікон, що неодмінно повинні бути оснащені сонцезахисним засобами: шторами та жалюзями [7].

При розміщенні робочих місць у приміщеннях з джерелами шкідливих та небезпечних виробничих факторів, вони зобов'язані розташовуватися в повністю відокремлених кабінетах з природним освітленням та організованою вентиляцією. Площа одного робочого місця повинна складати не менше $6,0 \text{ м}^2$, об'єм – не менше як 20 м^3 , а висота – не менше $3,2 \text{ м}$ [8].

Поверхня підлоги повинна бути гладкою, не слизькою, без вибоїн, зручною для вологого прибирання, мати антистатичні властивості. Не дозволяється застосовувати для оздоблення інтер'єру полімери, що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини.

6.2.2 Електробезпека

Основними причинами ураження електричним струмом у даному приміщенні можуть бути: робота під напругою при ремонтних роботах, несправність устаткування, випадкове торкання до струмоведучих частин або металевих частин, що опинилися під напругою. У відповідності до [9] це приміщення відноситься до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом через наявність значної (більше 75 %) вологості. Тому безпека експлуатації електрообладнання повинна забезпечуватись комплексом заходів, які

включають застосування ізоляції струмоведучих елементів, захисних блокувань, захисного заземлення тощо [10].

6.2.3 Пожежна безпека

Відповідно до [11] приміщення, де проводиться робота з дослідження спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях, відноситься до категорії пожежної небезпеки Б. Дане приміщення відноситься до 2-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів.

Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій розглядуваного приміщення наведені в таблиці Х.7. В таблиці Х.8 приведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Встановлюємо, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження, має бути обладнане двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [12].

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Забезпечення стійкості роботи телекомунікаційних систем і мереж у НС базується на комплексі організаційних, інженерно-технічних заходів і засобів, спрямованих на збереження працездатності в умовах дії загрозливих чинників. Для цього необхідно: прогнозувати та оцінити можливі наслідки; заздалегідь спланувати заходи із запобігання та зменшення вірогідності виникнення НС і скорочення масштабів прояву результатів НС; організація робіт в умовах НС та ліквідація її наслідків.

Розроблювану широкосмугову телекомунікаційну мережу призначено для обробки і передачі інформації також під час надзвичайних ситуацій, у воєнний та

надзвичайний стан. Також, такі мережі являють собою сукупність організаційних і технічних засобів для обробки інформації з метою забезпечення інформаційних потреб користувачів.

Одним з загрозливих чинників для широкопasmової телекомунікаційної мережі є електромагнітний імпульс (ЕМІ). Уражаюча дія ЕМІ в приземній області й на землі пов'язана з акумулюванням його енергії довгими металевими предметами, рамними і каркасними конструкціями, антенами, лініями електропередачі та зв'язку, в них виникають сильні наведені струми, які руйнують підключене електронне та інше чутливе устаткування. У районі дії ЕМІ безпосередній контакт людини зі струмопровідними предметами теж є небезпечний.

Безвідмовність широкопasmової телекомунікаційної мережі зв'язку – це властивість зберігати працездатність при її використанні в процесі передачі даних. Поряд з цим поява відмов широкопasmової телекомунікаційної мережі пов'язана з тим, що в деякі моменти часу роботи може виникнути відмова деяких елементів мережі обмеженого доступу в наслідок порушення дієздатності апаратної частини мережі зв'язку. Дані порушення можуть виникнути при нестійкому живленні, що виникає в наслідок дії електромагнітного імпульсу, іонізуючого випромінювання та інших факторів надзвичайних ситуацій.

Як наслідок, широкопasmова телекомунікаційна мережа може бути використана у якості системи збору інформації для швидкого прийняття рішень у НС, тому необхідно дослідити вплив загрозливих чинників на роботу та розробити заходи, які сприятимуть підвищенню стійкості її роботи.

6.3.1 Дослідження стійкості роботи широкопasmової телекомунікаційної мережі в умовах дії іонізуючих випромінювань

Мережа передачі даних поєднує програмну та апаратну частину засобів зв'язку, тому загрозливі чинники є досить різноманітними. Загрозливі чинники,

що впливають на безпеку роботи широкопasmової телекомунікаційної мережі здебільшого можна віднести до чинників техногенного та воєнного характеру. Визначаємо граничні значення дози опромінення $D_{\text{грі}}$, для елементної бази елементів мережі, при яких виникають незворотні зміни. Отримані дані заносимо в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 – Граничні значення експозиційних доз приймача

Блоки широкопasmової телекомунікаційної мережі	Елементи блоків	$D_{\text{грі}}, \text{P}$	$D_{\text{гр}}, \text{P}$
Блок перетворення сигналів	Мікросхема LM317	10^5	10^4
	Діод 1N4004	10^4	
	Резистор С2-23	10^7	
Блок формування сигналу і програмування	Конденсатор К50-6	10^4	
	Діод 1N4148	10^4	
	Резистор С2-33	10^7	
	Транзистор 2SA1271	10^4	
Блок обробки сигналу	Резистор С2-29В	10^8	
	Транзистор 2SA1271	10^4	

Проаналізувавши дані таблиці 5.5, визначили, що самим уразливим елементом блоків широкопasmової телекомунікаційної мережі з мінімальною дозою $D_{\text{грі}} = 10^4 \text{P}$ є такі як транзистори та діоди. Визначаємо можливу дозу опромінення за формулою:

$$D_{\text{м}} = \frac{2 \cdot P_1 (\sqrt{t_{\text{k}}} - \sqrt{t_{\text{п}}})}{K_{\text{осл}}}, \quad (6.5)$$

де P_1 – максимальне значення рівня радіації (5,47 P/год);

t_{k} – час кінця опромінення ($t_{\text{k}} = 43800$ год);

$t_{\text{п}}$ – час початку опромінення (1 год).

$K_{\text{осл}}$ – коефіцієнт послаблення радіації ($K_{\text{осл}}=1$).

$$D_M = \frac{2 \cdot 5,47 \cdot (\sqrt{40000} - \sqrt{1})}{1} = 2177,06 \text{ (Р)}.$$

Оскільки $D_{\text{грі}} > D_M$, то дана мережа стійка до дії радіації. Визначимо допустимий час роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі в заданих умовах за формулою:

$$t_{\text{д}} = \frac{D_{\text{гр}} \cdot K_{\text{осл}} + 2 \cdot P_1 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot P_1}, \quad (6.6)$$

$$t_{\text{д}} = \left(\frac{10^4 + 2 \cdot 5,47 \sqrt{1}}{2 \cdot 5,47} \right)^2 = 837365 \text{ (год)}.$$

Отже, можлива доза опромінення елементної бази $D_M=2177,06$ Р, а допустима - 10^4 Р. Отже, телекомунікаційна мережа буде стійкою в умовах дії іонізуючого випромінювання. Допустимий час роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі в заданих умовах становить 837365 год., при рівні радіації 5,47 Р/год.

6.3.2 Дослідження стійкості роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу

Початковими даними є:

- 1) Вертикальна складова напруженості електричного поля: $E_{\text{в}}=12$ кВ/м
- 2) $U_{\text{жі}}=48$ В

1. Визначимо горизонтальну складову напруженості електричного поля $E_{\text{г}}=10^{-3} \cdot E_{\text{в}}=12 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}=12$ В/м

2. Телекомунікаційна мережа розподіляється на окремі функціональні дільниці. На кожній дільниці визначається максимальна довжина струмопровідних частин. Максимальна довжина струмопровідної частини:

$$1) I_B = 0,6(\text{м}); \quad I_G = 1,3(\text{м});$$

$$2) I_B = 0,6(\text{м}); \quad I_G = 0,9(\text{м});$$

$$3) I_B = 0,8(\text{м}); \quad I_G = 0,7(\text{м}).$$

3. Визначимо напругу наведення у вертикальній (горизонтальній) струмопровідній частині:

$$1) U_B = E_G I_B = 12 \cdot 0,6 = 7,2 (В); \quad U_G = E_B I_G = 12 \cdot 10^3 \cdot 1,3 = 15,6 \cdot 10^3 (В);$$

$$2) U_B = E_G I_B = 12 \cdot 0,6 = 7,2 (В); \quad U_G = E_B I_G = 12 \cdot 10^3 \cdot 0,9 = 10,8 \cdot 10^3 (В);$$

$$3) U_B = E_G I_B = 12 \cdot 0,8 = 9,6 (В); \quad U_G = E_B I_G = 12 \cdot 10^3 \cdot 0,7 = 8,4 \cdot 10^3 (В).$$

4. Визначимо допустиме коливання напруги живлення:

$$U_d = U_{ж} + (U_{ж}/100) \cdot 5 = 48 + 2,4 = 50,4 (В).$$

5. Визначимо коефіцієнти безпеки:

$$1) K_{бв} = 20 \cdot \lg(U_d/U_B) = 20 \cdot \lg(50,4 / 7,2) = 16,9 (\text{дБ});$$

$$K_{бг} = 20 \cdot \lg(U_d/U_G) = 20 \cdot \lg(50,4 / 15,6 \cdot 10^3) = -49,8 (\text{дБ});$$

$$2) K_{бв} = 20 \cdot \lg(U_d/U_B) = 20 \cdot \lg(50,4 / 7,2) = 16,9 (\text{дБ});$$

$$K_{бг} = 20 \cdot \lg(U_d/U_G) = 20 \cdot \lg(50,4 / 10,8 \cdot 10^3) = -46,6 (\text{дБ});$$

$$3) K_{бв} = 20 \cdot \lg(U_d/U_B) = 20 \cdot \lg(50,4 / 9,6) = 14,4 (\text{дБ});$$

$$K_{бг} = 20 \cdot \lg(U_d/U_G) = 20 \cdot \lg(50,4 / 8,4 \cdot 10^3) = -44,4 (\text{дБ}).$$

Зведемо усе до таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Коефіцієнти безпеки блоків широкосмугової телекомунікаційної мережі.

Елементи мережі	$I_B, \text{м}$	$I_G, \text{м}$	$U_B, \text{В}$	$U_G, \text{В}$	$K_{бв}, \text{дБ}$	$K_{бг}, \text{дБ}$	Результат дії
Блок перетворення сигналів	0,6	1,3	7,2	15600	16,9	-49,8	нестійкий
Блок формування сигналу	0,6	0,9	7,2	10800	16,9	-46,6	нестійкий
Блок обробки сигналу	0,8	0,7	9,6	8400	14,4	-44,4	нестійкий

6. Звідси можна побачити, що апаратура буде нестійка в роботі, тому що і $K_{бв}$ і $K_{бг}$ менше 40 дБ.

Заходи по підвищенню стійкості: екранування апаратури стальним,, свинцевим або алюмінієвим екраном.

6.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі в умовах надзвичайних ситуацій

Головне завдання захисних пристроїв від ЕМП - виключити доступ наведених струмів до чутливих вузлів і елементів обладнання. У кожному конкретному випадку повинні бути знайдені найбільш ефективні і економічно доцільні методи захисту електронної апаратури і великих розгалужених телекомунікаційних мереж. Розглянемо основні методи захисту:

1. Металеві екрани відбивають електромагнітні хвилі і гасять високочастотну енергію. Через систему заземлення струм, наведений ЕМП, стікає в землю, не завдаючи шкоди електронної апаратури, що знаходиться усередині металевих шаф або коробів.

2. Сполучні кабелі для захисту прокладають в земляних траншеях під цементною або бетонною підлогою будівель або укладають в сталеві коробки, які заземляють. Надійність підвищується, якщо кабель розгалужується і підводиться до декільком шаф з розділовими трансформаторами. У цьому випадку ізольовані ділянки широкосмугової телекомунікаційної мережі володіють великим опором ізоляції і малої ємністю проводів відносно землі. Також доцільно застосовувати фільтри від високочастотних перешкод.

3. Основні функції захисного розрядника - розімкнути лінію або відвести енергію для запобігання пошкодження в обладнанні. Для захисту апаратури можуть бути рекомендовані плавкі запобіжники і захисні вхідні пристосування, які являють собою різні релейні або електронні пристрої, що реагують на перевищення струму або напруги в ланцюзі.

4. Грозазахисні пристрої.

Забезпечують «стікання» великого розряду в землю без пошкодження ізоляційних елементів ліній.

5. Захист периферійних пристроїв.

Зазначені способи і засоби захисту повинні впроваджуватися в усі види електротехнічної та радіоелектронної апаратури з урахуванням характеру вражаючої дії електромагнітного імпульсу для забезпечення надійності роботи широкопasmової телекомунікаційної мережі в умовах НС мирного і воєнного часу.

Розрахунок екранів для захисту широкопasmової телекомунікаційної мережі від дії електромагнітного імпульсу. Перехідне гасіння енергії електричного поля екраном для сталі:

$$A=40+ K_{\text{бв}} \quad (6.7)$$

Для блоку перетворення сигналу:

$$A_1=40+49,8=99,8 \text{ (дБ)};$$

Для блоку формування сигналу:

$$A_2=40+46,6=96,6 \text{ (дБ)};$$

Для блоку обробки сигналу:

$$A_3=40+44,4=84,4 \text{ (дБ)}.$$

Розрахуємо товщину захисних екранів. Для цього візьмемо найслабкішу ланку до дії ЕМП – блок перетворення сигналу:

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}} = \frac{99,8}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,156 \text{ (см)} \quad (6.8)$$

де f – найбільш характерна частота ($f=15$ кГц),

Отже, при екрануванні всіх елементів мережі з використанням екрану товщиною 0,156 см телекомунікаційна мережа буде стійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу.

Підвищення стійкості роботи широкопasmової телекомунікаційної мережі можна досягти шляхом посилення найбільш слабких елементів і ділянок мережі, а також завчасним проведенням комплексу інженерно-технічних, технологічних та

організаційних заходів, які спрямовані на максимальне зниження дії вражаючих факторів.

Висновки

В результаті виконання даного розділу було опрацьовано такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення допустимого часу перебування в зоні дії ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях, безпека в надзвичайних ситуаціях.

Також в даному розділі було досліджено стійкість роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі в умовах дії загрозливих чинників НС.

В умовах дії іонізуючого випромінювання мережа буде працювати стійко, так як граничне значення експозиційної дози випромінювання $D_{гр} = 100000 \text{ Р}$ значно більше ніж можливе значення дози $D_m = 2177,06 \text{ Р}$. Отже підвищувати стійкість роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі до впливу іонізуючого випромінювання непотрібно.

Вплив електромагнітного імпульсу на широкосмугову телекомунікаційну мережу призводить до порушення стійкості її роботи. Застосування екранування підвищило стійкість роботи широкосмугової телекомунікаційної мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі показано, що спектральна ефективність модуляції є інтегральною характеристикою систем широкосмугового доступу, яка дає можливість оцінити дієвість всієї сукупності заходів щодо повноцінності надання мультисервісних послуг – даних, відео, голосу. Ця характеристика безпосередньо пов'язана зі швидкістю передачі інформації і чим вища швидкість, що припадає на одиницю смуги пропускання каналу, тим вища спектральна ефективність.

Проведений аналіз показав, що зазвичай спектральна ефективність вступає у протиріччя з завадостійкістю – використання більшої кількості позицій в модульованому сигналі (символі) робить його більш уразливим до дії різноманітних завад і, навпаки, низькопозиційні види модуляції характеризуються більшою завадостійкістю. Найбільш пристосована до цих протиріч DMТ-модуляція, алгоритмом якої передбачений попередній аналіз стану каналу передачі і на основі цього оптимальний вибір типу модуляції. Необхідно також відзначити OFDM-модуляцію, яка дає суттєве підвищення спектральної ефективності і одночасно забезпечує стійку роботу в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль.

Відомо, що у загальному ширина смуги пропускання каналу визначає так звану модуляційну або символну швидкість передачі. Тому чисельно ширина смуги і символна швидкість практично однакові. Для однопозиційних видів модуляції рівними також є символна швидкість і інформаційна швидкість, яка визначається в біт/с.

Огляд технологій широкосмугового доступу виконаний у даній роботі з акцентом на аналіз досяжної у кожній з них спектральної ефективності. Чим вище значення цього показника, тим вища швидкість передачі може бути забезпечена. Очевидно, це важливо для каналів передачі, які мають обмежені можливості щодо ширини смуги пропускання. Саме тому еволюція спектральної ефективності пов'язується з застосуванням багатопозиційних методів модуляції. У той же час

ззначається, що ефективні модуляційні технології стикаються з проблемами завадостійкості інформаційних сигналів та необхідністю боротьби з міжканальною інтерференцією, яка безпосередньо залежить від ортогональності каналних сигналів. Отже, на спектральну ефективність мають вплив багатопозиційні види модуляції, які використовуються або одноосібно, або в сукупності з іншими технологіями.

Введення додаткових каналів передачі, задеклароване технологією МІМО, не тільки збільшує спектральну ефективність систем радіодоступу, але і робить це з використанням раніше негативного явища багатопроменевого поширення сигналів. Отже, вибір найбільш ефективного способу модуляції при розробці систем широкосмугового доступу продовжує залишатися одним з найважливіших питань.

У роботі виконано також аналіз комерційного потенціалу досліджень спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях та прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи. Зроблено також розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності.

В результаті виконання даної роботи було опрацьовано такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення допустимого часу перебування в зоні дії ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Столингс В. Беспроводные линии связи и сети / Столингс В. –2003. – 634 с.
2. Волков Л. Н. Системы цифровой радиосвязи. Базовые методы и характеристики / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинок. – Москва: Еко-Тренд, 2005. – 392с.
3. Карташевский В.Г. Сети подвижной связи / Карташевский В.Г., Семенов С.Н., Фирстова Т.В. – М.: ЭКОТRENДЗ, 2001. – 296 с.
4. Бортник Г. Г. Мережі абонентського доступу: Навчальний посібник. / Бортник Г. Г., Кичак В. М., Стальченко О. В., Яблонський В. Ф. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 201 с.
5. Крук Б.І. Телекомунікаційні системи та мережі / Крук Б.І., Попантонопуло В.М., Шувалов В.П. — К. : Наша культура і наука, 2009. —647 с.
6. Тяпичев Г.А. Спутники и цифровая радиосвязь / Г.А. Тяпичев. – Москва – 2001. – 250 с.
7. Денисьева О. М. Цифровые системы передачи для абонентских линий / Денисьева О. М. – Вестник связи №9. – 1995. – С. 37-38.
8. Васин В.А. Радиосистемы передачи информации / В.А. Васин, В.В. Калмыков. – К : Телеком, 2005. – 472с.
9. Прагер Е. І. Цифровая техника в связи / Е. І. Прагер, Б. О. Шимек, В.П. Дмитриев. – Прага : Радио і зв'язок, 1999. – 280 с.
10. Скляр Б. Цифровая связь / Б. Скляр. – К: Видавничий дім Вільямс, 2003—1104 с.
11. Назаров М.В. Методы цифровой обработки и передачи речевых сигналов / М.В. Назаров, Ю.Н. Прохоров. – Москва: 2001. – 392 с.
12. Гроднев И.И. Линии связи : Учебник для вузов . / И.И. Гроднев, С.М. Верник. – М. : Радио и связь, 1988. – 544 с.

13. Давыдов Г.Б. Сети элетросвязи. / Г.Б. Давыдов. – М. : Связь, 1977. – 180 с.
14. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов / Зюко А.Г. (и др.) –М. : Радио и связь, 1986.- 304 с.
15. Парамонов А. Цифровая обработка при когерентной демодуляции сигналов / Парамонов А., Куропаткин О. – Chip News, 2000, № 8, с.2.
16. Кириллов В. И. Многоканальные системы передачи: Учебник для вузов . / Кириллов В. И – М. : Новое знание, 2002. – 751 с.
17. Бортник Г. Г., Методи та засоби оцінювання параметрів абонентських ліній зв'язку. / Бортник Г. Г., Кичак В. М., Яблонський В. Ф. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 139 с.
18. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський [та ін.]. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
19. Прокис Дж. Цифровая связь. / Прокис Дж. – К. : Радио и связь, 2000. – 260 с.
20. Пролетарский А. В. Беспроводные сети Wi-Fi / Пролетарский А. В., Баскаков И. В., Чирков Д. Н. — К. : БИНОМ, 2007. — 178 с.
21. В. С. Сюваткин WiMAX — технология беспроводной связи: теоретические основы, стандарты, применение / В. С. Сюваткин В.И., Есипенко И. П. Ковалев — К. : Техносвіт , 2005. — 368 с.
22. Ирвин Д. Передача данных в сетях. Инженерный подход / Ирвин Д. — Петербург : 2003. — 448 с.
23. Соколов Н. А. Сети абонентского доступа. / Соколов Н. А. – М. : „Энтер”, 2004. – 254 с.
24. Кравчук С. В. Методи підвищення пропускнуої здатності телекомунікаційних систем широкосмугового радіодоступу. – Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, Київ, КПІ.
25. Методичні рекомендації з комерціалізації розробок, створених в результаті науково-технічної діяльності – К.: Наказ Державного

комітету України з питань науки, інновацій та інформатики (Лист № 1/06-4-97 від 13.09.2010 р.).

26. 26. Козловський В. О. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. – Вінниця: ВНТУ, 2012.
27. 27. Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 75 с.
28. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
29. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
30. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
31. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
32. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
33. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
34. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
35. Методичні вказівки до опрацювання розділу "Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях" в дипломних проектах і роботах студентів спеціальностей, що пов'язані з функціональною електронікою, автоматизацією та управлінням / Уклад. О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 64 с.
36. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
37. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.

38. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
39. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
40. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
41. ДСанПіН 3.3.6-096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

ДОДАТКИ

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедри ТКСТБ,
канд. техн. наук, професор
Г.Г.Бортник
“ ___ ” _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ В
ШИРОКОСМУГОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

08-34.МКР.008.00.000 ТЗ

Керівник роботи
к.т.н., проф. кафедри ТКСТБ
Барась С.Т.

Виконавець: ст. гр. ТТК-18м
Подольський О.С.

Вінниця-2019

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “02” 10 2019 року № 254 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 02.09.2019 р.

Дата закінчення: 12.12.2019 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка рекомендацій щодо використання багатопозиційних видів модуляції для підвищення спектральної ефективності каналів передачі інформації в умовах дії завад.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- розробка технічного завдання;
- огляд технологій широкосмугового доступу;
- аналіз залежності спектральної ефективності від виду модуляції;
- аналіз завадозахищеності багатопозиційних видів модуляції;
- дослідження впливу багатопроменевого поширення хвиль на спектральну ефективність каналів передачі;
- комп'ютерне моделювання каналів з високою спектральною ефективністю.

Об'єкт дослідження є системи широкосмугового доступу.

Предмет дослідження є спектральна ефективність каналів передачі в системах широкосмугового доступу.

Основними завданнями роботи є:

- аналіз методів модуляції сигналів, які використовуються в системах широкосмугового доступу;
- оцінка можливості використання багатопозиційних видів модуляції в умовах дії завад;

- аналіз спектральної ефективності систем при наявності багатопроменевого поширення хвиль;
- аналіз економічної ефективності проведеної розробки;
- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

В ході виконання роботи повинні бути встановлені залежності між ступенем позиційності модуляції і завадостійкістю системи та розроблені рекомендації стосовно підвищення спектральної ефективності в реальній заводській обстановці.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах бакалаврської дипломної роботи “Тракт передачі телекомунікаційних сигналів з модуляцією QAM-N”, яка виконувалась у ВНТУ у 2017/2018 н.р. Під час підготовки магістерської кваліфікаційної роботи будуть використані матеріали цієї БДР.

Список використаних джерел розробки:

- 3.1 Столингс В. Беспроводные линии связи и сети / Столингс В. –2003. – 634 с.
- 3.2 Волков Л. Н. Системы цифровой радиосвязи. Базовые методы и характеристики / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шиноков. – Москва: Еко-Тренд, 2005. – 392с.
- 3.3 Карташевский В.Г. Сети подвижной связи / Карташевский В.Г., Семенов С.Н., Фирстова Т.В. – М. : ЭКОТRENДЗ, 2001. – 296 с.
- 3.4 Бортник Г. Г. Мережі абонентського доступу: Навчальний посібник. / Бортник Г. Г., Кичак В. М., Стальченко О. В., Яблонський В. Ф. –УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 201 с.
- 3.5 Денисьева О. М. Цифровые системы передачи для абонентских линий / Денисьева О. М. – Вестник связи №9. – 1995. – С. 37-38.
- 3.6 Положення про кваліфікаційну роботу у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. О. Н. Романюк, Р. Р. Обертюх, Т. О. Савчук, Л. П. Громова – Вінниця : ВНТУ, 2015 – 27 с.

3.7 Кухарчук В.В., Ігнатенко О.Г., Обертюх Р.Р. Методичні вказівки до оформлення дипломних проектів (робіт) для студентів всіх спеціальностей.- В.: ВДТУ, 2002.

3.8 Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – В.: ВДТУ, 2003.

3.9 ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація, звіти у сфері науки і техніки.- К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

3.10 Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. Под ред. Э.Т.Романьчевой.- М: Радио и связь, 1989.

3.11 Бортник Г.Г., Стальченко О.В. Методичні вказівки до дипломного проектування для студентів спеціальності «Телекомунікаційні системи та мережі» усіх форм навчання.- Вінниця:ВНТУ, 2009.- 54 с.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра телекомунікаційних систем і телебачення, студент групи ТТК-18м Подольський О.С.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження методів і засобів підвищення спектральної ефективності в широкосмугових телекомунікаціях.

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

- швидкості передачі інформації $V=128$ кбіт/с – 54 Мбіт/с;
- ширина смуги пропускання каналу 1 – 20 МГц;
- види модуляції: BPSK; QPSK; QAM-8; QAM-16; QAM-32; QAM-64; QAM-128; QAM-256; QAM-512; DMT; OFDM;
- співвідношення $c/\text{ш}=5, 10, 15, 20$ дБ;
- діапазони частот 30 кГц - 2,2 МГц, 50-750 МГц; 2,4 ГГц; 5 ГГц; 9-11 ГГц.

6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		початок	закінчення		
1.	Розробка технічного завдання	5.09.2019р.	12.09.2019 р.	Розроблене ТЗ	Додаток А
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	13.09.2019р.	20.09.2019 р.	Проведений аналіз	Вступ. Розділ 1
3.	Огляд технологій широкосмугового доступу	21.09.2019р.	12.10.2019 р.	Проведений аналіз	Розділ 1
4.	Дослідження параметрів і характеристик модуляцій	13.10.2019р	20.10.2019 р.	Структурна схема	Розділ 2
5.	Розробка сучасних методів та засобів підвищення спектральної ефективності	21.10.2019р.	03.11.2019 р.	Характеристики і параметри	Розділ 3
6.	Моделювання каналу передачі	04.11.2019р.	10.11.2019р.	Результати моделювання	Розділ 4
7.	Аналіз економічної ефективності розробки	11.11.2019р.	14.11.2019 р.	Проведений аналіз	Розділ 5
8.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	15.11.2019р.	20.11.2019 р.	Проведений аналіз	Розділ 6
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	21.11. 2019р.	25.11.2019 р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
10.	Нормоконтроль МКР	26.11.2019р.	30.11.2019 р.	Позитивний захист	Відзив. рецензія
11.	Попередній захист, рецензування МКР	30.11.2019р.	06.12.2019 р.	Позитивні відзиви	
12.	Захист МКР ЕК	12.12.2019 р.		Захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- рекомендації щодо підвищення спектральної ефективності в реальній заводській обстановці;
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі телекомунікацій, зокрема, у навчальному процесі.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення спектральної ефективності систем широкопasmового доступу.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- нові пристрої модуляції для підвищення спектральної ефективності;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ;

- рекомендації щодо підвищення спектральної ефективності в реальній заводській обстановці.

11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

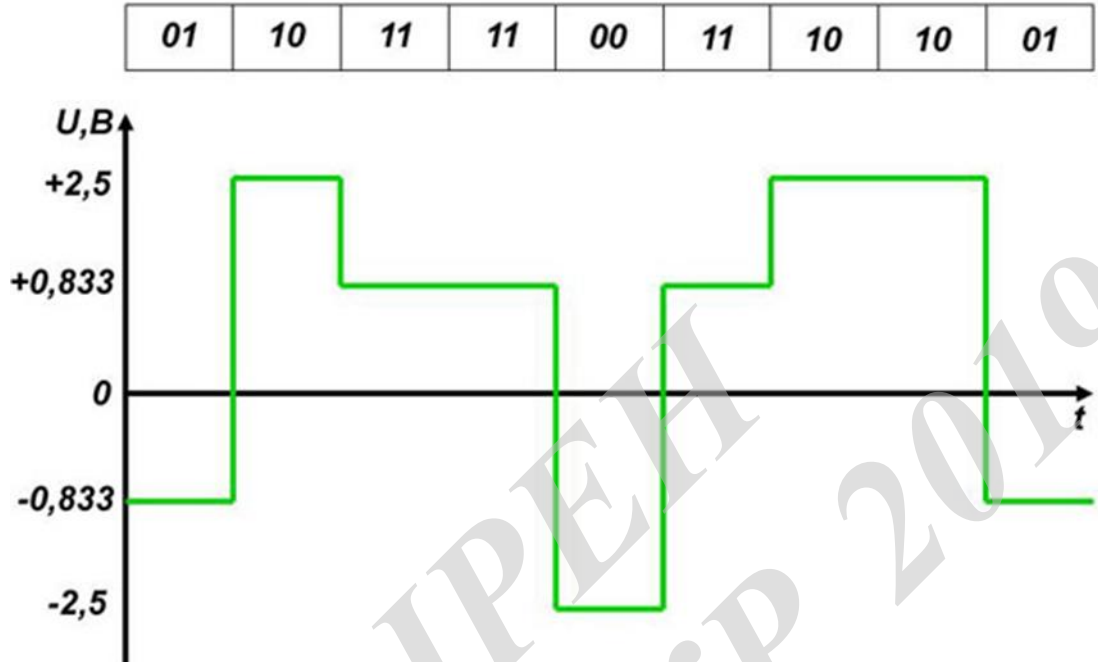
У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток Б
(обов'язковий)

Осцилограма потенційного коду 2B1Q

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

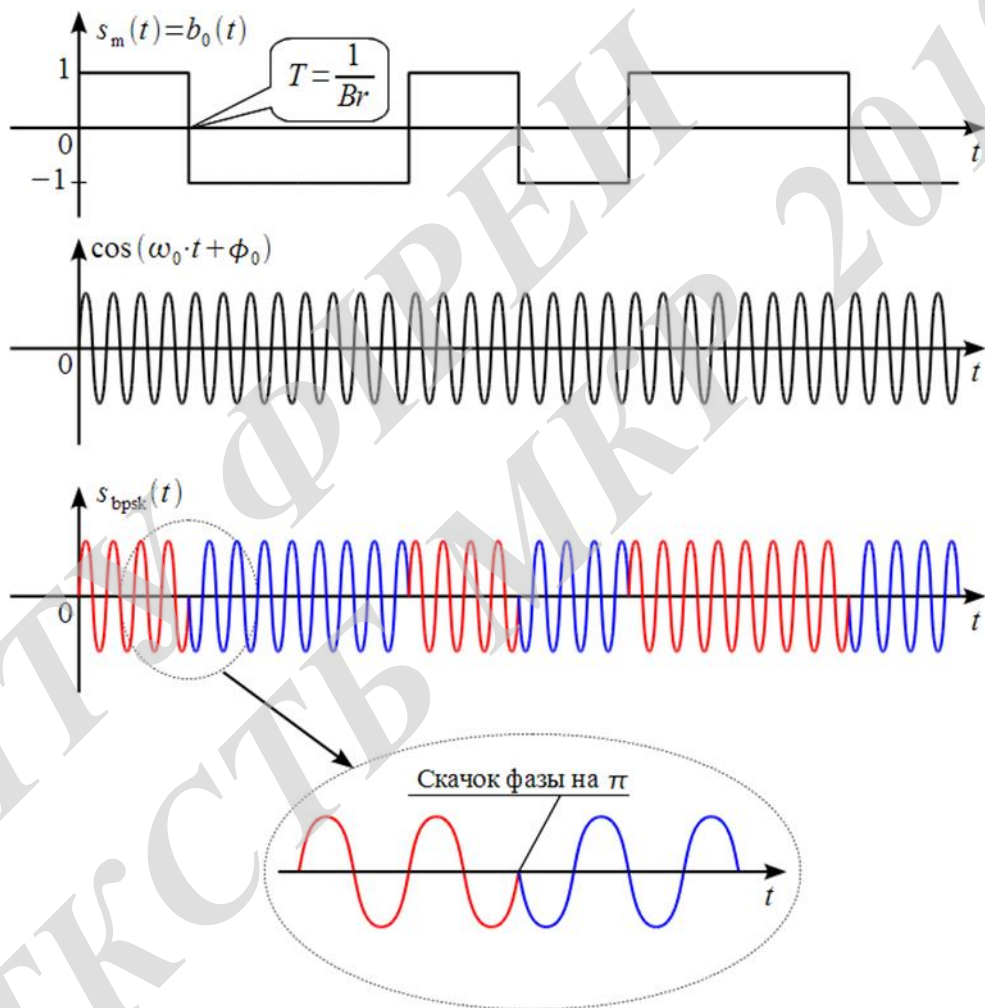
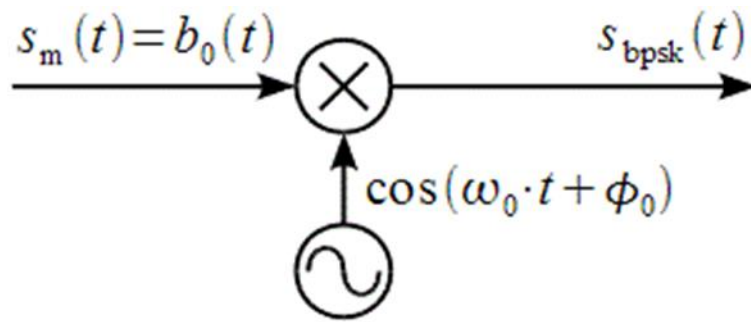


Осцилограма потенційного коду 2B1Q

Додаток В
(обов'язковий)

Результати аналізу BPSK-модулятора

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

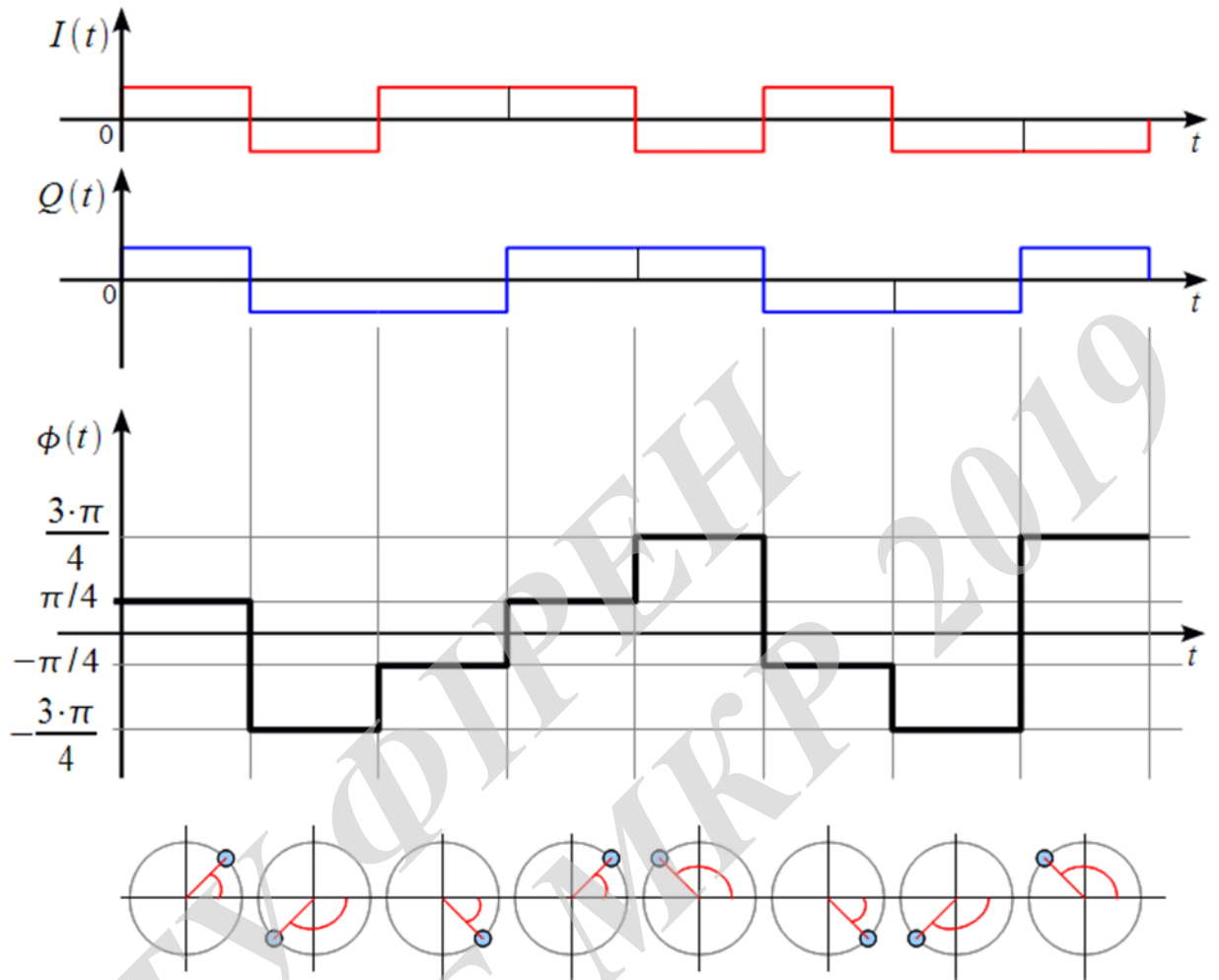


Спрощена структурна схема та осцилограми напруг BPSK-модулятора

Додаток Г
(обов'язковий)

Результати аналізу фазової обвідної QPSK-сигналу

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

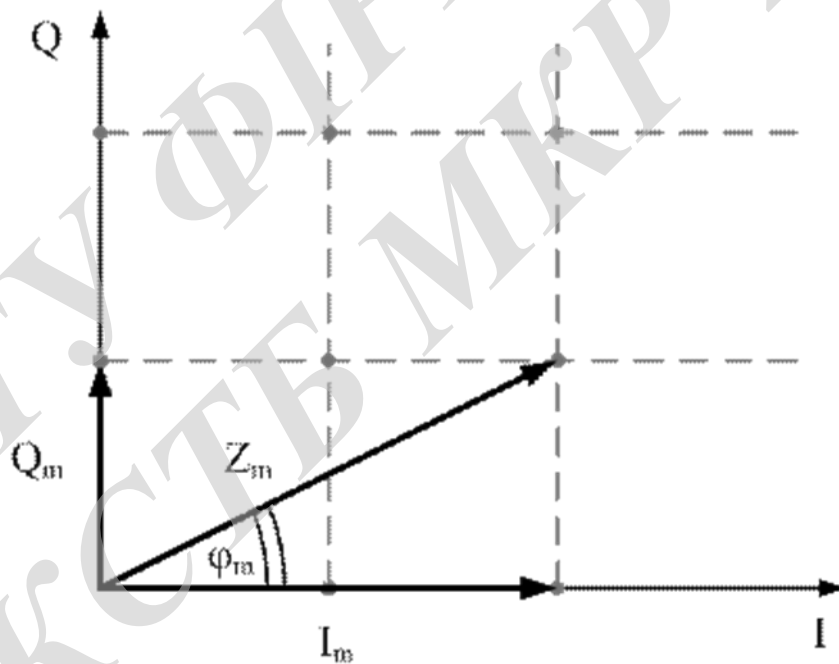
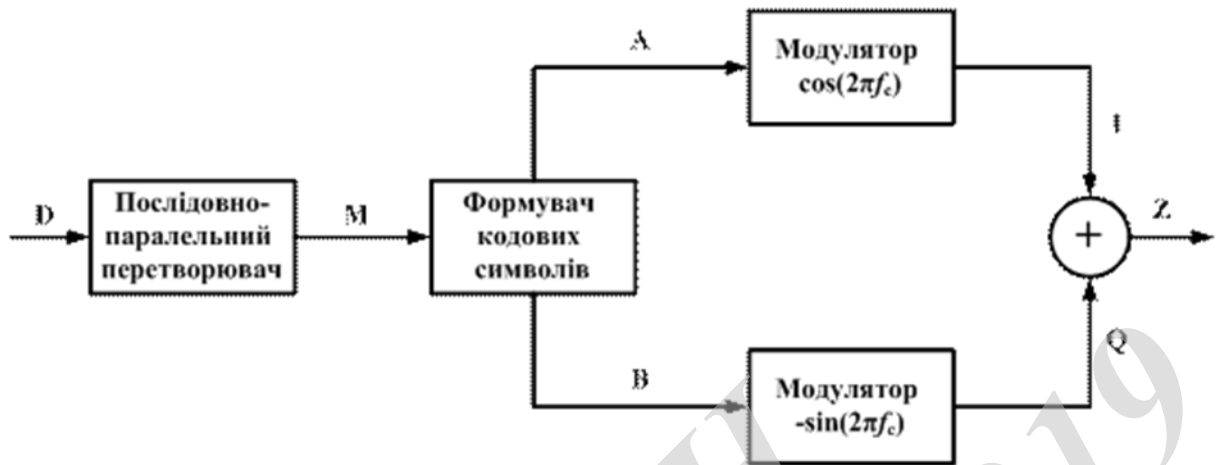


Фазова обвідна QPSK-сигналу

Додаток Д
(обов'язковий)

Структурна схема модулятора КАМ
та комплексне подання формування КАМ-сигналу

ВНТУ ФІЗИКЕН
ТКСТЬ МКР 2019

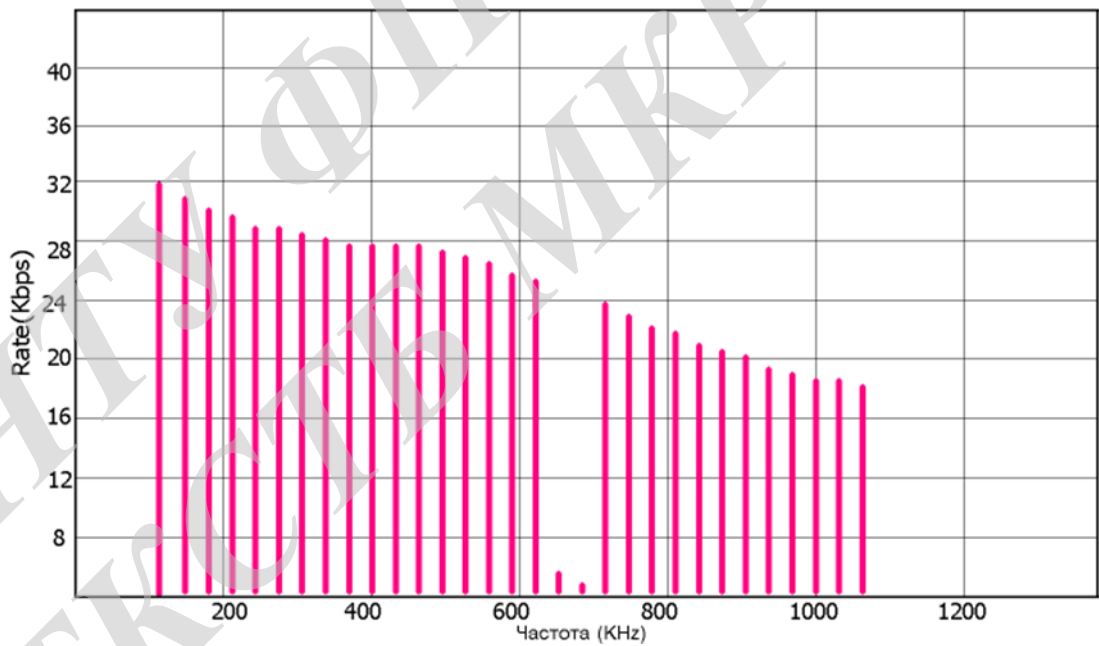
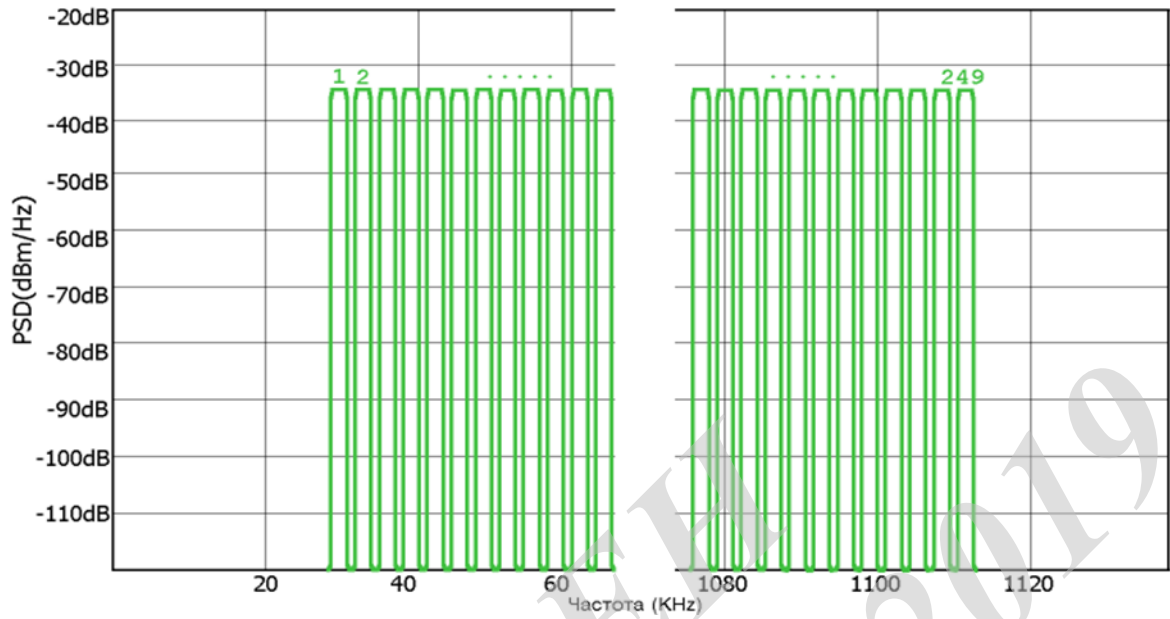


Структурна схема модулятора КАМ та комплексне подання формування КАМ-сигналу

Додаток Е
(обов'язковий)

Частотна організація вхідного потоку
та залежність швидкостей передачі даних
для дискретної багаточастотної модуляції DMT

ВНТУ ФІЗИКЕН
ТКСТЬ МКР 2019

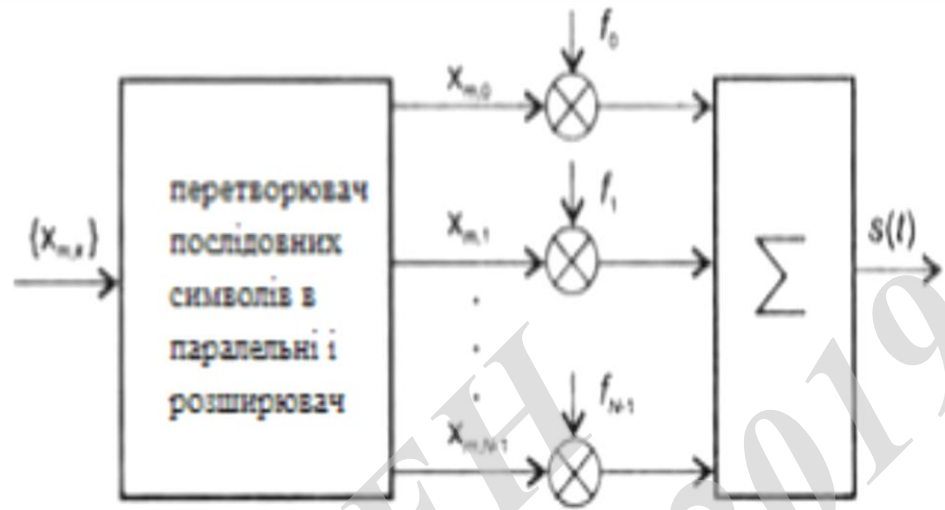


Частотна організація вхідного потоку
та залежність швидкостей передачі даних
для дискретної багаточастотної модуляції DMT

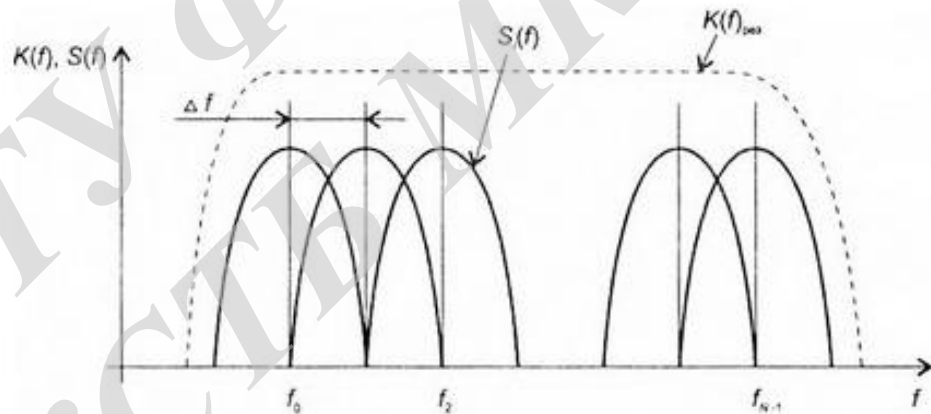
Додаток Ж
(обов'язковий)

Результати аналізу формувача OFDM-сигналу

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019



Формувач групового OFDM-сигналу

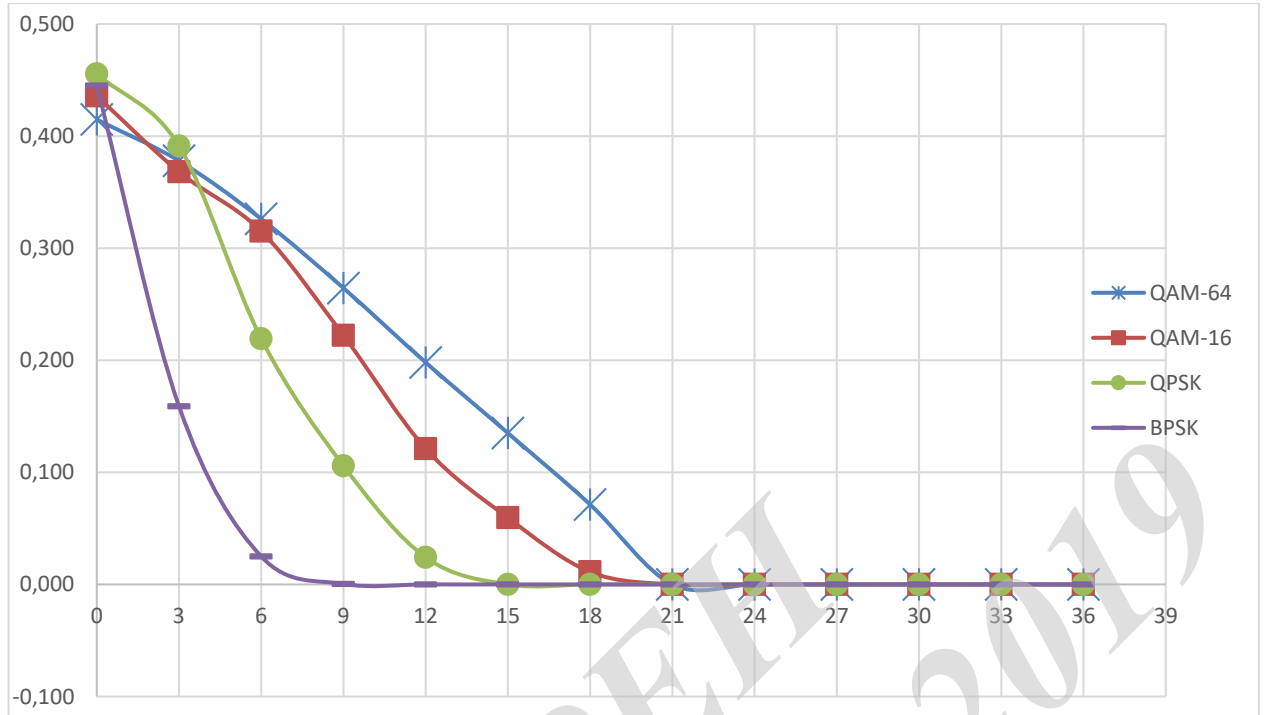


Взаємне розташування ортогональних піднесучих частот в OFDM-технології

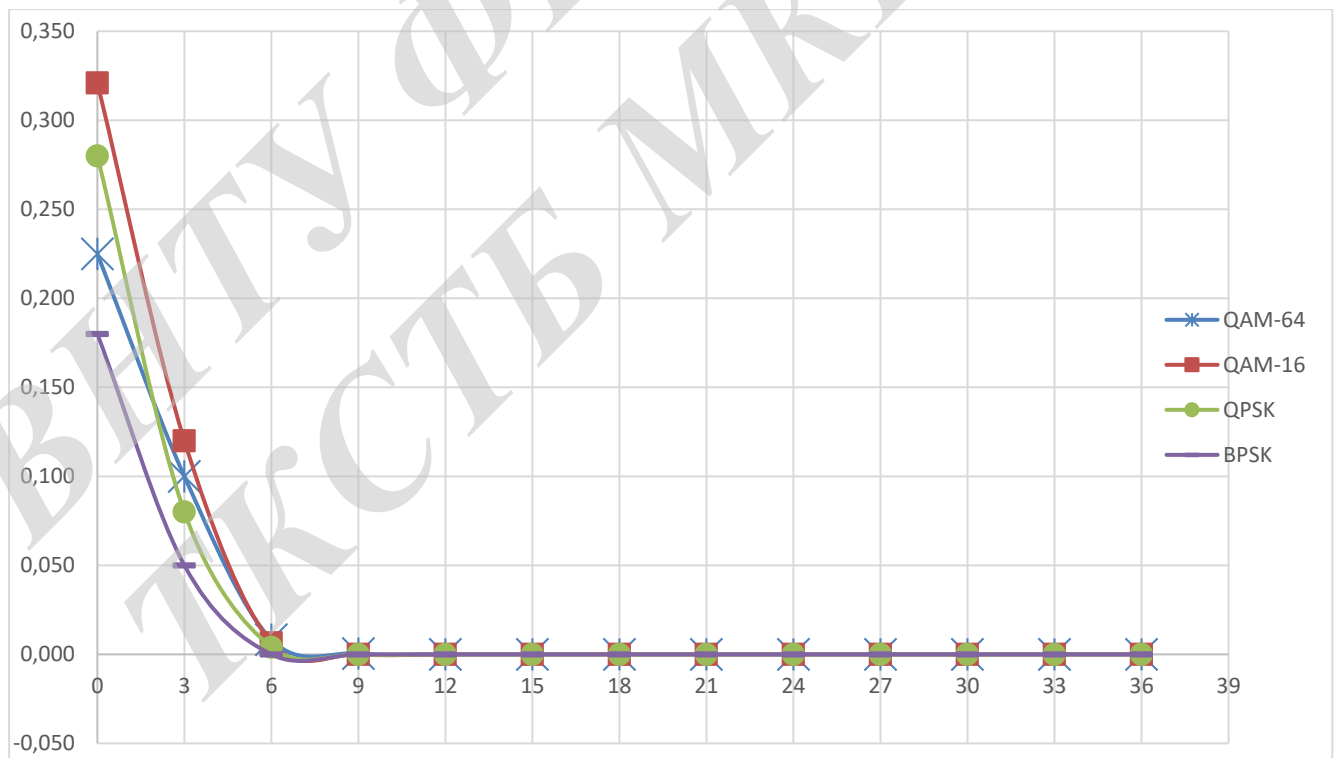
Додаток 3
(обов'язковий)

Залежність ймовірності помилки від відношення
сигнал/шум у каналі з гаусовим шумом

ВНТУ ФІЗИКА
ТКСТЬ МКР 2019



Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з гаусовим шумом при використанні OFDM

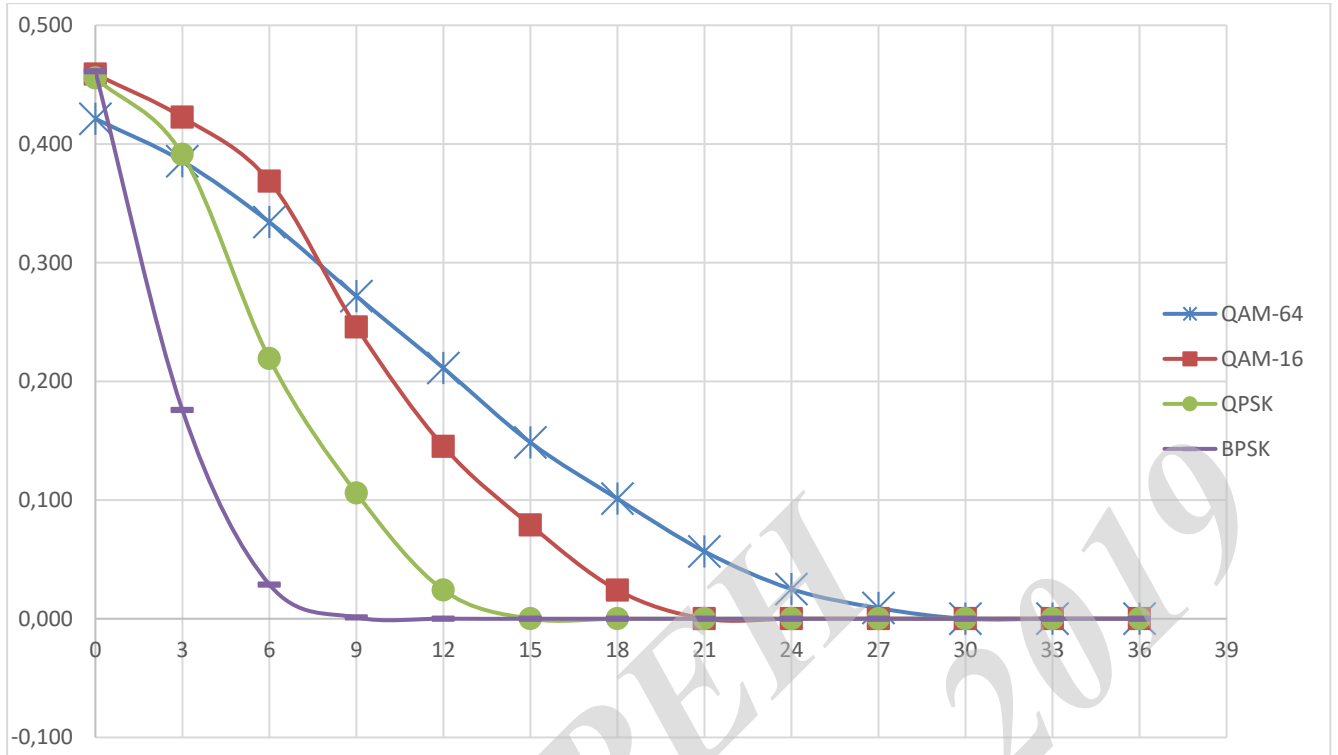


Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з гаусовим шумом без використання OFDM

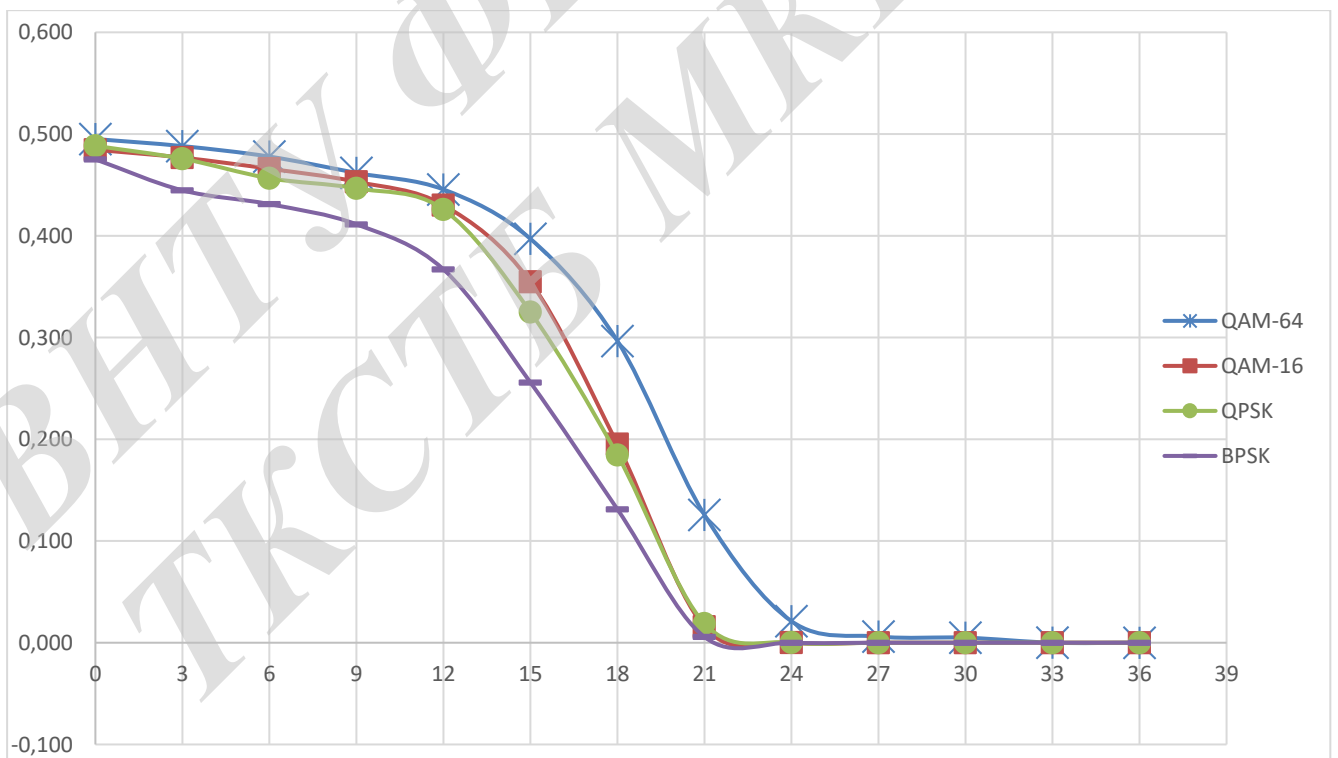
Додаток К
(обов'язковий)

Залежність ймовірності помилки від відношення
сигнал/шум у каналі з вузькосмуговою завадою

ВНТУ ФІЗИКА
ТКСТІ МКР 2019



Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з вузькосмуговою завадою при використанні OFDM



Залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум у каналі з вузькосмуговою завадою без використання OFDM

Додаток Л
(довідниковий)

Нормовані значення виробничих чинників

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Таблиця Л.1 – Нормовані допустимі параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	≤0,2
Теплий		21-28	19-30	60 при 27°С	0,1-0,3

Таблиця Л.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин [4]

Назва шкідливої речовини	ГДК, мг/м ³	Агрегатний стан	Клас небезпеки
Озон	0,1	Пара	4
Оксиди азоту	5	Пара	2
Пил	4	Аерозоль	2

Таблиця Л.3 – Число іонів у 1 см³ повітря приміщення під час роботи на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
додатній	400	1500-3000	50000
від'ємний	600	3000-5000	50000

Таблиця Л.4 – Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення і мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, лк			КПО для бокового освітлення, %	
						комбіноване		загальне	Природного	Суміщеного
						всього	у т. ч. від загального			
Середньої точності	0,5-1	IV	г	великий	середній	300	150	150	1,5	0,9

Таблиця Л.5 – Нормовані рівні звукового тиску і еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку і еквівалентні рівні звуку, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Таблиця Л.6 – Допустимі рівні вібрації [6]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц								Коректовані рівні віброприскорення, дБА
8	16	31,5	63	125	250	500	1000	
73	73	79	85	91	97	103	109	76

Таблиця Л.7 – Значення мінімальних меж вогнестійкості приміщення [11]

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни					Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті клітки	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки	Плити, прогони				Балки, ферми	
2	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	REI 15 M0	R 30 M0	

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см; M1 – $M \leq 25$ см – для горизонтальних конструкцій; $M \leq 40$ см – для вертикальних і похилих конструкцій; M2 – $M > 25$ см – для горизонтальних конструкцій; $M > 40$ см – для вертикальних і похилих конструкцій, nn – не нормується.