

## Пояснювальна записка

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

на тему:

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОКАНАЛІВ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ 5G  
ПОКОЛІННЯ  
08-34.МКР.006.00.000 ПЗ

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

\_\_\_\_\_ Мельничук О.І.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ТКСТБ

\_\_\_\_\_ Васильківський М.В.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. РТ

\_\_\_\_\_ Гаврілов Д.В.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Галузь знань 17– Електроніка та телекомунікації  
(шифр і назва)  
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
(шифр і назва)  
Освітня програма Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТКСТБ  
к.т.н., професор Г.Г. Бортник

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 року

## З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Мельничук Ользі Іванівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління

керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент,  
(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 1. Діапазон робочих частот – 70-80 ГГц; 2. Діаметр антени – 60 см; 3. Довжина радіотракту – 2560 м; 4. Швидкість передавання інформації – 2 Гбіт/с; 5. Формат модуляції – 64-QAM; 6. Доступність каналу зв'язку – 99,97%; 7. Режим роботи каналу передавання – частотний симетричний дуплекс; 8. Коефіцієнт бітових помилок –  $10^{-6}$ ; 9. Значення Q-фактору – 6,5 дБ; 10. Ширина смуги частот каналу передавання – 500 МГц; 11. Тип мультиплексування каналів передавання – частотне; 12. Тип ущільнення в каналі передавання – OFDM.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Швидкість передачі інформації у мережах мобільного зв'язку; 2. Розробка моделі радіоканалів міліметрового діапазону частот; 3. Моделювання радіоканалу міліметрового діапазону хвиль; 4. Розроблення імітаторів радіоканалів ММД

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

1. Структурна схема імітатора поширення радіосигналу по каналах ММД; 2. Структурна схема модуля управління радіосистемою міліметрового діапазону; 3. Структурна схема для технічного контролю апаратури покоління 5G; 4. Імітатор поширення ММХ на проміжній частоті; 5. Модуль управління комплексом імітації радіоканалів ММД; 6. Алгоритм управління імітатором ослаблення сигналу ММД.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ТКСТБ		
Економічна частина	Кавецький В.В., старший викладач		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Березюк О.В. к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2019 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	06.09.2019р.	
2.	Швидкість передачі інформації у мережах мобільного зв'язку	13.09.2019р.	
3.	Розробка моделі радіоканалів міліметрового діапазону частот	04.10.2019р.	
4.	Моделювання радіоканалу міліметрового діапазону хвиль	25.10.2019р.	
5.	Розроблення імітаторів радіоканалів ММД	08.11.2019р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	15.11.2019р.	
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	22.11.2019р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	29.11.2019р.	
9.	Нормоконтроль МКР	02.12.2019р.	
10.	Попередній захист МКР, рецензування МКР	06.12. 2019р.	
11.	Захист МКР ЕК	09.12. 2019р.	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Мельничук О.І.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Васильківський М.В.

ТИТУЛКА

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

## ЗАВДАННЯ

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

## ЗАВДАННЯ

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

## РЕФЕРАТ

В даній магістерській дипломній роботі досліджено радіоканал міліметрового діапазону 5G покоління, розроблено модель радіоканалу міліметрового діапазону частот, моделювання радіоканалу ММД, Проведено основні розрахунки для розробки радіоканалу.

Також розроблено імітатор поширення сигналів ММД, Розроблено алгоритм імітації загасання сигналів при поширенні по радіоканалах ММД.

## ABSTRACT

In this master's business field radio channel 5M radio channel was studied along the course, model of millimeter band radio channel was developed most often, simulation of MMD radio channel, basic requirements for radio channel distribution were proposed.

Also a simulator of the corresponding MMD signals was developed, an algorithm for simulating the mysterious signals with a valid MMD radio channel was developed.

## Зміст

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019



ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ШПД - широкосмуговий доступ,  
LTE - стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних,  
IoT - Інтернет речей,  
ЧТП - частотно-територіальне планування,  
ММД - міліметровий діапазон,  
PPS - радіорелейний зв'язок,  
MIMO - технологія просторового кодування сигналів,  
MMX - міліметрові хвилі,  
WiMAX - світове співробітництво для високошвидкісного доступу,  
СЧЗ - селективно-частотні завмирання,  
МСІ - міжсимвольні інтерференція,  
РЛЗ - регульована лінія затримки,  
At - атенюатор,  
ПЧЗ - пристрій частотного зсуву,  
СУ - система управління,  
ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач,  
МІ - модуль імітації,  
МУ - модуль управління,  
ПЛІС - програмована логічна інтегральна схема,  
К - контролер,  
ОЗП - оперативне запам'ятовуючий пристрій,  
ПК - пристрій контролю,  
СМ - змішувач,  
СЧ - синтезатор частоти,

## ВСТУП

**Актуальність.** Чисельність населення нашої планети поступово зростає і вже перевищила 7 мільярдів людей. Зростають і інформаційні потреби населення, а одночасно активно розвиваються технології «Інтернету речей» (IoT-пристроїв). За прогнозами фахівців щомісячний обсяг переданої інформації до 2020 року буде вимірюватися в зеттабайт ( $1 \cdot 10^{21}$  байт). Чисельний зростання кількості абонентів і все більш об'ємні запити до інформаційного сервісу постійно вимагає зростання швидкості передачі інформації в інфотелекомунікаційному просторі. Відповідаючи на ці запити Міжнародний союз електрозв'язку прийняв рішення про розвиток нового покоління стільникового зв'язку 5G зі швидкостями передачі даних не гірше 10 Гбіт / с при часу відгуку від однієї мілісекунди. Провідні світові виробники засобів передачі інформації дружно відгукнулися на це рішення, приділяючи особливу увагу розробці стандартів, досліджень та розвитку обладнання покоління 5G.

Відповідаючи на ці запити Міжнародний союз електрозв'язку прийняв рішення про розвиток нового покоління стільникового зв'язку 5G зі швидкостями передачі даних не гірше 10 Гбіт / с при часу відгуку від однієї мілісекунди. Провідні світові виробники засобів передачі інформації дружно відгукнулися на це рішення, приділяючи особливу увагу розробці стандартів, досліджень та розвитку обладнання покоління 5G. Однак зростання швидкості передачі інформації в основному можливий за рахунок розширення смуги використовуваних частот і вимоги, що пред'являються до мереж передачі інформації покоління 5G, можливо реалізувати лише в міліметровому діапазоні (ММД) частот.

Діапазон міліметрових хвиль (ММХ) досить добре вивчений, але використовується не повністю, що пояснюється як сильним загасанням ММХ при поширенні, так і високою складністю розробки і виробництва обладнання цього діапазону частот. Це протиріччя ставить важливу наукову і практичну задачу розробки і створення програмного забезпечення, здатних стати універсальним пристроєм для оцінки якості розробок нових пристроїв для міліметрового діапазону частот.

В якості такого універсального інструментарію може виступати імітатор радіоканалів ММД частот, що дозволяє в лабораторних умовах і без значних витрат виконувати безліч практичних завдань, що сприяють розвитку ММД частот, а саме:

- експериментально дослідити і знаходити найкращі технічні рішення пристроїв, вузлів і систем ММД;

- здійснювати технічний контроль розробленого і серійно виробленого обладнання;
- оптимізувати системи передачі інформації;
- експериментально дослідити і знаходити найкращі варіанти обробки використовуваних сигналів.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідженням ММД приділено велику увагу в роботах як вітчизняних, так і зарубіжних вчених усього світу, таких як Бистров Р.П., Соколов А. В., Чеканов Р.Н., Яковлев О.І., Калмиков Ю.П., Титов З.В., Андрєєв Г.А., Паршин В. В., Третьяков М. Ю., Кошелєв М. А., Павельєв В.А., Хаміні Д.В., Зражевський А.Ю., Красюк В.Н., Anderson CR, Rappaport TS, Alejos A., Sanchez M.G., Frenzel L., Pi Z., Khan F., Cuinas I., Doann C.H., Xu H. і багатьох інших. Моделювання радіоканалів присвячені роботи Кловського Д.Д., Самойлова А.Г., Галкіна А.П., Шінакова Ю.С., Маркова В.В., Іванова А.П., Єрмолаєва В.Т., Erceg V., Schumacher L., Watterson SS, Jroshek JR, Dtnsema V.D., Bello P., Son V.V. та інших[1-8].

Завдання розробки і створення імітатора радіоканалів ММД досить амбітна, але необхідна для розвитку покоління стільникового зв'язку 5G. Це завдання актуальна, а велика кількість досліджень міліметрового діапазону частот створили для її вирішення необхідну базу.

**Мета та постановка задачі.** Метою магістерської дипломної роботи є аналіз властивостей радіоканалів міліметрового діапазону частот і розробка комплексу імітації радіоканалів покоління 5G міліметрового діапазону частот.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз і визначити характеристики факторів, що впливають на передачу інформації по радіоканалах ММД;
- розробити математичну модель каналу ММД;
- запропонувати структуру комплексу імітації радіоканалів (Кірк) ММД;
- запропонувати практичні рекомендації щодо побудови комплексу імітації радіоканалів ММД;
- розробити методику верифікації пристроїв і систем покоління 5G за допомогою кирки.

**Предметом дослідження** є характеристики радіоканалів міліметрового діапазону частот.

**Об'єктом дослідження** є шляхи програмно-апаратної імітації радіоканалів міліметрового діапазону частот.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених завдань використовувалися методи, засновані на положеннях загальної теорії зв'язку, теорії поширення сигналів, методів теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії експерименту.

**Наукова новизна** магістерської дипломної роботи полягає в наступному:

1. Визначено вирази для імітації послаблень сигналів і завмирань в радіоканалах ММД при різних кліматичних і географічних параметрах модельованих трас зв'язку.

2. Запропоновано моделі передавальних функцій радіоканалів ММД для стаціонарних і мобільних абонентів.

3. Запропоновано структуру комплексу імітації радіоканалів ММД з перенесенням частот досліджуваних систем на проміжні частоти в діапазон 17 ГГц - 27 ГГц, що надає універсальність комплексу.

4. Розроблено методику управління Кірк для верифікації пристроїв і систем ММД.

**Практична значимість** роботи полягає в наступному:

1. Розроблено комплекс імітації радіоканалів ММД, що дозволяє в лабораторних умовах оцінювати ефективність пристроїв і систем покоління 5G. Оперативність отримання оцінок в порівнянні з польовими випробуваннями за експертними оцінками підвищується більш ніж в 10 разів.

2. Запропоновано алгоритм імітації втрат енергії сигналу на лініях зв'язку ММД, що враховує як кліматичні, так і географічні умови на трасах зв'язку.

3. Визначено серійні пристрої для побудови імітаторів загасання, замираний, затримок сигналів і дуплексних зрушень частоти, що більш ніж в 2 рази скорочує витрати на створення Кірк.

Достовірність і обґрунтованість результатів роботи підтверджуються коректним використанням положень теорії поширення сигналів і загальної теорії зв'язку, застосуванням випробованих методик, а також не протиріч результатів, отриманих в роботі, відомим з літератури.

Також на основі проведеного аналізу сформульовані завдання дипломного дослідження, запропоновані моделі передавальної функції радіоканалів ММД для стаціонарних і мобільних абонентів.

Розроблено структуру комплексу імітації радіоканалів ММД. Запропоновано також алгоритм обліку втрат енергії ММХ на лініях ММД, методика управління комплексом і пристрої для його побудови. Особисто підготовлені і опубліковані основні результати дослідження.

Положення, що виносяться на захист:

1. Структура комплексу імітатора радіоканалів ММД повинна забезпечувати моделювання затухань, затримок, багатопроменевого поширення і статистичних властивостей завмираних сигналів.

2. Алгоритм обліку втрат енергії ММХ на лініях зв'язку ММД, комплексно враховує різні причини загасання сигналів.

3. Методика управління Кірк, що дозволяє здійснювати верифікацію пристроїв і систем покоління 5G.

**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.

Структура і обсяг роботи. Магістерська дипломна робота складається зі анотації, вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 40 найменувань і шістьох додатків. Обсяг роботи 117 сторінки, рисунків, 15 таблиць, 7 додатків.

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

## 1 ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ У МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

### 1.1. Можливі напрямки для створення стандарту рухомого зв'язку 5G

Існуючі стандарти передачі даних, включаючи ще не повністю освоєнні покоління передачі даних 4G, з завданням щомісячної передачі до 1 зеттабайт інформації не можуть впоратися. Тому вже активно ведуться роботи зі створення нового стандарту для технології передачі даних 5G, призначеного об'єднати в єдину мережу тисячі абонентів на один квадратний кілометр з різними технологіями бездротового з'єднання при швидкостях передачі даних 10 Гбіт / с і часу відгуку від однієї мілісекунди. МСЕ планує в якості продовження розвитку поколінь передачі інформації впровадження комерційних мереж п'ятого покоління. Такий план орієнтований на 2020 рік з вимогою максимальної швидкості передачі даних до 20 Гбіт / с і можливістю підключення до мільйона IoT- пристроїв на площі в один квадратний кілометр. Але зростання швидкості передачі інформації вимагає збільшення пропускної спроможності каналів зв'язку. Теорема К. Шеннона [4] визначає пропускну здатність каналу зв'язку як:

$$C = \Delta f \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{N} \right) = \Delta f \log_2 \left[ 1 + \frac{E_b}{N_0} \left( \frac{C}{\Delta f} \right) \right], \quad (1.1)$$

де  $\Delta f$  - займана системою смуга частот,

$P_c$  - середня потужність сигналу,

$N$  - середня потужність шуму,

$E_b$  - енергія біта,

$N_0$  - спектральна щільність потужності шуму.

З виразу (1.1) видно, що існує два шляхи збільшення пропускної здатності каналу зв'язку - це збільшення середньої потужності сигналу  $P_c$  по відношенню до сумарної енергії шуму і перешкод, а також розширення смуги частот  $\Delta f$ , займаної сигналом. Збільшення потужності сигналу  $P_c$  для мобільного зв'язку обмежується стандартами на допустимі рівні електромагнітного випромінювання і масогабаритними параметрами передавачів і джерел живлення носяться абонентських приймально-передавачів - акумуляторів. Крім того збільшення середньої потужності сигналу абонентського терміналу стільникового зв'язку обмежується через негативних впливів електромагнітного випромінювання на людський організм [3] і з цієї причини не перевищує 1 Вт.

Джерела харчування в даний час займають до 20% в масогабаритних параметрах абонентських систем стільникового зв'язку та збільшення  $P_c$  приведе не тільки до збільшення ваги переносної трубки, але і значно скоротить час роботи акумулятора до наступного циклу заряду. Звичайно, роботи зі створення ефективних акумуляторів електричної енергії інтенсивно ведуться в різних країнах світу. Літєво-іонні і літій-полімерні, літєво-залізофосфатні, фторид-іонні і інші нові акумулятори [5], які прийшли порівняно недавно на зміну нікель-кадмієвих, помітно відбилися на якісних характеристиках обладнання стільникового зв'язку, але на пропускну здатність каналів передачі інформації практично вплинути не змогли. Тому основним шляхом для збільшення швидкості інформаційного обміну в мережах мобільного зв'язку полягає в розширенні смуги частот  $\Delta f$ , що виділяється для інформаційного обміну та розширення смуги частот є головною умовою для створення нового покоління мобільного зв'язку 5G.

МСЕ з 1995 року став міжнародним координатором робіт по електрозв'язку, спрямованих на створення глобального інформаційного суспільства. Створивши Регламент радіозв'язку [3] і розділивши поверхню Землі на три регіони МСЕ організував певний порядок в частотному користуванні. Однак частотний ресурс, що належить всьому людству, виключно активно використовується і до теперішнього часу частотні діапазони нижче 5 ГГц практично перевантажені. Присвоєння радіочастот і радіочастотних каналів для радіоелектронних засобів в цих діапазонах здійснюється за технологіями частотно-територіального планування (ЧТП) з обов'язковим розрахунком електромагнітної сумісності (ЕМС) радіозасобів. Тому одне з основних напрямків по створенню нового покоління мобільного зв'язку 5G - це освоєння частотних діапазонів вище 5 ГГц поки ще недостатньо використовуваних.

Щодо вільних ділянок спектра є поки на надвисоких частотах, наприклад, на кордоні діапазонів X і C не зайнята смуга частот близько 1,5 ГГц. Але найменше освоєний міліметровий діапазон (ММД) хвиль, тому саме в цьому діапазоні можливий розвиток стандарту 5G зі швидкостями передачі даних від 1 до 10 Гбіт / с. Діапазон міліметрових хвиль використовується поки не дуже активно і вивчений ще не повністю. Тому становить інтерес дослідження можливостей мобільного зв'язку в цьому діапазоні хвиль.

Діапазон міліметрових хвиль виявився виключно вдалим для транспортних потоків в районах з високою щільністю радіоелектронних засобів на ділянках радіорелейного зв'язку прямої видимості протяжністю в декілька кілометрів. ММД виявився зручним для організації локальних інформаційних мереж та створення каналів " останньої милі " при передачі



інформації. Додаткова перевага діапазону міліметрових хвиль полягає в тому, що в цьому діапазоні часто немає необхідності проводити мультиплексування сигналу, так як ширина смуги частот дозволяє конвертувати весь спектр сигналу транспортної мережі, в область міліметрових хвиль.

В даний час ММД використовується як в супутниковому зв'язку, так і в наземній радіорелейного зв'язку (PPC). Так для потреб комерційного зв'язку в міліметровому діапазоні хвиль вже успішно використовуються піддіапазони частот 27-32 ГГц, 36-38 ГГц і 40.5-42.5 ГГц. Нижні з цих частот були освоєні в США для забезпечення радіодоступу при побудові телекомунікаційних мереж. Такі системи отримали назву LMDS (Local Multipoint Distribution Service - локальна служба розподілу багатоточок). Пізніше технологію LMDS стали використовувати і для мереж телевізійного мовлення. У зв'язку з цим системи, що працюють на частотах 40,5-42,5 ГГц, отримали назву MVDS (Multipoint Video Distribution Systems - багатоточкові системи розподілу відео). У Росії широко використовуються наземні станції PPC в діапазоні 36 ÷ 40,5 ГГц. Однак вільні ділянки спектра в діапазоні міліметрових хвиль ще є, що і створює нішу для практичного застосування радіосистем цього діапазону в сучасному телекомунікаційному просторі при створенні і освоєнні нового покоління мобільного зв'язку 5G.

Певні успіхи по освоєнню ММД і використанню його для високошвидкісної передачі інформації є. Наприклад за даними компанії ComTek [2] для безліцензійного міліметрового діапазону в найбільш чутливому до опадів діапазоні радіозв'язку 70-80 ГГц протягом весняних та літніх 194 днів (з 19 лютого по 30 серпня) в цілодобовому режимі був досліджений канал радіорелейного зв'язку на обладнанні Siklu 1200 з антенами, діаметром 60 см, на дистанції 2560 метрів і результати по доступності каналу зв'язку, показані на рисунку 1.

При швидкостях передачі інформації до 700 Мбіт / с використовувалася адаптивна квадратурна фазова маніпуляція QPSK, на швидкостях 700 Мбіт / с і 1 Гбіт / с адаптивна квадратурна амплітудна маніпуляція до QAM-64. Досліджувався канал в Бухаресті, що знаходяться в дощовій зоні К, де опади значно інтенсивніше зони Е, до якої належить більшість території Росії. При цьому слід враховувати, що опади нерівномірно розподілені протягом року, тому при інтервалі спостереження менш одного року доступність каналу зв'язку, наведена на рисунку 1.1, коливається в кращу і в гірший бік.

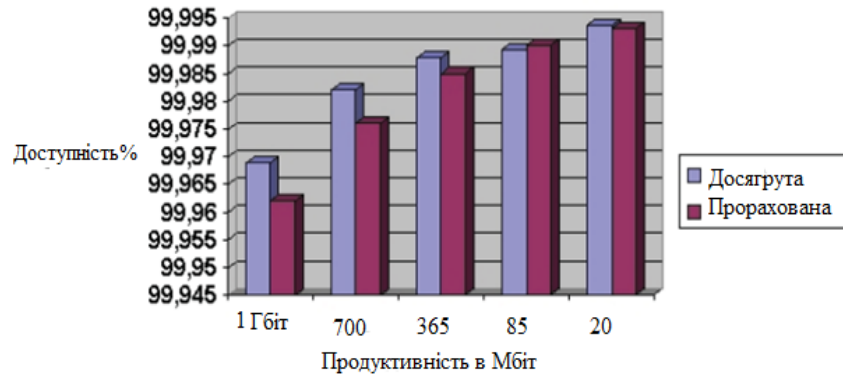


Рисунок 1.1 – Продуктивність каналу 70-80 ГГц (за даними ComPTek)

Російська компанія ЗАТ НПФ "Микран" [3], яка виробляє радіорелейне обладнання ММД, освоїла випуск устаткування Y-PACKET 80 - радіорелейний станцій типу "точка-точка" для діапазону 71-76 / 81-86 ГГц (Е смуга частот). Устаткування працює за схемою з частотним дуплексом і пропонує повністю симетричний канал, з підтримкою адаптивної модуляції від QPSK до QAM64 і дозволяє передавати дані на швидкості до 2 Гбіт / с в режимі 64QAM з робочою смугою 500МГц. Устаткування містить повноцінний набір функцій обробки пакетного трафіку Ethernet і підтримує інтерфейси Gigabit Ethernet (оптичні і електричні). Звичайно стаціонарне радіорелейне обладнання прийшло раніше в міліметровий діапазон, а й у мобільних системах є певні успіхи, які постійно підтверджуються новими розробками апаратури. Так компанія Qualcomm в жовтні 2016 року оголосила про створення мобільного модему Qualcomm Snapdragon X50 5G - першого комерційно доступного модему з підтримкою 5G, здатного підтримувати швидкість низхідного з'єднання на рівні 5 Гбіт / с в діапазоні 28 ГГц. Платформа Snapdragon X50 5G складається з модему, приймача міліметрових хвиль SDR051 і чіпа для керування живленням PMX50 і здатна підтримувати як більш широкий спектр частот, необхідних для стандарту 5G, так і раніше розгорнуті мережі LTE.

Те, що розвиток мереж п'ятого покоління не стоїть на місці компанія "Мегафон" продемонструвала на Петербурзькому економічному форумі, показавши на термінальному обладнанні китайської фірми "Huawei" і LTE модифікованому модемі від "Qualcomm" швидкість завантаження даних 1,24 Гбіт / с. А фахівці компанії "Samsung" на стаціонарному обладнанні на частоті 28 ГГц отримали влітку 2016 року в польових умовах швидкість обміну інформацією, рівну 7,5 Гбіт / с, що в десятки разів швидше максимальної швидкості стандарту LTE.

Компанія Ericsson в 2014 році оголосила про проведення успішної серії тестів 5G мережі в частотному діапазоні 15 ГГц. Їм вдалося домогтися передачі даних на швидкості 5 Гбіт / с, застосувавши технологію MIMO (Multiple Input Multiple Output), яка передбачає передачу і прийом даних по каналу за допомогою декількох антен і просторового кодування, а також використовуючи базові станції і радіомодулі з інтерфейсом нового типу. Уже з'явилися прототипи 5G-мереж. Першу 5G-мережу запустили в Південній Кореї. Компанія SK Telecom представила нову технологію на відкритті дослідницького центру, а до зимових Олімпійських ігор 2018 року в Південній Кореї компанія планує побудувати мережу 5G по всій країні.

За даними Huawei і Vodafone в 2016 році провели перші польові випробування стандарту 5G і відкрили лабораторію по дослідженню інтернету речей. Вони домоглися пікової швидкості передачі даних Гбіт / сек в діапазоні частот E (від 60 до 90 ГГц) і продемонстрували це в Ньюбері (Великобританія). Під час цих випробувань тестування піддалися однокористувальницький (SU-MIMO) і розрахований на багато користувачів (MU-MIMO) багатоканальний вхід / вихід, що продемонстрували швидкість 20 Гбіт / с і 10 Гбіт / с відповідно. Головний недолік міліметрових хвиль (MMW) укладено в сильному ослабленні сигналу при розповсюдженні. Однак аналізуючи відомі методи підвищення ефективності передачі цифрової інформації, можна запропонувати деякі з них для компенсації впливу ослаблення сигналів на передачу інформації в діапазонах MMW. До таких методів можна віднести наступні:

1. Застосування фазованих антенних решіток з великим коефіцієнтом посилення.
2. Використання технологій розсієного прийому.
3. Застосуванні технології MIMO, коли посиляють і приймають кілька сигналів одночасно.
4. Застосування завадостійкого кодування при передачі інформації.

Два перших із зазначених методів дають можливість підвищувати енергопотенціал на лінії зв'язку міліметрового діапазону за рахунок дуже малих (міліметрових) розмірів антен в цьому діапазоні. Наприклад, компанією Samsung вже розроблена і випробувана [6] фазировану антенну решітку з 64 антен, розміром близько 6 см<sup>2</sup>, що формує діаграму спрямованості шириною 10° зі зміною напрямку передачі. Випробування, проведені компанією Samsung, підтвердили можливість стійкого обміну даними зі швидкістю 1 Гбіт / с на відстані 2 км при прямої видимості і на відстані 200 м на закритих трасах. Методи рознесеного прийому теж можуть внести значний вклад в підвищення енергопотенціалу. При цьому слід задіяти всі широкі можливості методів,

використовуючи різні види надмірності - по частоті, поляризації, часу приходу посилок, паралельної обробки сигналів за технологією MIMO і т.д.

Технологія MIMO вже використовується в LTE і WLAN мережах покращити якість сигналу (паралельно відправляється і приймається 2-4 сигналу). Для високих частот застосовується Massive MIMO - технологія оптимізації прийому, коли в мобільних пристроях буде розміщено десятки невеликих антен і сотні - на передавальній базовій станції. Завадостійке кодування інформації енергійно знижує ймовірність помилок при передачі інформації і використовується практично у всіх цифрових телекомунікаційних системах, хоча використання різних видів завадостійкого кодування і трохи знижує швидкість передачі інформації за рахунок необхідності передавати надлишкові символи. Однак застосування завадостійкого кодування при передачі цифрової інформації дозволяє знизити ймовірність як одиночних, так і групових помилок на кілька порядків, що істотно компенсує ослаблення сигналу в діапазонах ММХ.

## 1.2. Аналіз обмежень на розвиток нового покоління мобільного зв'язку

Хороші умови поширення радіохвиль і досить розвинена елементна база для діапазону частот до 3 ГГц стали головною причиною того, що більшість світових систем комерційного радіозв'язку працює саме в цьому діапазоні частот. Але з ростом кількості радіозасобів і трафіку діапазон виявився сильно перевантажений. В даний час системи четвертого покоління, включаючи LTE і мобільний WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access - світове співробітництво для високошвидкісного доступу), з метою досягнення спектрального ущільнення, близького до теоретичної межі, використовують велику кількість передових технологій, таких як передача даних за допомогою безлічі прийомних антен (MIMO), застосування потужних перешкодостійких кодів, адаптивне налаштування каналу, мультиплексування ортогональними частотами (OFDM), механізм вибору пріоритету передачі в залежності від якості каналу та ін. Можна відзначити, що можливості ущільнення спектру в діапазоні до 3 ГГц, використовуваному активно для рухомого зв'язку, практично майже вичерпані, а в той же час частоти вище 3 ГГц недовикористовуються.

Робочою групою IEEE 802.16.1 (Радіоінтерфейс для фіксованих мобільних широкосмугових систем доступу для 10-66 ГГц) була розроблена, а потім стандартизована технологія LMDS, яка використовує частоти від 28 до 30 ГГц, і призначена для широкосмугового бездротового мовлення. Регулятори спектра ще в 2003 році оголосили, що частотний діапазон E (від 70

до 95 ГГц) стає доступним для високошвидкісного зв'язку, включаючи бездротові локальні мережі типу “точка-точка”, мобільні мережі та широкосмуговий доступ в Інтернет. Вільні ділянки спектра в діапазоні ММХ є, що і створює певну нішу для практичного застосування радіосистем цього діапазону для розвитку ІКТ при освоєнні нового покоління мобільного зв'язку 5G. Але в порівнянні з частотами до 3 ГГц частоти міліметрового діапазону в даний час використовуються не завжди.

Основні причини цього в сильному загасання сигналів ММД при поширенні і в недостатньо ще розвиненій елементній базі радіокомпонентів. Однак саме в ММД можливо організувати канали передачі інформації з високою пропускною здатністю і реалізувати стандарт 5G зі швидкостями передачі даних до 10 Гбіт / с. Тому розглянемо особливості цифрового мобільного зв'язку в міліметровому діапазоні хвиль. Головним досягненням ММД є можливість використання широкої смуги частот, але є і серйозні недоліки, що стримують розвиток телекомунікацій в цьому діапазоні, а саме:

- сильне загасання міліметрових хвиль при поширенні;
- рівень сигналу істотно залежить від впливу гідрометеорів (краплі дощу, сніг, град, туман) і від присутності в атмосфері твердих неоднорідностей (листя дерев, зграї птахів, пил);
- високий ступінь впливу на рівень сигналу закривають трасу перешкод;
- наявність зон сильного ослаблення сигналу на деяких частотах через ослаблення сигналів ММД частот молекулами кисню і парами води.

Основні втрати передачі радіохвиль у вільному просторі визначаються виразом:

$$b = 20\lg\left(\frac{4\pi Rf}{c}\right) = 92,4 + 20\lg(f) + 20\lg(R) \quad [\text{дБ}], \quad (1.2)$$

де  $R$  - відстань між передавачем і приймачем,

$c$  - швидкість світла,

$f$  - несуча частота.

З виразу (1.2) видно, що в ММД ослаблення сигналу у вільному просторі дуже велике і, наприклад, для відстані  $r = 1$  км на частоті 37,5 ГГц становить 123,9 дБ, а на частоті 100 ГГц становить 132,4 дБ. При поширенні через атмосферу до загасанням сигналу додаються додаткові ослаблення через поглинання сигналу молекулами кисню і води, а також через гідрометеорів (дощі, сніг, град, туман).

Залежність коефіцієнта поглинання міліметрових хвиль в атмосфері від частоти експериментально отримана і теоретично досліджена в ряді робіт [5-9]. Наприклад, для частот до 50 ГГц великі експериментальні дані наведені в

роботі [5], а для частот вище 50 ГГц в роботі [6]. На підставі цих експериментів визначена залежність ослаблення міліметрових хвиль при поширенні в атмосфері Землі, яка і показана на рис. 1.2.

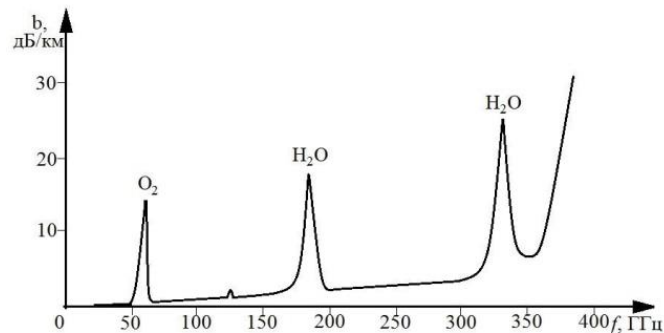


Рисунок 1.2 – Залежність поглинання сигналів ММД киснем і парами води

Аналіз експериментальних даних показує, що мінімальне поглинання хвиль спостерігається в так званих "вікнах прозорості атмосфери" при довжинах ММД 8 мм і 3 мм. З огляду на сильне поглинання сигналів ММД молекулами кисню і парами води можна визначити ділянки спектра ММД, придатні для високошвидкісної передачі інформації і широкосмугового доступу (ШСД). На рис. 1.3 показані ділянки спектра з ослабленням менше 2 дБ на частотах від 3 ГГц до 56 ГГц і з ослабленням сигналів ММД менш -3дБ на частотах від 200 ГГц до 310 ГГц.

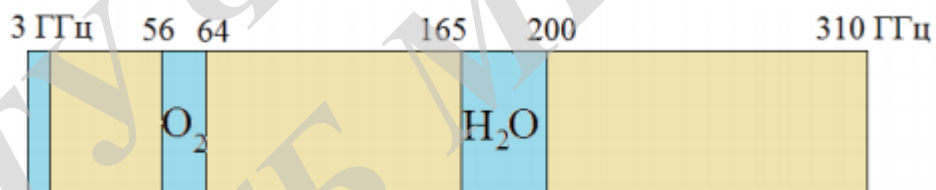


Рисунок 1.3 – Ділянки спектра ММД частот придатні для ШПД

Слід зазначити, що частоти від 27,5 ГГц до 31,3 ГГц зайняті ліцензованих діапазоном LMDC і на частотах E діапазону (від 70 ГГц до 95 ГГц) є ділянки спектра, які за планами ПТП вже розподілені. Але і ділянки спектра з сильним ослабленням сигналу також можна використовувати. Наприклад, частота 60 ГГц, на якій ослаблення сигналу велике, використовується в межах супутникового зв'язку, так як земні системи не створюють їм перешкод на цій частоті, а супутникові системи не створюють перешкод наземним. На поширення сигналів ММХ в атмосфері найбільш сильно впливають опади і навіть вікна прозорості атмосфери (довжини хвиль 3 мм і 8 мм) не захищають від впливу гідрометеорів. Поглинання енергії поширюється сигналу ММХ кількісно залежить від інтенсивності опадів.

Експериментальні дослідження впливу опадів на хвилі ММД проводилися багатьма дослідниками в різних кліматичних зонах при різноманітних дощових умовах - від мжичку, до проливних ураганних злив. На підставі численних експериментів, можна аналітично описати вплив опадів на поширення сигналів ММД. Наприклад, що коефіцієнт поглинання сигналу в ММД лінійно збільшується зі зростанням інтенсивності дощу і його залежність від частоти можна апроксимувати виразом.

$$b_D = \left(\frac{f}{70}\right)^2 Y \text{ [дБ/км]}, \quad (1.3)$$

де  $f$  - частота в ГГц,

$Y$  - інтенсивність дощу в мм / год.

Наведені в роботі залежно ослаблення сигналу ММД від різного рівня опадів, показані на рис. 1.4. Ці дослідження, наведені для території з частими дощами, показують, що найбільш відчутний вплив гідрометеорів в умовах Росії на поширення сигналів ММД буде на частотах вище 70 ГГц[7].

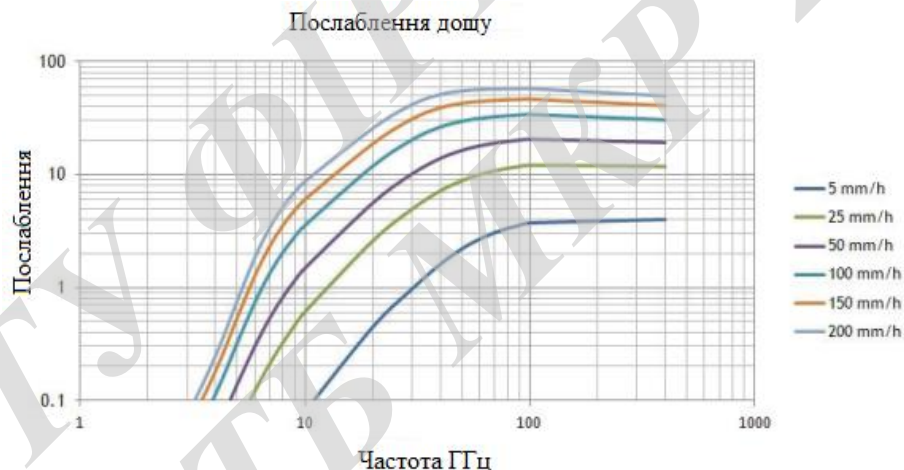


Рисунок 1.4 – Поглинання міліметрових хвиль опадами

Для інтервалів зв'язку протяжністю в 1 км, характерних для стільникового зв'язку в міських районах, запас на поглинання сигналів ММД дощами відповідно до вираження (1.3) для частот до 350 ГГц в середньому становить менше 10 дБ. У сумі з ослабленням у вільному просторі це призводить до ослаблення сигналів ММХ в каналах прямої видимості на трасах зв'язку протяжністю в 1 км в океанах прозорості атмосфери на частоті 37,5 ГГц до 134 дБ і на частоті 100 ГГц до 143 дБ. Особливістю діапазону ММХ є і багатопроминевою. При передачі інформації, навіть при радіовидимості між передавачем і приймачем, на антену приймача крім прямої хвилі приходять цілий ряд інших хвиль, що з'явилися в результаті відображень від

грунту, будівель і від інших місцевих предметів. Всі ці хвилі пройшли різний шлях від передавача до приймача і мають різні амплітуди і фази, що безперервно змінюються через зміни обстановки на трасі зв'язку і переміщення абонентів. Багатопроминевість призводить до випадкових і в загальному випадку нестаціонарних флуктуацій як амплітуди, так і фази сигналу, тобто завмирань сигналу. Через наявність перешкод на трасі зв'язку і через присутність відбитих сигналів, що призводять до багатопроминевих ослаблень сигналів ММД додатково може значно збільшуватися. Хоча методи боротьби з завмираннями сигналу досить добре розроблені, енергетичний запас на завмирання доводиться застосовувати.

### 1.3 Постановка завдання дослідження

При розробці стандарту нового покоління 5G необхідно вирішити проблему, яка полягає в тому, що, з одного боку, високошвидкісний ШПД можливий тільки в гігагерцовий діапазонах частот, а з іншого боку, організація передачі інформації і стільникового зв'язку в ММД зустрічає багато на перший погляд нездоланих труднощів. До них відноситься значне ослаблення сигналів міліметрового діапазону при поширенні в атмосфері і при проходженні через перешкоди (стіни будинків, листя дерев та ін.), А також вплив на рівень сигналу, що приходить на вхід приймача, випадкових флуктуацій через багатопроминевих і через гідрометеорів. Ці причини істотно ускладнюють освоєння ММД для високошвидкісної передачі інформації.

І якщо діапазон частот до 3ГГц досить докладно вивчений і освоєний, то розробка обладнання для ММД зустрічає багато труднощів, значна частина яких пов'язана з тим, що поки недостатньо інструментарію для експериментальної налагодження пристроїв цього діапазону. Комп'ютерне моделювання через необхідність масштабування призводить до більших помилок, а натурні випробування в реальних каналах вимагають великих витрат по створенню експериментальних трас зв'язку і уповільнюють процеси розробки нових пристроїв покоління 5G.

Виникає парадокс, що полягає в тому, що з одного боку потрібно швидше освоювати гігагерцовий діапазон, а з іншого боку будь-яка розробка нових пристроїв для роботи в ММД вимагає значного часу. Певну допомогу по вирішенню такого протиріччя може надати розробка і створення імітаційної моделі радіоканалу ММД, що враховує ймовірні характеристики заважають високошвидкісній передачі інформації факторів, адекватні реальним умовам ММД. Така модель може допомогти і в визначенні граничних вимог до апаратури покоління 5G, проектованої для роботи в міліметровому діапазоні



частот, оскільки дасть можливість не в польових, а в лабораторних умовах відчувати розробляється обладнання в реальному масштабі часу і визначати його характеристики. Створення моделі радіоканалів ММД, адекватної реальним умовам поширення сигналів ММХ мобільного зв'язку, дозволить вирішувати цілий ряд практично важливих задач:

- визначити найкращі види радіосигналів, що забезпечують високу якість передачі інформації;
- в лабораторних умовах експериментально досліджувати різні архітектури побудови пристроїв і систем покоління 5G;
- відпрацьовувати вузли формуванні та обробки інформаційних сигналів і визначити їх найкращі характеристики;
- оптимізувати системи і мережі мобільного зв'язку;

Створення такого багатофункціонального інструментарію дозволить прискорити процес становлення нового покоління рухомого зв'язку 5G. Метою цього дисертаційного дослідження і є аналіз властивостей радіоканалів міліметрового діапазону частот і розробка комплексу для імітації таких радіоканалів [8].

Для вирішення поставленого завдання потрібно:

- виконати аналіз радіоканалів ММД і визначити основні фактори, що заважають передачі інформації по каналах міліметрового діапазону;
- визначити характеристики і параметри факторів, що заважають передачі інформації по каналах ММД;
- розробити математичну модель каналу ММД;
- запропонувати структуру імітатора радіоканалів ММД;
- розробити методику синтезу імітатора радіоканалів ММД, що здійснює впливу на радіосигнали систем мобільного зв'язку;
- розробити рекомендації щодо вирішення завдань побудови імітатора радіоканалів ММД.

#### 1.4 Оцінювання наукового, технічного та економічного рівня науково дослідної роботи

На даний час людство потребує швидкого впровадження досягнень науково-технічного прогресу галузі, а це звісно вимагає зменшення часу на проведення НДДКР і скорочення строку окупності витрат. Виходячи з цього, доцільно орієнтуватися на час проведення НДДКР не більше 2 років, при чому технічні показники результатів плануються на рівні кращих світових зразків; передбачаються часткові можливості отримання авторських свідоцтв; строк окупності витрат 2 роки і менше.

В таблиці 1.1 – наведено критерії та бальна оцінка для визначення наукового та технічного рівня науково-дослідної роботи

Критерії оцінки	Шкала критеріїв	Індекс Оцінки
Час, необхідний для проведення НДР	2 роки і менше	+2
	3 роки	+1
	4 роки	0
	5-6 років	-1
	7 років і більше	-2
Технічні показники результатів розробки	Вище рівня кращих світових зразків	+2
	На рівні кращих світових зразків	0
	Нижче рівня кращих світових зразків	-2
Можливості отримання авторських свідоцтв на винахід	Впевненість в отриманні авторських свідоцтв	+2
	Часткові можливості	0
	Можливості немає	-1
Строк окупності витрат	2 роки і менше	+3
	3-4 роки	+2
	5 років	0
	6-7 років	-1
	8 років і більше	-2

Далі потрібно знати можливі результати оцінки теми НДДКР:

- Позитивна(+) оцінка – розробка є досить перспективною;
- Задовільна(0) оцінка – розробка перспективна;
- Негативна(-) оцінка – розробка не перспективна.

Проаналізувавши дані критерії оцінки, щодо моєї індивідуальної НДДКР можна підрахувати загальну суму балів.

$+2+0+0+3=+5$ , отже, можна зробити висновки, що дана науково-дослідна робота є досить перспективною та актуальною.

### 1.5 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Отже, метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу розробки (результатів НДДКР), створеної в результаті науково-технічної діяльності. В результаті оцінювання робиться висновок щодо напрямів (особливостей) організації подальшого її впровадження з врахуванням встановленого рейтинку.

Для проведення технологічного аудиту залучають 2-х або 3-х незалежних експертів. У нашому випадку такими експертами можуть бути керівник магістерської роботи та провідні викладачі кафедри.

Рекомендується здійснити оцінювання комерційного потенціалу розробки за 12-ю критеріями, наведені в наступній таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Оцінка комерційного потенціалу розробки

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Критерій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів Немає
Практична здійсненність					

## Продовження таблиці 1.2

8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Таблиця 1.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

	1	2	3
	Бали, виставлені експертами:		
1	4	4	4
2	4	3	4

## Продовження таблиці 1.3

3	3	2	2
4	3	3	3
5	2	3	2
6	2	4	4
7	2	4	3
8	2	3	4
9	2	2	2
10	4	2	3
11	3	2	3
12	4	3	2
Сума балів	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>36</b>
Середньоарифметична сума балів СБ	<b>35,33</b>		

За наступною таблицею визначимо рівень комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 1.4 – Рівень комерційного потенціалу розробки.

Середньоарифметична сума балів СБ , розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Ниже середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки становить 35,33 бала, що, згідно таблиці 1.4, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

## 1.6 Оцінювання рівня конкурентоспроможності розробки

Наступним кроком є визначення конкурентоспроможності послуги, яка базується на впровадженні радіоканалу ММД 5G покоління.

Конкурентоспроможність товару - це відносна й узагальнена характеристика товару, що виражає його вигідні відмінності від товару-конкурента за ступенем задоволення потреби і за витратами на її задоволення.

Конкуентоспроможність - це комплексна характеристика товарів, яка визначає його переваги порівняно з аналогічними товарами-конкуентами за ступенем задоволення потреби та витратами на це задоволення.

Основними параметрами конкурентоспроможності товару є[50]:  
Технічні параметри найбільш жорсткі. За ним судять про призначення товару, його приналежності до певного виду (класу) продукції. Це також характеристики, що відображають техніко-конструкторські рішення. Сюди відносяться стандарти, норми, правила, законодавчі акти, що визначають межі виміру технічних параметрів. Це також і ергономічні показники, які відображають, наскільки товар відповідає властивостям людського організму і його психіки.

Економічні параметри представлені величиною витрат на виробництво товару: його ціною, витратами на транспортування, установку, ремонт, експлуатацію та технічне обслуговування, навчання персоналу. Всі разом ці параметри утворюють ціну споживання, яка, як правило, вище ціни продажу. Найбільш конкурентоспроможний не той товар, за який просять мінімальну ціну на ринку, а той, у якого мінімальна ціна споживання за весь термін його служби у покупця.

Соціально-організаційні параметри - це врахування соціальної структури споживачів, національних особливостей в організації збуту, виробництва, реклами товару.

Однією із умов вибору товару споживачем є збіг основних ринкових характеристик виробу з умовними характеристиками конкретної потреби покупця. Такими характеристиками найчастіше вважають нормативні та технічні параметри, а також ціну придбання та вартість споживання товару .

Занесемо ці та інші показники до табл.1.5

Таблиця 1.5 – Нормативні, технічні та економічні параметри інноваційного рішення і товару-виробника

Показники	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)
<i>1. Нормативно-технічні показники</i>		
Період частотної генерації , Гц/сек	50	80
Швидкість формування сигналу Мбайт/с	1	1,2
Пропускна здатність радіоканалу, Мбайт/с	0,5	0,8

Продовження таблиці 1.5

Мобільність пристрою, бали	10	12
Частотна характеристика, Г Гц	5	10
<i>2. Економічні показники</i>		
Ціна послуги, грн/міс.	100	150
Вартість споживання послуги, тис.грн/міс	12	15

Загальний показник конкурентоспроможності інноваційного рішення (К) з урахуванням вищезазначених груп показників можна визначити за формулою:

$$K = \frac{I_{т.п.}}{I_{е.п.}}, \quad (1.4)$$

де  $I_{т.п.}$  – індекс технічних параметрів;

$I_{е.п.}$  – індекс економічних параметрів.

Розрахунок одиничних параметричних показників конкурентоспроможності для окремого показника визначається за наступною формулою:

$$q_i = \frac{P_i}{P_{базі}}; q_i = \frac{P_i}{P_{базі}}, \quad (1.5)$$

- за технічними показниками:

$$q_1 = \frac{80}{50} = 1,6; q_2 = \frac{1,2}{1} = 1,2; q_3 = \frac{0,8}{0,5} = 1,6; q_4 = \frac{12}{10} = 1,2; q_5 = \frac{10}{5} = 2.$$

- за економічними показниками:

$$q_1 = \frac{150}{100} = 1,5; q_2 = \frac{15}{12} = 1,25.$$

Далі розрахуємо групові параметри індексів конкурентоспроможності:

- за технічними параметрами:

$$I_{тп} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i, \quad (1.6)$$

де  $I_{тп}$  – груповий параметричний індекс за технічними показниками(порівняно з виробом-аналогом);

$q_i$  – одиничний параметричний індекс  $i$ -го параметра;

$\alpha_i$  – вагомість  $i$ -го параметричного індексу,  $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$ ;

$n$  – кількість технічних параметрів, за якими оцінюється конкурентоспроможність.

$$I_{\text{ТП}} = (1,6 + 1,2 + 1,6 + 1,2 + 2) \cdot 1 = 7,6.$$

Так, як  $I_{\text{ТП}} > 1$ , то рівень конкурентоспроможності даного виробу за технічними параметрами є набагато вищим за базовий виріб.

- за економічними параметрами:

$$I_{\text{ЕП}} = \sum_{i=1}^m q_i \cdot \beta_i, \quad (1.7)$$

де  $I_{\text{ЕП}}$  – груповий параметричний індекс за економічними показниками;

$q_i$  – економічний параметр  $i$ -го виду;

$\beta_i$  – частка  $i$ -го економічного параметра,  $\sum_{i=1}^k \beta_i = 1$ ;

$m$  – кількість економічних параметрів, за якими здійснюється оцінювання.

$$I_{\text{ЕП}} = (1,5 + 1,25) \cdot 1 = 2,75.$$

Розрахуємо інтегральний показник конкурентоспроможності:

$$K_{\text{ІНТ}} = \frac{I_{\text{ТП}}}{I_{\text{ЕП}}}, \quad (1.8)$$

$$K_{\text{ІНТ}} = \frac{7,6}{2,75} = 2,75.$$

Отже, так як  $K_{\text{ІНТ}} = 2,75 > 1$ , то, який аналізувався, є перспективним за базовий зразок на 75% за конкурентоспроможністю; та  $I_{\text{ТП}} = 6,7 > 1$ , то рівень конкурентоспроможності даного виробу за технічними параметрами є вищим за базовий виріб на 67%.

Висновки: при розробці економічної частини було розглянуто сутність технічної проблеми та перспективи виконання даної роботи. Проведене дослідження рівня комерційного потенціалу розробки яке становить 35,33 бала, що, згідно таблицею 5.5, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього). Також, визначили рівень конкурентоспроможності даного виробу за технічними параметрами є вищим за базовий виріб на 67%, а  $K_{\text{ІНТ}} = 2,75 > 1$ , який аналізує, що є перспективним за базовий зразок на 75% за конкурентоспроможністю.



## Висновки до розділу 1

1. Створення нових високошвидкісних поколінь рухомого радіозв'язку можливо в основному за рахунок освоєння міліметрового діапазону частот, тобто частот діапазонів Ka, Q, U, V, E, W, F, D.

2. На підставі аналізу радіоканалів ММД визначені основні фактори, що впливають на ослаблення сигналів ММД при передачі інформації.

3. Розробка пристроїв покоління 5G систем мобільного зв'язку і нових методів обробки сигналів мобільного зв'язку вимагає створення інструментарію, що дозволяє в лабораторних умовах оцінити якість нових розробок.

4. Для вивчення механізмів і систем покоління 5G необхідно створити імітатор радіоканалів ММД.

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

## 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ РАДІОКАНАЛІВ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

Розглянемо причини, що викликають завмирання сигналу. Сигнал, що приймається на антені приймача формується в результаті інтерференції радіохвиль, що надходять за різними шляхами поширення, як показано на рис. 2.1. Кожна хвиля, що приходить характеризується своєю амплітудою, часом поширення, фазовим зрушенням при відображенні і дуплексним зрушенням частоти. При зміні умов поширення, властивостей відбивачів, кутів падіння на поверхню, положення приймача і відбивачів змінюються параметри сигналів, і, відповідно, змінюється амплітуда і фаза сумарного сигналу.

При цьому потрібно враховувати, що зміни параметрів каналу випадкові і залежать від безлічі причин, внаслідок цього інтерференційна картина стає змінюється в часі, тобто нестационарної. Це спостерігається навіть якщо абонент нерухомий або переміщається повільно, а якщо він рухається швидко, то завмирання стають вираженими сильніше. Залежно від швидкості руху абонента властивості радіоканалу змінюються і за аналогією з теорією радіорелейного зв'язку [32-35] можна визначити часові інтервали, на яких властивості каналу змінюються незначно, тобто визначити інтервали локальної стаціонарності завмирання

У радіорелейного радіозв'язку в залежності від швидкості зміни рівня сигналу завмирання прийнято поділяти на два види - швидкі завмирання і повільні завмирання. Швидкі завмирання виникають через зміни взаємних амплітудних і фазових співвідношень сигналів, які прийшли різними шляхами поширення (рис. 2.1), і часто їх називають інтерференційними завмираннями. Повільні завмирання визначаються загальними змінами властивостей каналу поширення сигналу при зміні властивостей середовища поширення (наприклад, поява пилу в атмосфері або зміна властивостей підстильної поверхні після дощу). Такі процеси відбуваються порівняно рідко і повільно, тому повільні завмирання в ММД можна трактувати, як і регулярне зміна середнього рівня (медіани) сигналу, що змінюється за випадковим процесу через швидкі завмирання. Загальноприйнятою [18, 32-35] моделлю повільних завмирань є модель, що описується [34] логарифмічним законом ймовірностей. Функція щільності ймовірності розподілу середнього рівня випадкового процесу повільних завмирань при логарифмічним розподіл ( $x$ ) визначиться виразом:

$$\omega(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_M^2}} \exp\left[-\frac{(\ln x - m_M)^2}{2\sigma_M^2}\right], \quad (2.1)$$

де  $\sigma_M$ ,  $m_M$  - параметри розподілу.

Функція щільності розподілу ймовірностей (2.1) визначена двома параметрами - медіанного значенням  $m_M$  і стандартним відхиленням  $\sigma_M$ . Повільні завмирання сигналу ММД можуть досягати одиниць децибел, але відчутний вплив їх на сигнал виникає тільки при великих за тривалістю сеансах зв'язку. Проте запас енергетики на подолання цих завмирань доводиться враховувати.

Добовий хід рівня сигналу і його сезонні коливання в ММД практично мало помітні, так як передача сигналу йде через обмежений і малий обсяг атмосфери, властивості якого майже не залежать від часу доби і пори року. Швидкі завмирання в ММД визначаються багатопроменевим характером поширення сигналу, а також варіаціями кута приходу радіохвиль при переміщенні антен мобільних абонентів. Оскільки взаємні фазові зрушення інтерференційних компонентів випадкові, то коливання передавальної функції каналу зв'язку і рівня сигналу за рахунок швидких завмирань теж випадковий процес. Фізичною причиною швидких завмирань є інтерференція в приймальні антени безлічі хвиль з довільними амплітудами і випадковими фазами, що приходять до приймача за різними шляхами поширення від передавача. Ці шляхи поширення містять як найкоротшою прямий шлях, завдяки їхній радіовидимості між передавачем і приймачем, так і кілька більш протяжних шляхів за рахунок відображення поширюється сигналу від підстильної поверхні і від місцевих предметів[10].

Для створення математичної моделі каналу ММД необхідно визначити ймовірні і спектральні властивості таких завмирання, а також залежність їх характеристик від параметрів трас зв'язку. З цією метою розглянемо інтерференцію хвиль, що з'єднують двох абонентів, що знаходяться на відстані  $R$  один від одного, як показано на рисунку 2.1.

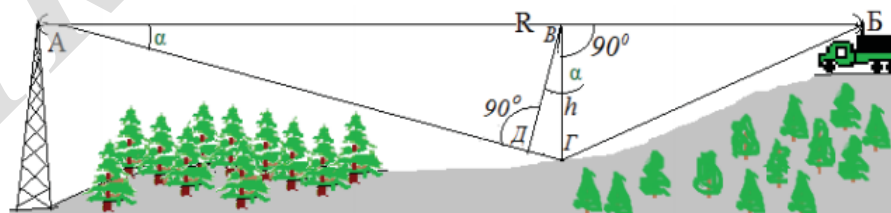


Рисунок 2.1 – Інтервал рухомого зв'язку

Така двопронена модель поширення радіохвиль є найпростішою моделлю поширення радіохвиль над рівнинами в сільській місцевості і уздовж

автомобільних доріг. Вона досить точно описує поширення сигналу, коли є прямий шлях між передавачем і приймачем і всього один відбитий. При цьому відбита хвиля зазвичай виникає при відображенні радіохвилі від підстильної поверхні, тобто від землі. Крапку відображення можна знайти з рівності кутів ковзання між дотичною до профілю в точці відображення і прямими лініями, проведеними з цієї точки до антен абонентів. Методика розрахунку множника ослаблення сигналу на трасах зв'язку з прямою радіовидимістю між абонентами, тобто на відкритих трасах, досить докладно викладена в роботах [32, 34], але частота і тривалість завмирань, що виникають через інтерференції променів, вимагає пояснення. Розглянемо це на основі моделі траси, показаної на малюнку 7. Радіосигнал від базової станції до мобільного абонента йде двома шляхами - найкоротшому АБ і більш довгому АГБ. Максимальна відстань між променями  $h$ , а різниця ходу сигналів по цих шляхах поширення визначимо як  $\Delta R = AB - (AG + BG) = DG$ .

Так як  $tg \alpha = \frac{h}{R/2} = \frac{2h}{R}$ , і одночасно  $tg \alpha = \frac{DG}{DB} \cong \frac{DG}{h}$ , то

$$\Delta R = DG = \frac{2h^2}{R}.$$

Різниця фаз між променями в точці прийому визначиться як набіг фаз при поширенні сигналу по цим променям

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{4\pi h^2 f}{RC}, \quad (2.2)$$

де  $\lambda$  - довжина робочої хвилі абонентів,  $f$  - робоча частота,  $C$  - швидкість радіохвилі.

Оскільки відстань  $h$  при стільникового зв'язку в діапазоні ММХ в порівнянні з  $R$  невелика, то кут  $\alpha$  малий і

$$tg \alpha = \frac{2h}{R} \cong \alpha, \quad h = \frac{\alpha R}{2},$$

то тривалість завмирань можна визначити як величину, зворотну швидкості завмирання:

$$\tau = \frac{dt}{d\varphi} = \frac{2\lambda}{\pi\alpha^2} \frac{dt}{dR}, \quad (2.3)$$

З виразу (2.3) випливає, що зі зменшенням довжини хвилі і зростанням інтервалу зв'язку  $R$  частота завмирання зростає, а їх тривалість зменшується. З ростом відстані  $h$  між променями поширення сигналів зростає кут  $\alpha$ , і частота

завмирання збільшується, а тривалість завмирань сумарного сигналу убуває за квадратичним законом. Так як в точці прийому інтерферує часто не дві, а кілька відображених місцевими предметами хвиль, то швидкість швидких завмирань змінюється в часі за випадковим законом, параметри якого залежать від характеристик конкретної траси зв'язку і від кількості відображають сигнал місцевих предметів.

Передавальну функцію радіоканалу можна визначити [36] прямим перетворенням Фур'є від комплексної імпульсної характеристики радіоканалу  $h(\tau)$ , то тривалість завмирань можна визначити як величину, зворотну швидкості завмирання

$$H(f, R_i, \{D\}) = \int_0^{\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad \text{при } -\infty < f < \infty \quad (2.4)$$

В цьому випадку сума синфазної і квадратурної гаусовської компонента сигналу визначиться як:

$$H(f, R_k, \{D_i\}) = H e^{j\varphi} = \sum_{i=1}^K H_i \cos\varphi_i + \sum_{i=1}^K H_i \sin\varphi_i = X + jY, \quad (2.5)$$

де:  $f$  - частота радіосигналу;

$R_k$  - довжина шляху  $k$  - го променя поширення сигналу від антени передавача до антени приймача;

$\{D_i\}$  - властивості  $i$  - го випромінювача;

$K$  - кількість випромінювача;

$H_i, \varphi_i$  - модуль і аргумент передавальної функції  $i$  - го променя поширення.

Для математичного опису швидких завмирань сигналу, викликаних інтерференцією сигналів різних променів поширення, використовуються різні випадкові процеси, серед яких найбільшою універсальністю має чотирьох параметрична модель розподілу щільності ймовірностей [36-38]. І для імітації радіоканалів мобільного радіозв'язку стосовно до міських умов з великою кількістю випромінювачів за основу математичної моделі можна вибрати чотирьох параметричний закон розподілу ймовірностей передавальної функції каналу з густиною ймовірностей модуля передавальної функції:

$$\omega(H) = \frac{H}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_x^2 \sigma_y^2 + m_y^2 \sigma_x^2}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) * \quad (2.6)$$

$$* \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(2k + 2S - 1)! (\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^k m_y^{2S} \sigma_x^{2S}}{k! (2S)! 2^k m_y^{2k+4s} m_x^{k+s}} H^{k+s} I_{k+s} \left( \frac{m_x}{\sigma_x^2} \right),$$

I фази:

$$\omega(\varphi) = \frac{\sigma_x \sigma_y \exp \left( \frac{m_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_y^2}{2\sigma_y^2} \right)}{2\pi (\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi)} * \quad (2.7)$$

$$* [1 + L[1 + \Phi(\sqrt{2}L)]\sqrt{\pi} \exp(L^2)]$$

при

$$L = \frac{m_x \sigma_y^2 \cos \varphi + m_y \sigma_x^2 \sin \varphi}{\sigma_x \sigma_y \sqrt{\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi}} \quad (2.8)$$

де  $H$  – модуль передавальної функції каналу зв'язку;  
 $I_{k+s}$  – модифікований функція Бесселя порядку  $k + s$ ;  
 $\sigma_{yx}, m_{xy}$  – параметри чотирьохпараметричного розподілу;  
 $\Phi(\varphi)$  - інтеграл ймовірності.

Чотирьох параметрична модель передавальної функції каналу зв'язку включає в себе багато окремих випадкових розподілів, часто спостерігаються в різних умовах радіозв'язку, і при різних умовах вираз (2.7) описується в більш простий вираз, при  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$  в рельєфне розподілення:

$$\omega(H) = \frac{H}{\sigma^2} \exp \left( -\frac{H^2}{2\sigma^2} \right) \quad (2.9)$$

А при  $\sigma_x$  або  $\sigma_y$  дорівнює нулю в усічено-нормальний розподіл

$$\omega(H) = \left( \frac{\sqrt{2}}{\sigma_{x,y} \sqrt{\pi}} \right) \exp \left( \frac{H^2}{2\sigma_{x,y}^2} \right), \quad (2.10)$$

Якщо  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$  а  $m_y \neq 0$  то вираз (2.10) описує в узагальнено-релеєвський розподіл ймовірностей:

$$\omega(H) = \left( \frac{H}{\sigma^2} \right) \exp \left( -\frac{(H^2 + m_x^2)}{2\sigma^2} \right) I_0 \left( m_x \frac{H}{\sigma^2} \right), \quad (2.11)$$

(Де  $I_0$  - модифікована функція Бесселя нульового порядку) з моментами

$$m_k = (2\sigma^2)^{\frac{k}{2}} \Gamma\left(1 + \frac{k}{2}\right) {}_1F_1\left(-\frac{k}{2}; 1; \frac{m_Y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.12)$$

де  $\Gamma$  - гамма функція.

Або при  $m_x = m_y = 0$  рівняння (2.10) вироджується в так зване [36,37] підрелеєвський розподіл:

$$\omega(H) = \frac{H}{\sigma_X \sigma_Y} \exp\left[-\frac{H^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_X^2} + \frac{1}{\sigma_Y^2}\right)\right] I_0\left[\frac{H^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_X^2} - \frac{1}{\sigma_Y^2}\right)\right], \quad (2.13)$$

з першим моментом виду

$$m_1 = \sqrt{\frac{\pi \sigma_X \sigma_Y}{2}} P_{1/2}\left[\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}{2\sigma_X \sigma_Y}\right], \quad (2.14)$$

Де  $P_{1/2}$  - функція Лежандра першого роду і другий момент виду

$$m_2 = 4i \sqrt{\frac{\sigma_X^3 \sigma_Y^3}{\pi(\sigma_X^2 - \sigma_Y^2)}} Q_{-1/2}^{3/2}\left[\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}{\sigma_X^2 - \sigma_Y^2}\right], \quad (2.15)$$

де  $Q_{-1/2}^{3/2}$  - приєднана функція Лежандра другого роду.

В рамках цієї моделі, яка визначається виразами (2.10) - (2.15), коливання рівня і фази прийнятого системою сигналу аналогічні проходженню сигналу через чотирьох полюсник з комплексним коефіцієнтом передачі, випадкові зміни якого описуються чотирьох параметричний закон розподілу. Ортогональні компоненти такого комплексного коефіцієнта передачі є випадкові процеси, описувані двома гаусівськими розподілами з різними дисперсіями і середніми  $m_C$ ,  $m_S$ ,  $\sigma_C$ ,  $\sigma_S$ . Залежно від конкретних значень величин цих параметрів і виходять різні види розподілів.

Однак радіоканали мобільного зв'язку ММД має свої особливості, однією з яких є необхідність роботи систем з гостонаправленими антенами для компенсації сильного загасання сигналів ММХ при поширенні. Тому через вузькість діаграм спрямованості антен рухомі системи зв'язку на приймач може надходити тільки кілька променів поширювального сигналу, що дозволяє від складної чотирьох параметричної моделі каналу рухомого зв'язку,

що описується виразами (2.10) і (2.11), перейти до інженерної моделі, що використовується зазвичай при розрахунках систем зв'язку.

Для моделювання багатопроменевого поширення в присутності прямих радіовидимих між абонентами зазвичай використовується розподіл Релея [34], у великому відсотку часу (понад 60%) узгоджується з експериментальними даними. Його щільність розподілу ймовірностей описується виразом (2.12). Для математичного опису каналу прямої радіовидимості з прямим променем і декількома променями, що з'являються через відбиття від підстильної поверхні і місцевих предметів, часто використовують розподіл Райса [40].

$$\omega(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \exp(-A) I_0\left(\frac{x}{\sigma} \sqrt{2A}\right), \quad (2.16)$$

де  $A$  - відношення потужності регулярної складової рівня корисного сигналу до флюктууючої складової;

У цифровому зв'язку наявність глибоких і тривалих швидких завмирань викликає поява пакетів помилок, виправлення яких утруднено. Тому для опису радіоканалу ММД потрібно визначити імовірнісні та спектральні властивості цих завмирань і залежність їх характеристик від параметрів трас і систем зв'язку.

Для визначення тривалості таких завмирань використовують коефіцієнт кореляції обвідної, що характеризує взаємозв'язок змін рівня сигналу в різні моменти часу на різних частотах

$$\rho(\Delta t, \Delta f) = \frac{\overline{(s_1 s_2)} - (\overline{s_1})(\overline{s_2})}{\sqrt{[(\overline{s_1^2}) - (\overline{s_1})^2][(\overline{s_2^2}) - (\overline{s_2})^2]}}, \quad (2.17)$$

де  $s_1, s_2$  - амплітуди сигналів на відстані одна від одної частоти на величину  $\Delta f$  і віддалених один від іншого за часом на  $\Delta t$ .

Для рухомого абонента мобільної станції [36-38] пропонується апроксимація для коефіцієнта кореляції буде мати такий вигляд:

$$\rho(\Delta t, \Delta f) = \frac{I_0\left(\frac{2\pi V \Delta t}{\lambda}\right)}{1 + (2\pi \Delta f)^2 T_m^2}, \quad (2.18)$$

де  $I_0$  - функція Бесселя першого роду нульового порядку;

$V$  - швидкість переміщення абонента;



$T_m$  - середньоквадратичне відхилення часу приходу сигналу щодо її середнього часу приходу.

Вирази для коефіцієнта кореляції (2.17) і (2.18) визначають також інтервал частотної кореляції завмирань  $\rho(f)$ , тобто рознос частот, на якому коливання рівня прийнятих сигналів можуть вважатися не корелійними. Якщо смуга частот спектру сигналу більше, ніж  $\rho(f)$ , то завмирання з гладких, коли все частотні компоненти спектру інформаційного сигналу завмирають одночасно, перетворюються в селективно-частотні, коли різні частотні складові сигналу завмирають не одночасно. Це еквівалентно проходженню сигналу через лінійну ланцюг з нерівномірною частотною характеристикою, причому форма частотної характеристики безперервно змінюється.

Тривалість ТЗ швидких завмирань щодо деякого середнього рівня  $T_0 \cong \tau$  може бути апроксимована виразом [34]

$$T_3 = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi V}} \frac{\sqrt{2}\sigma}{T_0} \left[ \exp\left(\frac{T_0^2}{2\sigma^2}\right) - 1 \right], \quad (2.19)$$

При русі абонентів зв'язку середня частота завмирання може досягати одиниці герц, що значно впливає на достовірність передачі інформації, так як може призводити до пакетів помилок.

У ММД повинні використовуватися досить широкосмугові інформаційні сигнали і багатопримієвість може призводити і до селективно-частотним завмирань (СЧЗ). Основною причиною СЧЗ є тимчасове розсіювання приходу різних променів, внаслідок багатопримієвості поширення. Різниця фаз між компонентами однієї і тієї ж частоти, що поширюються по різних шляхах, можуть виявитися некорелійними для різних частот спектра, при цьому одні частотні складові посилюються, інші слабшають.

З виразу (2.18) при  $\Delta t = 0$  слід

$$\rho(\Delta f) = \frac{1}{1 + (2\pi\Delta f)T_m^2}, \quad (2.20)$$

Припустимо, що рівень кореляції між різними частотними складовими дорівнює 0,5, тоді інтервал частотної кореляції дорівнюватиме  $\rho(f) = 1 / (2\pi T_m)$ . На реальних трасах рухомого зв'язку значення  $T_m$  може змінюватися в широких межах, від сотих часток мікросекунди до десятків мікросекунд [35].

Тому значення інтервалу частотної кореляції може приймати будь-які значення від одиниць кілогерц до десятків мегагерц.

СЧЗ і багатопромінєвість в ММД призводять до розтягування за часом прийнятих символів, що викликає міжсимвольні інтерференцію (МСІ). Відстань по частотній осі між прямими і зворотними каналами в міліметровому діапазоні може значно перевищувати інтервал частотної кореляції, при цьому канал двостороння виявляється асиметричним, що ускладнює адаптивне управління системами зв'язку мобільних і базових станцій по зворотному каналу.

У радіоканалах покоління стільникового зв'язку 5G можуть спостерігатися і тимчасові завмирання [37]. Їх основною причиною є дуплерівські зміна частоти при русі абонентів зв'язку відносно один одного. Якщо мобільна станція переміщається, то через дуплерівського зсуву частоти сигнал зазнає спотворення, що призводять аналогічно багатопромінєвості до МСІ, негативно впливає на якість передачі цифрової інформації через можливе збільшення ймовірності помилок.

При наближенні абонентів зв'язку, зміна частоти визначиться виразом

$$f = f_0 \left( \frac{1 + \frac{U}{C}}{1 - \frac{V}{C}} \right) = f_0 \left( \frac{C + U}{C - U} \right), \quad (2.21)$$

де  $f_0$  - несуча частота системи зв'язку,

$U, V$  - швидкість руху приймача і передавача відносно один друга,

$C$  - швидкість поширення радіохвиль.

При видаленні абонентів один від одного дуплерівській зміні частоти визначається виразом:

$$f = f_0 \left( \frac{1 - \frac{U}{C}}{1 + \frac{V}{C}} \right) = f_0 \left( \frac{C - U}{C + U} \right), \quad (2.22)$$

Наприклад, для рухомих назустріч один одному автомобілів зі швидкістю кожного 90 км / год дуплексної частоти  $f$  (Д), при робочій частоті автомобільних радіостанцій в 100 ГГц, складе  $f$  (Д) = 16,7 кГц.

Величина дуплексного зсуву частот різна для різних кутів прийому  $\alpha$ , як показано на рисунку 2.3. Такий ефект називають дисперсією частоти або дуплексним розкидом і залежить він від величини кута прибуття радіохвилі  $\alpha$ .

Через дуплексний ефекту, спектр переданого сигналу піддається розширенню частоти протягом передачі інформації, який також залежить від кута приходу хвилі.

$$f_{\text{Дмакс}} = f_{\text{Д}} \cos \alpha, \quad (2.23)$$

Максимальна (або мінімальна при русі в зворотному напрямку) дуплексна частота досягається при  $\alpha_n = 0$  ( $\alpha_n = \pi$ ), як впливає з виразу (2.23).



Рисунок 2.3 – Кут прибуття радіохвилі -  $\alpha$

Багатопроменеве поширення в зв'язку з рухом приймача або передавача призводить до різких змін властивостей радіоканалу, що в свою чергу викликає глибокі і випадкові флуктуації сигналу. Завмирання сигналу до десятка децибел нижче середнього рівня сигналу можуть [37] відбуватися кілька разів в секунду, в залежності від швидкості переміщення мобільної станції. У міській зоні мобільного зв'язку спостерігається затінення прямий траси між базовою і мобільного станціями і стільниковий зв'язку в ММД здається неможливою через загасання радіохвиль в стінах будівель і інших перешкод. Однак при цьому навколо абонентів мережі 5G присутня велика кількість відбивачів сигналу, обумовлене різноманітністю міських об'єктів. Ці відбивачі створюють додаткові шляхи між передавачем і приймачем, що дозволяють оптимістично дивитися на можливості стільникового зв'язку в ММД хвиль. Але слід пам'ятати, що багатопроміневість призводить до МСІ і завмирань сигналу, хоча рівень будь-якого відбитого сигналу завжди менше рівня сигналу прямої радіовидимості.

## Висновки до розділу 2

1. Виявлено найбільш значущі причини ослаблення ММХ в радіоканалах.
2. Запропоновано статистичні моделі завмираних сигналів ММХ для наземних радіоканалів.

3. Визначено вирази для дуплерівських зрушень частоти в каналах ММД.
4. Отримано опис тривалості і частоти завмираних в каналах ММД.
5. Визначено залежність величини відбитої потужності від відстані до підстильної поверхні.
6. Вивчено причини ослаблення ММХ газами атмосфери, дощами, туманами, снігом, листям дерев, будівельними матеріалами та визначено методи обліку ослаблення сигналів ММХ через ці причини.

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

### 3 МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОКАНАЛУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ

#### 3.1. Розробка методики моделювання радіоканалу ММД

Для створення імітатора радіоканалу ММД необхідно вирішити цілий ряд завдань, виконуючи їх в певній послідовності. На підставі проведеного аналізу властивостей радіоканалів ММД і використовуючи отримані дослідниками різних країн теоретичні і експериментальні результати по поширенню радіохвиль міліметрового діапазону можна запропонувати наступний план створення методики імітації радіоканалів ММД:

- визначити ослаблення сигналів на різних частотах діапазону ММВ, що поширюються прямо не затіненим променем в нормальних атмосферних умовах;

- визначити значення поправочних коефіцієнтів, які враховують наявність в атмосфері гідрометеорів (туман, дощ, паморозь, сніг та ін.), з урахуванням насиченості ними атмосфери;

- визначити поправочний коефіцієнт через ослаблення ММХ при проходженні через лісові масиви;

- оцінити нерівність профіля траси зв'язку та визначити можливі точки відображення сигналів для типових профілів;

- визначити зрушення фаз інтерферуючих ММХ для різних точок відображення на трасі зв'язку;

- з урахуванням нерівності профілю траси визначити можливу кількість прийнятих променів поширювального сигналу ММД;

- визначити поправочні коефіцієнти ослаблення для різних відбитих променів сигналів ММД;

- визначити дуплексне зрушення частоти для мобільних абонентів, що рухаються з різними швидкостями;

- оцінити зміну всіх раніше знайдених залежностей при русі абонента зв'язку з різними швидкостями.

Відповідно до запропонованої методикою визначимо ослаблення сигналів на різних частотах діапазону ММХ, що поширюються прямо не затіненим променем в нормальних атмосферних умовах як функцію від відстані між приймальної і передавальної антен станцій ММД. Для цього знайдемо ослаблення сигналів ММД у вільному просторі і побудуємо його залежність від несучої частоти сигналу використовуючи вираз (1.2)

$$b = 20 \lg \left( \frac{4\pi R f}{c} \right), \quad (3.1)$$

де  $R$  - відстань між передавачем і приймачем,

$c$  - швидкість світла,

$f$  - несуча частота.

Результати розрахунку представлені на рисунку 3.6.

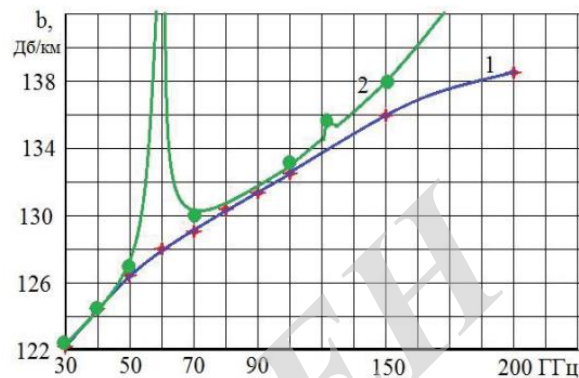


Рисунок 3.1 – Ослаблення ММХ в вільному просторі на відстані 1 км.

Атмосферні гази вносять поправку в графік і з урахуванням рис. 2.4 він перетвориться до виду, показаному на рис. 3.6 кривої 2. На частотах від 52 ГГц до 66 ГГц, і від 180 ГГц до 190 ГГц спостерігаються різкі збільшення коефіцієнта поглинання ММХ. Це пояснюється негативним впливом молекул кисню і молекул води, наявних в газах атмосфери.

Поправочні коефіцієнти, що враховують наявність в атмосфері гідрометеорів можна визначити, використовуючи вираз, отримане в роботі [6]. Порогове загасання в дощах розраховуємо за такою формулою:

$$b_D = K_D Y^\alpha, \quad \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right], \quad (3.14)$$

де  $Y$  - інтенсивність опадів, мм / год;

$K_D$  - параметр, що залежить від частоти, температури, поляризації дБч / м;

$\alpha$  - безрозмірний параметр, який також залежить від частоти, температури і поляризації.

Лінійна залежність між коефіцієнтом поглинання і інтенсивністю дощу, вираженої в мм / год, існує для всього діапазону сантиметрових і міліметрових хвиль. У логарифмічному масштабі ця залежність лінійна до частоти 20 ГГц, після чого переходить в область насичення.

Росія за класифікацією інтенсивності опадів відноситься до дощової зони Е. Дощові зони введені рекомендаціями МЕМ (Rec.ITU-R PN.837-1) і показують імовірність опадів різної інтенсивності і їх тривалість. Для Росії поправочні коефіцієнти розраховані за виразом (3.1) і приведені в таблиці 3.1. На частотах вище 100 ГГц спостерігається значне збільшення коефіцієнта поглинання через дощі. Особливо сильно це проявляється при зливових дощах з високою інтенсивністю опадів.

Слід зазначити, що на частотах 60 ГГц і 120 ГГц при помірній вологості атмосфери в земної поверхні повне ослаблення випромінювання ММХ в атмосфері в центрах ліній поглинання кисню може перевищувати 200 дБ. Це в свою чергу виключає можливість несанкціонованого прийому інформації з комічних апаратів.

Таблиця 3.1 – Імовірність опадів різної інтенсивності і їх тривалість

Частота, ГГц	Вісоток пори року, %	Інтенсивність опадів $Y$ , мм/ч	Затухання в дощ, $b_d$ , дБ/км
30	1	0,6	0,1
	0,3	2,4	0,43
	0,01	6,0	1,08
	0,003	12	2,18
	0,001	22	4,02
80	1	0,6	0,63
	0,3	2,4	1,84
	0,01	6,0	3,73
	0,003	12	6,35
	0,001	22	10,12
90	1	0,6	0,7
	0,3	2,4	1,99
	0,01	6,0	3,98
	0,003	12	6,7
	0,001	22	10,6

Ослаблення ММХ в тумані залежить від кількості води в його обсязі. Погоне ослаблення можна визначити [6] наступним виразом:

$$b_T = L_T V_T \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right], \quad (3.2)$$

де  $L_T$  - питома погонний коефіцієнт ослаблення,  
 $V_T$  - коефіцієнт вмісту води, який визначається по оптичній видимості.  
 Значення цих коефіцієнтів представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. – Погонне ослаблення в тумані

Величина $L_T$ при $18^\circ$ [дБм <sup>3</sup> /гкм]				
Частота, ГГц	30	42	60	150
$L_D$ , дБм/гкм	0,438	0,876	1,65	0,438; 7,14
Величина $V_t$ [ $r/m^3$ ]				
$V_t$ [ $r/m^3$ ]	0,2	0,5	1	2
Оптична видимість	200	80	50	30

Поглинання ММХ в снігу залежить від щільності снігу та його вологості. Сухий сніг впливає на загасання ММХ аналогічно дощів з інтенсивністю опадів не вище 0,5 мм / год, але мокрий сніг вже аналогічний за величиною інтенсивності дощу  $Y = 6,0$  мм / год.

Поглинання ММХ в листі можна оцінити за емпіричною формулою, наведеною в роботі [30]. Наприклад, ослаблення сигналу ММД при його поширенні через товщу листя що не перевищує 400 м можна оцінити по емпіричною формулою, наведеною в цій роботі

$$b_{л} = 0,2 f_0^{0.3} R^{0.6} \quad [\text{дБ}], \quad (3.3)$$

де  $f_0$  - частота, МГц;

$R$  - глибина перекриває шару листя, м.

При проходженні сигналів ММД через лісові масиви та рослинність спостерігається додаткове загасання ММХ, яке залежить від довжини траси в лісі і від виду рослинності. При сильному вітрі стандартне відхилення величини загасання збільшується. Розрахунок загасання від поглинання ММХ деревами наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок загасання від поглинання ММХ деревами

r, м	Затухання, дБ			
	f= 30	f= 50	f = 70	f = 90
25	30,4	35,4	39,2	42,3
50	46	53,7	59,4	64
75	58,6	68,3	75,5	81,5
100	69,9	81,4	90,0	97,1
150	89,1	103,8	114,8	124



Нерівність місцевості, де проходить траса зв'язку, впливає на можливе число відбитих від земної поверхні радіохвиль. При відображенні від землі енергія сигналу частково втрачається і ці втрати, що залежать від поляризації сигналу, можна визначити за допомогою коефіцієнта відбиття  $K$ .

Коефіцієнт відображення ММХ від земної поверхні визначається як

$$K = \frac{\sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma}}{\varepsilon}, \quad K = \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma}, \quad (3.4)$$

для вертикальної і горизонтальної поляризації відповідно. Тут  $\varepsilon = 15$  і це середня діелектрична постійна для землі або асфальту;  $J$  - кут падіння променя на поверхню, що відбиває.

Необхідно відзначити і те, що сигнали ММД погано проникають через тверді матеріали. У таблиці 3.4 наведені експериментальні дані [28] по загасання ММХ в будівельних матеріалах. Особливо сильно ослаблення сигналів ММД в цеглі і бетоні, що ускладнює використання ММХ для стільникового зв'язку і буде оснащення будівель репітерами і фемсотами.

Таблиця 3.4– Експериментальні дані по загасання ММХ в будівельних матеріалах

Коефіцієнт ослаблення ММХ в матеріалах $b_M$ , дБ				
Матеріали	Товщина, см	Частота, ГГц		
		3	40	60
Скло	0,4	6,4	2,5	3,6
Гіпсокартон	2,5	5,4	-	6,0
Дерево	0,7	5,4	3,5	-
ДСП	1,6	-	0,6	-
Штукатурка	1,5	-	2,9	-
Кірпіч	10	-	178	-
Бетон	10	17,7	175	-

Крім питань загасання сигналів ММД при поширенні необхідно визначити такі параметри як набіг фаз при багатопроменевому прийомі і зміна несучої частоти через дуплексний ефект при русі абонентів.

При багатопроменевому прийомі різниця фаз між променями в точці прийому визначиться як набіг фаз при поширенні сигналу по цим променям

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{4\pi h^2}{\lambda R} = \frac{4\pi h^2 f}{RC}, \quad (3.5)$$

де  $\lambda$  - довжина робочої хвилі абонентів,  $f$  - робоча частота,  $C$  - швидкість радіохвилі,  $R$  - відстань між приймачем і передавачем,  $h$  - висота від точки відображення сигналу до прямої лінії, що з'єднує антени передавача і приймача.

Середню тривалість ТЗ інтерференційних завмирань, що виникають через багатопромислові, щодо деякого рівня  $T_0$  можна визначити за допомогою наступного виразу [34]:

$$T_z = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi}V} \frac{\sqrt{2}\sigma}{T_0} \left[ \exp\left(\frac{T_0^2}{2\sigma^2}\right) - 1 \right], \quad (3.6)$$

Дуплексне зрушення частоти визначається виразом:

$$f = f_0 \left( \frac{1 + \frac{V}{C}}{1 - \frac{U}{C}} \right), \quad (3.7)$$

де  $f_0$  - несуча частота системи зв'язку,

$V, U$  - швидкість руху приймача і передавача відносно один одного,

$C$  - швидкість поширення радіохвиль.

При пішому русі абонентів назустріч один одному дуплексний набіг частоти не перевищить декількох тисячних часток відсотка, що практично не вплине на якість зв'язку. Але при русі абонентів на технічних засобах зі швидкостями сучасних автомобілів і потягів дуплексним ефектом можна нехтувати. Розглянемо вплив швидкості пересування РА на зміну частоти прийнятого абонентами сигналу.

Припустимо, що абоненти рухаються зустрічно відносно один одного, а їх радіостанції працюють на частоті  $f_0 = 28,5$  ГГц. Результати розрахунку, в залежності від сумарної швидкості руху абонентів, наведені в табл.3.5.

При русі абонентів в протилежні сторони один від одного знак відходу частоти зміниться на протилежний.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку, в залежності від сумарної швидкості руху абонентів

Загальна швидкість руху ПА	Дуплексний вихід частоти від $f_0$
100	2,64
140	3,7
180	4,8

## Продовження таблиці 3.5

220	5,8
260	6,86
280	7,39

З наведеного прикладу видно, що при русі абонента зі швидкістю понад 200 км / год догляд частоти перевищує  $\pm 5,0$  кГц і приймач повинен мати або високошвидкісну систему автопідстроювання частоти гетеродина, або смугу пропускання розширену на 10,0 кГц.

Величини затухання сигналів ММХ при поширенні, певні виразами (3.1) - (3.4) дозволяють оцінити ослаблення сигналу для трас різної протяжності з різними кліматичними і географічними умовами.

### 3.2 Модель передавальної функції радіоканалів ММД для стаціонарних ліній зв'язку

Для побудови імітатора радіоканалу міліметрового діапазону слід вирішити питання про необхідну кількість модельованих променів поширення сигналу. Це кількість модельованих траси поширення.

Однак застосування технології просторового кодування ПОВЗ (Multiple Input Multiple Output), використовуваної в групі стандартів IEEE 802.11 і стандарті IEEE 802.16, визначила обов'язкову багатоканальну архітектуру імітатора радіоканалів мережі 5G, з можливістю зміни кореляції сигналів в каналах рознесення. Управління кореляційними зв'язками каналів рознесення необхідно, так як якщо на базових станціях можливо просторове рознесення каналних антен системи ПОВЗ на відстані в десятки разів перевищує робочі довжини ММХ, то у абонента такої можливості найчастіше немає і сигнали різних променів просторового рознесення будуть в якійсь мірі корельовані. Причому ступінь кореляції буде залежати не тільки від того, що розносить антена в приймальному пристрої абонента, а й від виду застосовуваного просторово-часового кодування переданих сигналів в використовуваній системі ПОВЗ. Спираючись на проведений вище аналіз для плоскої поверхні, що підстилає можна запропонувати модель каналу, що складається з декількох променів, причому прямий промінь від антени передавача до антени приймача буде мати максимальну амплітуду і на фіксованій відстані буде забезпечувати постійний рівень напруженості поля. Для рухомого абонента, що рухається в сторону випромінюючої станції, амплітуда напруженості поля від прямого променя буде рости за квадратичним законом в залежності від відстані, або

спадати з цього ж закону при видаленні абонента від базової станції. Моделі нерухомого щодо базової станції абонента і рухомого будуть істотно відрізнятися як за рахунок зміни поглинання при зміні відстані, так і з-за флуктуацій відбитих сигналів і виникнення дуплексних зрушень частоти при русі абонентської станції. Амплітуда і фаза сигналів, відбитих від підстильної поверхні, буде підкорятися випадковим законам з дисперсією, пропорційною величиною площі відображення міліметрової хвилі. Так як для ММД розміри поверхні, що відбиває в усіх напрямках практично завжди перевищують довжину хвилі і кількість відбивачів велика, то відповідно до Центральної граничною теоремою в разі великої кількості відбивачів сумарний сигнал одного променя поширення, для нерухомого щодо базової станції абонента, буде прагне до нормального закону з дисперсією, пропорційною розмірам відбитої поверхні

$$\omega(H) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.8)$$

де  $m$  - математичне сподівання,  
 $\sigma^2$  - дисперсія.

У променях ММХ, що приходять до приймача через відбиття від місцевих предметів загасання збільшується пропорційні зміні коефіцієнта відбиття від даної поверхні і якщо моделювати окремо відображені промені поширення ММХ, то це необхідно враховувати. Інший і більш зручний варіант моделювання полягає в тому, щоб врахувати вплив відбитих променів на якість передачі інформації інтегрально, звівши їх вплив до змін передавальної функції каналу зв'язку. Вираз (3.8) описує передавальну функцію суми відображених сигналів при абсолютній нерухомості БС і АС відносно один одного.

Однак в міліметровому діапазоні це практично не дотримується через малі розміри точок відображення, коливань антен БС від вітру і незначних переміщень АС. Застосування в системі зв'язку технології ПОВЗ робить систему n-променевої, а при неповною кореляції між каналами ПОВЗ передавальна функція кожного променя буде флуктувати і підкорятися випадковим законом.

Якщо на трасі зв'язку є багато відбивачів сигналів ММХ, то модель каналу для нерухомого абонента ускладнюється і її можна представити n променями поширення, передавальні функції кожного з яких піддані ослабленим, які визначаються виразами (3.1-3.4) і флуктують за випадковим законом. Але в міліметровому діапазоні нерухомим канал зв'язку з точністю до міліметрів буває рідко і точки відображення сигналу постійно зміщуються.

Це наближає до моделі точкових розсіювачів [26] і багатопараметричному закону розподілу ймовірностей.

Таким чином детерміновану складову передавальної функції радіоканалу ММД можна описати таким чином

$$H = 20 \lg \left( \frac{4\pi R f_0}{C} \right) + kR(K_D Y^\alpha + L_T V_T) + 0,2 f_0^{0,0143} r^{0,6} \text{ [дБ]}, \quad (3.9)$$

де  $R$  - відстань між передавачем і приймачем, м,

$C$  - швидкість світла, м / с;

$f_0$  - несуча частота, Гц;

$Y$  - інтенсивність опадів, мм / год;

$K_D$  - параметр, що залежить від частоти, температури, поляризації дБгод / м<sup>2</sup>;

$\alpha$  - безрозмірний параметр, який також залежить від частоти, температури і поляризації;

$L_T$  - питома погонний коефіцієнт ослаблення ММХ в тумані;

$V_T$  - коефіцієнт вмісту води в атмосфері, який визначається по оптичній видимості;

$r$  - глибина перекриває шару листя, м,

$k$  - коефіцієнт, який визначає наявність або відсутність опадів.

З огляду на близькість моделі радіоканалу ММД до моделі точкових розсіювачів [26], передавальну функцію каналу ММХ навіть при нерухомому абонента в загальному випадку можна уявити випадковим процесом, що описується чотирьох параметричним розподілом ймовірностей, параметри якого при  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$  від 60 до 70 відсотків часу сеансу зв'язку зводять чотирьох параметричний розподіл ймовірностей [37] до релейського закону. Від 30 до 40 відсотків часу сеансу зв'язку щільність.

Розподіл ймовірностей передавальної функції каналу можна приблизно порівню [37] поділити між усічено-нормальним розподілом, узагальнено-релейському розподілом ймовірностей, які визначаються виразами і підрелейським розподілом, визначеним виразами

Таким чином імітація стаціонарного радіоканалу з прямим і декількома відбитими променями на шляху від БС до нерухомої абонентської станції (АС) зводиться до побудови  $n$ -променевого комплексу, в якому кількість променів  $n$  визначається використовуваною системою ПОВЗ, а в кожному промені на час сеансу зв'язку формується передавальна функція, що описується чотирьох параметричним розподілом ймовірності

$$\omega(H) = \frac{H}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_x^2 \sigma_y^2 + m_y^2 \sigma_x^2}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) * \quad (3.10)$$

$$* \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{S=0}^{\infty} \frac{(2k + 2S - 1)! (\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^k m_y^{2S} \sigma_x^{2S}}{k! (2S)! 2^k \sigma_y^{2k+4S} m_x^{k+S}} H^{k+S} I_{k+S}\left(\frac{m_x}{\sigma_x} H\right),$$

де  $H$  - модуль передавальної функції каналу зв'язку;

$I_{k+S}(z)$  - модифікована функція Бесселя порядку  $k + s$ ;

$\sigma_x, m_x, m_y, \sigma_y$  - параметри чотирьох параметричного розподілу.

Статистика завмирання в різних модельованих променях комплексу повинна в зазначені вище відсотки часу сеансу зв'язку відповідати приватним випадкам розподілу ймовірностей вираження (3.5), що визначаються параметрами  $\sigma_x, m_x, m_y, \sigma_y$ , а саме - релейському, узагальнено-релейському, усічено-нормальному і підрелейському розподілів ймовірностей. При цьому модельованні передачі інформації від БС до АС статистика завмирань в різних променях комплексу повинна бути некорельованою, а при передачі інформації від АС до БС можлива кореляція завмирань в різних променях комплексу, ступінь якої визначається реалізацією ПОВЗ в абонентській станції.

У разі використання комплексу імітації радіоканалу для верифікації приймально-передавальної апаратури в кожен імітований промінь поширення має також вноситися ослаблення сигналу, яке визначається дальністю модельованого інтервалу зв'язку, можливими кліматичними і географічними умовами на моделюваній трасі і характеристиками використовуваного просторового кодування сигналів. Тому комплекс імітації радіоканалів повинен включати в себе керований атенюатор, що дозволяє моделювати ослаблення сигналів відповідно до виразами (1.2-2.5, 3.4, 3.6) і параметрами з таблиць, враховують ослаблення сигналів ММД в реальному середовищі поширення.

### 3.3. Модель передавальної функції радіоканалів ММД для мобільних ліній зв'язку

Як вже зазначалося для рухомого абонента (РА), що рухається в сторону випромінюючої станції, амплітуда напруженості поля від прямого променя буде рости в залежності від відстані, або спадати при видаленні абонента від базової станції відповідно до вираження (3.2). Крім цього на передавальну функцію будуть накладені обмеження, які визначаються виразами (3.3-3.6). Це

визначить детерміновану складову ослаблення передавальної функції каналу ММД, описувану виразом (3.7). Але також як і при нерухомому абоненті є і більш складна випадкова складова.

Так як в ММД через малі довжин хвиль відбита поверхня являє собою безліч елементарних відбивачів, то при русі абонента кожен відбитий сигнал є сумою безлічі сигналів з різними фазами і амплітудами, що змінюються по випадковим законам.

Альbedo земної поверхні залежить від кутів падіння хвилі, тому результуюче відбиття від підстильної поверхні або від місцевих предметів сигнал ММХ в результаті має змінюватися при русі абонента по випадковим законам амплітуд і фаз, характер флуктуацій яких відповідає теорії розсіювання сигналів на точкових неоднорідних розсіювачах. Тому передавальні функції каналів з розсіюванням і з множинними відображеннями з мінливими характеристиками практично збігаються, що неодноразово підтверджувалося аналітично і експериментально [36-38].

Крім прямого і відбитих променів через розсіювання хвиль в атмосфері виникає і енергетично найслабший промінь, який теж буде підкорятися випадковим законом з дисперсією, яка залежить від кількості розсіювань неоднорідностей в атмосфері на трасі поширення сигналу. Оскільки відображають властивості розсіювання середовища безперервно змінюються, то таким умовам також задовольняє [37] чотирьох параметричний розподіл передавальної функції каналу. Однак в міліметровому діапазоні дальність зв'язку невелика і антени мають порівняно високу спрямованість, що обмежує область випромінювання сигналів в атмосфері, тому сигналу ми через атмосферного розсіювання при імітації радіоканалів ММД можна без відчутного збитку знехтувати.

Якщо профіль траси призводить до явно вираженої багатопроминевості через горбисту місцевість або через нерівномірне забудови вулиці, то можна запропонувати модель каналу з безлічі  $n$  променів МІМО, серед яких можуть бути, або можуть бути і відсутніми, промені прямої радіовидимості між БС і РА.

Кожен промінь зазнає ослаблення відповідно до вираження (3.6) і флуктуація відповідно до виразами (2.8-2.15). Так як загасання сигналу ММХ залежить від відстані між абонентами, то рівень одиночного сигналу, відбитого від підстильної поверхні і від місцевих предметів, буде завжди (3.5) слабкіше рівня сигналу прямої радіовидимості. Однак при ММХ площа відображення практично завжди перевищує апертури антени приймача, тому сумарний рівень відображених сигналів може перевершувати рівень сигналів прямої радіовидимості.

У зв'язку з викладеним вище для променів ММХ при рухомому абоненті можна вибрати модель каналу з розсіюванням, диференціальне розподіл модуля передавальної функції якої, що характеризує завмирання амплітуди і фази поширюються по технології МІМО сигналів, можна описати чотирьох параметричним законом розподілу ймовірностей) з розподілом відсотків часу сеансу зв'язку відповідно до окремими випадками чотирьох параметричного розподілу ймовірностей.

Необхідно також врахувати той факт, що при русі абонента виникають дуплерівські зрушення частоти. І якщо щодо станції змінюються кути прийому  $\alpha$  відбитих сигналів, то через дуплерівського ефекту відповідно за виразами буде змінюватися частота радіосигналу і спектр сигналу піддається дуплерівському розкиду частоти під час передачі інформації, величина якого залежить від зміни кутів приходу хвиль і швидкості пересування АС.

Нехтувати дуплексним розширенням спектра можна, так як у мобільному зв'язку швидкості пересування, особливо абонентських станцій ІоТ, безперервно ростуть і навіть при міських обмеженнях на швидкість пересування дуплексного зрушення частоти складають десятки кілогерц. Розрахуємо і зведемо в таблицю 3.6 можливі відходи частоти через дуплексне розширення спектра при русі АС і БС відносно один одного зі швидкостями  $V$  при робочій частоті системи зв'язку 100 ГГц.

Таблиці 3.6.

АС, БС	Пішохід	Автомашина	Поїзд
$V$ , км/ч	5,0	90,0	200,0
$\Delta f$ , кГц	0,93	16,7	37,0

Як впливає з таблиці 3.6, при стабільності частоти радіостанцій ММД  $\Delta f/f = 10^{-5} - 10^{-7}$  дуплексними зрушеннями частоти нехтувати не можна. Тому при імітації радіоканалів ММД частот рухомого зв'язку, поряд з ослабленням сигналу в кожному промені поширення відповідно також моделювання завмирання через інтерференції сигналів впливає на сигнал, що приймається з метою розширення його спектру.

Таким чином модель кожного променя передавальної функції рухомого радіоканалу ММД повинна складатися як мінімум з трьох модулів, імітаційного в залежності від властивостей каналу, швидкості пересування абонентів і характеристик апаратури:

- ослаблення сигналів на трасі зв'язку;
- інтерференційні завмирання сигналів на антенах МІМО;
- дуплексне розширення спектра сигналів.



При русі абонентів ослаблення сигналів залежить від відстані, тобто при зближенні абонентів сигнал послаблюється менше. Але у відбитих променів буде при цьому зростати кут падіння хвилі на поверхню, що відбиває, що призведе до ослаблення відбитої складової сумарного сигналу на входах антен. Використовуючи вираз (3.8) для визначення ослаблення сигналу в різних променях поширення ММХ цей факт необхідно враховувати.

### Висновки до розділу 3

1. На підставі проведеного аналітичного огляду відомих моделей радіоканалів для створення імітатора радіоканалів ММД обрана модель каналу як сукупність безлічі радіохвиль, що прийшли до приймача від передавача за прямим і по ламаним маршрутами після віддзеркалень від будівель, місцевих предметів і від підстильної поверхні.

2. Запропоновано методику моделювання радіоканалів ММД, заснована на імітації реальних змін сигналів при розповсюдженні по каналах ММД.

3. На основі відомих аналітичних і експериментальних даних визначено вираження і систематизовані коефіцієнти і обмеження для імітації послаблень сигналів в радіоканалах ММД через кліматичні і географічних характеристик модельованих трас зв'язку.

4. Синтезовано вираз для постійної складової ослаблення сигналів в радіоканалах ММД в залежності від кліматичних умов на трасі зв'язку.

5. Запропоновано модель передавальної функції радіоканалів ММД для рухливих абонентів.

## 4 РЕАЛІЗАЦІЙНА ОСНОВА ІМІТАТОРІВ РАДІОКАНАЛІВ ММД

### 4.1. Розробка загальної структури комплексу імітації радіоканалів ММД

Поширення ММХ відбувається за законами близькі до оптичних. Так як в ММД через малі довжин хвиль відбиває поверхня являє собою безліч елементарних відбивачів, то кожен відбитий сигнал є сумою безлічі сигналів з різними фазами і амплітудами, змінюються по випадковим законам. Результуючий відбитий від підстильної поверхні або від місцевих предметів сигнал ММХ в результаті має змінюватися при русі абонента по випадковим законам амплітуд і фаз, характер флуктуацій яких визначається передавальною функцією каналу. Математична модель передавальної функції каналу ММД, містить детерміновану (3.8) і стохастичну (3.9) складові, що дозволяють моделювати ослаблення сигналу ММХ в атмосфері з заданими характеристиками при русі абонента в умовах прийому прямого і відбитих сигналів.

Детермінована складова визначається відомими апріорі даними, такими як: протяжність моделювання траси, її профіль, наявність відбивачів сигналу, швидкість пересування абонента щодо базової станції, робоча частота, яку займає смуга частот і т.д. Імовірнісна складова передавальної функції каналу визначається багатопроменевим поширенням сигналів міліметрового діапазону (ММД), наявністю безлічі точкових відбивачів сигналу і інтерференцією прийнятих сигналів на вході приймача. Технологія просторового кодування ПОВЗ (Multiple Input Multiple Output), яка використовується в групі стандартів IEEE 802.11 і IEEE 802.16, визначає багатоканальну архітектуру імітатора радіоканалів мереж ММД, з можливістю зміни кореляції сигналів в каналах рознесення. Необхідність управління кореляційними зв'язками каналів рознесення обумовлюється тим, що на базових станціях можливо просторове рознесення каналних антен системи ПОВЗ на відстані в десятки разів перевищує робочі довжини ММХ, а у абонентських станцій такої можливості найчастіше немає і сигнали різних променів просторового рознесення будуть частково корельовані. Причому ступінь кореляції буде залежати не тільки від ступеня рознесення антен ПОВЗ, а й від виду застосовуваного просторово-часового кодування переданих сигналів у використовуваній системі ПОВЗ.

Грунтуючись на розробленій математичній моделі радіоканалів ММД в імітаторі кожен імітованим канал рознесення повинен містити регульовану лінію затримки (РЛЗ), визначальну час проходження ММХ по конкретному променю і його зміна при русі абонента. Для імітації відбитих від підстильної

поверхні і від місцевих предметів променів в каналах імітатора в структурі імітатора необхідно передбачити керовані фазообертачі (ФБ), що імітують флуктуації фази ММХ при відображеннях і зміна фази при русі абонента для моделювання ослаблення сигналів у відповідності з виразом (3.8) і флуктуацій передавальної функції радіоканалу кожен канал імітатора повинен містити керовані атенюатори ( $At$ ), а для моделювання дуплексного зсуву частоти при русі абонента пристроя частотного зсуву (ПЧС).

У кожному каналі імітатора повинна бути система управління ( $SU_i$ ), що дозволяє встановлювати значення параметрів РЛЗ, ФБ,  $At$ , ЧС і міняти їх за даною програмою випробувань, що враховує профіль траси, параметри пересування абонента щодо базової станції, що використовується тип ПОВЗ і його характеристики. Так як сигнали управління простіше реалізувати в цифровій формі, то перед кожним керованим каскадом необхідно поставити цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП).

Таким чином комплекс імітації радіоканалів (КІМ) ММД повинен містити два модуля:

- модуль імітації (МІ) зміни станів передавальної функції радіоканалу через ослаблення сигналів і їх флуктуацій при поширенні;
- модуль управління (МУ), що задає необхідні параметри для моделювання параметрів траси зв'язку і конкретних умов при поширенні сигналу.

Структурну схему одного променя поширення сигналу, що визначається системою МІМО, можна запропонувати у вигляді, показаному на рис. 4.1.

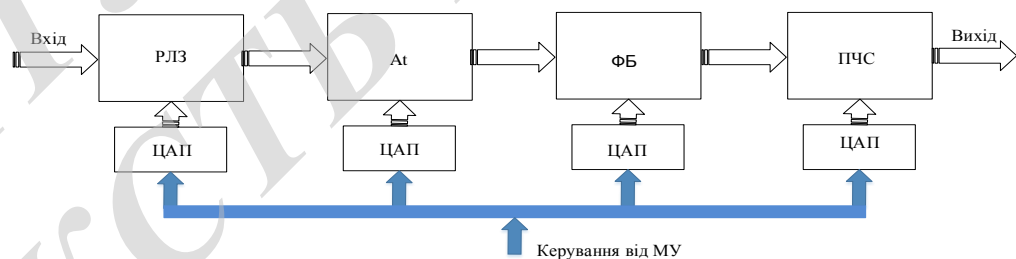


Рисунок 4.1 – Структурна схема імітатора одного променя поширення радіосигналу по каналах ММД

Кількість  $n$  каналів імітатора в модулі МІ, що моделюють промені поширення, а також входів і виходів модуля МІ, визначається числом антенних випромінювачів системи МІМО передавача і приймача лінії зв'язку. Апаратна реалізація всіх каналів імітатора однотипна, а відмінності полягають в значеннях величин сигналів управління, які формують впливу на сигнал ММХ відповідно до вираження (3.6) при русі абонента щодо базової станції.

Модуль управління можна запропонувати на основі програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС), керованої через контролер (К) від персонального комп'ютера (ПК). При цьому ПЛІС повинна мати пам'ять (ОЗП) для можливості введення мінливих параметрів. В такому випадку структурна схема модуля управління буде мати вигляд, показаний на рис.4.2.

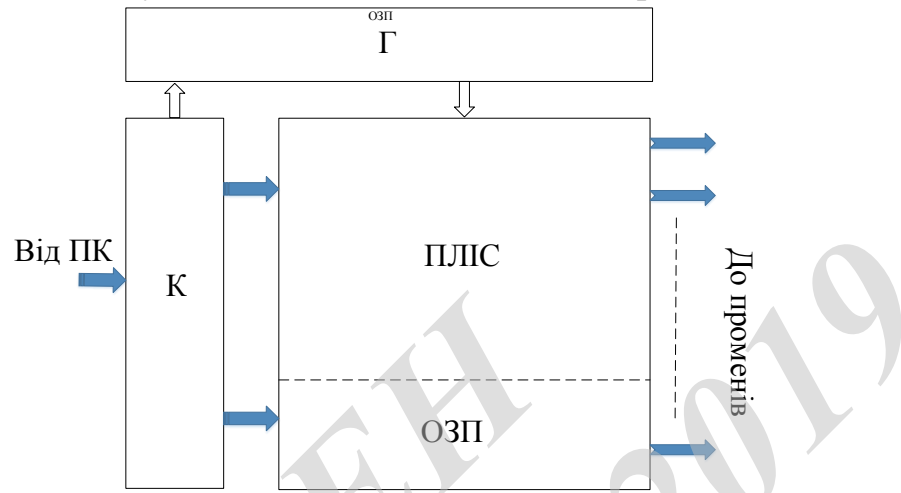


Рисунок 4.2 – Структурна схема модуля управління

Слід зазначити, що при побудові імітатора, що працює на частотах діапазону ММХ, виникнуть труднощі зі створенням широкосмугових вузлів модуля імітації - РЛЗ, ФБ, Ат, ПЧС, однак таке виконання імітатора дозволить використовувати його не тільки для відпрацювання нових технічних рішень пристроїв міліметрового діапазону, а й для проведення технічного контролю вироблених систем передачі інформації ММД, в тому числі нового покоління стільникового зв'язку 5G.

Можна запропонувати схему для використання розроблюваного імітатора радіоканалів ММД з метою технічного контролю апаратури системи зв'язку міліметрового діапазону покоління 5G. Для цього потрібно ввести в схему пристрій контролю (КК), що порівнює переданий і прийнятий інформаційні сигнали. КК повинно визначати відсоток помилок після проходження сигналу через імітатор і виводити результат дослідження на друк.

Структурна схема стенду для проведення технічного контролю приймально-передавальної апаратури наведена на рис. 4.3.

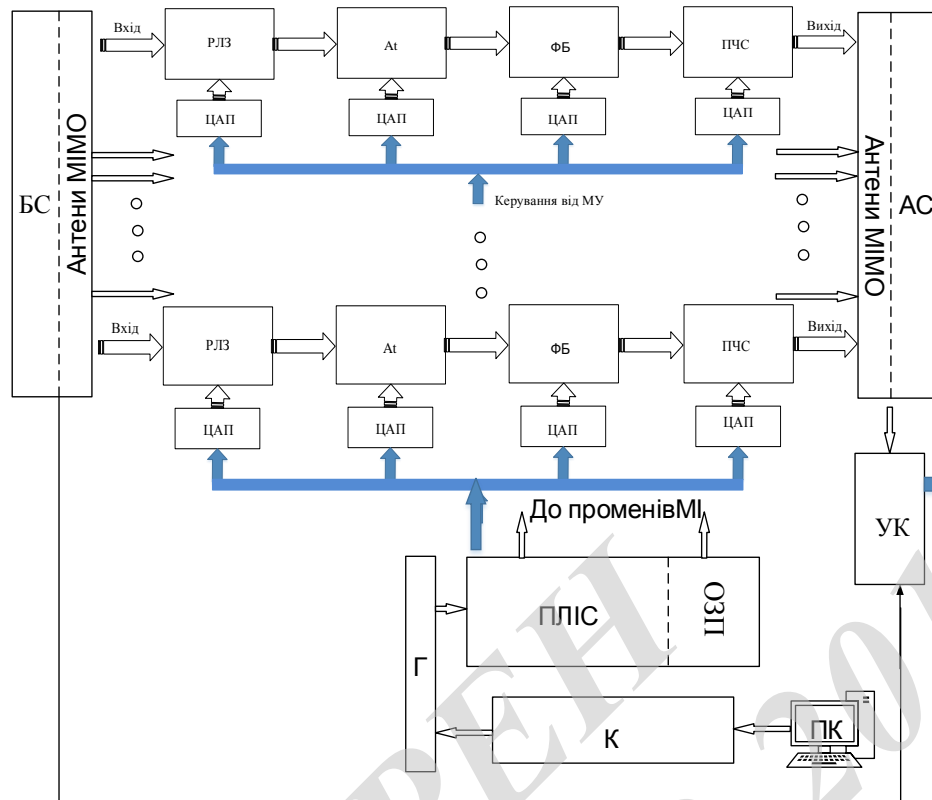


Рисунок 4.3 – Структурна схема стенду для проведення технічного контролю апаратури покоління 5G

При технології MIMO системи покоління 5G мають десятки і навіть сотні рознесених по будь-якою ознакою каналів передачі сигналів. Надмірність при цьому може здійснюватися різними способами - за простором, частоті, часу, поляризації, або структурі сигналу [21].

Якщо імітувати властивості каналів мобільного зв'язку інтегровано, то за рамками можливостей таких імітаторів залишаються не тільки антени MIMO, але і все обладнання, що здійснює в системах зв'язку просторове кодування сигналів. Тому бажано для систем мобільного зв'язку, що використовують технологію MIMO, імітатор реалізувати багатоканальним із загальною системою управління для всіх каналів і уніфікованим обладнанням в самих модельованих каналах. При імітації впливів на сигнали ММД зустрічаються проблеми, які накладають обмеження на можливості комплексу імітації радіоканалів ММД. Одна з таких проблем пов'язана з необхідністю всіх пристрої імітатора променя поширення ММХ, показаного на рис. 4.1, виконувати ширококутовими. У імітаторах сантиметрового діапазону частот від цієї проблеми позбуваються виконуючи імітатор на проміжній частоті [18] в 70 МГц. Імітатор ММД на таких частотах будувати не можна, так як на проміжних частотах в десятки мегагерц порівняно вузькі смуги пропускання

тракту обмежать можливість налагоджувати і відчувати високошвидкісне устаткування покоління 5G.

Рішення такої проблеми можливе шляхом вибору проміжної частоти і побудови імітатора з широкою смугою пропускання в найбільш освоєній ділянці спектра ММД 17 - 27 ГГц і спектра частот випробовуваних систем ММД в цей частотний інтервал. Зупинимося на цьому варіанті реалізації імітатора радіоканалів ММД і розглянемо можливості побудови основних вузлів імітатора.

## 4.2. Розробка імітатора поширення сигналів ММД

### 4.2.1. Імітатор дуплексного зсуву частот

Якщо вибрати в якості еквівалента проміжних частот, найбільш освоєний ділянку спектра ММД, то на входах і виходах імітованих променів поширення сигналів ММХ (рис. 4.1) буде потрібно встановити змішувачі (СМ), керовані синтезатори частот (СЧ), і фільтри (Ф) на смугу пропускання 17-27 ГГц. При цьому модель променя поширення ММХ перетвориться до виду, показаному на рис. 4.4, і фактично стане імітатором радіоканалу на проміжній частоті з пропускнуою здатністю в 10 ГГц, достатньої для вивчення механізмів і систем покоління мобільного зв'язку 5G.

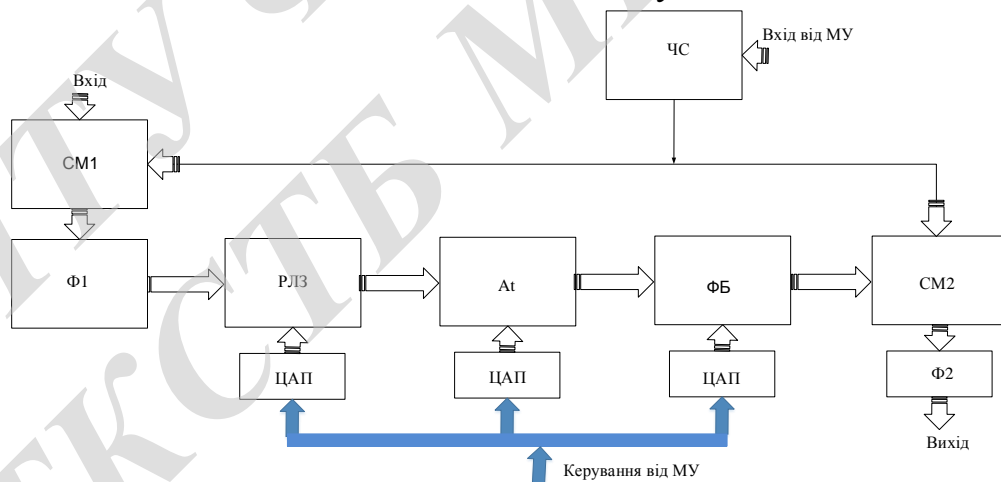


Рисунок 4.4 – Імітатор променя поширення ММХ на проміжній частоті

Оскільки сигнали від синтезатора частот в схемі на рис. 4.4 надходять в тракт імітатора променя поширення з різними знаками, то помилки по стабільності частоти синтезатора частот не впливатимуть на частоти дослідженого сигналу ММХ.

Важливе значення пропонованої схеми ще полягає в тому, що з її допомогою порівняно просто імітувати дуплексне зрушення частот при випробуваннях мобільних систем. Для цього зі схеми, запропонованої на рис. 4.1, потрібно виключити пристрій зсуву частот і керуючий їм ЦАП. Для моделювання дуплексного розширень спектра досить організувати невеликий крок перебудови частоти у синтезатора і управляти синтезатором частоти від модуля управління.

Як синтезатора частоти можна вибрати синтезатор серії SPS 50, виробництва ТОВ Спектран [30]. Вихідні сигнали SPS 50 при необхідності множаться по частоті широкосмуговим помножувачем частоти, наприклад типу 7009 виробництва НДПП "Кварц" [26]

Параметри синтезатора SPS 50 наведені в додатку П2. SPS 50 зручний ще тим, що має програмований блок управління з зовнішніми інтерфейсами RS232, USB, SPI, LAN, що дозволяє моделювати дуплексні зрушення частоти.

#### 4.2.2. Імітатор загасання ММХ при поширенні

Моделювати загасання сигналів ММХ в пропонованій на рис. 4.4 схемі призначений керований атенюатор  $A_t$ . Цей вузол повинен відповідно до вираження (3.6), і в залежності від величин, що вводяться в модуль управління (МУ) параметрів, (таких як:  $R$  - відстані між передавачем і приймачем,  $C$  - швидкості світла,  $f_0$  - частоти несучої,  $Y$  - інтенсивності опадів,  $K_d$  - параметра, що залежить від частоти, температури і поляризації,  $\alpha$  - безрозмірного параметра, також залежить від частоти,  $L_T$  - коефіцієнта ослаблення ММХ в тумані,  $V_T$  - коефіцієнта вмісту води в атмосфері,  $r$  - глибини перекриття шару листя,  $k$  - коефіцієнта, що визначає наявність або відсутність опадів) забезпечувати ослаблення випробовуваних сигналів ММД.

Такі атенюатори розроблені і випускаються серійно цілою низкою вітчизняних і зарубіжних фірм і підприємств [13], такими, як наприклад: НПП Исток, НПФ Микран, ВАТ Тантал, ЗАТ ВЧ технології, ННПП Кварц, United Monolithic Semiconductors, Analog Devices, Herley General Microwave, Rogers Corporation та інші. Наприклад, тільки фірма Analog Devices випускає, як показано в таблиці 13, цілу лінійку керованих напругою СВЧ аналогових і цифрових атенюаторів. Фазообертачі, вироблені різними компаніями використовуються для повороту фази сигналів діапазонів ВЧ, СВЧ і міліметрових хвиль без зміни їх амплітуди. Цифрові СВЧ атенюатори забезпечують менше загасання і вимагають спеціалізованого інтерфейсу, тому при побудові комплексу імітації поширення радіосигналів ММД можна застосовувати аналогові керовані атенюатори.

Відповідно до виразом (3.5) можна вибрати [9] керовані атенуатори типу НМС985ALP4KE, що включаються послідовно при необхідності ослаблення сигналів випробовуваних пристроїв більш ніж на 33,0 дБ.

Таблиця 4.1 – Антени розроблені фірмою Analog Devices

Тип	$F_{\min}$ , ГГц	$F_{\max}$ , ГГц	Втрат и, дБ	Послаблення мін, дБ	Послаблення мах, дБ	Керуванн я, дБм
НМС985AL4 KE	10	40	3,4	3	33	33
НМС985A- Dia	20	50	4.8	-	-	33
НМС812A	5	30	2	3	33	32
НМС712A	5	26	3,5	2,1	31	32

#### 4.2.3. Імітатор фазових флуктуацій ММХ при поширенні

Для імітації змін фази відбуваються в радіоканалах ММД сигналів потрібно використовувати керовані СВЧ фазовращатели і фазові модулятори. Ці пристрої, широко описані в світовій літературі [94-100], як і керовані атенуатори, також є серійними виробами багатьох вітчизняних і зарубіжних фірм. Наприклад японська фірма Waka серійно виготовляє керовані фазообертачі, фазові тримери, фазові коректори, вимірювальні фазообертачі і фазові системи працюють в діапазоні до 60 ГГц. Керовані фазообертачі широко в техніці радіолокації і радіонавігації де їх застосовують для управління діаграмою спрямованості фазованих антенних решіток.

У сучасній техніці використовують декілька типів регульованих фазообертачів: на феритових пристроях, на р-і-п діодах, на польових транзисторах, на основі мікроелектромеханічних системах (МЕМС), на сегнетоелектриках. Всі вони мають свої переваги і недоліки. Наприклад, електрично керовані фазообертачі на феритових пристроях вимагають великої потужності управління вимірюваної у ВАТ. Регульовані фазообертачі на напівпровідниках на частотах міліметрового діапазону мають відчутні втрати і істотно за цим параметром поступаються фазообертачам на МЕМС, які вносять малі втрати в діапазоні частот до 100 ГГц, але мають запізнювання по спрацьовуванню більше 10 нс.



Кращі результати за часом спрацьовування, по споживанню енергії і низьким фазовим шумів мають [15-17] керовані фазообертачі на сегнетоелектриках, але вони поки не випускаються серійно для СВЧ додатків. Для імітатора фазових флуктуацій можна вибрати вітчизняний хвилеводний фазовий модулятор на р-і-n діодах, що реалізовується на основі МЕМС. Можна вибрати і цифровий керований фазообертач, вироблений фірмою G.T. Microwave Inc., параметром якого наведені в таблиці 4.1.

Можливість фазового модулятора змінювати фазові зрушення аж до  $360^\circ$  дозволяє з його допомогою вносити фазові спотворення як через постійні фазових зрушень, так і з-за змінних, відповідно до вираження (2.7). Таким чином можна моделювати як запізнювання променів поширення, так і фазові завмирання внаслідок інтерференції безлічі сигналів при відображенні ММХ від шорсткою підстильної поверхні.

Таблиця 4.2 – Характеристики виробленого фірмою G.T. Microwave Inc. цифрового фазообертача.

Електричні характеристики цифрових фазообертачів до $360^\circ$						
Діапа-зон частот, ГГц	Динамічний діапазон	Максимальна фазова помилка	Максимальна амплітуда	Максимальна втрата	Коефіцієнт напруги стоячої хвилі	Вхідна потужність
16-27	$360^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 2.0$ дБ	16.0 дБ	2.0/1	15 Вт

#### 4.2.4. Імітація запізнених сигналів відбитих променів ММХ

Кожен канал рознесення в імітаторі радіоканалів ММД повинен містити регульовану лінію затримки (РЛЗ), визначальну час проходження ММХ по конкретному променю і його зміна при русі абонента.

Для імітації керованої затримки сигналів можна використовувати різні технології. Відомо [18-19] кілька схем організації РЛЗ на основі мікроелектромеханічних систем (МЕМС). У міліметровому і субміліметровому діапазонах ефективне управління затримкою можна отримати змінюючи погонну ємність СВЧ лінії передачі. І такі лінії з керованою в динаміці структурою лінії передачі вже створені і рядом фірм випускаються серійно.

Управління затримкою в лініях на основі МЕМС із цифровими сигналами, комутуючі відрізки мікрополоскових ліній.

Принцип роботи таких керованих ліній затримки докладно описаний в роботі [18] і дані по РЛЗ, виконаним за МЕМС технології наведені в роботі [10]. Із зазначених в роботі [10] МЕМС як керованої лінії затримки для імітатора радіоканалів ММД підходить лінія затримки з ємнісним управлінням, що має параметри, наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри імітатора радіоканалу ММД

Керування	Смуга частот, ГГц	Втрати, дБ	U керування, В	Нерівномірна фазочастотна характеристика, град.	Габарити, мм
Керована ємність	1-40	1,5	20	10	8,4*2,1

#### 4.3. Методика управління імітатором радіоканалів ММД

Модуль управління комплексом імітації радіоканалів ММД містить, як показано на рис. 4.7, програмовану через контролер за допомогою персонального комп'ютера програмовану логічну інтегральну схему (ПЛІС). На виходах ПЛІС формуються сигнали управління зрушенням частоти СЧ при моделюванні каналу з рухомим абонентом і сигнали управління пристроями РЛЗ, А<sub>т</sub>, ФВ модуля імітації для кожного модельованого променя системи зв'язку. Сформовані на виходах ПЛІС сигнали управління в модулі імітації проходять через цифроаналогові перетворювачі і перетворюються в аналогові сигнали, необхідні для управління РЛЗ, А<sub>т</sub>, ФВ.

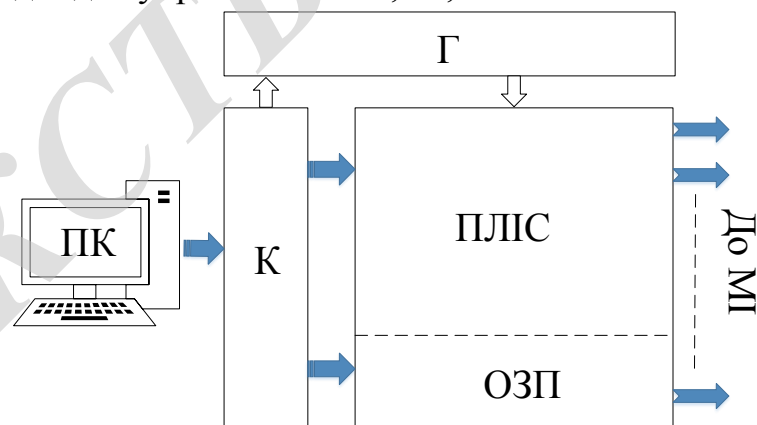


Рисунок 4.7 – Модуль управління комплексом імітації радіоканалів ММД

Для імітації впливів на досліджувані системи шуму і перешкод паралельно сигналам управління від МУ до пристроїв модуля імітації вихідні сигнали ПЛІС в модулі імітації проходять через цифро-аналогові

перетворювачі і перетворюються в аналогові сигнали управління РЛЗ, Ат, ФВ подаються сигнали від зовнішніх генераторів шуму і генераторів перешкодних сигналів.

Для дослідження якості функціонування пристроїв і систем передачі інформації комплекс охоплюють пристроєм контролю (КК), як показано на рис. 4.3. КК звіряє передані та прийняті інформаційні сигнали, вважає відсоток помилково прийнятих посилок і робить висновок про результати дослідження. Методика роботи всього комплексу імітації радіоканалів ММД підпорядковується наступним алгоритмом:

Крок перший. Для кожного керованого пристрою імітатора розробляється своя програма управління, яка враховує особливості радіоканалу конкретного променя поширення ММХ і специфіку сигналів досліджуваної системи передавач - приймач ММД.

Крок другий. Через контролер (К), що забезпечує інтерфейс ПК з програмованої логічної інтегральної схемою, за участю тактового генератора (Г) програми записуються в ПЛІС.

Крок третій. Наявна в ПЛІС оперативна пам'ять (ОП) доставляє в програми необхідні значення параметрів модельованої траси зв'язку для управління певними вузлами імітатора.

Крок четвертий. ПЛІС формує сигнали управління імітатором для всіх модельованих променів поширення сигналів ММХ.

Крок п'ятий. Сигнали з виходів ПЛІС в ЦАП модуля імітації перетворюються в аналогові сигнали управління пристроями РЛЗ, Ат, ФВ.

Крок шостий. У імітованих променях поширення сигнал БС послаблюється і зазнає спотворення, викликані змінами передавальної функції радіоканалів.

Крок сьомий. Пристрій контролю (КК) порівнює інформаційний сигнал, який надходить з базової станції, з інформаційним сигналом на виході апаратури абонента.

Крок восьмий. КК робить висновок про наявність чи відсутність технічної придатності комплексу апаратури і дає команду на друк результатів.

Крок дев'ятий. Роздруковуються результати технічного контролю досліджуваної апаратури зв'язку.

#### 4.4. Розробка алгоритму імітації загасання сигналів при поширенні по радіоканалах ММД

Хто приходить до радіоприймача сигнал ММВ сильно ослаблений порівняно з сигналом передавальної станції. Величина ослаблення сигналів

ММВ визначається не тільки через ослаблення при поширенні у просторі, який визначається виразом (1.2), а й ослабленням через наявності на трасі зв'язку рослинності (ліс, кущі) і можливим ослабленням викликається гідрометеорів.

Велика робота по дослідженню загасання радіохвиль ММД в дощах і гідрометеорах виконана в ІРЕ РАН [11]. На підставі багаторічних експериментів виявлено вплив на які поширюються сигнали ММХ дощів різної інтенсивності і туманів, що дало можливість розвинути метод розрахунку ослаблення міліметрових випромінювань в гідрометеорах, з урахуванням умов Росії. Пізніші експериментальні дослідження, проведені в Бухаресті [11], С. Петербурзі [12] та ін. Місцях світу дозволили розвинути результати роботи [11] і МЕМ розробити рекомендації [13] для інших кліматичних зон. Таблиця розподілу опадів по зонам світу приведена в Додатку 1.

Апроксимація експериментальних даних по ослабленню ММХ гідрометеорів виразами (3.14) і (3.15) і експериментальних даних по ослабленню ММХ листям вираз (3.16) дозволило отримати загальний вираз (3.22), що враховує ослаблення ММХ на трасі зв'язку і відповідно до нього розробити алгоритм роботи пристрою управління аттенюатором НМС985ALP4KE, який наведено на рис. 4.8.

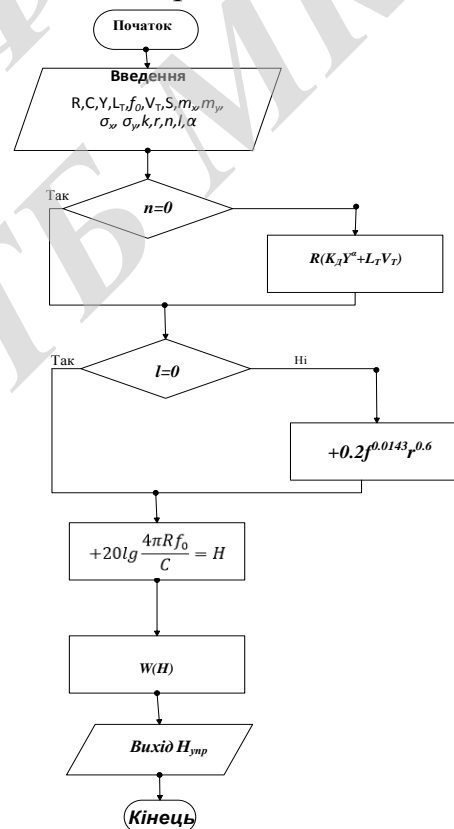


Рисунок 4.8 – Алгоритм управління імітатором ослаблення сигналу ММД (At) при поширенні

#### Висновки до розділу 4

1. На підставі аналізу особливостей поширення ММХ по радіоканалах запропонована структура комплексу імітації радіоканалів ММД.
2. Запропоновано реалізувати імітатор на проміжних частотах з смугою частот від 17 ГГц до 27 ГГц з перенесенням частот досліджуваних систем в цей діапазон. Визначено пристрої для перенесення спектрів в цей діапазон.
3. Визначено шлях імітації дуплексного зсуву частот в каналах ММД і рекомендовані пристрої для цього.
4. Запропоновано імітатор фазових спотворень сигналів ММД в радіоканалах і визначені пристрої на основі МЕМС для його побудови.
5. Розроблено імітатор запізнювання сигналів відбитих променів в радіоканалах ММД і запропоновані пристрої для його реалізації.
6. Запропоновано імітатор загасання на основі серійного керованого атенюатора і розроблений алгоритм імітації загасання сигналів ММД в залежності від географічних і кліматичних умов трас зв'язку.
7. Розроблено методику управління комплексом імітації радіоканалів ММД.

## 5 АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОВЕДЕНОЇ РОЗРОБКИ

5.1 Розрахунок витрат на проведення НДР з дослідження алгоритмів приймання дискретних даних при використанні послуг радіоканалів ММД 5G покоління

Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної чи дослідно-конструкторської роботи НДДКР робити може складатися з таких етапів:

1-й етап полягає в розрахунку витрат, які безпосередньо стосуються виконавців даного розділу(частини) НДДКР.

2-й етап: розрахунок загальних витрат на виконання даної НДДКР.

3-й етап: прогнозування загальних витрат на виконання та впровадження результатів НДДКР.

Отже, в техніко-економічному обґрунтуванні представленому в першому розділі даної магістерської кваліфікаційної роботи було приблизно обґрунтовано доцільність проведення НДР. Тому в даному розділі будуть проведені більш детальні розрахунки витрат на проведення НДР з дослідження радіоканалів ММД 5G покоління.

Для економічного розрахунку проведення НДР потрібно скласти кошторис витрат, який передбачає розрахунок визначених основних статей витрат.

Основна заробітна плата дослідників та розробників, якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери, розраховується за наступною формулою:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн.)}, \quad (5.1)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад конкретного розробника (дослідника), грн.;

$T_p$  – число робочих днів в місяці, 22 дн;

$t$  – число днів роботи розробника (дослідника).

Проведені розрахунки зводимо до таблиці.

Таблиця 5.1 – Основна заробітна плата дослідників та розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
1. Керівник проекту	15960,00	510,71	38	27567,30
2. Ст. науковий співробітник	8760,00	439,58	25	9954,55

3. Інженер-конструктор телекомунікаційних систем	9550,00	583,2	36	15627,30
4. Фахівець-консультант з аналітично-математичних досліджень	8980,00	494,09	10	4081,80
5. Інженер-схемотехнік вищ. кат.	8260,00	434,28	13	4880,90
6. Технік	5690,00	239,44	37	9569,55
Разом				71681,40

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ), що здійснюють підготовку робочих місць та пристроїв необхідних для досліджень, підготовку та формування баз даних тощо, розраховуються на основі норм часу, які необхідні для виконання даної роботи, за формулою:

$$Z_p = \sum_i^n t_i C_i K_i \text{ (грн.)} \quad (5.2)$$

де  $t_i$  - норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

$n$  - число робіт по видах та розрядах;

$K_c$  - коефіцієнт співвідношень, який установлений в даний час Генеральною тарифною угодою між Урядом України і профспілками,  $K_c = 1$ ;

$C_i$  - погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує відповідну роботу, грн./год.

$C_i$  визначається за формулою:

$$C_i = \frac{M_n K_i}{T_p T_{зм}}, \left( \frac{\text{грн}}{\text{год.}} \right) \quad (5.3)$$

де,  $M_n$  - мінімальна місячна оплата праці, грн.,  $M_n = 4173,00$  грн.;

$K_i$  - тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду;

$T_p$  - число робочих днів в місяці,  $T_p = 22$  дн.;

$T_{зм}$  - тривалість зміни,  $T_{зм} = 8$  годин.

Проведені розрахунки внесемо до таблиці.

Таблиця 5.2 – Витрати на основну заробітну плату працівників.

Найменування робіт	Трудоміст- кість, нормо- годин	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати, грн.
1.Встановлення допоміжного обладнання	13,00	2	1,1	26,08	339,04
2.Інсталяція програмного забезпечення	12,00	3	1,45	34,37	412,44
3.Встановлення цифрових обчислювальних систем	4,75	5	1,7	40,3	191,45
4.Відлагодження модулів та блоків передачі сигналу	9,00	5	1,7	40,3	362,7
5.Узгодження параметрів цифрових блоків	7,00	4	1,7	40,3	282,1
6. Монтаж системи	4,00	4	1,7	40,3	161,2
7.Тренування системи	6,20	3	1,7	40,3	249,9
Разом					1998,8

Додаткова заробітна плата розробників, дослідників та працівників, які приймали участь в дослідженнях та розробці НДР в дослідженні радіоканалу ММД 5G покоління розраховується як 12 % від основної заробітної плати розробників та працівників:

$$Z_0 = Z_0 \cdot 12 / 100\% \quad (5.4)$$

$$Z_0 = (71681,40 + 1998,8) \cdot 12 / 100 \% = 8625,75 \text{ (грн.)}$$

Нарахування на заробітну плату дослідників та працівників.

Згідно діючого законодавства нарахування на заробітну плату складають 22 % від суми основної та додаткової заробітної плати:

$$H_0 = (Z_0 + Z_0) \cdot 22 / 100\% , \quad (5.5)$$



$$H_s = (71681,4 + 1998,8 + 8625,75) * 22 / 100\% = 18107,30 \text{ (грн.)}$$

Витрати на матеріали та комплектуючі на даному етапі проведення НДР пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментального програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі офісних витратних матеріалів.

Витрати на матеріали, що були використані при проведенні досліджень, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^n H_i C_i K_i, \quad (5.6)$$

де, -  $H_i$  - витрати матеріалу  $i$ -го найменування, кг;

$C_i$  - вартість матеріалу  $i$ -го найменування, грн./кг.;

$K_i$  - коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,1$ ;

$n$  - кількість видів матеріалів,

Проведені розрахунки зводимо до таблиці.

Таблиця 5.3 – Витрати на основні матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Одиниця виміру	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Папір канцелярський офісний (A4)	уп.	103,00	6,0	618,00
Папір для заміток (A5)	уп.	42,00	7,0	294,00
Начиння канцелярське	шт.	120,00	8,0	960,00
Органайзер офісний	шт.	252,00	9,0	2268,00
Картридж для принтера (SEEK-212)	шт.	1680,00	3,0	5040,00
Диск оптичний (CD-R)	шт.	11,00	5,0	55,00
Диск оптичний (CD-RW)	шт.	11,00	4,0	44,00
FLASH-пам'ять (16 ГБ)	шт.	350,00	3,0	1050,00
Всього				10329,00

З врахуванням транспортних витрат вартість матеріалів складе:

$$M = 10329,00 * 1,1 = 11361,9 \text{ грн.}$$

Амортизація обладнання для проведення досліджень.

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

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{в}}}{T_{\text{в}}} * \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (5.7)$$

де  $Ц_{\text{в}}$  – балансова вартість обладнання, приміщень тощо, які використовувались для розробки нового технічного рішення, грн.;

$t_{\text{вик}}$  – термін використання обладнання, приміщень під час розробки, місяців;

$T_{\text{в}}$  – строк корисного використання обладнання, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці.

Таблиця 5.4 - Величина амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн
Програмно-аналітичний комплекс	21000,00	5	2	700
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	23840,00	5	2	794,66
Програмне забезпечення (PC Wizard; CPU-Z Version 1.28; SiSoftware Sandra Lite.SR1; PCMark04 Build 1.3.0;)	10660,00	2	2	888,33
Антенa вузьконаправлена	4x2100,00	4	2	350
Модулятор високочастотний	7993,00	4	2	33,05
Еквалайзер EZ1000F	9245,00	4	2	385,2
Фільтр узгоджуючий	6780,00	4	2	282,5
Вхідний радіочастотний каскад (блок A12)	7952,00	5	2	265,06
Передавач сигналу PC3	2660,00	5	2	88,66

Передавач сигналу РС8	2370,00	5	2	79,00
Приймач сигналу СС3	3782,00	5	2	126,06
Приймач сигналу СС8	3930,00	5	2	131,00
Місце оператора спеціалізоване	9100,00	5	2	303,33
Офісна оргтехніка	11400,00	4	2	475,00
Дослідницька лабораторія	161500,00	20	2	1345,85
Всього				6247,68

Витрати на силову електроенергію на проведення досліджень розраховують за формулою:

$$V_e = B * П * \Phi * K_p, \quad (5.8)$$

де,  $B$  – вартість 1 кВт-години електроенергії,  $B = 2,21$  грн./кВт –година;

$П$  – встановлена потужність обладнання, кВт.;

$\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, годин. ;

$K_p$  – коефіцієнт використання потужності.

Всі проведені розрахунки зведемо до таблиці

Таблиця 5.5 – Витрати на електроенергію при проведенні досліджень

Найменування обладнання	Кількість годин роботи обладнання, год.	Встановлена потужність, кВт	Коефіцієнт використання потужності	Величина оплати
Програмно-аналітичний комплекс	350,00	0,72	1	580,12
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	350,00	0,73	1	564,65
Офісна оргтехніка	85,00	1,2	1	225,42
Місце оператора спеціалізоване	360,00	0,33	1	262,55
Антенна вузьконаправлена	210,00	0,05	1	23,20
Модулятор високочастотний	205,00	0,2	1	90,61
Еквалайзер EZ1000F	215,00	0,11	1	52,26
Фільтр узгоджуючий	215,00	0,01	1	4,45

Вхідний радіочастотний каскад (блок А12)	215,00	0,25	1	118,78
Передавач сигналу РС3	215,00	0,32	1	152,04
Передавач сигналу РС8	215,00	0,40	1	190,06
Приймач сигналу СС3	205,00	0,03	1	13,59
Приймач сигналу СС8	205,00	0,04	1	18,12
Всього				2295,85

Інші витрати охоплюють: загальновиробничі витрати, адміністративні витрати, витрати на відрядження, матеріали, окремі непередбачені витрати, зв'язок, витрати на інтернет-послуги тощо.

Інші витрати доцільно приймати як 200...300% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників.

Величина інших витрат складе:

$$I = (71681,40 + 1998,8) * 210\% / 100\% = 154728,40 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи.

Сума всіх попередніх статей витрат дає загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи:

$$B = 71681,40 + 1998,8 + 10329 + 6247,68 + 2295,85 + 154728,40 + 11361,9 + 18107,30 = 276750,33 \text{ (грн.)}$$

5.2 Визначення коефіцієнта наукової значимості отриманих результатів науково-дослідної роботи

Коефіцієнт наукової значимості результатів проведеної НДР  $K_{зп}$  можна підрахувати за формулою:

$$K_{зп} = \frac{\sum_1^3 b_i d_1}{\sum_1^3 b_{max} d_i}, \quad (5.9)$$

де  $b_i$  - значимість отриманих результатів:

$b_1$  - ступінь наукової новизни,

$b_2$  - рівень теоретичної обґрунтованості,

$b_3$  - ступінь експериментальної перевірки результатів.

Бальна оцінка отриманих результатів наведена в таблиці .

Максимальне значення отриманих результатів можна прийняти в межах 7...10 балів;

$d_i$  - питома вага кожної характеристики, значення якої наведено в таблиці;

3 – кількість характеристик, за якими була зроблена оцінка результатів науково-дослідної роботи.

Таблиця 5.6 – Показники для оцінювання наукової значимості результатів виконання НДР

Характеристики	Питома вага характеристик	Бальна оцінка характеристик		
		Ступінь новизни $b_1$	Рівень теоретичної обґрунтованості $b_2$	Ступінь експериментальної перевірки результатів $b_3$
		1	3...5	7...10
$b_1$	0,500	Часткове удосконалення виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту, тощо	Суттєве удосконалення виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту, тощо	Нові напрямки в розробці виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту, тощо. Створення принципово нової техніки
$b_2$	0,333	Позитивне рішення на основі зроблених узагальнень	Установлення залежностей, які використовувались в інших випадках	Відкриття нових шляхів рішення задачі
$b_3$	0,167	Експериментальна перевірка не робилась	Результати перевірялись на невеликій кількості даних	Результати перевірені на великій кількості даних

Підставляючи числові дані у вираз ( 5.9 ) оцінимо наукову значимість отриманих результатів

$$K_{3H} = \frac{7 * 0,5 + 6 * 0,333 + 6 * 0,167}{10 * 0,5 + 10 * 0,333 + 10 * 0,167} = 0,65$$

### 5.3 Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР

Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР з дослідження радіоканалу ММД 5G покоління, можна розрахувати за формулою:

$$V = \frac{k_{\text{тві}} * Z_i}{\sum_1^n k_{\text{тві}} Z_i}, \quad (5.10)$$

де  $k_{\text{тві}}$ - коефіцієнт творчої участі кожного виконавця НДР, який оцінюється наступним чином: проведення досліджень – 3 бали, робоче проектування – 1,5 бали, освоєння – 1,0 балів.

Якщо виконавець приймав участь в декількох видах робіт, то береться сума відповідних балів;

$Z_i$  - заробітна плата кожного виконавця НДР;

$n$ - кількість всіх виконавців НДР,

Розраховуємо внесок дослідника:

$$V = \frac{3 * 9550}{3 * 5690 + 3 * 10590,00 + 1.5 * 8760.00} = 0,55$$

#### Висновки до розділу 5

Загалом запланована науково-дослідна робота з дослідження радіоканалу міліметрового діапазону 5G покоління вимагає вкладення для проведення досліджень в межах 27650,33 грн.

Однак отримані результати досліджень мають високий рівень наукової значимості (в межах 0,65), що свідчить про доцільність та перспективність проведення розробок. Також розрахувавши внесок дослідника ми бачимо, що він становить 0,55.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Промислова безпека, яку розглядає охорона праці, має велике значення для працюючих тому, що саме вона контролює фізичний стан працівника, що не може не позначитись на його житті, здоров'ї та продуктивності праці зокрема і у галузі радіотехніки.

В даному розділі наводиться аналіз небезпечних, шкідливих [1] і уражаючих для людини і навколишнього середовища чинників, які виникають при проведенні дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління. Тут висвітлюються, в тому числі, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення загального рівномірного штучного робочого освітлення точковим методом, 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

Вибираємо для приміщення для проведення дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іа.

Згідно із [2] допустимі параметри температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні для теплого та холодного періодів року наведені у таблиці X.1 додатку X.

При опроміненні менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення –  $100 \text{ Вт/м}^2$ .

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

При використанні ЕОМ джерелом забруднення повітря є також іонізація молекул речовин, які містяться в повітрі. Рівні додатних та від'ємних іонів повинні відповідати [4] і наведені в таблиці X.3 додатку X.

Для забезпечення нормованих показників мікроклімату та складу повітря робочої зони запропоновано: в приміщенні має бути встановлена система опалення для холодного і кондиціонування для теплого періодів

року; припливно-витяжна система вентиляції, а при несприятливих погодних умовах кондиціонування.

### 6.1.2 Виробниче освітлення

Для забезпечення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях великі вимоги висуваються щодо кількісних та якісних параметрів освітлення.

З погляду задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводиться робота з дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління, відповідно до [43] знаходимо, що вони відповідають IV розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – великий, а характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд зорових робіт 2.

Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості для штучного освітлення наведені в таблиці 6.4 додатку 7

Оскільки приміщення знаходиться у м. Вінниця (2-га група забезпеченості природним світлом), а вікна розташовані за азимутом  $225^\circ$ , то для таких обставин КЕО визначатиметься за виразом [43, 44]

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

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

$m_N$  – коефіцієнт світлового клімату;

$N$  – номер групи забезпеченості природним світлом.

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

$$e_{N,6} = 1,5 \cdot 0,85 = 1,28 (\%);$$

$$e_{N,c} = 0,9 \cdot 0,85 = 0,77 (\%).$$

Для встановлення нормованих значень показників освітлення передбачено:

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

2) застосування штучного освітлення в темну пору доби.

Вихідні дані: розміри приміщення (м):  $8 \times 5 \times 3,2$ .

Згідно рекомендацій [44] розрахунок загального локалізованого штучного освітлення проведемо за допомогою точкового методу. В цьому методі



початково приймається, що світовий потік в кожному світильнику рівний 1000 лк.

Світловий потік ламп світильників загального рівномірного штучного освітлення визначається за формулою:

$$\Phi_{л} = \frac{1000EK_3}{\mu\Sigma e} [\text{лм}], \quad (6.2)$$

де  $E$  – нормована освітленість при загальному штучному освітленні, лк;

$K_3$  – коефіцієнт запасу (для виробничих приміщень  $K_3 = 1,3...1,5$ );

$\mu$  – коефіцієнт, що враховує відбиту складову освітленості;

$\Sigma e$  – сумарна умовна освітленість від найближчих світильників в контрольній точці, лк.

Сумарна освітленість від найближчих світильників в контрольній точці визначається за номограмами в залежності від відстані до світильника  $d$  та висоти світильника над робочою поверхнею  $h$ .

Висоту світильника над робочою поверхнею знайдемо за формулою:

$$h = H - h_3 - h_p [\text{м}], \quad (6.3)$$

де  $h_3$  – висота звісу світильника ( $h_3 = 0,15$  м);

$h_p$  – висота умовної робочої поверхні ( $h_p = 0,8$  м).

Визначимо відстань між рядами світильників за формулою

$$L_p = b / n_p [\text{м}], \quad (6.4)$$

де  $b$  – ширина приміщення, м;

$n_p$  – кількість рядів світильників, шт.

Для забезпечення рівномірності освітлення розташовуємо світильники в  $n_p = 2$  ряди.

Підставляючи відомі значення у формули (6.3, 6.4) отримаємо:

$$h = 3,2 - 0,15 - 0,8 = 2,25 \text{ (м)};$$

$$L_p = 5 / 2 = 2,5 \text{ (м)}.$$

$E = 150$  лк. Вибираємо коефіцієнт запасу  $K_3 = 1,3...1,5 = 1,4$ .

Для загального штучного освітлення приймаємо  $\mu = 1 \dots 1,2 = 1,1$ .

Контрольна точка А освітлюється чотирма світильниками, що пронумеровані числами 1...4 і показані на рисунку 6.1.

Сумарна освітленість від найближчих світильників в контрольній точці  $\Sigma e$  визначається за допомогою просторових ізолюксів в залежності від співвідношень величин  $d$  і  $h$ .

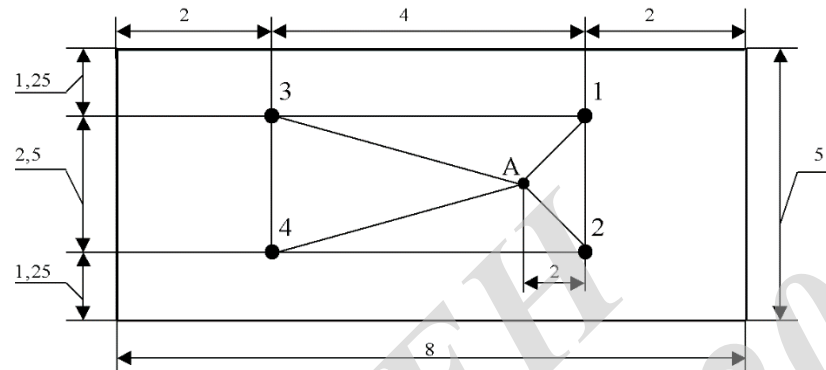


Рисунок 6.1 – Схема розміщення контрольної точки А відносно світильників

Дані щодо визначення сумарної умовної освітленості від найближчих світильників в контрольній точці  $\Sigma e$  для світильників УПД, оформимо у вигляді таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Дані щодо визначення сумарної умовної освітленості від найближчих світильників в контрольній точці  $\Sigma e$

Номер світильника	Відстань $d$ , м	Умовна освітленість $e$ , лк
1	2,358	18,3
2	2,358	18,3
3	2,358	18,3
4	2,358	18,3
		$\Sigma e = 73,2$

Визначимо світловий потік для кожної лампи

$$\Phi_l = \frac{\Phi}{N} [\text{лм}], \quad (6.5)$$

де  $N$  – кількість ламп, шт.

Згідно рисунка 5.1  $N = 4$  шт.

Підставляючи відомі значення у формули (6.2, 6.5) отримаємо:

$$\Phi = \frac{1000 \cdot 150 \cdot 1,4}{1,1 \cdot 73,2} = 2608 \text{ (лм)};$$

$$\Phi_n = \frac{2608}{4} \approx 652 \text{ (лм)}.$$

Згідно [14] за отриманим значенням вибираємо лампу Б-60 з  $\Phi_n = 715$  лм.

### 6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при використанні пристроїв крім усього іншого обладнання використовується устаткування, робота якого генерує шум та вібрацію, необхідно передбачити захист від шуму та вібрації.

Визначено, що приміщення, в якому відбувається робота з дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління може містити робочі місця із шумом та вібрацією, що створюється вентиляторами блоку живлення комп'ютера та кулерами мікропроцесора, відеокarti.

Для попередження травмування працівників від дії шуму він підпадає під нормування. Головним нормативом з питань промислового шуму, діючим на території нашої країни, є [5], згідно з яким допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні шуму на робочих місцях у виробничих приміщеннях не мають бути більшими ніж значення, які наведено в таблиці 6.5 додатку 7. Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 6.6 додатку 7 для локальної вібрації.

З метою поліпшення віброакустичного клімату у приміщенні передбачено:

- 1) оздоблення стін спеціальними перфорованими плитами, панелями з метою шумопоглинання;
- 2) контроль рівня шуму та вібрації не менше 1 разу на рік.

### 6.1.4 Виробничі випромінювання

Значення напруженості електромагнітного поля на робочих місцях з персональними ЕОМ мають не перевищувати граничнодопустимі, які складають 20 кВ/м.

Експозиційна доза рентгенівського випромінювання на відстані 5 см від екрана до корпусу монітора при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв не повинні перевищувати  $7,74 \cdot 10^{-12}$  Кл/кг, що відповідає потужності еквівалентної дози 0,1 мБер/год (100 мкР/год) у відповідності до [14].

З метою гарантування захисту та досягнення нормативних рівнів випромінювань необхідно застосовувати приєкранні фільтри, локальні світлофільтри та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат.

6.2 Технічні рішення щодо 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

Робочі місця з відеодисплейним терміналом зобов'язані розміщатися на відстані не менше як 1,5 м від стіни з вікнами, від інших стін – на відстані 1 м, одне від одного на відстані не менше ніж 1,5 м. При розміщенні робочих місць потрібно виключити можливість прямого засвічування екрану джерелом природного освітлення. Робоче місце доцільно розташовувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, бажано зліва [47].

Розташовувати відеодисплейний термінал на робочому місці необхідно так, щоб поверхня екрана має розташовуватись на відстані 400-700 мм від органів зору користувача. Висота робочої поверхні столу при виконанні роботи сидячи має налаштовуватись в межах 680-800 мм. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше як 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм та на рівні витягнутої ноги не менше як 650 мм [48].

#### 6.2.2 Електробезпека

В середині приміщення, де проводиться робота з дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління, значну увагу потрібно надати уникненню загрози ураження електричним струмом. У відповідності до [49] дане приміщення належить до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом через наявність значної (більше 75 %) вологості. Через це безпека експлуатації електрообладнання повинна гарантуватись рядом заходів, що

включають використання ізоляції струмовідних елементів, захисного заземлення, захисних блокувань та ін [50].

### 6.2.3 Пожежна безпека

Відповідно до [51] приміщення, в якому проводиться робота з дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління, відноситься до категорії пожежної небезпеки В. 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 6.7. В таблиці 6.8 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Встановлюємо, що приміщення, де проводиться робота з дослідження, має бути оснащено двома вогнегасниками, пожежним щитом, а також ємністю з піском [52].

## 6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

### 6.3.1 Визначення області працездатності радіоканалів міліметрового діапазону 5G в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Визначення області працездатності радіоканалів ММД 5G може безпосередньо впливати на надзвичайні ситуації техногенного, природного, військового положення. На даний момент тема розробки радіоканалу є проблемою для навколишнього середовища та природи. Серед НС можна виділити найбільш небезпечні : наявність у довкіллі шкідливих речовин понад ГДК, аварії зі загрозою викидів ХНР і біологічних небезпечних засобів, радіоактивне забруднення, вплив ЕМІ.

Отже, існує актуальна проблема розрахунку і підвищення стійкості базових та абонентських станцій. Для цього завчасно на основі розрахунків планують і проводять відповідні організаційні та інженерно-технічні заходи.

### 6.3.2 Визначення області працездатності радіоканалів міліметрового діапазону 5G в умовах дії іонізуючих випромінювань

Визначаємо експозиційну можливу дозу при яких в елементах радіоканалів ММД 5G можуть виникнути незворотні зміни. Дані занесені в таблицю 6.2

Таблиця 6.2 – Експозиційна можлива доза елементів радіоканалу ММД 5G

№	Підсистеми	Елементи радіоканалу	$D_{грн}$ $i,$ (P)	$D_{гр},$ P
1	Система живлення	приймачі серії Leica GRX1200+GNSS	$10^5$	$10^3$
		Дросель аксіальний 47uH 0.205A 10%	$10^5$	
		Нормативний перетворювач швидкості NSP1207	$10^6$	
		Контролер SP 3.0 DC	$10^6$	
		Цифровий частотомір Zhaoxin HC-F27001	$10^5$	
		Діод D0805-0,05	$10^4$	
2	Система керування (базова станція)	Тумблер ASW -13-102	$10^2$	$10^3$
		Транзистори ГТ309В, КТ312Б	$10^7$	
		Конденсатори К73-16-8,2 мкФ 250В	$10^5$	
		Резистори CR-2W-130, 0,25W-36	$10^4$	
3	Мікропроцесорна система	Мікросхема П1 регулятора частоти УДС-1	$10^4$	$10^3$
		Блок обмеження струму К342ЕН8Б	$10^5$	

Найбільш уразливий елемент – це фотодіоди блоку управління релейного захисту і автоматики,  $D_{гр} = 10^3 P$ .

Визначаємо можливу дозу опромінення після аварії на АЕС більше 3-х місяців наступним виразом:

$$D_m = \frac{2P_1(\sqrt{t_k} - \sqrt{t_{п}})}{K_{посл}}, \quad (6.8)$$

Де  $P_1$  - рівень радіації через 1 годину після аварії на радіаційно небезпечному об'єкті (після вибуху), P/год;

$K_{посл}$  – коефіцієнт послаблення, 1;

$t_k$  – час початку опромінення, 1 год.;

$t_{п}$  – максимальна тривалість роботи, 20 років.

Підставивши дані отримаємо:

$$D_m = \frac{2 * 3.9(\sqrt{175200} - \sqrt{1})}{1} = 3257(P)$$

Далі визначаємо допустимий час роботи РЕА наступною формулою:

$$t_{доп} = \left( \frac{D_{гр} K_{посл} + 2P_1 \sqrt{t_{п}}}{2P_1} \right)^2, \quad (6.9)$$

Підставимо всі відомі значення у вираз:

$$t_{доп} = \left( \frac{10^3 * 1 + 2 * 3,9\sqrt{1}}{2 * 3,9} \right)^2 = 16693,93(\text{год.})$$

Порівнюємо отримані значення:

$$D_{гр} = 10^3 < D_m = 3257$$

Отже, для забезпечення стійкості роботи  $K_{посл}$  потрібно збільшити в 3 рази. Робота РЕА буде стійкою протягом 16693,96 годин.

6.3.3 Дослідження безпеки роботи радіоканалу ММД 5G в умовах дії електромагнітного імпульсу

За критерій стійкості роботи радіоелектронних систем або окремих їх елементів в умовах дії електромагнітних випромінювань можна прийняти коефіцієнт безпеки показана в наступному виразі:

$$K_{\text{б(в,г)}} = 20 \lg \frac{U_{\text{доп}}}{U_{\text{(в,г)}}} \geq 40 \text{ (дБ)}, \quad (6.10)$$

де  $U_{\text{д}}$  - допустиме коливання напруги живлення, В;

$U_{\text{в(г)}}$ - напруга наведена за рахунок електромагнітних випромінювань у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних частинах, В.

Система вважається стійкою коли  $K_{\text{бвi}}$  і  $K_{\text{бгi}} \geq 40$  (дБ).

Дослідження здійснюються за дією електричного поля, яке є складовою електромагнітного. Допустимі коливання напруги:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}N}{100}, \text{ (В)} \quad (6.11)$$

Де  $U_{\text{д}}$  –напруги живлення від електричної мережи;

$N$  – допустиме відхилення напруги в системі.

Підставивши значення у вираз отримаємо:

$$U_{\text{д}} = 220 + \frac{220 * 5}{100} = 231 \text{ (В)}.$$

Зазвичай все обладнання знаходиться у металевому корпусі і всі кабелі живлення будуть у вертикальному положенні, тому на напругу наведення у горизонтальній струмопровідній частині можна не зважати. Знаходиться у вертикальній частині обладнання, використаємо формулу для знаходження коефіцієнта безпеки.

$$K_{\text{бв}} = 20 \lg \frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{в}}}, \text{ звідси } U_{\text{в}} = \frac{U_{\text{д}}}{10^{\frac{K_{\text{бв}}}{20}}}, \quad (6.12)$$

Отже, будемо мати:  $U_{\text{в}} = \frac{231}{10^{\frac{40}{20}}} = 2,31 \text{ (В)}.$

Для безпечної роботи радіоканалу ММД 5G покоління необхідно, щоб напруги наведення не перевищували 2,31 (В).

За значенням напруги наведення складові напруженості електричного поля розраховуються наступними формулами:

$$E_{\text{г}} = \frac{U_{\text{в}}}{l_{\text{в}}}, \quad (6.13)$$



$$E_B = \frac{E_r}{10^{-3}}, \quad (6.14)$$

Де  $l_B$  – загальна довжина струмопровідних частин обладнання, кабелів живлення.

Середні за величиною мережі 5G містять в собі багато комунікативного обладнання, тому загальна довжина струмопровідних частин обладнання складає 30 м.

Підставимо відомі значення:

$$E_r = \frac{U_B}{l_B} = \frac{2,31}{30} = 0,077 \left( \frac{В}{м} \right), \quad E_B = \frac{E_r}{10^{-3}} = \frac{0,077}{10^{-3}} = 77 \left( \frac{В}{м} \right).$$

Можна зробити висновки, що для безпечної роботи радіоканалу ММД 5G покоління в умовах дії електромагнітного імпульсу вертикальна складова частина напруженості електричного поля повинна бути менша 77 (В/м).

#### 6.3.4 Визначення області працездатності радіоканалів міліметрового діапазону 5G у НС.

Для забезпечення якомога швидкого відновлення виробництва на випадок виходу з ладу основних джерел енергоживлення повинен бути створений резерв джерел енерго- та водопостачання (пересувні електростанції і наносні агрегати з автономними двигунами).

Визначення області працездатності радіоканалу міліметрового діапазону 5G покоління підключають до декількох джерел живлення, віддалених одне від одного на відстані, що виключає можливість їх одночасного ураження одним ядерним вибухом.

Для забезпечення надійного управління діяльності радіоканалів у надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу в одному із сховищ обладнується пункт управління. Диспетчерські пункти і радіовузли розміщують по можливості у найміцніших спорудах і підвальних приміщеннях. Повітряні лінії зв'язку до найважливіших виробничих ділянок переводять на підземно кабельні. Стійкість зазобів зв'язку можна підвищити прокладанням енергопостачальних фідерів на автоматичну телефонну станцію (АТС) та радіовузлу об'єкта, підготовкою пересувних електростанцій для зарядження акумуляторів АТМ і для живлення радіовузла при відключенні основних джерел електропостачання. При розширенні мережі підземних

кабельних ліній необхідно прокласти дводротові, захищені екранами від впливу ЕМІ.

Для цього проведемо розрахунок товщини стінки екрану, для цього визначаємо перехідне затухання в екрані. Вибираємо сталевий екран  $K_e = 5,2$ . Отже, для системи живлення будемо мати:

$$t_1 = \frac{A_e}{K_e \sqrt{f}}, \quad (6.15)$$

$$t_1 = \frac{-72,12 - 40}{5,2 \sqrt{15000}} = 0,176 \text{ (см)}.$$

Для системи керування:

$$t_2 = \frac{-70,9 - 40}{5,2 \sqrt{15000}} = 0,174 \text{ (см)}.$$

Для мікропроцесорної системи будемо мати:

$$t_3 = \frac{-72,98 - 40}{5,2 \sqrt{15000}} = 0,177 \text{ (см)}.$$

Таким чином при екрануванні системи живлення з використанням екрану товщиною 0,176 (см.) зі сталі, система автоматики буде стійкою в умовах дії ЕМІ. При екрануванні схем резервного захисту використанням екрану товщиною 0,174 (см.) зі сталі, схеми постійного струму будуть стійкими в умовах ЕМІ. Для схем постійного струму потрібен екран товщиною 0,177 (см.).

#### Висновки до розділу 6

Під час виконання даного розділу було опрацьовано такі питання охорони праці та безпеки надзвичайних ситуацій, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення загального рівномірного штучного робочого освітлення точкових методом, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління, безпека в надзвичайних ситуаціях. Також визначено області працездатності радіоканалів міліметрового діапазону 5G в умовах дії іонізуючих випромінювань (ІВ) та в умовах дії ЕМІ.

Данні розрахунки показали, що в умовах дії електромагнітних випромінювань, безпечна робота працівників гарантується при розрахованих значеннях вертикальних та горизонтальних складових.

Визначення області працездатності радіоканалів міліметрового діапазону 5G в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій показала, що подальша робота радіоканалу буде стійкою, а виробничий процес не буде перерваний.

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. На підставі проведеного аналізу показано, що побудова нових високошвидкісних систем рухомого радіозв'язку можливо в основному за рахунок освоєння міліметрового діапазону частот.

2. Запропоновано для створення і дослідження пристроїв і систем покоління стільникового зв'язку 5G створити імітатор радіоканалів ММД, що дозволяє в лабораторних умовах оцінювати якість нових розробок.

3. Вивчено причини ослаблення ММХ і визначені основні фактори, що впливають на ослаблення сигналів ММД при передачі інформації.

4. Запропоновано методику моделювання радіоканалів ММД, заснована на імітації реальних впливів за часом, частоті, фазі і амплітуді на сигнали ММД при їх поширенні по радіоканалах.

5. Визначено вирази для імітації послаблень сигналів і завмирань в радіоканалах ММД при різних кліматичних і географічних параметрах модельованих трас зв'язку.

6. Запропоновано моделі передавальної функції радіоканалів ММД для стаціонарних і мобільних абонентів.

7. Розроблено структуру комплексу імітації радіоканалів ММД з перенесенням частот досліджуваних систем на проміжні частоти

8. Як проміжних частот для комплексу імітації радіоканалів ММД обраний найбільш освоєний діапазон частот від 17 ГГц до 27 ГГц, в якому досить серійних виробів і пристроїв для реалізації комплексу.

9. Визначено пристрої для реалізації імітаторів загасання, амплітудних і фазових спотворень, затримок при поширенні сигналу, дуплексних зрушень частоти.

10. Розроблено методику управління комплексом імітації радіоканалів ММД.

11. Розроблено алгоритм імітації загасання сигналів ММД в залежності від географічних і кліматичних умов трас зв'язку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вивчення принципів побудови систем безпроводового зв'язку на основі технології LTE [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://studfiles.net/preview/2425953/page:2/>
2. Захист інформації в інформаційно - комунікаційних системах [наукове видання] (Київ, 3-6 червня 2013р) / відп. Ред. Г.Ф.Конахович – Київ, Національний Авіаційний Університет, 2013
3. Пригода В.М. заступник директора філії «Дирекція первинної мережі ВАТ «Укртелеком», Розвиток перспективних телекомунікаційних технологій і послуг в Україні за умов глобалізації // 2012. - №3. – С.2-5.
4. Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення [6-та науково-технічна конференція] (м.Київ, 25-26 жовтня 2012 року) /Мністерство оборони України Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» - Київ, - 2012. – С. 225.
5. Тихвинский В.О., Бочечка Г.С. Перспективы миллиметрового диапазона для 5G в России / Первая милья. - 2014, № 2. - С. 36-39.
6. Говоркова В. Что нужно знать о стандарте 5G. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://kapital.kz/world/53278/chto-nuzhno-znat-o-standarte-svyazi-5g.html/>
7. На пути к 5G. 08.10.2019. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.pvsm.ru/it-infrastruktura/184848#begin/>
8. «Batteries in a Portable World. A handbook on rechargeable batteries for non-engineers» — інтернетверсія книги г-на Isidor Buchmann, главы канадской компании Cadex Electronics Inc. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.buchmann.ca/>
9. Зубарев Ю.Б. Мобильный телефон и его влияние на здоровье человека. - М.:Изд. МНИТИ. - 2014. - 45с.
- 10.. Qualcomm объявляет о появлении первого модема для сетей 5G 21.10.2016. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.contentreview.com/articles/37482>
11. 5G технології. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://wimax.livebusiness.ru/tags/5G>

12. Быстров Р.П., Соколов А. В., Федорова Л.В., Чеканов Р.Н. Достижения в освоении миллиметровых и субмиллиметровых волн / Успехи современной радиоэлектроники. - 2009, №6. - С.52-78.

13.. Паршин В. В., Третьяков М. Ю., Кошелев М. А. и др. Исследования поглощения радиоволн в ММ и субММ диапазонах методами прецизионной резонаторной спектроскопии 12.02.2013. [Электронный ресурс] / Режим доступа:<http://nauchebe.net/2013/02/issledovaniya-pogloshheniya-radiovoln-v-mm-i-submm-diapazonah-metodami-precizionnoj-rezonatornoj-spektroskopii/>

14. Samsung разрабатывает новые технологии беспроводной связи с использованием миллиметровых волн. [Электронный ресурс] / Режим доступа:<http://radiotechstudent.ru/news/budushhemillimetrovuxvolnvtehnologiya-x-5g>.

15.Самойлов А.Г., Сидоренко А.А. Применение каскадных помехоустойчивых кодов для повышения эффективности борьбы с независимыми ошибками / Проектирование и технология электронных средств, 2014, №3. - С.2-8.

16. Гомес Ж.Л., Самойлов А.Г., Самойлов С.А. Возможности блочного кодирования при использовании разнесенного приема в системах связи Республики Ангола // 11-я Международная научно-техническая конференция "Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ'2015". - г. Суздаль, 12-14 ноября 2015 г.- С.43 - 45.

17. Самойлов А.Г., Самойлов С.А. Адаптивное программирование в цифровых системах телеметрии / Проектирование и технология электронных средств, 2015, №3. - С.3-6.

18.Жоую Пи, Фарук Хан Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона / Электроника: наука, технологии, бизнес. - 2012, №3.- С.86-94.

19. Рекомендация МСЭ-R P.2040 Влияние строительных материалов и структур на распространение радиоволн на частотах выше приблизительно 100 МГц.

20. Жоую Пи, Фарук Хан Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона / Первая милья. - №6, 2011. - С.10-19.

21. Двухлучевая модель. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://systemseti.com/ССРО/405.html>

22. Десятилучевая модель. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://systemseti.com/ССРО/406.html>

23. Модель Окамуры. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://systemseti.com/ССРО/408.html>

24. Модель Хата. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://systemseti.com/ССРО/409.html>
25. Модель Уолфица-Бертони. <http://systemseti.com/ССРО/410.html>
26. Малютин Н.Д., Лошилов А.Г., Федоров В.Н., Зыков Д.Д. Широкополосные дискретные не дисперсионные фазовращатели на основе эффекта кратного изменения фазовой скорости в многосвязных полосковых структурах с существенно неуравновешенной электромагнитной связью при сохранении согласования в широкой полосе частот / Доклады ТУСУРа, No 4 (34), декабрь 2014. - С. 22-30.
27. Шаров Г.А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. - М.: Радиотехника. - 2016. - 638 стр. Рекомендации ITU-R PN.837-7 Характеристики осадков для моделирования распространения. - 2017, No 6.
28. Kurakova T., Valdburger M. How ITU can help develop future networks / ITU News. - 2013, No 1. – p. 38-41.
29. Куракова Т.П. Использование миллиметрового диапазона волн для мобильной связи поколения 5G / Проектирование и технология электронных средств. - 2016, No4. – С. 3-7.
30. Куракова Т.П., Сарьян В.К. Моделирование радиоканалов миллиметрового диапазона частот / Труды НИИР. - 2017, No1. – С.33-39.
31. Куракова Т.П., Сарьян В.К. Методика моделирования радиоканалов миллиметрового диапазона // Материалы XII Международной научнотехнической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации"-ПТСПИ-2017 в 2-х томах. - г. Суздаль, 5-7 июля 2017.- Т.2.- С.87-90.
32. Куракова Т.П. Доплеровские сдвиги частоты в высокоскоростных каналах мобильной связи // Материалы XII Международной научнотехнической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации"-ПТСПИ-2017 в 2-х томах. - г. Суздаль, 5-7 июля 2017.- Т.1.- С.47-48.
33. Куракова Т.П., Михайлов С.Н. Моделирование каналов сотовой связи нового поколения // Сб. статей по материалам 1-ой ВНК "Инфотелекоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения". – Курск. - В 2-х частях. – 2017, ч.1. – С.61-66.
34. Куракова Т.П. О моделировании радиоканала миллиметрового диапазона// XXXVI Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем", 28-29 июня 2017 г. - Т.5. - Филиал военной академии РВСН, г. Серпухов. – С.177-180.

35. Куракова Т.П., Самойлов А.Г. О моделировании каналов связи поколения 5G // Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2017. -Рязань.- Сб. тр., Том 3. - С.102-106.

36. Куракова Т.П., Самойлов А.Г., Самойлов С.А. Разработка имитатора радиоканалов мобильной связи поколения 5G // Четвертая международная конференция Инжиниринг & Телекоммуникации - En&T - 2017, 29-30 ноября, 2017, Москва. – С.

37. Куракова Т.П., Самойлов А.Г., Самойлов С.А., Сарьян В.К. Имитация многолучевых радиоканалов // Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» ( Intermatic - 2017 ). - 20 - 24 ноября 2017, Москва. - С.

38. Kurakova T. Overview of the Internet of things // Conference INTNITEN (IN-ternet of THings and ITs ENablers), 3 – 4 June, 2013, St. Petersburg. - p.82-

39. Kurakova T. 5G in simple words / [http://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/13/Pages/CB-Future Networks.aspx](http://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/13/Pages/CB-Future%20Networks.aspx) . - October 2017.

40. Слюсар В.И. Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов. // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – № 8. – С. 52 – 58.

46. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.

47. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

48. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

49. Правила улаштування електроустановок. 2-е вид., перероб. і доп. – Х: "Форт", 2009. – 736 с.

50. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.



Додаток А  
(обов'язковий)  
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав.кафедри ТКСТБ ВНТУ,  
канд. техн. наук, професор  
Г.Г.Бортник  
“ \_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**  
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи  
ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОКАНАЛІВ МІЛІМЕТРОВОГО  
ДІАПАЗОНУ 5G ПОКОЛІННЯ  
08-34.МКР.006.00.000 ТЗ

Керівник роботи  
к.т.н., доц. кафедри ТКСТБ ВНТУ  
Васильківський М.В.

Виконавець: ст. гр. ТКС-18м

Мельничук О. І

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: 09.12.2019 р.

## 2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

*Метою* даної магістерської кваліфікаційної роботи є аналіз властивостей радіоканалів міліметрового діапазону частот і розробка комплексу імітації радіоканалів покоління 5G міліметрового діапазону частот.

*Задачами* магістерської кваліфікаційної роботи є:

- розробка технічного завдання;
- виконати аналіз і визначити характеристики факторів, що впливають на передачу інформації по радіоканалах ММД;
- розробити математичну модель каналу ММД;
- запропонувати структуру комплексу імітації радіоканалів (Кірк) ММД;
- запропонувати практичні рекомендації щодо побудови комплексу імітації радіоканалів ММД;
- розробити методичку верифікації пристроїв і систем покоління 5G за допомогою кирки.

*Об'єкт дослідження* є шляхи програмно-апаратної імітації радіоканалів міліметрового діапазону частот.

*Предмет дослідження* є характеристики радіоканалів міліметрового діапазону частот.

*Основними завданнями* роботи є:

- швидкість передачі інформації у мережах мобільного зв'язку;
- розробка моделі радіоканалів міліметрового діапазону частот
- моделювання радіоканалу міліметрового діапазону хвиль;
- реалізаційна основи імітаторів радіоканалів ммд
- аналіз економічної ефективності проведеної розробки;
- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

Розроблено структуру комплексу імітації радіоканалів ММД. Запропоновано також алгоритм обліку втрат енергії ММХ на лініях ММД, методика управління комплексом і пристрої для його побудови. Особисто підготовлені і опубліковані основні результати дослідження.

### 3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах роботи придипломної практики “Дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління”, яка виконувалась у ВНТУ у 2018/2020 н.р. Під час підготовки магістерської кваліфікаційної роботи будуть використані матеріали цієї роботи.

Список використаних джерел розробки:

3.1 Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение / Бернард Скляр ; [пер. с англ]. – М.: Изд. Дом “Вильямс”, 2003. – 1104с.

3.2 Куракова Т.П. Доплеровские сдвиги частоты в высокоскоростных каналах мобильной связи // Материалы XII Международной научнотехнической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации"-ПТСПИ-2017 в 2-х томах. - г. Суздаль, 5-7 июля 2017.- Т.1.- С.47-48.

3.3. Куракова Т.П., Михайлов С.Н. Моделирование каналов сотовой связи нового поколения // Сб. статей по материалам 1-ой ВНК "Инфотелекоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения". – Курск. - В 2-х частях. – 2017, ч.1. – С.61-66.

3.4 Куракова Т.П., Сарьян В.К. Моделирование радиоканалов миллиметрового диапазона частот / Труды НИИР. - 2017, №1. – С.33-39.

3.5 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.

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

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

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

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

3.10 Бортник Г.Г., Васильківський М.В. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання.- Вінниця:ВНТУ, 2018.- 50 с.

#### 4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра телекомунікаційних систем та телебачення, студент групи ТКС-18м Мельничук О. І.

#### 5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження радіоканалів міліметрового діапазону 5G покоління.

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

1. Діапазон робочих частот – 70-80 ГГц;
2. Діаметр антени – 60 см;
3. Довжина радіотракту – 2560 м;
4. Швидкість передавання інформації – 2 Гбіт/с;
5. Формат модуляції – 64-QAM;
6. Доступність каналу зв'язку – 99,97%;
7. Режим роботи каналу передавання – частотний симетричний дуплекс;
8. Коефіцієнт бітових помилок –  $10^{-6}$ ;
9. Значення Q-фактору – 6,5 дБ;
10. Ширина смуги частот каналу передавання – 500 МГц;
11. Тип мультиплексування каналів передавання – частотне;
12. Тип ущільнення в каналі передавання – OFDM.

При розробці радіоканалу слід максимально використовувати стандартні та уніфіковані деталі.

## 6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		початок	закінчення		
1.	Розробка технічного завдання (ТЗ)	02.09.2019р.	06.09.2019р.	Розроблене ТЗ	Додаток А
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки (ТЕО)	09.09.2019р.	13.09.2019р.	Розроблене ТЕО	Вступ. Розділ 1.
3.	Розробка моделі радіоканалів міліметрового діапазону частот	16.09.2019р.	04.10.2019р.	Проведена розробка	Розділ 2
4.	Моделювання радіоканалу міліметрового діапазону хвиль	07.10.2019р.	25.10.2019р.	Розроблене моделювання	Розділ 3
5.	Реалізаційна основи імітаторів радіоканалів ммд	28.10.2019р.	08.11.2019р.	Реалізація дослідження	Розділ 4
6.	Аналіз економічної ефективності	11.11.2019р.	15.11.2019р.	Економічна частина	Розділ 5
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	18.11.2019р.	22.11.2019р.	Частина ОТ та БНС	Розділ 6
8.	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	25.11.2019р.	29.11.2019р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
9.	Нормоконтроль, попередній захист, рецензування МКР	02.12. 2019р.	06.12.2019р.	Позитивні відзиви	Відзив. рецензія
10.	Захист МКР ЕК		09.12. 2019р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

## 7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

1. Структурна схема імітатора поширення радіосигналу по каналах ММД;
2. Структурна схема модуля управління радіосистемою міліметрового діапазону;
3. Структурна схема для технічного контролю апаратури покоління 5G;
4. Імітатор поширення ММХ на проміжній частоті;
5. Модуль управління комплексом імітації радіоканалів ММД;
6. Алгоритм управління імітатором ослаблення сигналу ММД.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі телекомунікацій:

- Регіональний Центр експлуатації телекомунікаційної мережі України шляхом впровадження радіоканалу ммд;
- ПАТ “Укртелеком” шляхом впровадження нових розробки імітатора радіоканалу.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення радіоканалу ммд.

## 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:

- Техніко-економічне обґрунтування розробки;
- Структурну схему імітатора поширення радіосигналу по каналах ММД;
- Структурну схему модуля управління радіосистемою міліметрового діапазону;
- Структурну схему для технічного контролю апаратури покоління 5G;

- Імітатора поширення ММХ на проміжній частоті;
- Модуль управління комплексом імітації радіоканалів ММД;
- Алгоритм управління імітатором ослаблення сигналу ММД.

## 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.

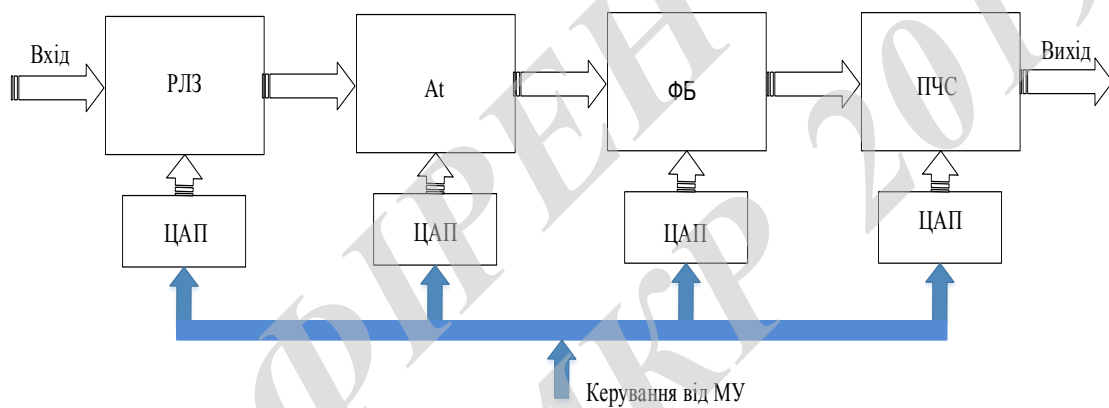
ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

Добаток Б  
(Обов'язковий)

Структурна схема імітатора поширення радіосигналу по каналах ММД

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019



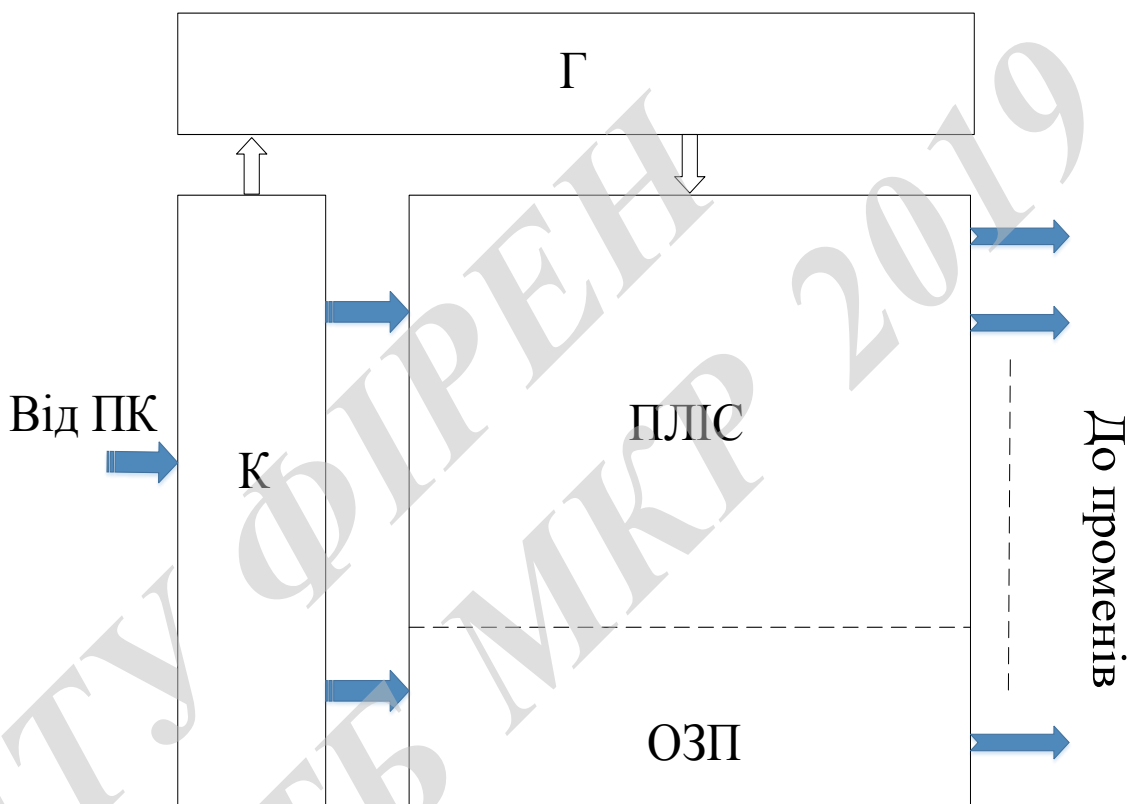


					08-34.МКР.006.00.000.E8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Структурна схема імітатора поширення радіосигналу по каналах ММД					
Розроб.		Мельничук О. І.						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.							1	1
Реценз.		Коваль Л. Г.						ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		Бортник Г. Г.								

Додаток В  
(Обов'язковий)

Структурна схема модуля управління радіосистемою міліметрового діапазону

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МАКР 2019



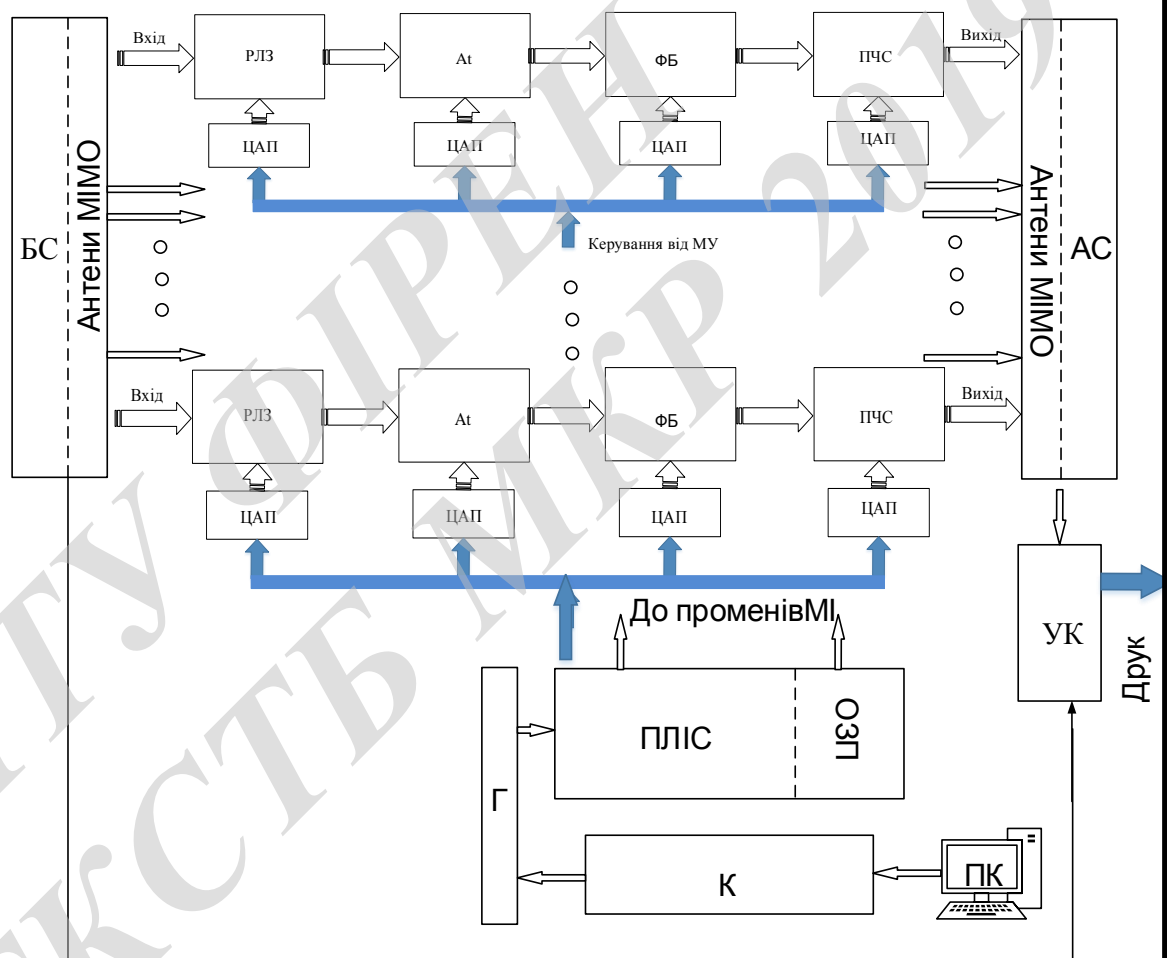
08-34.МКР.006.00.000.Е1

Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Мельничук О. І.			Структурна схема модуля управління радіосистемою міліметрового діапазону	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.		Коваль Л.Г.				ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		БОРТНИК Г. Г						

Додаток Г  
(Обов'язковий)

Структурна схема для технічного контролю апаратури покоління 5G

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

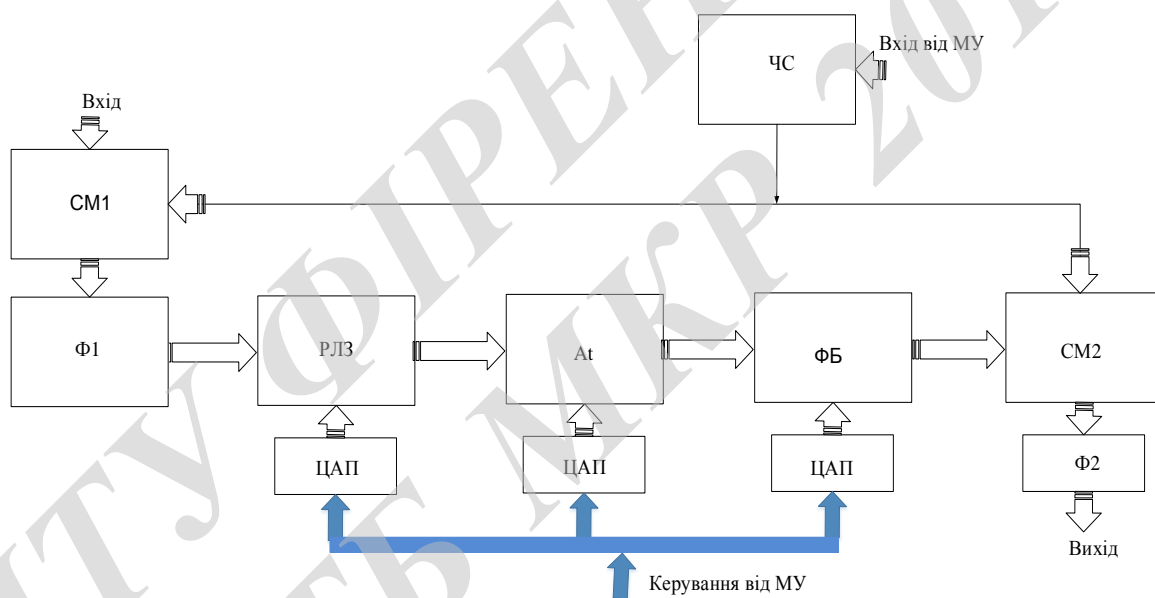


					08-34.МКР.006.00.000.E8		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Мельничук О. І.			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.				1	1
Реценз.		Коваль Л.Г.			ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.					
Затверд.		БОРТНИК Г. Г					
Структурна схема для технічного контролю апаратури покоління 5G							

Додаток Д  
(Обов'язковий)

Імітатор поширення ММХ на проміжній частоті

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019



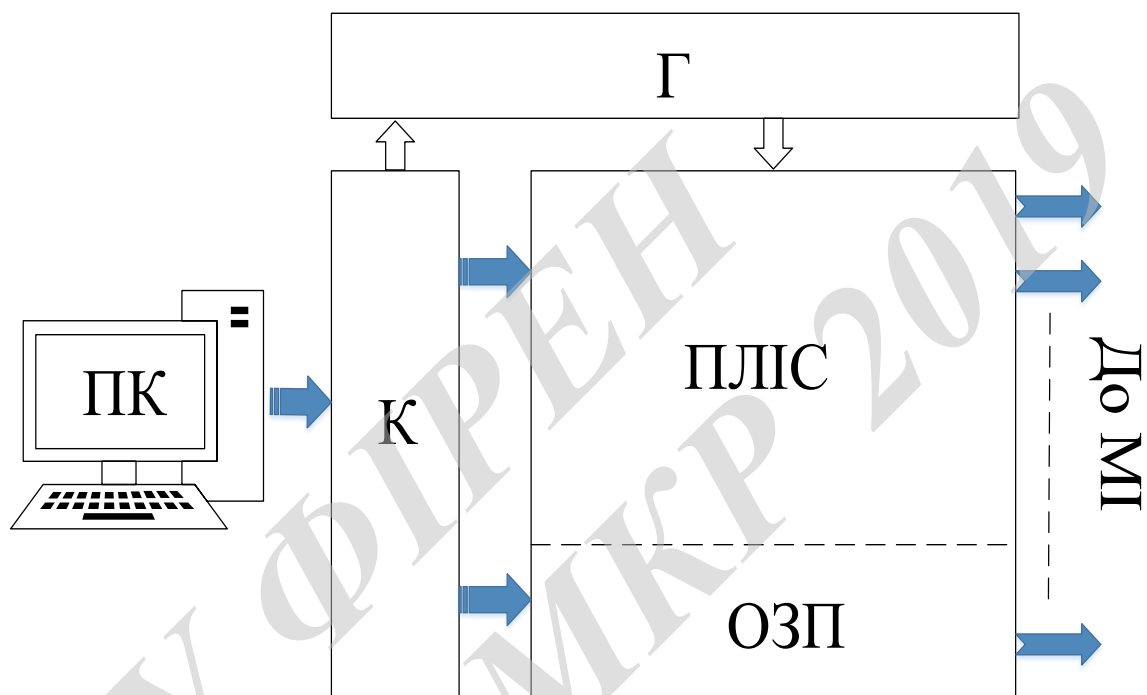
					08-34.МКР.006.00.000.Е1					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Імітатор поширення ММХ на проміжній частоті					
Розроб.		Мельничук О. І.						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.							1	1
Реценз.		Коваль Л. І.						ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		БОРТНИК Г. Г.								

Додаток Е  
(Обов'язковий)

Модуль управління комплексом імітації радіоканалів ММД

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019



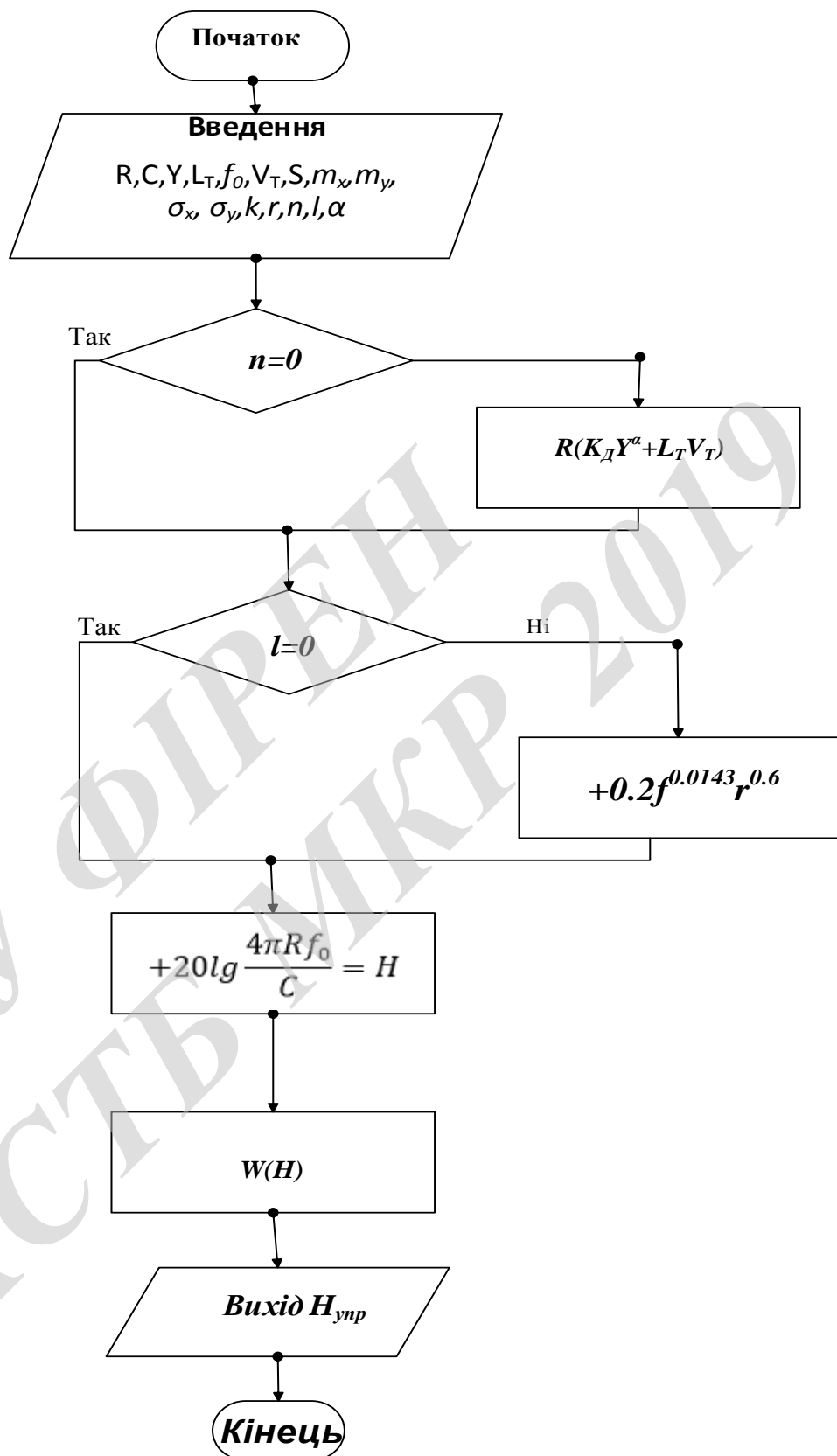


					08-34.МКР.006.00.000.E8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Модуль управління комплексом імітації радіоканалів ММД					
Розроб.		Мельничук О. І.						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.							1	1
Реценз.		Коваль Л.Г.						ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		Бортник Г. Г.								

Додаток Є  
(Обов'язковий)

Алгоритм управління імітатором ослаблення сигналу ММД

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019



					08-34.ПП.006.00.000.E8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Мельничук О. І.			Алгоритм управління імітатором ослаблення сигналу ММД	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.		Коваль Л. Г.				ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Бортник Г. Г.						

Додаток Ж  
(довідниковий)

Допустимі значення виробничих чинників

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019

Таблиця 6.1 – Нормовані допустимі параметри мікроклімату в приміщенні

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іа	21-25	18-26	75	≤0,1
Теплий		22-28	20-30	55 при 28°С	0,1-0,2

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин [54]

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

Таблиця 6.3 – Число іонів в 1 см<sup>3</sup> повітря приміщення під час роботи на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
позитивний	400	1500-3000	50000
негативний	600	3000-5000	50000

Таблиця 6.4 – Нормативні значення КПО і мінімальні освітленості для штучного освітлення

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 6.5 – Нормовані рівні шуму та еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку та 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 6.6 – Допустимі рівні віброприскорення [50]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах з 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

ВНТУ ФІРЕН  
ТКСТЬ МКР 2019