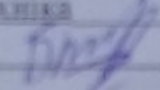


Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

ОСОБЛИВОСТІ ПЛАНУВАННЯ І ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖ 5G

Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-216
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

 Брижотка Н.К.

Керівник: к.т.н., доцент, каф. ІКСТ

 Стальченко О.В.
« 12 » 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., доцент каф. ІРТС

 Осалтук Я.О.
« 12 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

 Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“5” 05 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Брацюсі Назару Костянтиновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Особливості планування і проектування мереж 5G

керівник роботи Стальченко Олександр Володимирович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від “20” березня 2025 року № 97

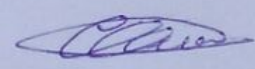
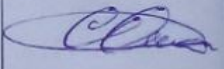
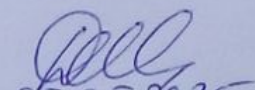
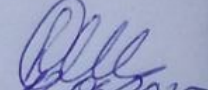
2. Строк подання студентом роботи: 9 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: частота радіоканалу – 30 кГц; висота антени БС – 30м, висота антени МС – 1,5 м вихідна потужність БС – 50 дБм, вихідна потужність МС – 23 дБм запас на затінення – 8,7 дБ кількість виділених ресурсних блоків – 133 і 273, зона – міська

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): теоретичні основи та принципи роботи мереж 5G, планування та проектування мереж 5G, розгортання мережі 5G на основі LTE, розрахунок мережі 5G, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Сценарії використання 5G; Загальна архітектура мережі 5G; Вимоги до продуктивності мережі; мережеві архітектури; Варіанти розгортання мереж 5G; Архітектура комбінованої мережі 5G/LTE; Варіант архітектури 5G на основі LTE

6. Консультанти розділів роботи

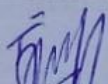
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Стальченко О.В. доцент кафедри ІКСТ	 05.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С. В. професор кафедри БЖДПБ	 05.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «5» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

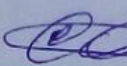
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Приміт
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	31.05.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	04.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Студент


(підпис)

Брацюха Н.К.

Керівник роботи


(підпис)

Стальченко О.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Брацюха Назар Костянтинович. Особливості планування і проєктування мереж 5G. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 91с.

На українській мові. Бібліогр.: 29 назв; Рис.: 10; Табл.: 9.

Дана бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена аналізу принципів планування і проєктування безпроводних мереж 5G. У роботі розглядаються основні принципи функціонування мереж 5G, технології, що використовуються в таких мережах, а також специфічні вимоги до інфраструктури та ресурсів, необхідних для їхнього розгортання. Крім того, здійснено аналіз труднощів, що можуть виникнути при проєктуванні таких мереж, а також їхніх перспектив на найближчі роки. Проведено розрахунок параметрів мережі. Розглянуто питання безпеки життєдіяльності та охорони праці.

Ключові слова: стільниковий зв'язок, п'яте покоління, проєктування.

ANNOTATION

UDK 621.397

Bratsiukha Nazar Kostiantynovych. Features of planning and designing 5G networks. Bachelor diploma work. – Vinnytsya: VNTU, 2025. – 91 pp.

In Ukrainian language. Refs.: 29 titles; Figs.: 10; Tables: 9.

The bachelor thesis is devoted to the analysis of the principles of planning and designing 5G wireless networks. The work considers the basic principles of functioning of 5G networks, technologies used in such networks, as well as specific requirements for infrastructure and resources necessary for their deployment. In addition, an analysis of the difficulties that may arise when designing such networks, as well as their prospects for the coming years, was carried out. The network parameters were calculated. The issues of life safety and labor protection were considered.

Keywords: cellular communication, fifth generation, design.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	6
Вступ.....	7
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ МЕРЕЖ 5G.....	9
1.1 Визначення та характеристика мереж 5G.....	9
1.2 Архітектура мережі 5G.....	12
1.3 Порівняння з попередніми поколіннями мереж.....	17
1.4 Основні технології мереж 5G.....	21
1.5 Структура сигналів 5G NR.....	28
2 ПЛАНУВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖ 5G.....	30
2.1 Загальні принципи планування мереж 5G.....	30
2.2 Проєктування радіоінтерфейсу мереж 5G.....	34
2.3 Етапи планування мережі 5G.....	38
2.4 Проблеми планування покриття мережі 5G.....	43
2.5 Інтеграція з попередніми поколіннями мереж.....	47
2.6 Управління трафіком та розподіл ресурсів у мережах 5G.....	51
3 РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ 5G НА ОСНОВІ LTE.....	55
4 РОЗРАХУНОК МЕРЕЖІ 5G.....	62
4.1 Розрахунок максимально допустимих втрат	62
4.2 Розрахунок зони покриття базової станції	65
4.3 Розрахунок швидкості передачі 5G NR.....	66
4.4 Оцінка радіопокриття.....	67
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	70

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	70
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	73
5.3 Пожежна безпека.....	77
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
Додаток А (обов'язковий) ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	86
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	91

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БС – базова станція
РС – ретрансляційна станція
1G – first generation
2G – second generation
3G – third generation
4G – fourth generation
5G – fifth generation
AR – augmented reality
D2D – Device-to-device
GPRS – General Packet Radio Services
IoT – Internet of things
LTE – Long-term evolution
M2M – Machine-to-machine
MIMO – Multiple Input, Multiple Output
NFV – Network Function Virtualization
NR – New Radio
NSA – Non-Standalone
OFDM
SA – Standalone
SDN – Software-Defined Networking
QoS –Quality of service
VR – virtual reality

ВСТУП

Актуальність теми. Технології мобільного зв'язку пройшли значний шлях еволюції, починаючи з перших поколінь 1G і до сучасної мережі 4G. Кожне нове покоління мереж приносило значні покращення як у швидкості передачі даних, так і в стабільності зв'язку, що дозволяло розширювати можливості комунікацій і відкривати нові горизонти для розвитку різних сфер життя. Проте з кожним новим поколінням вимоги до мережі зростали, і на перший план виходила необхідність впровадження нових технологій, здатних задовольнити зростаючий попит на швидкість, пропускну здатність і надійність зв'язку.

Особливо актуальним є впровадження п'ятого покоління мобільного зв'язку, або 5G. Завдяки надвисоким швидкостям передачі даних, мінімальній затримці (латентності) і значному збільшенню кількості підключених пристроїв, 5G відкриває нові можливості для розвитку таких технологій, як Інтернет Речей (IoT), автономний транспорт, смарт-міста, індустрія 4.0 та багато інших. Однак розвиток цієї технології вимагає нових підходів до планування та проєктування мережі, оскільки особливості 5G значно відрізняються від попередніх поколінь, зокрема, через використання нових частотних діапазонів, малих клітин (small cells) та більш складну інфраструктуру.

З огляду на ці фактори, актуальність дослідження особливостей планування і проєктування мережі 5G є надзвичайно високою, оскільки успішна реалізація 5G здатна значно змінити технологічний ландшафт не тільки в галузі телекомунікацій, але й в усіх сферах економіки та суспільства. Однак існує низка проблем, таких як забезпечення покриття, безпека мережі, економічна ефективність розгортання та багато інших, що потребують детального вивчення.

Аналіз останніх досліджень. Серед вітчизняних та закордонних науковців, роботи яких присвячені плануванню, проєктуванню та розгортанню мереж зв'язку п'ятого покоління, уваги заслуговують праці таких вчених як Климаш М.М., Бешлей М.І., Одарченко Р.С., Скулиш М.А [1-7]. У роботах [8-13] було досліджено особливості розгортання мереж п'ятого покоління. Шляхи застосу-

вання новітніх технологій плануванні та проєктування мереж зв'язку п'ятого покоління розглядають у роботах [14-16].

Об'єктом дослідження в даній бакалаврській кваліфікаційній роботі є мережі мобільного зв'язку 5G, їх основні компоненти та принципи роботи.

Предметом дослідження є процеси планування та проєктування інфраструктури мережі 5G, зокрема, технології доступу до мережі, вимоги до частотних діапазонів, методи оптимізації і тестування мережі, а також технічні аспекти, що стосуються її впровадження

Мета та задачі дослідження. Метою даної бакалаврської дипломної роботи є дослідження особливостей планування та проєктування мереж 5G, а також вивчення ключових аспектів, що визначають ефективність впровадження цієї технології.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

- Описати архітектуру мережі 5G та її відмінності від попередніх поколінь мобільного зв'язку.
- Обґрунтувати особливості планування радіомережі 5G
- Визначити основні проблеми, які виникають при плануванні та проєктуванні мережі 5G.
- Оцінити перспективи розвитку мереж 5G та можливості їх інтеграції з іншими сучасними технологіями.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на LIV Всеукраїнській науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2025).

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ МЕРЕЖ 5G

1.1 Визначення та характеристика мереж 5G

5G (англ. fifth generation — «п'яте покоління») — це є стандарт п'ятого покоління стільникової мережі, на базі стандартів 5G/IMT-2020 для радіо інтерфейсів в області телекомунікацій, наступником 4G мережі [7]. Мережі п'ятого покоління є новим етапом у розвитку бездротових комунікацій, вони суттєво перевищують можливості попередніх поколінь (2G, 3G, 4G). Технології 5G орієнтовані не лише на збільшення швидкості передачі даних, а й на покращення масштабованості, покриття та ефективності в обробці трафіку. Вони створюють основу для широкомасштабного розвитку Інтернету речей (IoT), автономних транспортних засобів, розумних міст і нових бізнес-моделей.

Основною метою мереж 5G є значне покращення швидкості передачі даних, зниження латентності та підвищення здатності підтримувати одночасне підключення мільярдів пристроїв з різними вимогами до трафіку. Ці можливості дають нові можливості для розвитку цифрових технологій та підвищення якості життя (рис.1.1).

Мережі 5G забезпечують ефективний обмін даними у реальному часі, що особливо важливо для таких галузей, як медицина, фінансові технології, транспорт, енергетика і багато інших. Завдяки своїм характеристикам технологія 5G може задовольняти найрізноманітніші потреби: від мобільного Інтернету з високою швидкістю для кінцевих користувачів до високонавантажених промислових застосувань, таких як автоматизовані виробничі процеси або дистанційне управління роботами.

Мережі 5G можуть забезпечити швидкість до 10 Гбіт/с на рівні користувачького підключення, що в десятки разів більше порівняно з мережами 4G [1]. Це дозволяє передавати великий обсяг даних за мінімальний час і задовольняти потреби користувачів у високоякісних потокових відео, онлайн-іграх, віртуальній реальності та інших високошвидкісних додатках. Прогнозується, що мак-

симальна швидкість передачі даних за допомогою технології 5G може навіть досягати 20 Гбіт/с у майбутньому, що відкриває нові можливості для передачі великих обсягів даних.



Рисунок 1.1 – Сценарії використання 5G

Однією з найважливіших переваг мереж 5G є значне зниження латентності — часу, необхідного для передачі даних від відправника до отримувача. У мережах 4G латентність складає близько 30-50 мс, тоді як у мережах 5G вона знижується до 1 мс. Це зниження особливо важливе для застосувань, де критично важливо миттєво реагувати на сигнали, наприклад, у системах автономного водіння, медичних пристроях для хірургічних операцій на відстані та у багатьох інших реальних часі додатках.

Мережі 5G здатні підтримувати підключення до мільярдів пристроїв в одному географічному районі без значного зниження продуктивності. Очікується, що на кожен квадратний кілометр буде можливо підключити до 1 мільйона пристроїв у порівнянні з 100 000 пристроїв на такій самій площі в мережах

4G. Це критично важливо для розвитку Інтернету речей (IoT), коли десятки або навіть сотні пристроїв повинні взаємодіяти в реальному часі.

Вимоги до продуктивності мережі 5G подано у табл. 1.1

Таблиця 1.1 Вимоги до продуктивності мережі

Параметр	Значення
Пікова швидкість	>10 Гбіт/с
Швидкість для користувача	до 1 Гбіт/с
Щільність підключень	Мільйон з'єднань/ км.кв.
Мобільність	До 500 км/год
Затримка	1 мс

Мережі 5G забезпечують підвищену енергоефективність порівняно з попередніми поколіннями. Вони оптимізовані для ефективного використання енергетичних ресурсів, зокрема для малих базових станцій і для передавання даних на великих відстанях. Висока енергоефективність дозволяє мережам 5G працювати на довші відстані при зниженому енергоспоживанні, що особливо важливо для бездротових пристроїв з низьким енергоспоживанням.

Технологія 5G підтримує концепцію мережевих сегментів, що дозволяє створювати віртуальні частини мережі, кожна з яких оптимізована для виконання певного набору завдань або підтримки конкретних типів сервісів. Це дає змогу гнучко налаштовувати мережу в залежності від вимог кінцевого користувача: одна частина може бути оптимізована для швидкої передачі великих обсягів даних, інша — для мінімальної латентності, а ще одна — для забезпечення масових підключень.

Однією з основних особливостей мереж 5G є використання високочастотних спектрів, таких як millimeter wave (mmWave), діапазони частот від 24 ГГц до 100 ГГц. Ці спектри забезпечують високу пропускну здатність для швидкої передачі даних на коротких відстанях. У поєднанні з низькими і середніми час-

татами, які використовуються для забезпечення широкого покриття, мережі 5G можуть забезпечити високу швидкість і на великих відстанях.

Мережі 5G спроектовані так, щоб бути сумісними з попередніми поколіннями технологій, зокрема з 4G. Це означає, що користувачі зможуть переходити між різними поколіннями мереж в залежності від покриття та вимог до швидкості з'єднання, що дозволяє плавно інтегрувати нову технологію в існуючі інфраструктури.

1.2 Архітектура мережі 5G

Архітектура мережі 5G є значним кроком вперед порівняно з попередніми поколіннями мобільних мереж, такими як 4G (рис.1.2). Вона включає в себе нові компоненти і концепції, які дозволяють забезпечити високу пропускну здатність, низьку латентність та можливість підключення великої кількості пристроїв. У цьому підрозділі розглянемо основні елементи архітектури 5G, їх функціональні особливості та принципи роботи [12].

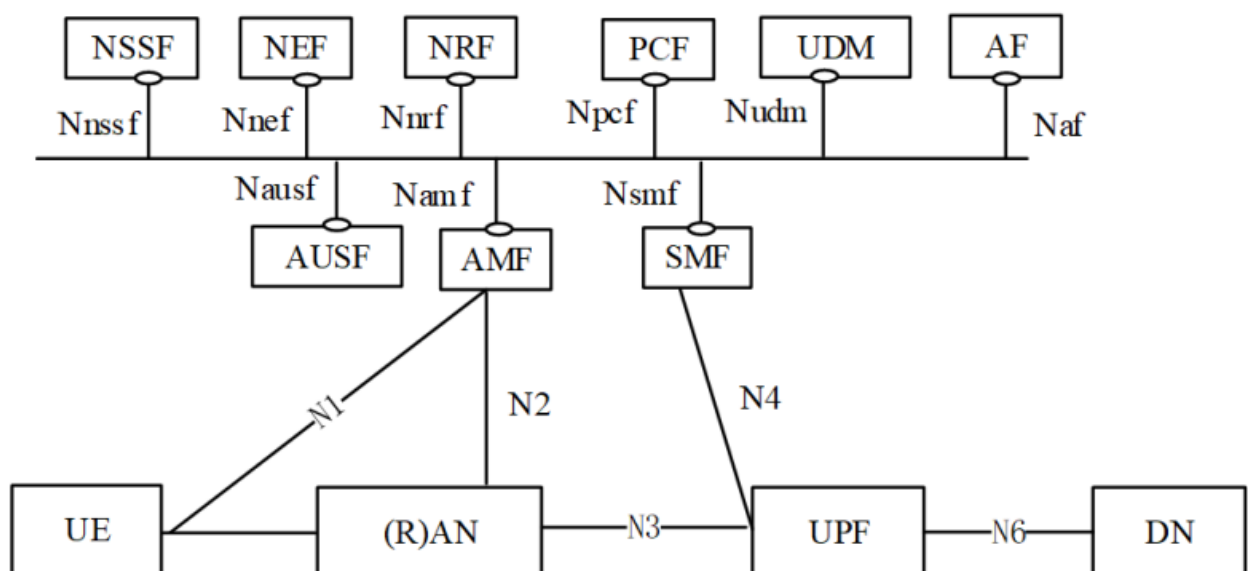


Рисунок 1.2 – Архітектура мережі 5G з точки зору сервіс-орієнтованої взаємодії різних мережевих функцій на площині управління

Архітектура мережі 5G складається з двох основних частин: радіомережі (RAN - Radio Access Network) і основної мережі (Core Network).

Кожна з цих частин має свої унікальні характеристики і завдання, але вони тісно взаємодіють для забезпечення ефективної роботи мережі в цілому.

Радіомережа 5G, що складається з базових станцій і користувацьких пристроїв, є компонентом, який відповідає за взаємодію з кінцевими пристроями (мобільними телефонами, IoT-пристроями, датчиками та іншими). Розглянемо основні складові елементи радіомережі 5G.

Базова станція 5G (gNB) – це основний компонент радіомережі, який забезпечує з'єднання між користувачами і основною мережею. Базові станції 5G мають здатність працювати в нових частотних діапазонах, таких як mmWave (міліметрові хвилі), а також підтримувати нові технології, як massive MIMO та beamforming.

Мережа 5G включає в себе такі основні програмні модулі і мережеві функції:

- Access and Mobility Management Function (AMF) – функція управління доступом і мобільністю
- Session Management Function (SMF) – функція управління сесіями
- User Plane Function (UPF) – функція передачі даних користувачів
- Unified Data Management (UDM) – модуль керування даними користувачів
- Unified Data Repository (UDR) – уніфікована база даних
- Unstructured Data Storage Function (UDSF) – система зберігання неструктурованих даних
- Network Slice Selection Function (NSSF) – функція вибору мережевого шару
- Policy Control Function (PCF) – функція управління політиками
- Network Exposure Function (NEF) – функція забезпечення взаємодії з зовнішніми додатками

- NF Repository Function (NRF) – сховище мережеских функцій
- Application Function (AF) – прикладна функція
- SMS Function (SMSF) – функція підтримки обміну короткими текстовими повідомленнями за допомогою протоколу NAS
- Non-3GPP InterWorking Function (N3IWF) – функція взаємодії з не-3GPP мережею доступу

Основна мережа 5G (5G Core) є серцем системи, де здійснюється управління трафіком, маршрутизація даних, а також обробка сигналів від користувачів. Розглянемо основні функції цієї частини мережі.

Сегментація мережі (Network Slicing) – один з ключових елементів архітектури мережі 5G. Мережескі сегменти (slices) дозволяють створювати віртуалізовані частини мережі, кожна з яких оптимізована для різних типів послуг, таких як автономні транспортні засоби, Інтернет речей (IoT) чи високошвидкісна передача даних. Це дозволяє ефективно використовувати ресурси мережі залежно від специфічних вимог.

Для обробки та маршрутизації даних (Data Plane) між користувачами, різними сегментами мережі та інтернетом мережа 5G має спеціалізовані компоненти. Це включає використання нових технологій віртуалізації для забезпечення гнучкості і масштабованості.

Контроль доступу та управління (Control Plane) як компонент мережі відповідає за управління підключеннями, аутентифікацію користувачів і контроль за трафіком. В основній мережі 5G використовується централізоване управління мережею, що дозволяє швидко адаптувати її до змінюваних умов.

5G Authentication Server (AUSF) – це сервер аутентифікації користувачів, який забезпечує безпеку мережі і підтверджує особистість підключеного пристрою.

User Plane Function (UPF) відповідає за передачу даних між кінцевими пристроями і мережею, зокрема за маршрутизацію трафіку до користувачів. Цей компонент забезпечує знижену затримку і високошвидкісну передачу даних.

Однією з важливих особливостей архітектури 5G є її розподіленість та віртуалізація. У порівнянні з попередніми поколіннями мобільних мереж, 5G розвивається в напрямку побудови більш гнучких і адаптивних систем, що дозволяють підтримувати різноманітні сервіси та типи трафіку, а також забезпечувати більш високу ефективність управління ресурсами.

Мережі 5G активно використовують віртуалізацію для створення окремих логічних мереж на основі фізичних ресурсів. Це дозволяє ефективно використовувати інфраструктуру та надавати різні типи послуг через мережеві сегменти (network slicing). Кожен сегмент може мати свої вимоги до швидкості, латентності та пропускної здатності, що дозволяє оптимізувати використання ресурсів для різних сценаріїв.

Мережеві сегменти або network slices є основним механізмом для адаптації 5G мереж до різних потреб користувачів і додатків. Кожен сегмент може бути оптимізований під конкретні вимоги, наприклад: один сегмент може бути оптимізований для високошвидкісної передачі даних, що важливо для відео-стрімінгу або ігор. Інший сегмент може бути орієнтований на низьку латентність і високу надійність, що необхідно для автономного транспорту або медичних систем у реальному часі. Ще один сегмент може підтримувати масові підключення для Інтернету речей (IoT), де тисячі пристроїв можуть підключатися одночасно без зниження якості зв'язку [3].

Мережі 5G повинні бути сумісні з попередніми поколіннями мереж (4G, 3G, 2G), щоб забезпечити безперервне обслуговування користувачів, які переходять між різними мережами. Це забезпечується завдяки технології Non-Standalone (NSA), коли мережі 5G співіснують з мережами 4G до того часу, поки не буде реалізовано повне розгортання 5G. Однак, з часом планується перехід на Standalone (SA) архітектуру, де мережа 5G буде повністю незалежною.

Як видно з рис. 1.3, SA мережа 5G може працювати повністю незалежно від мережі LTE. Взаємодія з даною мережею необхідна для охоплення зон, не покритих 5G, та з'єднати користувачів 5G з користувачами, які не використовують 5G.

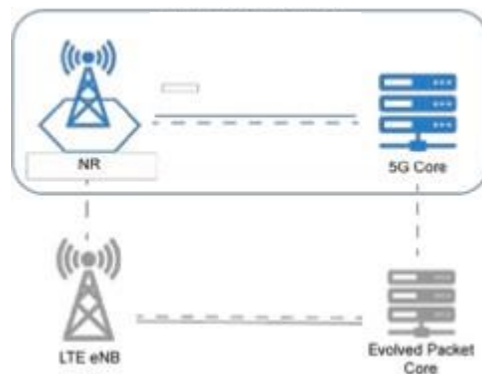


Рисунок 1.3 — Самостійна мережева архітектура

На рис. 1.4 показано структуру несамоїсної 5G мережі, яка використовує лише EPC ядра 5G NR стільників. Провайдери встановлюють антени 5G і використовуватимуть мережу LTE для управління та доставки. При цьому 5G NSA має структуру «ведучий-ведений», де вузли доступу 4G ведуть, а вузли доступу 5G ведуться [7].

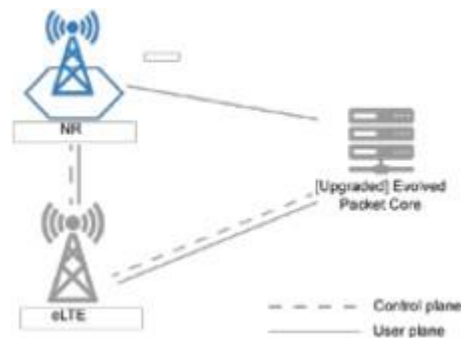


Рисунок 1.4 — Несамоїсна мережева архітектура

Архітектура 5G включає кілька нових концепцій та моделей мережевих елементів. Так, Centralized RAN (C-RAN) – це модель, в якій базові станції та контролери радіомережі централізовані в одному або кількох центрах обробки даних, що дозволяє знижувати витрати на інфраструктуру. Модель Cloud RAN (Cloud-RAN) передбачає використання хмарних технологій для обробки радіот-

рафіку, що дозволяє досягти більшої гнучкості та масштабованості в управлінні мережею.

Переваги архітектури мережі 5G це:

1. Масштабованість: Здатність підтримувати велику кількість пристроїв і додатків завдяки технології сегментації мережі.
2. Гнучкість: Можливість адаптації мережі під різні типи трафіку та послуг завдяки віртуалізації.
3. Ефективність: Оптимізоване використання ресурсів для забезпечення високої швидкості передачі даних і низької латентності.

1.3 Порівняння з попередніми поколіннями мереж

Мережі 5G є значним кроком уперед порівняно з попередніми поколіннями мобільних комунікацій, такими як 4G, 3G та 2G [5]. Кожне нове покоління мобільних мереж вносить суттєві зміни в архітектуру, швидкість передачі даних, латентність і можливості підключення пристроїв. У цьому підрозділі ми порівняємо мережі 5G з попередніми поколіннями з точки зору основних характеристик, таких як швидкість передачі даних, латентність, пропускна здатність, кількість підключених пристроїв, а також нові можливості, які вони забезпечують.

1.3.1 Швидкість передачі даних

Однією з найбільших переваг мережі 5G є висока швидкість передачі даних порівняно з попередніми поколіннями.

Мережі другого покоління забезпечують швидкість передачі даних до 64 кбіт/с. Вони здебільшого використовувались для голосового зв'язку та текстових повідомлень (SMS), і тільки пізніше з'явилися можливості для передачі да-

них через GPRS (General Packet Radio Services), що дозволило здійснювати базовий мобільний Інтернет.

Мережі третього покоління забезпечували швидкість до 2 Мбіт/с в умовах мобільного підключення та до 384 кбіт/с при використанні в режимі стаціонарного доступу. 3G дозволив реалізувати такі сервіси, як відеозв'язок і мобільний Інтернет з більшими швидкостями, хоча вони все одно залишались обмеженими для сучасних вимог до швидкості передачі даних.

Мережі четвертого покоління забезпечують швидкість до 100 Мбіт/с для мобільних підключень і до 1 Гбіт/с при стаціонарному використанні. 4G дозволив використовувати такі сервіси, як HD-відео, швидкісне серфінгування в Інтернеті, онлайн-ігри з високою роздільною здатністю, а також запустив багатопоточні додатки.

Мережі п'ятого покоління здатні забезпечити теоретичні швидкості до 10 Гбіт/с на рівні користувацького підключення, що в десятки разів перевищує можливості 4G. Практично ж, на користувацькому рівні швидкість зазвичай буде коливатися в межах 1-5 Гбіт/с, що дозволить забезпечити високоякісне відео у форматах 4K і 8K, миттєву передачу великих обсягів даних і нові формати додатків, таких як віртуальна реальність (VR) і доповнена реальність (AR).

1.3.2 Латентність

Латентність — це час, необхідний для передачі сигналу між відправником і отримувачем. Зниження латентності є однією з основних характеристик технології 5G [8].

Латентність в мережах 2G була досить високою і могла сягати 500 мс, що робило будь-які реальні часи взаємодії неефективними і непридатними для більшості сучасних додатків.

У мережах 3G латентність була знижена до 100-150 мс, що дозволило покращити якість голосових дзвінків і вперше дозволити здійснювати відеодзвінки.

Мережі 4G забезпечували латентність у діапазоні від 30 до 50 мс, що стало достатньо для високоякісного відео- та голосового зв'язку, а також для сучасних інтернет-сервісів.

Однією з найбільших переваг мережі 5G є наднизька латентність, яка досягає до 1 мс. Така латентність критична для застосувань, що потребують миттєвих реакцій, таких як автономні транспортні засоби, медичні операції в реальному часі та роботизовані виробничі процеси.

1.3.3 Кількість підключених пристроїв

З кожним новим поколінням мобільних мереж збільшувалась кількість підключених пристроїв, що в свою чергу сприяло розвитку Інтернету речей (IoT) і нових концепцій, таких як розумні міста [16].

Мережі 2G підтримували лише голосовий зв'язок і обмежену кількість текстових повідомлень. Вони не були розроблені для великої кількості підключених пристроїв.

Мережі третього покоління дозволили забезпечити більшу кількість підключених пристроїв завдяки розвитку технологій для передачі даних, але мережі 3G все одно мали обмежену здатність до обробки великої кількості пристроїв одночасно.

У мережах 4G кількість одночасно підключених пристроїв була значно збільшена, і вони почали підтримувати масові підключення до інтернету, зокрема завдяки розвитку Інтернету речей (IoT).

Мережі 5G здатні підтримувати до 1 мільйона пристроїв на квадратний кілометр. Це дозволяє ефективно використовувати технології IoT для підключення великої кількості пристроїв в умовах міської інфраструктури, промислових зон та навіть сільських територій, де необхідна велика кількість датчиків для збору інформації.

1.3.4 Пропускна здатність

Пропускна здатність мережі визначає, скільки даних може передаватися через мережу за одиницю часу, що безпосередньо впливає на ефективність роботи додатків і сервісів.

Мережі 2G забезпечували низьку пропускну здатність і обмежували обсяг передаваних даних, що підходило тільки для текстових повідомлень і голосових дзвінків.

Мережі третього покоління вже могли передавати більший обсяг даних, забезпечуючи пропускну здатність до 2 Мбіт/с, що дозволяло передавати відео та здійснювати мобільний Інтернет.

Мережі 4G забезпечують значно вищу пропускну здатність, яка досягає 100 Мбіт/с для мобільного доступу та до 1 Гбіт/с для стаціонарного підключення, що дозволяє працювати з важкими медіа-файлами та відео в високій роздільній здатності.

Пропускна здатність 5G здатна досягати 10 Гбіт/с на рівні користувацького підключення. Це дозволяє здійснювати передавання даних у великих обсягах в реальному часі, зокрема для таких нових технологій, як віртуальна і доповнена реальність, а також для масових потокових передач даних, що є критичними для розвитку автономного транспорту, розумних міст і промислових додатків.

1.3.5 Інфраструктура та енергоефективність

Мережі 2G були дуже енергоефективними, оскільки вони обробляли лише голосові дзвінки і мали обмежену інфраструктуру, але вони не підтримували високі швидкості передачі даних.

Мережі 3G дозволяли більш ефективно передавати дані, однак енергоспоживання було вищим через збільшену складність мережі.

Мережі 4G забезпечують високу пропускну здатність, але інфраструктура 4G потребує значних енергетичних витрат для обробки великих обсягів даних.

Мережі 5G орієнтовані на підвищення енергоефективності, зокрема завдяки використанню малих базових станцій, технологій віртуалізації та зменшенню потреби в постійному передаванні даних завдяки використанню network slicing. Це дозволяє зменшити енергоспоживання і підвищити ефективність передачі даних.

1.4 Основні технології мереж 5G

Мережі 5G використовують ряд новітніх технологій, які дозволяють досягати безпрецедентної швидкості передачі даних, низької латентності, великих можливостей підключення пристроїв та енергоефективності. Це забезпечує підтримку великої кількості нових застосувань, таких як автономні транспортні засоби, Інтернет речей (IoT), віртуальна реальність (VR) та доповнена реальність (AR). У цьому підрозділі розглянемо основні технології, які лежать в основі мережі 5G.

1.4.1 Масивне MIMO

MIMO (Multiple Input, Multiple Output) — це технологія, що дозволяє одночасно передавати і приймати кілька потоків даних за допомогою множинних антен (рис.1.5). Це дає змогу підвищити пропускну здатність мережі без необхідності збільшення частотного спектра [4].

Для впровадження MIMO існує низка різних методів, деякі з яких наведено на рисунку 1.6. Кожен з цих методів передбачає детальні переваги та недоліки [12].

Massive MIMO — це розширена версія технології MIMO, де використовуються сотні або навіть тисячі антен для передачі даних. Кількість антен у базових станціях може значно перевищувати традиційні варіанти, що дозволяє збільшити швидкість передачі даних та покращити якість зв'язку в умовах високої щільності користувачів. Технологія Massive MIMO дає можливість збіль-

шити ефективність використання радіочастотного спектра і зменшити інтерференцію, що особливо важливо в умовах, коли велика кількість пристроїв підключена до мережі одночасно. Завдяки цій технології мережа 5G може досягати більш високих швидкостей передачі даних, знижувати латентність і підтримувати стабільне з'єднання навіть в районах з високою щільністю користувачів, таких як стадіони чи густонаселені міські райони.

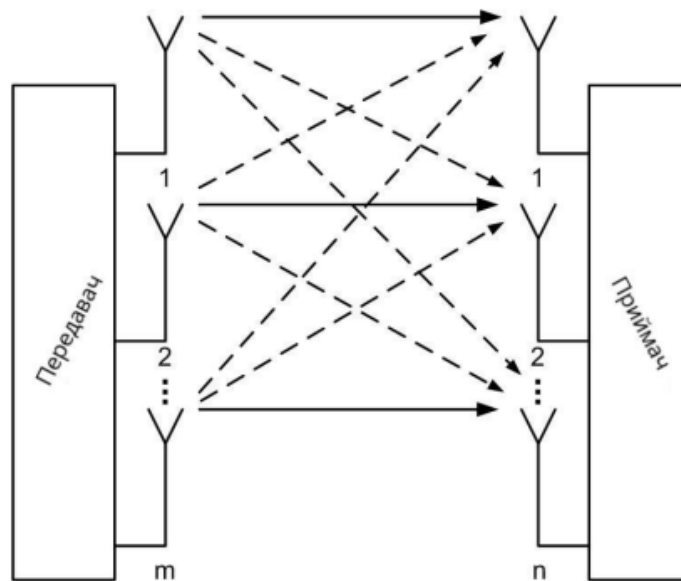


Рисунок 1.5 – Технологія MIMO



Рисунок 1.6 — Конфігурації MIMO

1.4.2 Технологія формування променя

Beamforming — це метод керування напрямком передачі сигналу, що дозволяє орієнтувати радіохвилі у певному напрямку, замість того щоб поширювати їх в усіх напрямках. Це дозволяє досягти вищої пропускну здатності та зниженої латентності (рис.1.7).

В 5G, завдяки Massive MIMO та використанню великої кількості антен, технологія beamforming дозволяє спрямовувати сигнали саме в напрямок кінцевого користувача або групи користувачів. Це підвищує ефективність використання радіочастотного спектра, оскільки сигнал стає сильнішим і менш схильним до загасання, а також зменшується рівень перешкод з боку інших пристроїв. Формування променя є критично важливим для роботи в діапазонах високих частот, таких як mmWave (міліметрові хвилі), де сигнал може швидко загасати через атмосферні умови, перешкоди або будівлі [9].

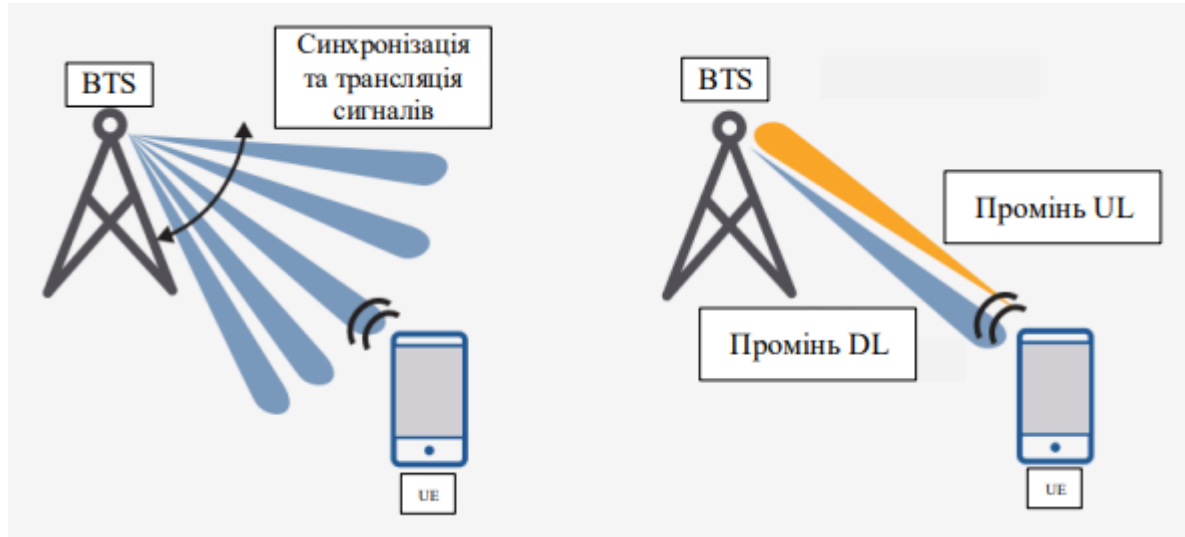


Рисунок 1.7 — Початкові процедури доступу

1.4.3 Малі базові станції

Малі базові станції — це компактні точки доступу, які забезпечують покриття на малих територіях і використовуються для покращення якості зв'язку в

умовах високої щільності користувачів. Малі базові станції можуть бути розташовані у внутрішніх приміщеннях, на вулицях, у підземних переходах та інших зонах, де традиційні великі базові станції не можуть забезпечити ефективне покриття. Вони допомагають зменшити навантаження на основну мережу та підвищити швидкість зв'язку для користувачів, знижуючи затримки і покращуючи якість сигналу. Ці станції використовуються для розширення покриття, особливо в густонаселених міських районах, а також для забезпечення високошвидкісного Інтернету у приміщеннях і на вулицях [14].

Архітектура базових станцій gNB для 5-го покоління мережі мобільного зв'язку 3GPP є продовженням ідеології розподілених базових станцій і «Cloud BBU». gNB складається з центрального модуля gNB-CU (gNB Central Unit) і одного або кількох розподілених модулів gNB-DU (gNB Distributed Unit). Рис. 1.8 демонструє варіант проектування базової станції.

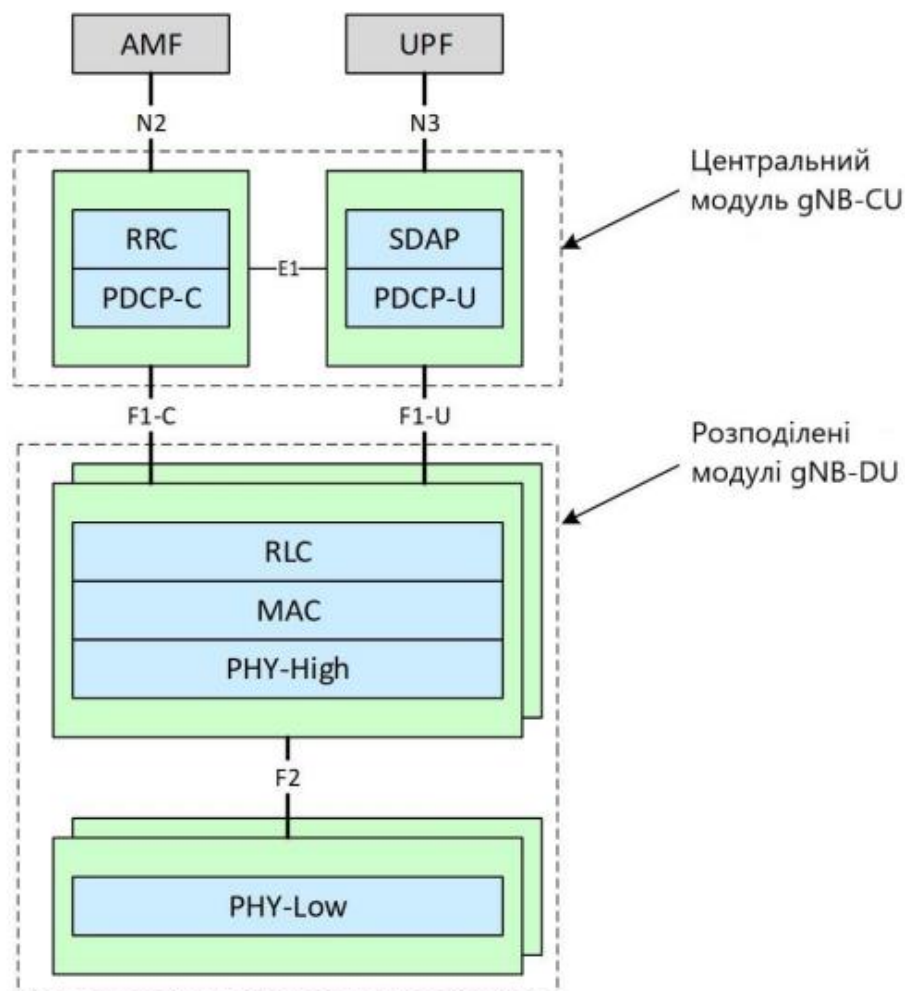


Рисунок 1.8 – Можливе проектування базової станції

1.4.4 Віртуалізація мережі

Віртуалізація мережі є однією з основних технологій, яка дозволяє значно підвищити гнучкість та ефективність управління мережами 5G.

Віртуалізація дозволяє створювати логічні мережі на основі фізичної інфраструктури, що дозволяє оптимізувати ресурси мережі для різних застосувань і сервісів [13].

В рамках мережі 5G використовуються мережеві сегменти (network slicing) — метод, що дозволяє розділяти мережу на окремі частини для конкретних потреб. Кожен сегмент може мати свої специфічні вимоги до пропускної здатності, латентності та рівня безпеки, що забезпечує максимальну адаптивність і ефективність мережі.

Віртуалізація також дозволяє розподіляти навантаження між різними ресурсами, зменшуючи енергоспоживання і забезпечуючи більш ефективну роботу в умовах постійного зростання кількості підключених пристроїв.

1.4.5 Технологія mmWave

mmWave (міліметрові хвилі) — це частотний діапазон, що лежить у межах 24-100 ГГц. Для порівняння, традиційні мобільні мережі працюють у діапазонах частот до 6 ГГц [2].

Мережі 5G активно використовують mmWave для забезпечення високої швидкості передачі даних. Міліметрові хвилі дозволяють передавати дані на великих швидкостях і з високою пропускною здатністю, що дозволяє підтримувати потоки даних для високоякісного відео, доповненої та віртуальної реальності, а також для підтримки великих обсягів даних у реальному часі.

Однак, mmWave має низький діапазон поширення сигналу і схильний до загасання через перешкоди, такі як будівлі або атмосферні умови. Тому для забезпечення стабільного зв'язку використовуються технології beamforming і малих базових станцій, які допомагають компенсувати ці обмеження.

Оскільки конструкції mmWave не дозволяють інтегрувати фазовий шум, більший інтервал між піднесучими на більш високих частотах підвищує надійність форми хвилі. Рисунок 1.9 показує, як різні піднесучі інтервали та часові інтервали передачі (TTI) пов'язані з кожною шкалою за розміром слота.

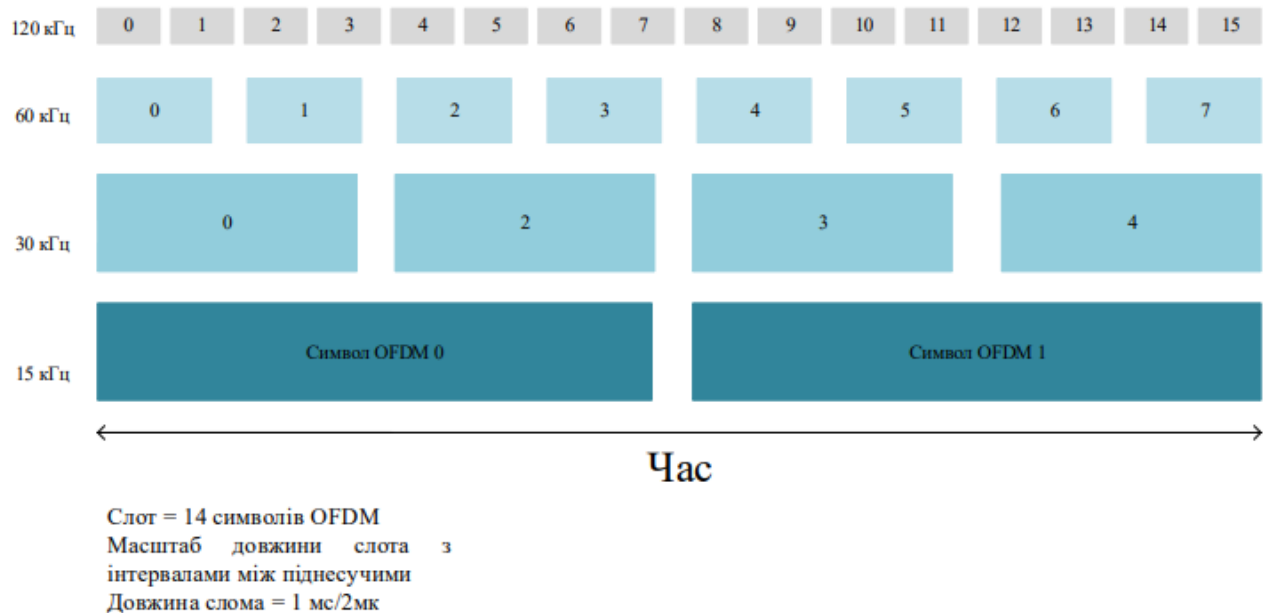


Рисунок 1.9 — Зв'язок між піднесучими та часом

1.4.6 Інтерфейс 5G New Radio

5G New Radio (NR) — це новий стандарт радіозв'язку для мереж 5G, який є основою для забезпечення високих швидкостей передачі даних, низької латентності та високої пропускної здатності. 5G NR включає вдосконалені технології для обробки сигналів, що дає змогу здійснювати одночасну передачу в кількох частотних діапазонах, що дає змогу підтримувати як існуючі частотні діапазони (sub-6 ГГц), так і високочастотні діапазони (mmWave). Крім того, 5G NR підтримує нові методи модуляції і кодування, що дозволяє ефективніше використовувати частотний спектр і покращує швидкість зв'язку, а також підтримує нові технології, такі як beamforming і massive MIMO.

1.4.7 Система управління та оркестрації

Орієнтовані на хмару системи управління і оркестрації в мережах 5G дозволяють оператору мережі централізовано керувати і оптимізувати роботу інфраструктури та сервісів [3]. Вони використовують автоматизовані процеси для розгортання і управління ресурсами мережі, що дозволяє забезпечити високий рівень адаптивності та масштабованості при збереженні низької латентності та високої ефективності. Завдяки інтеграції з технологіями віртуалізації та мережевого сегментування, ці системи дозволяють створювати кастомізовані рішення для конкретних користувачів або сценаріїв, що є важливим для адаптації 5G до різноманітних вимог різних типів сервісів і користувачів.

1.4.8 D2D (Device-to-device) та M2M (Machine-to-machine)

Використання технології device-to-device дає можливість пристроям, які знаходяться на невеликій відстані один від одного, виконувати безпосередній обмін даними, тобто без участі мережі 5G, через ядро якої у такому випадку проходить лише сигнальний трафік.

Міжмашинна взаємодія (M2M) — це загальна назва технологій, які дозволяють машинам передавати або обмінюватися інформацією один з одним. Периферійні вузли, комунікаційне обладнання та програмне забезпечення складають систему M2M. Найчастіше периферійні частини використовуються як датчики для визначення стану навколишнього середовища та стану роботи фізичних пристроїв. Зібрані дані миттєво перетворюються на цифрові сигнали, які потім передаються по мережі. Комунікаційне обладнання забезпечує передачу даних до програм і інших компонентів. Програмне забезпечення використовує дані датчиків для прийняття рішень і передачі команд пристроям. Такі бездротові технології мають багато незаперечних переваг. Застосування M2M-обладнання дозволяє заощадити на прокладанні кабельної інфраструктури, збе-

регти дорогоцінний час, скоротити кількість обслуговуючого персоналу та зробити роботу ефективнішою та легше керованою.

1.5 Структура сигналів 5G NR

Дослідники, що працюють у сфері бездротового зв'язку, в останні роки вивчали різноманітні сигнали з декількома несучими. Це створило різноманітні варіанти радіодоступу 5G. Сигнали, які використовують мультиплексування з ортогональним частотним розділенням або OFDM, добре підходять для дуплексної роботи з часовим поділом. Вони вже продемонстрували ефективну комерційну реалізацію з ефективним опрацюванням сигналів із все більш широкою смугою пропускання, підтримуючи програми, чутливі до затримок. Крім того, висока спектральна ефективність і сумісність сигналів OFDM з MIMO допомагають задовольнити вимоги цього нового стандарту стільникового зв'язку щодо надзвичайної щільності каналів і швидкостей передачі даних [6].

Сигнали OFDM демонструють високу стійкість у частотно-виборчих радіоканалах завдяки методам оцінки та вирівнювання сигнальних каналів. Тим не менш, у каналі зазвичай відбувається тимчасова дисперсія, оскільки через багатопромінність поширення та відображення частини переданого сигналу приймаються з різними затримками. Як наслідок, ортогональність вибірково втрачається, що призводить до інтерференції як між бітами, що містяться всередині символу, так і між символами. Для уникнення перекриття в початку OFDM-символу вставляється циклічний префікс, який містить кінцеві біти попереднього символу. Для запобігання міжсимвольним перешкодам і зменшення помилок синхронізації приймач може прикріпити копію кінця символу OFDM до початку символу, що є циклічним префіксом.

DFT-S-OFDM є кращим варіантом для висхідного каналу зв'язку. Одним із недоліків сигналів OFDM є їх високе відношення пікового рівня потужності до середнього рівня, або PAPR. Розробники системи хотіли б створити структуру сигналу, яка підтримує вискоефективний режим роботи передавача при од-

ночасному задоволенні спектральних вимог 5G, оскільки підсилювач потужності високої частоти мобільного пристрою споживає найбільшу кількість енергії.

Передавач модулює всі піднесучі однаковими даними за допомогою техніки DFT-S-OFDM (рисунок 1.10). Це забезпечує гнучкий розподіл частот піднесе OFDM і одночасно зменшує відношення пікового значення до середнього. Наприклад, PAPR CP-OFDM може становити 11-13 дБ, тоді як споживання DFT-S-OFDM може становити 6-9 дБ [9].

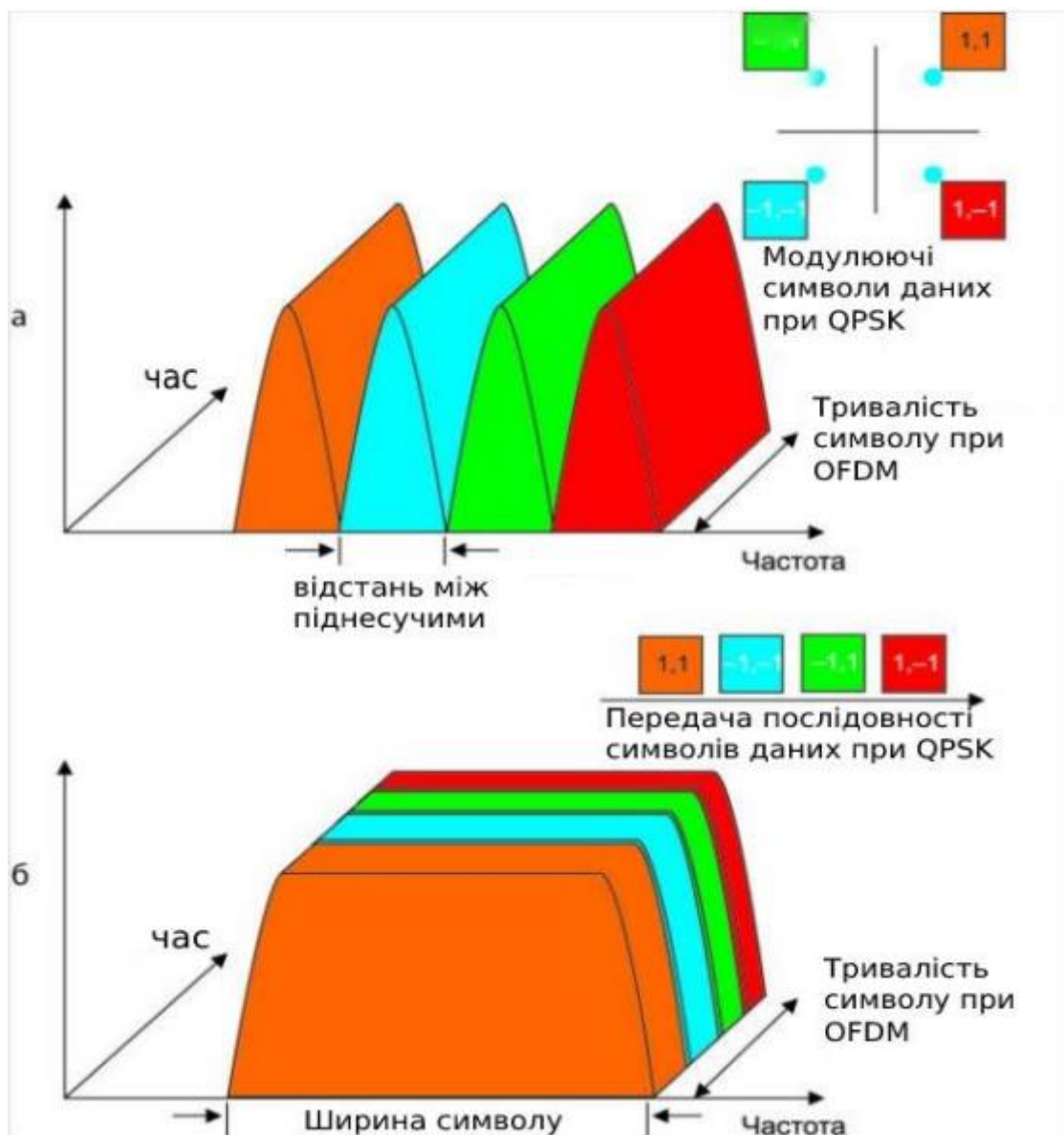


Рисунок 1.10 – Порівняння часової та частотної діаграм технологій: а) OFDM; б) DFT-S-OFDM

2 ПЛАНУВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖ 5G

Мережі 5G, як одна з найбільш передових технологій мобільного зв'язку, вимагають ретельного планування та проєктування для забезпечення ефективної роботи, високої продуктивності та стабільного покриття. Розгортання мереж 5G передбачає урахування безлічі факторів, таких як географічне розташування, щільність населення, технічні вимоги до інфраструктури, а також специфіка мережевих послуг [8].

2.1 Загальні принципи планування мереж 5G

Планування мереж 5G є складним і багатогранним процесом, який вимагає врахування численних факторів, таких як вимоги до покриття, пропускну здатності, латентності та масштабованості. Оскільки мережі 5G націлені на забезпечення високошвидкісного зв'язку з низькою затримкою і великою кількістю підключених пристроїв, їх проєктування повинно бути адаптоване до специфічних умов різних регіонів та потреб користувачів.

2.1.1 Оцінка потреб користувачів

Одним із перших етапів планування мережі 5G є оцінка потреб користувачів, оскільки ця технологія має обслуговувати різні типи користувачів із різними вимогами. Мережі 5G розраховані на підтримку великої кількості підключених пристроїв (від смартфонів до IoT пристроїв) і забезпечення високої пропускну здатності для даних, низької латентності для критичних застосувань і широкого покриття для віддалених регіонів. Для цього потрібно враховувати деякі аспекти.

Важливим аспектом є кількість користувачів. У міських районах, де густота населення висока, важливо забезпечити високу пропускну здатність і знизити ймовірність перевантаження мережі. У сільських або віддалених районах

мережа повинна забезпечувати стабільне покриття навіть за умов низької щільності користувачів.

Другий аспект, який необхідно врахувати, це типи трафіку. Для забезпечення належної якості послуг потрібно визначити, які види трафіку будуть переважати: відео- та аудіо-стрімінг, геймінг, Інтернет речей (IoT), віртуальна та доповнена реальність (AR/VR) або критичні системи (наприклад, автономні транспортні засоби або телемедицина).

І, нарешті, третій аспект — вимоги до затримки. Наприклад, для застосувань у сфері автономного транспорту або промислової автоматизації потрібна мінімальна затримка (менше ніж 1 мс). Для інших послуг, таких як стрімінг відео, можуть бути допустимі більші затримки.

2.1.2 Вибір частотного спектра

Частотний спектр є одним з ключових ресурсів у плануванні мереж 5G [1]. Вибір частотного діапазону безпосередньо впливає на покриття, швидкість передачі даних та ефективність використання спектру. Для мереж 5G використовуються два основні діапазони частот.

Низькі частоти (sub-6 ГГц) — діапазони до 6 ГГц, які забезпечують більшу зону покриття і краще проникнення сигналу через перешкоди (стелі, стіни, будівлі). Ці частоти використовуються для забезпечення зв'язку на більших відстанях і в умовах поганого покриття, наприклад, у сільських та гірських районах. Однак вони не забезпечують такої високої швидкості передачі даних, як високочастотні діапазони.

Високочастотні діапазони (mmWave) — частоти понад 24 ГГц (так звані міліметрові хвилі), які дозволяють досягати високих швидкостей передачі даних і забезпечують високу пропускну здатність мережі. Однак ці частоти мають обмежену дальність покриття і високу чутливість до перешкод, таких як будівлі, дерева, погодні умови. Тому вони зазвичай використовуються для забезпечення високошвидкісного доступу в густонаселених міських районах або в ок-

ремих зонах, де потрібна велика пропускна здатність, таких як спортивні стадіони чи бізнес-центри.

2.1.3 Моделювання покриття та щільність базових станцій

Одним з найважливіших аспектів планування мереж 5G є визначення місць для розміщення базових станцій та малих базових станцій (small cells). Мережі 5G вимагають набагато більшої щільності базових станцій у порівнянні з попередніми поколіннями мереж. Враховуючи короткий діапазон радіусів покриття для міліметрових хвиль, для забезпечення стабільного сигналу і високої швидкості передачі даних потрібно розміщувати базові станції в значно більшій кількості, ніж для мереж 4G. Під час планування покриття необхідно виконати ряд етапів.:

Перший етап – визначити місця для великих базових станцій. Враховуючи високі вимоги до швидкості та щільності трафіку, великі базові станції повинні бути стратегічно розташовані для забезпечення покриття на великих територіях, таких як міста та промислові зони.

Другий етап – використовувати малі базові станції (small cells). Для заповнення "покривних прогалин" і покращення якості зв'язку в місцях з високою концентрацією користувачів (наприклад, в міських умовах або на стадіонах) використовуються малі базові станції. Вони дозволяють значно покращити пропускну здатність і забезпечити стійкість мережі в умовах високої щільності користувачів.

Третій етап – моделювання покриття. Використовуються спеціальні моделі для оцінки покриття мережі, враховуючи типи використовуваних частот, щільність базових станцій і перешкоди на місцевості (будівлі, ландшафт тощо). Це дозволяє визначити оптимальне розташування станцій для досягнення максимального ефекту.

2.1.4 Забезпечення безпеки та конфіденційності

Безпека мережі є критичним аспектом її планування, оскільки мережі 5G підключають до Інтернету величезну кількість пристроїв, багато з яких будуть працювати в режимі реального часу і передавати конфіденційну інформацію [4]. Під час проєктування мережі, повинні бути враховані основні принципи безпеки.

Один із цих принципів – це шифрування даних. Мережі 5G мають забезпечувати надійне шифрування даних як на етапі передачі, так і на етапі зберігання, щоб захистити конфіденційну інформацію від несанкціонованого доступу.

Другий принцип – аутентифікація користувачів і пристроїв. Система повинна мати надійні механізми аутентифікації для запобігання несанкціонованому доступу до мережі і захисту пристроїв від атак.

Ще один принцип, який необхідно врахувати, це розподілене управління безпекою. Оскільки мережа 5G може об'єднувати великі обсяги даних і різноманітні пристрої, важливо забезпечити централізоване управління безпекою для своєчасного виявлення і реагування на загрози.

2.1.5 Інтеграція з попередніми поколіннями мереж

У процесі розгортання мереж 5G важливо забезпечити інтеграцію з існуючими мережами попередніх поколінь, зокрема 4G. Це дозволяє зберегти сумісність з існуючими користувачами та послугами під час переходу на нову технологію. Найпоширенішими підходами є дві технології:

Технологія Non-Standalone (NSA) – у мережі 5G використовують інфраструктуру 4G (наприклад, контролери мобільного доступу), щоб забезпечити спільну роботу з мережею 4G, знижуючи витрати на розгортання мережі 5G і забезпечуючи поступовий перехід до повністю автономної мережі 5G.

Технологія Standalone (SA) – мережа 5G працює повністю автономно, без залучення інфраструктури попередніх поколінь. Цей підхід забезпечує найкращу ефективність і дозволяє повністю використовувати всі переваги технологій 5G, таких як низька латентність і висока пропускна здатність.

Отже, планування мереж 5G вимагає комплексного підходу до оцінки потреб користувачів, вибору частотного спектра, проектування інфраструктури та забезпечення безпеки. Врахування усіх цих факторів дозволить створити ефективну, надійну і безпечну мережу, здатну задовольнити зростаючі вимоги до зв'язку в епоху Інтернету речей, автономних транспортних систем, розумних міст та інших інноваційних застосунків.

2.2 Проектування радіоінтерфейсу мереж 5G

Проектування радіоінтерфейсу є одним із ключових етапів створення мережі 5G, оскільки від якості радіоінтерфейсу залежить ефективність зв'язку, пропускна здатність, покриття і стійкість мережі до зовнішніх перешкод. У порівнянні з попередніми поколіннями мобільних мереж, 5G має нові вимоги до швидкості передачі даних, латентності, кількості підключених пристроїв і ефективності використання спектру. Проектування радіоінтерфейсу мережі 5G враховує не тільки використання нових частотних діапазонів, але й інноваційні технології, які забезпечують високу пропускну здатність, низьку латентність і надійність зв'язку.

2.2.1 Вибір частотного спектра для 5G

Однією з основних особливостей мережі 5G є використання нових частотних діапазонів для забезпечення високошвидкісного доступу і високої пропускної здатності [15]. Мережі 5G працюють на різних частотах, що дозволяє задовольняти різні вимоги до покриття, швидкості і кількості підключених пристроїв. У загальному випадку використовуються два основних діапазони частот:

Низькі частоти (Sub-6 ГГц) – це діапазони частот до 6 ГГц, які забезпечують ширше покриття, більшу здатність проникати через перешкоди (будівлі, стіни) та стабільний сигнал на великих відстанях. Низькі частоти також допомагають забезпечити покриття у сільських та віддалених районах, де щільність населення невисока. Однак ці частоти мають обмежену пропускну здатність порівняно з високочастотними діапазонами.

Високі частоти (mmWave) – це частоти понад 24 ГГц (міліметрові хвилі), які забезпечують дуже високу швидкість передачі даних та велику пропускну здатність. Однак вони мають обмежену дальність покриття і чутливі до перешкод (наприклад, будівель чи атмосферних умов), що потребує використання великої кількості малих базових станцій і мікростанцій для забезпечення безперервного покриття. Високі частоти використовуються переважно в густонаселених міських районах і зонах з високим попитом на швидкість передачі даних (наприклад, спортивні арени, бізнес-центри).

2.2.2 Моделювання покриття та планування базових станцій

Мережі 5G потребують значно більшої кількості базових станцій у порівнянні з попередніми поколіннями мереж через обмежений радіус покриття високочастотних хвиль. Для забезпечення належної пропускну здатності та покриття мережа 5G використовує комбінацію великих базових станцій та малих базових станцій, таких як small cells. Оскільки для високочастотних сигналів характерна коротка дальність і висока чутливість до перешкод, основна увага під час проектування має бути спрямована на розміщення малих базових станцій і планування розташування базових станцій, а також інтерференцію та координацію частот.

Справа в тому, що для досягнення стабільного покриття в умовах високої щільності користувачів важливо впроваджувати малі базові станції, що розташовуються в місцях з великим скупченням людей, таких як стадіони, торгові

центри, аеропорти, офісні райони тощо [15]. Вони можуть бути встановлені на вулицях, в будівлях, підземних переходах і на даху.

Також, завдяки використанню спеціальних інструментів моделювання покриття можна оптимізувати місце розташування базових станцій для забезпечення рівномірного покриття та мінімізації зон із поганим сигналом. Моделювання враховує типи частот, топографічні особливості місцевості, наявність перешкод (будівлі, дерева, рельєф місцевості), а також рівень навантаження на мережу.

Окрім того, одним із важливих аспектів планування є зменшення перешкод між базовими станціями, що працюють на однакових частотах, зокрема, у міських районах з великою кількістю малих базових станцій. Для цього використовуються методи координації частот (FREQ) та управління інтерференцією, які допомагають зменшити перешкоди та забезпечити оптимальний розподіл частот у мережі.

2.2.3 Використання технології Massive MIMO

Масивне MIMO (Massive MIMO) є однією з основних технологій, що лежать в основі радіоінтерфейсу мережі 5G. MIMO (Multiple Input, Multiple Output) технологія дозволяє використовувати кілька антен для одночасної передачі та прийому сигналів, що підвищує пропускну здатність та знижує інтерференцію. У мережах 5G застосовується технологія Massive MIMO, що передбачає використання десятків або навіть сотень антен на базових станціях. Основні переваги Massive MIMO включають наступне.

Відбувається покращення пропускну здатності, адже використання великої кількості антен дозволяє передавати та приймати більше даних одночасно, що значно збільшує загальну пропускну здатність мережі.

Також має місце покращена якість зв'язку. Масивне MIMO дозволяє зменшити вплив перешкод і шуму в сигнал, що підвищує надійність зв'язку та знижує ймовірність втрат пакетів.

Окрім того, використання технології beamforming дозволяє спрямовувати сигнал безпосередньо на кінцевий пристрій, що зменшує втрати сигналу та підвищує ефективність використання спектру. Це особливо важливо для мереж 5G, де наявність великої кількості пристроїв і потреба в високій пропускній здатності вимагають більш ефективного використання ресурсів.

2.2.4 Технологія формування променя

Технологія beamforming є важливою складовою радіоінтерфейсу мережі 5G. Це технологія, що дозволяє формувати направлені сигнали, які спрямовуються безпосередньо до кінцевих користувачів. Використання beamforming дозволяє підвищити ефективність використання спектру. Оскільки сигнал спрямовується безпосередньо до користувача, зменшується витік енергії в інші напрямки, що дозволяє зменшити інтерференцію та поліпшити пропускну здатність. Окрім того, має місце покращення якості зв'язку. Завдяки точному спрямуванню сигналу на користувача знижуються втрати сигналу, що дозволяє забезпечити стабільне з'єднання на великих відстанях і в умовах високої щільності користувачів. Також відбувається зменшення впливу перешкод. Beamforming також дозволяє зменшити вплив перешкод, спрямовуючи сигнал тільки на той пристрій, з яким здійснюється з'єднання, і знижуючи таким чином рівень шуму і перешкод [11].

2.2.5 Управління потужністю та ефективністю використання спектру

Важливим аспектом проєктування радіоінтерфейсу є управління потужністю передавання і ефективність використання спектру. Оскільки спектр є обмеженим ресурсом, правильне управління потужністю і розподіл спектру мають вирішальне значення для забезпечення якості зв'язку та ефективності мережі.

У мережах 5G використовується технологія динамічного управління потужністю, що дозволяє адаптувати рівень потужності передавання залежно від умов середовища. Це дозволяє зменшити витрати енергії та покращити ефективність використання ресурсу спектру.

Застосовуються різні стратегії для ефективного управління спектром, такі як розподіл частот і оптимізація використання різних частотних діапазонів. Використання адаптивних технологій дозволяє змінювати параметри передавання для оптимізації продуктивності і забезпечення стабільного покриття.

2.2.6 Інтеграція з іншими мережами

Мережа 5G повинна бути здатна інтегруватися з попередніми поколіннями мереж, зокрема 4G, щоб забезпечити безперебійний перехід і збереження безпеки зв'язку для користувачів. У цьому контексті важливим є використання non-standalone (NSA) і standalone (SA) архітектур, що забезпечують зворотну сумісність і плавний перехід між поколіннями мереж.

Таким чином, проектування радіоінтерфейсу мережі 5G є складним процесом, що вимагає ретельного вибору частотного спектра, розташування базових станцій, використання технологій MIMO та beamforming, а також ефективного управління ресурсами для забезпечення високої пропускної здатності, низької латентності та стабільного покриття. Інтеграція новітніх технологій у радіоінтерфейс дозволяє мережам 5G відповідати зростаючим вимогам сучасних користувачів і нових додатків, таких як Інтернет речей, автономні транспортні засоби та доповнена реальність.

2.3 Етапи планування мережі 5G

Процес планування мережі 5G є складним та багатоступеневим, оскільки включає в себе низку етапів, що враховують різноманітні фактори: від вибору частотного спектра до розміщення базових станцій та забезпечення безпеки.

Кожен етап має на меті максимізувати ефективність мережі, її покриття, пропускну здатність та зручність для користувачів, враховуючи специфічні вимоги та обмеження. У цьому підрозділі розглядаються основні етапи планування мережі 5G, які є необхідними для її ефективного розгортання та експлуатації.

2.3.1 Оцінка вимог і цілей мережі

Першим етапом є оцінка вимог і цілей мережі, яка полягає в тому, щоб визначити, які саме характеристики мережі необхідно досягти. Це включає в себе вивчення потреб користувачів, цілей оператора та специфічних вимог до покриття та пропускну здатності.

Розглянемо основні аспекти, що оцінюються на цьому етапі.

Типи трафіку. Необхідно визначити, які типи сервісів будуть домінувати в мережі (наприклад, мобільний інтернет, IoT, відео, VR/AR), оскільки різні типи трафіку мають різні вимоги до затримки, пропускну здатності та надійності.

Щільність користувачів. В залежності від густоти населення у певних районах, потрібно забезпечити необхідне покриття та пропускну здатність.

Часова та просторова динаміка трафіку. Необхідно враховувати коливання навантаження в різний час доби або в певних локаціях (наприклад, на спортивних подіях або в туристичних зонах).

Цей етап дозволяє сформулювати базові параметри для розробки мережі 5G, що визначають її конфігурацію, кількість базових станцій, типи частот і стратегії управління трафіком.

2.3.2 Оцінка спектра та вибір частот

Другим етапом є оцінка спектра та вибір частот для мережі 5G. Оскільки 5G підтримує широкі діапазони частот, важливо вибрати такі діапазони, що найкраще підходять для досягнення поставлених цілей, забезпечення необхідної пропускну здатності та покриття. Вибір частот залежить від різних факто-

рів, таких як низькі частоти (sub-6 ГГц) для покриття великих територій і хорошого проникнення сигналу через будівлі та інші перешкоди та високі частоти (mmWave) для забезпечення високошвидкісного з'єднання в зонах з високою концентрацією користувачів (наприклад, в міських центрах, спортивних аренах або бізнес-районах).

Оцінка частотного спектра включає також врахування доступності ліцензій на частоти, обмежень по використанню, а також можливості сумісності з іншими мережами та стандартами [6].

2.3.3 Проєктування інфраструктури та базових станцій

Проєктування інфраструктури та базових станцій є важливим етапом планування мережі 5G, оскільки забезпечує фізичну реалізацію мережі. Враховуючи, що мережі 5G потребують набагато більшої щільності базових станцій, ніж попередні покоління мереж, важливо ретельно спланувати їх розташування.

На цьому етапі здійснюється наступні операції.

Розрахунок кількості базових станцій. Визначається необхідна кількість малих базових станцій (small cells), макробазових станцій та мікробазових станцій для забезпечення необхідного покриття, враховуючи характеристики місцевості та потреби користувачів.

Вибір місць для розташування станцій. За допомогою спеціалізованих інструментів для моделювання покриття проводиться оцінка найкращих локацій для базових станцій, що дозволить забезпечити максимальне покриття та мінімізацію зон без сигналу.

Оцінка впливу на оточення. Важливо враховувати існуючі інфраструктурні обмеження (будівлі, інші радіосистеми, екологічні вимоги тощо) при виборі місць для установки обладнання.

Ретельне проєктування інфраструктури допоможе уникнути перевантаження мережі та забезпечить стабільну роботу мережі при високій щільності користувачів.

2.3.4 Вибір технологій для радіоінтерфейсу

На цьому етапі здійснюється вибір технологій для радіоінтерфейсу, таких як Massive MIMO, beamforming, NFV (Network Function Virtualization) і SDN (Software-Defined Networking), які сприяють ефективному використанню спектра, зменшенню інтерференції та підвищенню ефективності мережі.

Так, використання великих антенних масивів дозволяє значно збільшити пропускну здатність і ефективність використання радіочастотного спектра.

Технологія Beamforming дозволяє направляти радіосигнали в конкретному напрямку, що зменшує втрати та покращує якість зв'язку [7].

Також використовуються технології для підвищення енергоефективності. Враховуючи вимоги до зниження витрат енергії, особливо для малих базових станцій та IoT-пристроїв, потрібно вибрати оптимальні технології управління потужністю і енергоспоживанням.

2.3.5 Планування управління трафіком і якості обслуговування (QoS)

Планування управління трафіком і якості обслуговування (QoS) є необхідним для досягнення стабільної роботи мережі 5G в умовах високих вимог до пропускну здатності і низької затримки. Це включає в себе оптимізацію маршрутизації трафіку для забезпечення високої швидкості обробки запитів користувачів, з урахуванням різних типів трафіку (наприклад, відео, голос, дані) та забезпечення високої якості обслуговування (QoS) для підтримки різних класів сервісів з мінімальними затримками і високою надійністю, що є важливим для таких застосунків, як автономний транспорт, медичні послуги, інтерактивні ігри та віртуальна реальність.

Цей етап також передбачає інтеграцію технологій для автоматичного управління трафіком і за потреби перерозподілу навантаження для забезпечення ефективної роботи мережі під час пікових навантажень.

2.3.6 Оцінка безпеки та захисту мережі

Оцінка безпеки та захисту мережі є важливим етапом, оскільки мережі 5G підтримують велике число підключених пристроїв та сервісів, багато з яких є критичними для життєдіяльності суспільства (наприклад, автономні транспортні засоби, медичні пристрої, інфраструктура критичного значення). Важливим на цьому етапі є забезпечення конфіденційності та аутентифікації. Створення системи безпеки, що включає багато рівнів захисту, таких як шифрування даних, автентифікацію користувачів та пристроїв. Також важливим є захист від атак на інфраструктуру. Включення в проєкт інструментів для виявлення та нейтралізації можливих атак, таких як DDoS, спроби несанкціонованого доступу та маніпуляцій з даними. Багато уваги приділяється міжмережевій взаємодії. Забезпечення безпеки в разі інтеграції з іншими мережами та технологіями, зокрема попередніми поколіннями мобільних мереж.

2.3.7 Розгортання мережі та тестування

Останнім етапом є розгортання мережі та тестування. Після того, як всі етапи проєктування завершено, мережу 5G потрібно втілити в реальність. Це включає фізичну установку базових станцій, налаштування інфраструктури, інтеграцію з існуючими мережами та проведення тестування для перевірки всіх компонентів мережі на надійність і ефективність.

Основні завдання на цьому етапі:

1. Тестування покриття та продуктивності. Перевірка того, чи відповідає реальне покриття заданим вимогам.
2. Виявлення проблем та їх усунення. Проводяться тести на стабільність мережі, латентність, навантаження та продуктивність.
3. Фінальні налаштування та оптимізація. Після тестування необхідно внести корективи в конфігурацію мережі для досягнення оптимальних результатів.

Отже, етапи планування мережі 5G є невід'ємною частиною забезпечення її ефективного функціонування. Вони охоплюють всі аспекти — від оцінки потреб і вимог до вибору частотного спектра, проектування інфраструктури, вибору технологій, до управління трафіком, безпеки та тестування. Ретельне виконання кожного етапу дозволяє створити стабільну, високошвидкісну та надійну мережу 5G, яка відповідає всім сучасним вимогам.

2.4 Проблеми планування покриття мережі 5G

Планування покриття є одним з найскладніших і найважливіших етапів при створенні мережі 5G. Забезпечення рівномірного і стабільного покриття на великій території, зокрема в умовах густонаселених міст, віддалених або важкодоступних місцевостей, є непростим завданням, яке вимагає ретельного планування та аналізу. Оскільки технологія 5G базується на використанні високо-частотних діапазонів (міліметрові хвилі), це створює нові виклики, зокрема щодо дальності покриття, проникнення сигналу через перешкоди та енергоефективності.

2.4.1 Обмежена дальність сигналу в високочастотних діапазонах

Одна з основних проблем при плануванні покриття мережі 5G — це обмежена дальність сигналу, особливо в діапазонах високих частот (mmWave). Сигнали, що передаються в цих діапазонах, мають більшу частоту і тому швидше поглинаються атмосферами та перешкодами, такими як стіни будівель, дерева та навіть дощ чи сніг. Це означає, що для забезпечення належного покриття в таких діапазонах потрібно встановлювати більше базових станцій з меншою дальністю покриття.

Ключові аспекти цієї проблеми наступні. По-перше – це низька здатність проникнення через матеріали. Високочастотні сигнали мають низьку здатність проходити через тверді перешкоди, такі як стіни, будівлі та інші конструкції.

Це робить складним забезпечення покриття в міських районах з високою щільністю забудови. По-друге, це потреба в більшій кількості базових станцій. Для забезпечення стабільного покриття на великих територіях необхідно розміщувати велику кількість малих базових станцій, що забезпечує високу щільність покриття, але збільшує капітальні витрати та складність експлуатації мережі.

2.4.2 Інтерференція та координація частот

Інша проблема, що виникає при плануванні покриття 5G, — це інтерференція між базовими станціями, зокрема в умовах високої щільності малих базових станцій у міських зонах. Висока частота радіосигналів, яка використовується в мережах 5G, може створювати значну кількість перешкод між сусідніми базовими станціями, якщо не застосовувати ефективні методи координації частот.

Основні аспекти цієї проблеми є інтерференція між базовими станціями та координація частот і розподіл ресурсів. При використанні подібних частот між близько розташованими станціями може виникати перешкода сигналів, що знижує якість зв'язку і пропускну здатність. Для зменшення інтерференції необхідно використовувати методи розподілу спектра і адаптивного управління потужністю, а також технології, що дозволяють координувати роботу базових станцій, наприклад, через використання технології CoMP (Coordinated Multipoint) та Carrier Aggregation. Це дозволяє забезпечити оптимальне використання спектру без суттєвих перешкод між станціями.

2.4.3 Проблеми покриття в сільських та віддалених районах

Незважаючи на великий потенціал високочастотних сигналів для забезпечення високих швидкостей передачі даних, мережі 5G можуть мати проблеми з покриттям у сільських та віддалених районах, де інфраструктура є менш розвинутою, а щільність населення — низька. Для таких районів характерні великі

відстані між базовими станціями та мала кількість користувачів, що не виправдовує установку великої кількості малих базових станцій.

Ключовими труднощами є висока вартість розгортання та мінімізація пробілів у покритті. Для забезпечення покриття на великих відстанях і в умовах низької щільності користувачів необхідно встановлювати більше базових станцій або використовувати великі антенні масиви для охоплення більших територій, що збільшує витрати на інфраструктуру. У сільських районах важко досягти постійного покриття без використання додаткових технологій, таких як малий стільниковий зв'язок (small cells), міжсистемна інтеграція з мережами супутників або створення зв'язку через інші канали, наприклад, через 4G або Wi-Fi.

2.4.4 Вплив погоди та атмосферних умов

Атмосферні умови, такі як дощ, сніг, туман чи вітри, можуть значно впливати на якість сигналу мережі 5G, особливо в діапазонах високих частот (mmWave). Це явище є характерним для мереж, що використовують хвилі з дуже високими частотами, які стають вразливими до поглинання і розсіювання вологи та частинок в атмосфері [5].

Основною проблемою є ослаблення сигналу через атмосферні умови. Високочастотні сигнали схильні до значного ослаблення під час дощу, снігопадів або інших атмосферних явищ, що може призвести до зниження пропускної здатності та якості з'єднання.

Відповідно, є необхідність адаптивних технологій. Для боротьби з цими ефектами необхідно використовувати технології, що дозволяють адаптувати потужність передавання сигналу та інші параметри в залежності від умов навколишнього середовища, а також комбінувати різні частотні діапазони для забезпечення стабільності покриття в різних умовах.

2.4.5 Вартість та складність інфраструктури

Інфраструктура мережі 5G потребує значно більших витрат порівняно з попередніми поколіннями мобільних мереж через високі вимоги до щільності базових станцій та складності їх розгортання.

Проблемами на цьому етапі є високі капітальні витрати та висока складність експлуатації та обслуговування. Для досягнення належного покриття в умовах високої щільності користувачів потрібен значний обсяг інвестицій у будівництво базових станцій, антен, малих стільників та іншої інфраструктури. В той же час, мережі 5G вимагають постійного моніторингу та оптимізації, а також регулярного обслуговування великої кількості базових станцій і обладнання, що збільшує операційні витрати.

2.4.6 Залучення ресурсів і погодження з місцевими органами

Процес розгортання мережі 5G також стикається з питаннями адміністративного погодження та залучення ресурсів. Оскільки для встановлення нових базових станцій і малих клітин необхідно проходити процедури дозволу в місцевих органах влади, це може спричиняти затримки і додаткові витрати.

Основні проблеми на цьому етапі це: затримки в отриманні дозволів та конфлікти з місцевими жителями або органами: У міських районах або в охоронних зонах встановлення інфраструктури може вимагати складних погоджень і затримувати процес розгортання мережі. Залучення громадськості та органів влади для отримання дозволів на встановлення антенної інфраструктури може спричинити соціальні та юридичні суперечки, що ускладнює процес розгортання мережі.

Отже, планування покриття мережі 5G супроводжується низкою серйозних проблем, які потребують комплексного підходу до їх вирішення. Ключовими проблемами є обмежена дальність сигналу в високочастотних діапазонах, інтерференція, складність покриття сільських і віддалених районів, вплив пого-

дних умов, висока вартість інфраструктури та складність взаємодії з місцевими органами влади. Однак, із розвитком нових технологій і методів оптимізації розгортання мережі 5G можна вирішити більшість цих проблем і забезпечити стабільне та ефективне покриття в усіх типах локацій.

2.5 Інтеграція з попередніми поколіннями мереж

Інтеграція мережі 5G з попередніми поколіннями мобільних мереж, зокрема 4G (LTE), 3G та 2G, є важливим і складним етапом в процесі її розгортання. Оскільки мережі 5G повинні забезпечувати безперебійний зв'язок і високоякісні послуги користувачам, важливо забезпечити взаємодію нової технології з існуючою інфраструктурою. У цьому підрозділі розглядаються основні аспекти інтеграції мережі 5G з попередніми поколіннями мобільних мереж, а також виклики, що виникають під час цього процесу.

2.5.1 Підхід до поступової інтеграції

Мережа 5G розгортається поступово і доповнює існуючі мережі 4G, 3G та 2G, забезпечуючи спільну роботу з ними на різних етапах розвитку. Це дозволяє операторам мобільного зв'язку зберегти існуючу інфраструктуру, зменшити витрати на розгортання та забезпечити зворотну сумісність для користувачів, які не підтримують 5G.

Основні підходи до інтеграції:

- Паралельна робота (Non-standalone, NSA). На початкових етапах розгортання мережі 5G використовуються технології, що базуються на інтеграції з мережею 4G. В цьому випадку мережа 4G використовується для управління сигналами та обробки даних, а 5G забезпечує високу швидкість передачі даних і зменшену затримку. Такий підхід дозволяє швидко впровадити 5G без необхідності повної модернізації всіх компонентів мережі.

- Окреме розгортання (Standalone, SA). В разі окремого розгортання мережі 5G повністю замінюється інфраструктура попередніх поколінь. У цьому випадку мережа 5G працює як самостійна система, що не залежить від 4G чи інших попередніх поколінь.

2.5.2 Спільне використання радіоінтерфейсу

Інтеграція 5G з попередніми поколіннями мобільних мереж передбачає спільне використання радіоінтерфейсу (Radio Access Network, RAN), що дозволяє забезпечити безперервність з'єднання для користувачів під час переходу між різними поколіннями мереж.

Використання спільного радіоінтерфейсу вимагає сумісності радіоінтерфейсів. Мережі 5G повинні бути сумісними з радіоінтерфейсами попередніх поколінь (LTE, UMTS, GSM), що дозволяє користувачам безперешкодно переміщатися між різними мережами. Також можливе використання гібридних мереж. Створення гібридних мереж, які об'єднують базові станції і радіотехнології різних поколінь (наприклад, LTE і 5G), дозволяє більш ефективно використовувати інфраструктуру та забезпечувати покриття в умовах зниженого сигналу 5G або в районах, де мережа 5G ще не розгорнута.

2.5.3 Мобільність та управління переходами між мережами

Одним із важливих аспектів інтеграції мереж 5G з попередніми поколіннями є управління мобільністю та переходами між різними мережами. Оскільки користувачі можуть переміщатися між зонами покриття різних мереж (наприклад, з 5G в 4G або з 3G в 2G), важливо забезпечити безперервність з'єднання і ефективне управління переходами.

Ключовим при управлінні мобільністю є перехід між технологіями. Під час переміщення користувача з зони покриття 5G в зону покриття 4G або 3G мережа повинна автоматично здійснити перехід на відповідну технологію без

втрати з'єднання. Це здійснюється за допомогою механізмів handover та inter-RAT handover, що дозволяє безшовно перемикає з'єднання між різними мережами. Гнучкість мережі Інтеграція з попередніми поколіннями дозволяє мережі 5G адаптуватися до різних умов, що виникають під час переміщення користувачів між різними зонами покриття та між технологіями. Це є важливим для забезпечення стабільного та безперервного обслуговування [7].

2.5.4 Спільне використання інфраструктури

Спільне використання інфраструктури між 5G та попередніми поколіннями мереж дозволяє оптимізувати витрати на експлуатацію та модернізацію інфраструктури. Це включає в себе не тільки спільне використання базових станцій, але й інших елементів мережі, таких як центри обробки даних, мережеві елементи та кабельні системи.

Переваги спільного використання інфраструктури:

- Зниження витрат на побудову нових станцій Оскільки базові станції 5G можуть бути розташовані поруч із вже існуючими станціями 4G, витрати на встановлення нового обладнання значно зменшуються.
- Оптимізація витрат на енергоспоживання Спільне використання інфраструктури дозволяє знизити енергоспоживання, оскільки більшість елементів мережі може працювати за спільними стандартами.
- Збереження зворотної сумісності Спільне використання інфраструктури забезпечує збереження зворотної сумісності для пристроїв, які не підтримують 5G, дозволяючи їм підключатися до мережі 4G або 3G без перерв.

2.5.5 Вплив на управління мережею та обслуговування

Управління мережею та обслуговування в умовах інтеграції мереж 5G з попередніми поколіннями потребує нового підходу до моніторингу, адміністрування і технічної підтримки. Оскільки кожне покоління мереж має свої особ-

ливості в архітектурі та управлінні, потрібно впроваджувати рішення, які забезпечують ефективне керування різними типами трафіку та мережевими ресурсами.

Основними аспектами управління мережею є централізоване управління мережею та використання віртуалізації мереж. Оператори повинні впроваджувати централізовані системи управління мережею, які дозволяють контролювати та координувати роботу всіх поколінь мобільних мереж, що працюють одночасно. Це включає моніторинг трафіку, оптимізацію розподілу ресурсів та реагування на аварії. Віртуалізація мережевих функцій (NFV) дозволяє забезпечити ефективне управління ресурсами в умовах змішаного середовища, де працюють різні покоління мереж.

2.5.6 Проблеми сумісності

Інтеграція мереж 5G з попередніми поколіннями може зустрічати труднощі через відмінності в архітектурах мереж. Технології 5G використовують новітні методи передачі даних, такі як масиви антен MIMO, технології програмно-орієнтованого управління мережею (SDN) і віртуалізацію функцій мережі (NFV), що можуть бути не сумісні з існуючими технологіями.

Для вирішення цих проблем необхідні стандартизація, тобто розробка нових стандартів і протоколів, що дозволяють забезпечити сумісність між різними поколіннями мереж, та адаптація існуючих мережевих елементів. Для досягнення максимального рівня інтеграції потрібно оновити деякі мережеві компоненти і адаптувати їх до нових вимог, що знижує сумісність з попередніми технологіями.

Таким чином, інтеграція мережі 5G з попередніми поколіннями мобільних мереж є важливим етапом її розгортання, який дозволяє забезпечити безперервне обслуговування користувачів і знижує витрати на інфраструктуру. Поступова інтеграція, спільне використання інфраструктури, радіоінтерфейсів та управління мобільністю є основними складовими цього процесу. Однак інтег-

рація з попередніми поколіннями також стикається з рядом проблем, таких як сумісність технологій, управління мережею та обслуговування, що потребують подальших доопрацювань і вдосконалення стандартів.

2.6 Управління трафіком та розподіл ресурсів у мережах 5G

Однією з ключових характеристик мережі 5G є висока швидкість передачі даних, мінімальні затримки та здатність обробляти величезні обсяги трафіку. Для досягнення цих характеристик необхідно ефективно управляти трафіком і розподіляти ресурси мережі таким чином, щоб забезпечити оптимальне використання доступного спектра, знижувати навантаження на мережу та забезпечити якісне обслуговування для всіх типів користувачів [12].

2.6.1 Принципи управління трафіком у мережах 5G

Управління трафіком є одним із основних завдань у мережах 5G, оскільки вони повинні обробляти величезний потік даних, який виникає завдяки новим типам послуг та підключених пристроїв, таких як Інтернет речей (IoT), автономні транспортні засоби, розширена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR).

Один із найважливіших аспектів управління трафіком — це класифікація даних за різними критеріями, такими як тип послуги, пріоритетність, чутливість до затримки та пропускну здатність. Мережа 5G повинна забезпечити диференціацію трафіку для забезпечення QoS (Quality of Service) для критичних і чутливих до затримки додатків (наприклад, автономні системи або медичні пристрої) і одночасно гарантувати високу пропускну здатність для великих обсягів даних, наприклад, відео-стримінгу.

Для забезпечення високої продуктивності мережі важливо, щоб система могла адаптуватися до зміни навантаження, наприклад, у випадку пік-трафіку

або неочікуваних змін у використанні мережі. Адаптивне управління дозволяє мережі 5G оптимізувати розподіл ресурсів залежно від реальних умов.

Важливою складовою управління трафіком є ефективне перемикання з'єднань і обробка мобільності користувачів. Мережа 5G повинна забезпечувати безперебійний зв'язок, навіть коли користувач переміщується між різними зонами покриття або мережами.

2.6.2 Розподіл спектра і ресурсу мережі

Розподіл спектра в мережах 5G є критичним аспектом, оскільки нова технологія передбачає використання частот у високочастотних діапазонах (міліметрові хвилі) і сумісність з існуючими діапазонами, такими як суб-6 ГГц. Для ефективного управління спектром потрібно забезпечити рівномірний розподіл ресурсів між різними користувачами та сервісами, забезпечуючи при цьому мінімальні затримки і високу пропускну здатність.

Мережа 5G підтримує використання різних частотних діапазонів для забезпечення ефективного розподілу ресурсів. Для цього використовуються методи Carrier Aggregation (агрегація каналів) та Dynamic Spectrum Sharing (динамічний поділ спектра), які дозволяють ефективно використовувати як існуючі частотні ресурси, так і нові діапазони для більш високої пропускну здатності.

Важливим аспектом є використання технологій віртуалізації функцій мережі (NFV) та програмно-орієнтованого управління мережею (SDN). Вони дозволяють ефективно розподіляти ресурси віртуальних мереж, автоматизувати налаштування та забезпечувати гнучке управління навантаженням і адаптацію до вимог користувачів.

У мережах 5G розподіл ресурсів також залежить від типу трафіку. Наприклад, для передачі критичних даних, таких як телемедичні дані або системи автономних транспортних засобів, необхідно надати високий пріоритет і гарантувати низьку затримку. Для менш критичних застосувань, таких як відео-

стримінг, можна забезпечити більшу пропускну здатність без жорстких вимог до затримки.

2.6.3 Механізми управління затримкою

У мережах 5G одним із найбільших досягнень є зниження затримки у порівнянні з попередніми поколіннями мобільних мереж. Висока швидкість передачі даних і низька затримка є критичними для багатьох нових технологій, таких як автономні транспортні засоби, віртуальна реальність, телемедицина та інші застосунки з реальним часом.

Для зменшення затримки використовуються технології упорядкування трафіку, що дозволяють уникнути переповнення мережі і забезпечити пріоритет для чутливих до затримки додатків. Наприклад, механізми flow control (управління потоком) і traffic shaping (формування трафіку) дозволяють контролювати інтенсивність передачі даних і знижувати затримки.

Використання технологій обчислень на межі мережі (edge computing) дозволяє зменшити час, необхідний для обробки даних. Це досягається шляхом перенесення обробки даних ближче до користувачів, що дозволяє зменшити необхідний час для передачі даних до центральних серверів і назад.

Застосування пріоритезації трафіку дозволяє визначати, які дані повинні бути передані першими. Це важливо для додатків, що вимагають мінімальної затримки, таких як відеоконференції або інтерактивні ігри.

2.6.4 Інтелектуальні системи управління трафіком

Оскільки мережі 5G обробляють величезні обсяги трафіку та постійно змінюються умови навантаження, важливо впроваджувати інтелектуальні системи управління трафіком. Ці системи використовують алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту для прогнозування навантаження, адаптації до змінних умов та оптимізації використання ресурсів. Використання алгоритмів

для аналізу трафіку в реальному часі дозволяє прогнозувати можливі проблеми з пропускнуою здатністю та оперативно коригувати параметри мережі. Інтелектуальні системи можуть автоматично налаштовувати мережеві ресурси, такі як канали передачі даних, потужність сигналу та розподіл частот, що дозволяє забезпечити стабільну роботу мережі навіть за умов високих навантажень.

2.6.5 Підходи до управління трафіком для IoT та критичних послуг

Для забезпечення оптимального управління трафіком у мережах 5G необхідно також враховувати специфіку роботи пристроїв Інтернету речей (IoT) та критичних послуг, таких як автономні автомобілі або системи охорони здоров'я.

Для IoT пристроїв та критичних послуг можна використовувати спеціалізовані канали та механізми управління пріоритетом, щоб забезпечити швидку і надійну передачу даних.

Для IoT-пристроїв також важливо оптимізувати трафік таким чином, щоб знижувати енергоспоживання і забезпечити тривалу роботу пристроїв на обмежених батареях.

Управління трафіком і розподіл ресурсів є важливими складовими ефективного функціонування мережі 5G. Завдяки інтелектуальним системам, адаптивним методам управління та оптимізації використання спектра, мережа здатна забезпечити високі швидкості передачі даних, низькі затримки та ефективне обслуговування великої кількості підключених пристроїв. У той же час важливо враховувати специфічні потреби різних типів трафіку, таких як IoT та критичні послуги, щоб забезпечити належний рівень якості обслуговування для всіх користувачів.

3 РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ 5G НА ОСНОВІ LTE

На даний момент багато розвинених країн світу мають 4G покриття по всій або майже по всій території країни. Ситуація в Україні погіршується через те, що значні території залишаються недоступними навіть для мереж третього покоління. Однак на це є технічні та економічні причини. Незважаючи на це, усі великі міста мають покриття 4G від основних операторів мобільного зв'язку в Україні. Великі міста є першими потенційними кандидатами для впровадження нових технологій мобільного зв'язку п'ятого покоління, оскільки саме в них є великі скупчення людей, які потребують вищої швидкості мобільного інтернету та більшої пропускної здатності, що дозволяє одночасно надавати послуги великій кількості абонентів та з'єднувати велике число різних пристроїв. Також там доцільно розвивати послуги Інтернету Речей для автоматизації багатьох процесів та впровадження ідей «розумного» міста. Стадіони, великі торгові центри та інші є першими претендентами на створення покриття 5G.

З огляду на те, що мережі четвертого покоління повністю розгорнуті та працюють, є можливість використовувати їх на перших етапах впровадження нової технології 5G [16].

У будь-якому випадку, ці технології повинні працювати разом протягом тривалого періоду часу, тому їх взаємодія повинна бути максимально ефективною та непомітною для звичайного користувача. Операторам зв'язку також найбільше підходить розгортання 5G шляхом спільного існування мереж 4-го і 5-го поколінь при максимальному повторному використанні інфраструктури, вузлів і мережевих компонентів. Це дає операторам можливість поступово покращувати свої мережі. З одного боку, це призведе до продовження інвестицій у будівництво мереж LTE, а з іншого, це призведе до розширення зони покриття мереж LTE. Однак оператори зможуть надавати клієнтам нові послуги, що базуються на 5G, саме в тих районах, де вони будуть популярні. Поступове впровадження дозволить операторам поступово модернізувати свої мережі без поспіху, зберігаючи широке покриття 4G, а також пропонуючи кліє-

нтам, які зацікавлені в цьому, нові можливості, що впливають із технології нового покоління.

З метою реалізації даної стратегії 3GPP запропонував декілька можливих або опцій впровадження 4G і 5G. Всі опції розділені на дві основні групи: Standalone - використання однієї технології радіодоступу та Non-Standalone (NSA) - використання і LTE і NR, що суттєво спростить розгортання мереж 5G на початковому етапі.

Для цього доступні дві схеми реалізації. Перша схема split bearer розділяє потік віртуального каналу користувача даних на два підпотоки в напрямку Master eNb і Secondary eNb відповідно. У другій схемі перемикачі можуть комутувати потік, призначений для користувача даних, або в напрямку Master eNb, або в напрямку Secondary eNb, без агрегації.

Таким чином, оператори та їхні клієнти найкраще виграють від сценарію Non-Standalone (NSA). Для реалізації Non-Standalone опції одним із найважливіших аспектів є концепція подвійного підключення, тобто Dual Connectivity.. Двостороннє підключення відрізняється від агрегації частот тим, що вона дозволяє підключатися до двох різних базових станцій, які пов'язані за допомогою інтерфейсу X2 і зазвичай розташовані на різних місцях.

Додаткові вимоги до терміналів користувача (UE) і їхні складності необхідні для реалізації Non-Standalone. Ці складності включають необхідність забезпечити одночасну роботу двох модемів, збільшення розміру буфера прийому та збільшення навантаження на ресурси процесора рівня PDCP з метою відновлення порядку проходження пакетів даних у режимі MCG split bearer.

Сценарій переходу від опції 1 до опції 3/3a, опції 7/7a або опції 8/8a до опції 4/4a, показаний на рис. 3.1, є найкращим варіантом для поєднання можливостей четвертого та п'ятого поколінь. Він дозволяє поступово впроваджувати можливості п'ятого покоління та дозволяє користувачам комфортно співіснувати з двома технологіями, збільшуючи можливості використання високошвидкісного мобільного зв'язку. Надширокосмуговий мобільний зв'язок (eMBB) стане першим помітним розширенням, яке збільшить швидкість передачі даних до 1

Гбіт/с і пікові швидкості передачі даних до 10 Гбіт/с і 4 Гбіт/с у зонах гарячої точки. Щільність підключення становить один мільйон з'єднань на квадратний кілометр. Раннє використання можливостей eMBB зосереджується на споживчому ринку та потребі кращого та швидшого підключення для обробки високоякісного відеоконтенту, збільшення кількості створеного користувачем контенту та наших очікувань можливості передавати те, що ми хочемо, куди хочемо та коли хочемо. Архітектура 5G/LTE-комбінації Option 4/4a стане завершальною.

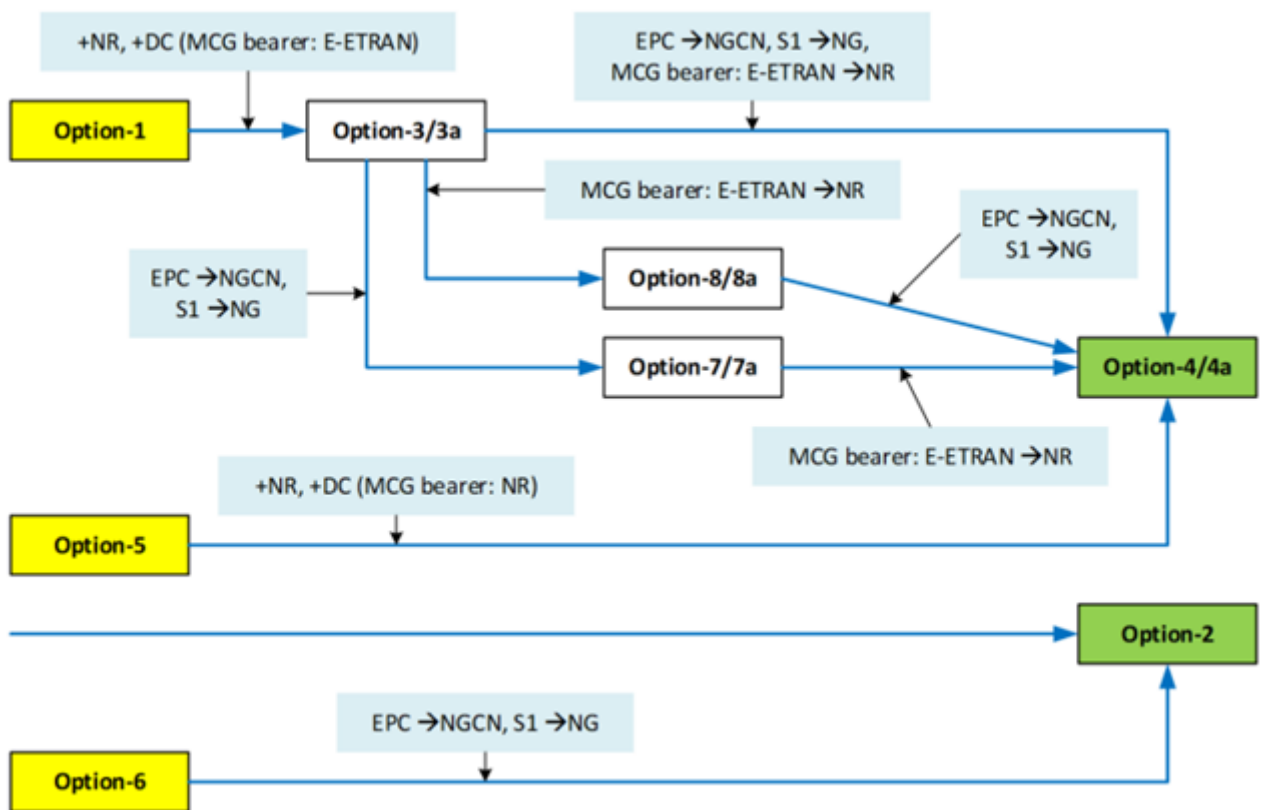


Рисунок 3.1 – Варіанти розгортання мереж 5G

Розглянемо деякі визначені 3GPP опції.

У Варіанті Option 1 (рис.3.2) реалізується традиційна виділена мережа LTE на базі ядра EPC і базових станцій eNb. Це відповідає 14-м або більш раннім релізам 3GPP. Використовується в місцях, де 5G-сервіси не потрібні.

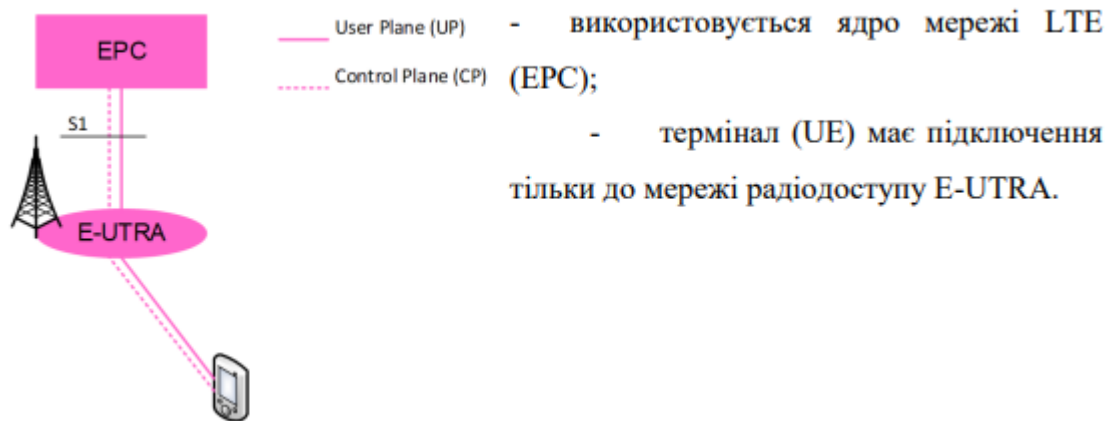


Рисунок 3.2 – Варіант реалізації мережі Option 1

У регіонах, де вже працюють мережі 4G-LTE, варіант Option 3/3a буде корисним на ранніх стадіях будівництва 5G (рис.3.3). Немає необхідності впроваджувати ядро NGCN, оскільки використовується ядро мережі LTE-EPC. Базується на двох підключеннях. S1 служить інтерфейсом, який зв'язує мережі радіодоступу E-UTRA/NR і EPC, а також передає користувацький і сигнальний трафік. Базові станції E-UTRAN (eNb) є якірною точкою для термінації S1-MME.

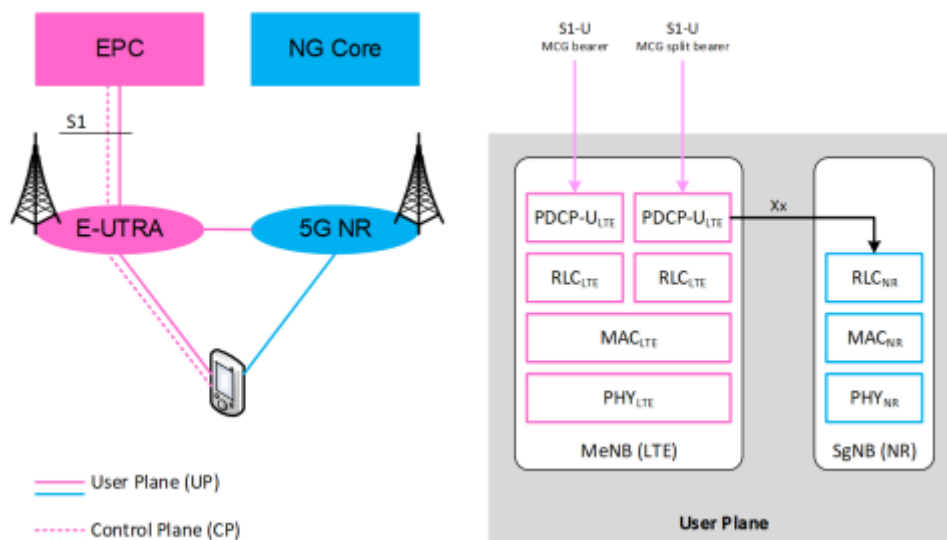


Рисунок 3.3 – Варіант реалізації мережі Option 3/3a

Варіант Option 7/7a може використовуватися як проміжний етап до цільової архітектури 5G / LTE Option 4/4a (рис.3.4) . На відміну від цього, базові станції мережі радіодоступу EUTRAN (eNb) служать якірними точками термінації NG-C.

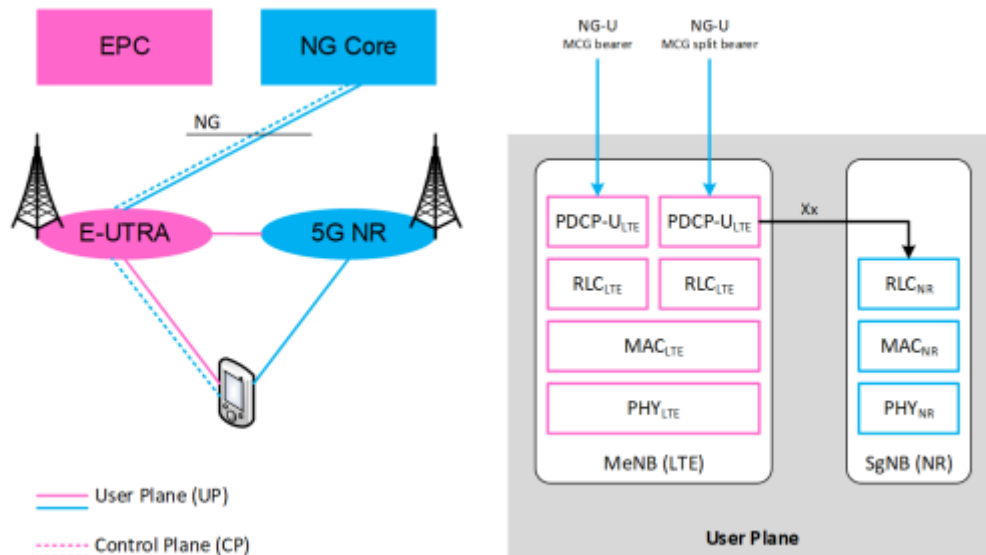


Рисунок 3.4 – Варіант реалізації мережі Option 7/7a

Основна архітектура комбінованої мережі 5G/LTE відома як Варіант 4/4a (рис.3.5). Використовується подвійне підключення. Необхідно впровадити ядро NGCN і модернізувати базові станції мережі LTE до ng-eNb. Базується на двох підключеннях. NG використовується як інтерфейс, що зв'язує мережі радіодоступу E-UTRA/NR і NGCN, а також передає користувацький і сигнальний трафік. Базові станції мережі радіодоступу NR (gNb) служать якірною точкою для термінації NG-C.

Отже, пропонована архітектура має спеціальну назву option X і складається з таких елементів: UE, eNodeB E-UTRA, gNodeB 5G NR, MME, SAEGW; Інтерфейси: X2, S1AP, S1-U, S11, SGi (рис.3.6.)

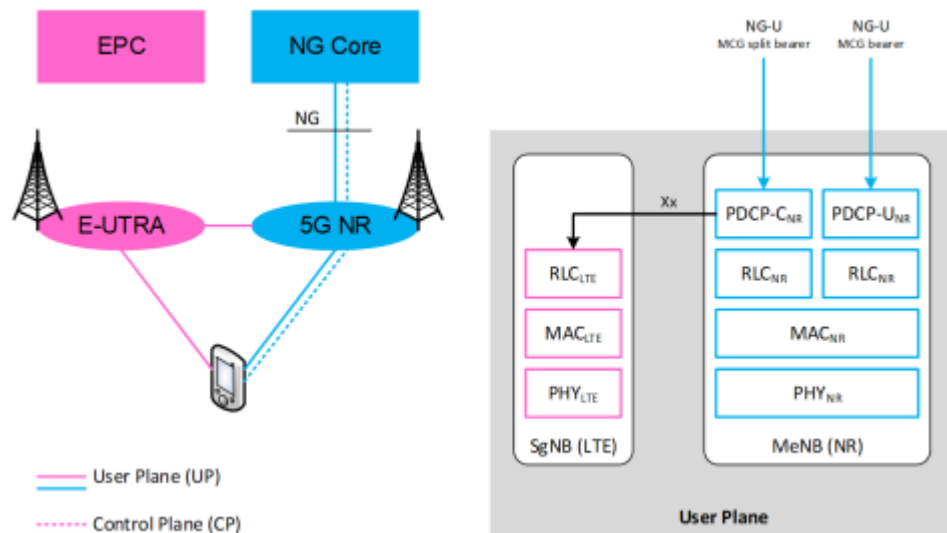


Рисунок 3.5 – Варіант реалізації мережі Option 4/4a

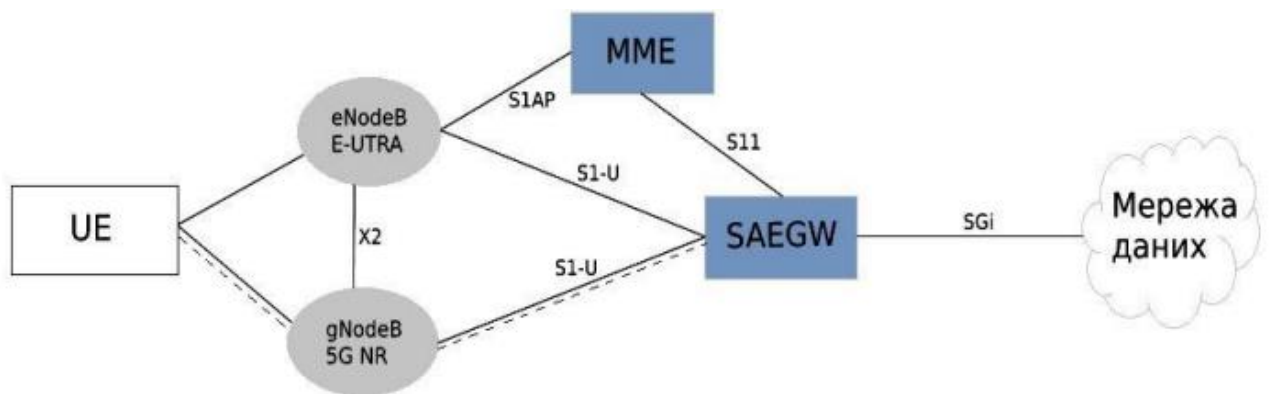


Рисунок 3.6 – Варіант архітектури 5G на основі LTE

Принцип роботи архітектури полягає в наступному. Термінал користувача) має подвійне підключення до станцій eNodeB E-UTRA та gNodeB 5G NR. Сигнальний трафік обробляється через шлюз SAEGW на gNb. Трафік призначений для користувача передається маршрутами SAEGW-MME-eNB-gNB-UE чи SAEGW-gNB-UE.

Цей варіант має комбіновану архітектуру мережі 5G/LTE з додатковими елементами MME та SAEGW. Це також стосується технології подвійного підключення. NG використовується в архітектурі в якості інтерфейсу, який зв'язує

мережі радіодоступу E-UTRA/NR і SAEGW. Він також передає трафік як користувальницький (User Plane), так і сигнальний (Control Plane)

ММЕ є суб'єктом управління мобільністю і є основним вузлом управління мережею доступу LTE. Він також керує мобільністю та мережею доступу в Європейському Союзі, а також встановлює шляхи носія для ЄС. Крім того, ММЕ відповідає за аутентифікацію користувача та керує процесами активації та деактивації носія [11]. Крім того, він аналізує дозвіл мобільного пристрою на розташування в мережі громадської наземної мобільної мережі провайдера послуг і вказує на обмеження пристрою щодо роумінгу.

Призначенням шлюзу еволюції архітектури системи SAEGW є спрощення та покращення мобільних мереж. SAEGW складається з двох сервісних шлюзів, які відповідають за маршрутизацію та пересилання пакетів даних користувача. Крім того, він є шлюзом PDN, який з'єднує мобільний пристрій із зовнішніми мережами. Основними перевагами цього шлюзу є те, що він покращує операційну ефективність, уникаючи необхідності обробляти контекст передплатника за допомогою незалежних служб площини даних. Це також робить більш зручним для кінцевих користувачів у мережі, сприяє зростанню попиту на нові послуги та забезпечує простіший перехід до базової мережі, повністю складеної з IP, зі спрощеною архітектурою та відкритими інтерфейсами.

Таким чином, оператори зв'язку найбільше потребують розгортання 5G, яке передбачає тривале спільне існування мереж 4-го і 5-го поколінь при максимальному перевикористанні інфраструктури, вузлів і мережевих компонентів. З цієї причини всі плани впровадження 5G поділяються на дві основні категорії: Standalone і Non-Standalone. Перші передбачають використання лише однієї технології або сумісне існування двох поколінь, що спрощує початкове впровадження мереж 5G.

4 РОЗРАХУНОК МЕРЕЖІ 5G

4.1 Розрахунок максимально допустимих втрат

При побудові мережі стільникового зв'язку необхідно провести аналіз мережі. Цей аналіз він починається з обчислення максимально допустимих втрат лінії (МДВ). МДВ розраховуються, як різниця між еквівалентною ізотропною випромінюваною потужністю передавача і мінімальною потужністю сигналу на вході до приймача. Також з метою забезпечення оптимальної демодуляції сигналу у приймачі, потрібно враховувати всі втрати в каналі зв'язку.

Розглянемо базову станцію з приймачем, вихідна потужність якого дорівнює 100 Вт (50 дБм). При цьому радіочастотний блок встановлено максимально близько до антени. Обчислюємо енергетичний бюджет абонента на границі стільника, тобто коли мобільна станція приймає сигнали від базової із малим відношенням сигнал/шум у режимі рознесеної передачі. Користувачьким пристроєм є модем CPE із потужністю передавача 23 дБм.

Розрахунок максимально допустимих втрат виконується за формулою:

$$L_{MAPL} = P_{EIRP} - S_{RX} + G_{RXA} - L_{RXF} - M_{BUILD} - M_{INT} - M_{SHADE} + G_{HO}$$

де P_{EIRP} – це ЕІВП передавача;

S_{RX} – це чутливість приймача;

G_{RXA} – це коефіцієнт підсилення антени приймача;

L_{RXF} – це втрати у фідерному тракті приймача;

M_{BUILD} – це запас на проникнення сигналу у приміщення;

M_{INT} – це запас на внутрішньосистемні завади;

M_{SHADE} – це запас на затінення;

G_{HO} – це вигравш від передачі обслуговування.

Запас на проникнення сигналів у приміщення визначається так:

- 22 дБ в умовах міста (щільна забудова);

- 17 дБ в умовах міста (нещільна забудова);
- 12 дБ в умовах передміста;
- 8 дБ у сільській місцевості.

Запас на затінення приймаємо рівним 8,7 дБ.

Запас для внутрішньосистемних завад характеризує підвищення потужності шуму на вході приймача. Запас для внутрішньосистемних завад дорівнює:

$$M_{INT} = -10\lg(1 - \eta)$$

$$M_{INT} = -10\lg(1 - 0,84) = 7,96$$

$$M_{INT} = -10\lg(1 - 0,65) = 4,56$$

де η – це відносне завантаження стільника у лінії вниз або вверх.

Запас на внутрішньосистемні завади буде залежати від навантаження на стільник мережі: чим вищим є допустиме навантаження на стільник, тим більший запас потрібно враховувати під час розрахунку. У випадку підвищення навантаження до 100%, діапазон завад буде прямувати до нескінченності, а зона покриття одного стільника зменшується до нуля. З двох значень МДВ, отриманих для лінії вверх і лінії вниз, вибирається мінімальне значення, відповідно до якого здійснюється подальше обчислення радіусу дії базової станції.

Шумова смуга приймача знаходиться так :

$$B = N_{RB} \cdot \Delta f_k,$$

де N_{RB} – це число виділених ресурсних блоків;

Δf_k – це радіоканал.

Підставляємо значення і одержуємо:

$$B = 273 \cdot 30 \cdot 10^3 = 8,19 \cdot 10^6$$

$$B = 133 \cdot 30 \cdot 10^3 = 3,99 \cdot 10^6$$

Обчислюємо потужність теплового шуму приймача

$$P_N = 10 \lg(100kTB) \quad (3.4)$$

$$P_N = 10 \lg(100 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 8,19 \cdot 10^6) = -114,79$$

$$P_N = 10 \lg(100 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 3,99 \cdot 10^6) = -117,92$$

Знаходимо чутливість приймача:

$$S_{RX} = P_N + M_{SNR} + L_N$$

де M_{SNR} – це відношення сигнал/шум приймача, дБ;

L_N – це коефіцієнт шуму приймача, дБ.

Підставляємо отримане значення і одержуємо:

$$S_{RX} = -114,79 + 7 + 7 = -100,79$$

$$S_{RX} = -117,92 + 2 + 11,5 = -104,42$$

Розраховуємо ефективну ізотропно випромінювану потужність за формулою

$$P_{EIRP} = P_{TX} + G_{TX.DIV} + G_{TXA} - L_{TXF}$$

де P_{TX} – вихідна потужність передавача;

$G_{TX,DIV}$ – виграш від складання потужності передавачів;

G_{TXA} – коефіцієнт підсилення антени передавача;

L_{TXF} – втрати у фідерному тракті передавача.

Підставляємо потрібне значення:

$$P_{EIRP} = 50 + 3 + 18 - 0,4 = 70,6$$

$$P_{EIRP} = 23 + 0 + 0 - 0 = 23$$

Обчислюємо максимально допустимі втрати для ліній вниз і вверх:

$$L_{MAPL} = 70,6 + 100,79 + 0 - 0 - 22 - 7,96 - 8,7 + 0 = 132,73$$

$$L_{MAPL} = 23 + 104,42 + 18 - 0,4 - 22 - 4,56 - 8,7 + 0 = 109,76$$

З отриманих для ліній вниз та вгору значень МДВ обираємо мінімальне, щоб виконувати подальші розрахунки дальності мобільного зв'язку та радіусу стільника. За дальністю зв'язку обмежувальною лінією є лінія вверх.

4.2 Розрахунок зони покриття базової станції

За відомими допустимими втрати можна знайти радіус покриття стільника. Нехай висота підйому антени мобільних станцій рівна 1,5 м, а висота базової станції – 30м. Зона покриття – міська.

За формулою допустимих втрат отримаємо вираз для визначення радіуса стільника:

$$L = 45,5 - 13,82 \lg H_{BC} + 35,4 \lg F + (1,1 \lg F - 0,7) H_{MC} + \\ + (44,9 - 6,55 \lg H_{BC}) \lg R$$

Розраховуємо радіус стільника:

$$R = 10^{L-45,5+13,82 \lg H_{BC}-35,4 \lg F-(1,1 \lg F-0,7) H_{MC}-(44,9-6,55 \lg H_{BC}) \lg R}$$

$$R = 10^{109,76-45,5+13,82 \lg 30-35,4 \lg 1710-(1,1 \lg 1710-0,7) 1,5-(44,9-6,55 \lg 30) \lg R} = 374(M)$$

4.3 Розрахунок швидкості передачі 5G NR

Обчислюємо швидкість передачі даних системи 5G NR. Для лінії вверх маємо:

$$R_{5G} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J [V \cdot Q_m \cdot f \cdot R_{\max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j)\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH)],$$

де $J=1$ – це число агрегованих компонентних несучих у смузі або комбінації смуг,

$Q_m=6$ – це порядок модуляції

$V = 4$ – це число шарів

$f=1$ – коефіцієнт масштабування

$\mu=1$ – нумерологія 5G NR

OH – додаткові витрати

T_s – середня тривалість символу OFDM у підкадрі, у мікросекундах,

$N_{PRB}=1333$ – число ресурсних блоків,

$R_{\max}=948/1024$ – швидкість передачі.

Обчислюємо середню тривалість OFDM-символу у підкадрі для нумерології μ

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu}$$

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^1} = 3,57 \cdot 10^{-5}$$

Додаткові витрати ОН вони приймають такі значення:

[0,14] → частотний діапазон FR1 для DL

[0,18] → частотний діапазон FR2 для DL

[0,08] → частотний діапазон FR1 для UL

[0,10] → частотний діапазон FR2 для UL

Підставляємо дані у формулу і отримуємо:

$$R_{5G} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J [4 \cdot 6 \cdot 1 \cdot \frac{948}{1014} \cdot \frac{133 \cdot 12}{3,57 \cdot 10^{-5}} \cdot (1 - 0,08)] = 913,49 (Mbit/c)$$

4.4 Оцінка радіопокриття

Планування бездротової мережі 5G не обмежується мінімізацією витрат на експлуатацію та інфраструктури. Метою розробленого плану мережі є збільшення пропускної здатності мережі в густонаселених міських центрах. Користувальне обладнання, ретрансляційні станції (РС) і базові станції (БС) складають три категорії вузлів, які складають запропоновану мережу. Загальні витрати на обладнання включають розгорнуті БС і РС у відповідних місцях.

Загальна вартість запропонованої задачі планування є зваженою сумою витрат на апаратне забезпечення та експлуатацію. Якість зв'язку між віддаленими вузлами може погіршитися через споживання більшої кількості енергії, а бездротовий зв'язок може погіршитися через втрати на шляху. Таким чином, втрати враховуються як операційні витрати для кожної лінії зв'язку, тобто ко-

ристувацьке обладнання. Для планування бездротової мережі 5G витрати виглядають наступним чином:

$$W = W_1 \left(\sum_{b \in B} c_b^B y_b^B + \sum_{r \in R} c_r^R y_r^R \right) + \\ + W_2 \left(\sum_{b \in B} \sum_{m \in M} p_{bm}^{BM} p_{bm}^{BM} + \sum_{r \in R} \sum_{m \in M} p_{rm}^{RM} p_{rm}^{RM} + \sum_{b \in B} \sum_{r \in R} p_{br}^{BR} p_{br}^{BR} \right)$$

де $W_{1,2}$ – це показники вагомості для двох частин цільової функції;

B – це розташування базових станцій;

R – це розташування ретрансляційних станцій;

M – набір мобільних пристроїв;

x – бінарні змінні рішення, які чи було встановлено з'єднання на відповідних лініях;

y – бінарні змінні рішення, які відображають, чи розгорнута базова або ретрансляційна станція в місці розташування;

p – ризик втрати шляху, пов'язаний із каналом зв'язку.

Визначаємо топологічні обмеження як

$$\sum_{b \in B} x_{br}^{BR} \leq y_r^R,$$

$$\sum_{b \in B} x_{bm}^{BM} \leq y_b^B,$$

$$\sum_{b \in B} x_{br}^{BR} \leq y_b^B,$$

$$\sum_{r \in R} x_{rm}^{RM} \leq y_r^R,$$

$$\sum_{b \in B} x_{bm}^{BM} + \sum_{r \in R} x_{rm}^{RM} = 1.$$

Це топологічне обмеження гарантує, що кожна розгорнута ретрансляційна станція підключена тільки до однієї базової станції. Для кожного з'єднання БС-РС, значення потоку має лежати в межах максимальної пропускної спроможності:

$$f_{br}^{BR}(x_{br}^{BR}) \leq l_{br}^{BR},$$

де l – верхня межа можливої швидкості потоку інформації.

Обмеження на навантаження обчислюється так:

$$\sum_{r \in R} f_{rm}^{RM}(x_{bm}^{BM}, x_{rm}^{RM}) + \sum_{m \in M} f_{bm}^{BM}(x_{bm}^{BM}) \leq T_1,$$

$$\sum_{m \in M} f_{rm}^{RM}(x_{rm}^{RM}) + \leq T_2.$$

де $T_{1,2}$ – максимальна пропускна здатність (в бітах за секунду).

$$\sum_{b \in B} f_{rm}^{BM}(x_{bm}^{BM}) + \sum_{m \in M} f_{rm}^{RM}(x_{rm}^{RM}) \leq a_m^M,$$

де a – запит на трафік для мобільних пристроїв.

Обмеження були введені, щоб уникнути перевантаження та задовольнити потреби кожного користувача. Вони також гарантують, що кожен користувач отримує достатній потік через БС або РС. Максимальне навантаження для БС і РС визначається на основі їхньої пропускної здатності та ресурсів. Обмеження на кількість одночасних користувачів, оброблювальна потужність, пропускна здатність кожного каналу чи сектора, розташування антен тощо можуть бути причиною цього. Забезпечуючи правильне максимальне навантаження, можна запобігти перенавантаженню БС та РС, що може призвести до зниження якості обслуговування та швидкості передачі даних для користувачів [8].

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

У зв'язку з активним впровадженням технологій п'ятого покоління (5G) в Україні, питання охорони праці під час проектування та розгортання таких мереж набуває особливої актуальності. Цей процес пов'язаний не лише з технічними викликами, а й з підвищеними ризиками для працівників, які виконують монтажні, електротехнічні та висотні роботи. Забезпечення належних умов праці, дотримання чинних нормативних документів та впровадження сучасних заходів безпеки є критично важливими для запобігання виробничим травмам і збереження життя та здоров'я фахівців галузі телекомунікацій.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори можуть мати вплив на дослідника особливостей планування і проектування мереж 5G наступні: підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; недостатнє освітлення робочої зони; недостатність природного освітлення; підвищений рівень шуму на робочому місці; відсутність чи нестача природнього світла; фізичні перевантаження (статичні); нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, емоційні навантаження).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо безпечних умов праці під час дослідження особливостей планування і проектування мереж 5G.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Однією з визначальних тенденцій сучасного суспільного розвитку є активне розширення сфер людської діяльності, в яких застосовуються інформаційні технології. Особливого поширення набули персональні комп'ютери, що значно полегшили виконання багатьох завдань. Водночас їх широке використання загострило питання збереження здоров'я як окремих користувачів, так і суспільства загалом. Це зумовлює необхідність удосконалення існуючих підходів до організації робочого середовища та впровадження профілактичних заходів, спря-

мованих на мінімізацію шкідливого впливу комп'ютерної техніки на організм людини.

Відповідно до встановлених гігієнічно-санітарних вимог (ДСН 3.3.6.042-99 [11]) роботодавець зобов'язаний забезпечити в приміщеннях з ПК допустимі параметри виробничого середовища.

Робоче місце дослідника особливостей планування і проектування мереж 5G повинне бути розташоване на відстані не менше 1,5 м від стіни з вікнами, від інших стін – на відстані 1 м, від інших користувачів – на відстані не менше 1,5 м. Відносно вікон робоче місце доцільно розташувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, переважно зліва.

При розташуванні елементів робочого місця користувача ПК слід враховувати:

- робочу позу користувача;
- простір для розміщення користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- розміщення документації і матеріалів, які використовуються користувачем.

Для забезпечення точного та швидкого зчитування інформації в зоні найкращого бачення площина екрана монітора повинна бути перпендикулярною нормальній лінії зору. При цьому повинна бути передбачена можливість переміщення монітора навколо вертикальної осі в межах $\pm 30^\circ$ (справа наліво) та нахилу вперед до 85° і назад до 105° з фіксацією в цьому положенні.

Клавіатура повинна бути розташована так, щоб на ній було зручно працювати двома руками. Клавіатуру слід розміщати на поверхні столу на відстані 100...300 мм від краю. Кут нахилу клавіатури до столу повинен бути в межах від 5° до 15° , зап'ястя на долонях рук повинні розташовуватись горизонтально до площини столу.

Для запобігання світлових відблисків від екрана, клавіатури в напрямку очей користувача від освітлювачів загального призначення або сонячних про-

менів необхідно застосовувати антивідблискові сітки, спеціальні фільтри, захисні козирки, на вікнах регульовані жалюзі.

Принтер повинен бути розміщений у зручному для користувача положенні, так, що максимальна відстань від користувача до клавіш управління принтером не перевищувала довжину витягнутої руки користувача.

Конструкція робочого стола повинна забезпечувати можливість оптимального розміщення на робочій поверхні обладнання, що використовується, з врахуванням його кількості та конструктивних особливостей (розмір монітора, клавіатури, принтера, ПК та ін.) і документів, а також враховувати характер роботи, що виконується.

Згідно з вимог електробезпеки, під час проектування та експлуатації систем електропостачання для ПК необхідно дотримуватись вимог.

Лінія електромережі для живлення ПК, периферійних пристроїв ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК під час проектування виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – без підвищеної небезпеки, у зв'язку з відсутністю факторів підвищеної та особливої небезпеки [12].

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;

2) захисне заземлення із використанням природних заземлювачів;

3) систематичне проходження інструктажу з електробезпеки.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

1. Перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі.

2. Перевірити загальний стан апаратури, справність проводки електромережі, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок та розеток, заземлення захисного екрана.

3. Відрегулювати освітленість робочого місця.
4. Відрегулювати і зафіксувати висоту стільця (крісла), зручний для користувача нахил його спинки.
5. Увімкнути апаратуру ПК вмикачами на корпусах в такій послідовності: стабілізатор (або блок безперервного живлення), ВДТ, системний блок, принтер (якщо передбачається друкування).
6. Відрегулювати яскравість світіння екрану ВДТ, контрастність.
7. При появі несправностей комп'ютерної техніки повідомити керівника.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

За енерговитратами робота дослідника особливостей планування і проектування мереж 5G згідно Гігієнічної класифікація праці [1] відноситься до категорії І б. Нормовані значення параметрів мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.5.1

Таблиця 5.1 - Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Легка І б	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний		20-24	75	0,2

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату здійснюються такі заходи:

1. Температура в приміщенні в холодний період року підтримується за допомогою системи центрального опалення.
2. Використовується передбачається припливна вентиляційна система.
3. Здійснюється систематичне вологе прибирання.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Шкідливі речовини – речовини, які при контакті з організмом людини внаслідок порушення технологічного процесу викликають професійні захворювання, виробничі травми або відхилення стану здоров'я.

Шкідливі речовини у повітря робочої зони поступають у вигляді пару, газів та пилу. Вплив на організм людини залежить від хімічного складу, розміру (дисперсності), форми часток та їх кількості у одиниці об'єму. Найбільш небезпечний високодисперсний пил (розміром < 5 мкм), а також гострокрайовий пил. Високодисперсний пил найбільш глибоко проникає та затримується у легенях.

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [11]. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

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

Для забезпечення складу повітря робочої зони слід використовувати механічну вентиляцію та забезпечити регулярне прибирання.

5.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення повинно бути боковим, бажано одностороннім. Для уникнення засліплюючої дії сонячних променів найкраще, коли світлові отвори (вікна) зорієнтовані на північ чи північний схід. Коефіцієнт природної освітленості (КПО) повинен бути не нижче 1,5%.

У приміщенні, де проводиться дослідження особливостей планування і проектування мереж 5G використовується штучне та природне освітлення. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 5.3:

Таблиця 5.3 - Норми освітленості в приміщенні

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

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

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

5.2.4 Виробничий шум

У приміщеннях з ПК рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99 [10].

Рівні шуму на робочих місцях осіб, що працюють з ПК, визначені ДСанПіН 3.3.2-007-98 [9]. Допустимі значення звукового тиску під час проектування лабораторного стенду наведені в табл.5.4.

Таблиця 5.4 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових примі-	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

5.2.5 Виробничі випромінювання

В умовах, що розглядаються, діють електромагнітні випромінювання. Джерелами електромагнітних випромінювань являються ПК, дослідницькі установки та вимірювальні пристрої.

Рівні електромагнітного випромінювання та магнітних полів повинні відповідати вимогам. Рівні інфрачервоного випромінювання не повинні перевищувати граничних. Рівні ультрафіолетового випромінювання не повинні перевищувати допустимих [9].

Гранично допустима напруженість електростатичного поля на робочих місцях не повинна перевищувати рівнів [6].

Заходи щодо зменшення впливу на працівника електромагнітного випромінювання: оптимальна організація робочого місця, доцільне розміщення тех-

нологічного устаткування, дотримання гігієнічно-обґрунтованих режимів праці та відпочинку, зменшення часу перебування у зоні опромінення.

5.3 Пожежна безпека

Приміщення, де здійснюється дослідження особливостей планування і проектування мереж 5G відноситься до категорії пожежної безпеки В (табл.5.5).

Таблиця 5.5 – Категорія приміщення за вибухопожежною і пожежною небезпекою

Категорія приміщення	Характеристика речовин і матеріалів, що знаходяться (обертаються) у приміщенні
В Пожежонебезпечна	Тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться, не відносяться до категорій А, Б і питома пожежна навантага для твердих і рідких легкозаймистих та горючих речовин на окремих ділянках площею не менше 10 м ² кожна перевищує 180 МДж/м ² .

Конструкція будівлі, де розміщено приміщення, відноситься до II-го ступеня вогнестійкості (будівля з несучою конструкцією з природних матеріалів або штучного каменю, бетону або залізобетону з застосуванням листових і плиткових негорючих матеріалів).

Згідно з правилами улаштування електроустановок, приміщення відноситься до класу П-Па пожежної небезпеки (приміщенні, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали).

5.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

До причин, що можуть спричинити пожежу в приміщенні, відносяться:

- короткі замикання;

- перевантаження електромережі і перегріву струму несучих частин та з'єднань;
- порушення правил техніки безпеки.

При виникненні аварійних ситуацій відбувається різке виділення теплової енергії, яка може стати причиною виникнення пожежі.

Заходи щодо запобігання пожежі:

- систематична перевірка на справність струмоведучих частин обладнання;
- систематичне проведення протипожежного інструктажу;
- дотримання вимог пожежної безпеки на робочому місці.

5.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

У приміщенні можливе використання системи автоматичного пожежогасіння. Також потрібно використовувати установку порошкового пожежогасіння, що використовує у якості вогнегасної речовини спеціальний порошок, який є нетоксичним. Для подачі сигналів про пожежу у приміщенні встановлено пожежну сигналізацію.

Після закінчення роботи від усіх електроприладів, а також з мереж їх живлення повинна бути відключена напруга (за винятком протипожежних та охоронних установок). Електропроводи для підключення комп'ютерів, приладів повинні прокладатися по негорючих конструктивних елементах.

Згідно норм [7] на кожні 20 м² площі приміщення вказаних категорії та класу пожежовибухонебезпеки та можливих класів пожеж – А, В і Е розміщується один порошковий або вуглекислотний вогнегасник з масою заряду від 3 до 5 кг. Крім того на поверсі, де знаходиться приміщення слід забезпечити наявність двох порошкових вогнегасників з масою заряду 10 кг.

Тому в приміщенні буде розташовуватися два порошкових вогнегасники, які будуть розміщуватися в різних його кінцях, на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до нижнього торця вогнегасника і на відстані від дверей, достатній для їх повного відчинення. Підходи до місця розташування вогнегасників ма-

ють бути завжди вільними. Для зазначення місцезнаходження вогнегасників буде встановлений вказівний знак. Знак розташовують на видних місцях на висоті 2,0 - 2,5 м від рівня підлоги.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі були досліджені основні аспекти планування, проєктування, інфраструктури та ресурсів для мереж 5G. Мережі 5G є значним кроком уперед у порівнянні з попередніми поколіннями мобільних мереж і відкривають нові можливості для розвитку телекомунікацій, цифрової економіки та інноваційних технологій.

Для успішного розгортання мереж 5G в Україні необхідно враховувати вимоги до радіочастотного спектра, базових станцій та обчислювальних ресурсів. Розвиток телекомунікаційної інфраструктури є ключовим фактором для забезпечення покриття і стабільної роботи мережі 5G, що вимагає значних інвестицій і модернізації існуючих мереж.

Планування мереж 5G вимагає комплексного підходу до оцінки потреб користувачів, вибору частотного спектра, проєктування інфраструктури та забезпечення безпеки. Врахування усіх цих факторів дозволить створити ефективну, надійну і безпечну мережу, здатну задовольнити зростаючі вимоги до зв'язку в епоху Інтернету речей, автономних транспортних систем, розумних міст та інших інноваційних застосунків.

Інтеграція мережі 5G з попередніми поколіннями мобільних мереж є важливим етапом її розгортання, який дозволяє забезпечити безперервне обслуговування користувачів і знижує витрати на інфраструктуру. Поступова інтеграція, спільне використання інфраструктури, радіоінтерфейсів та управління мобільністю є основними складовими цього процесу. Однак інтеграція з попередніми поколіннями також стикається з рядом проблем, таких як сумісність технологій, управління мережею та обслуговування, що потребують подальших доопрацювань і вдосконалення стандартів.

Оператори зв'язку найбільше потребують розгортання 5G, яке передбачає тривале спільне існування мереж 4-го і 5-го поколінь при максимальному перевикористанні інфраструктури, вузлів і мережевих компонентів. З цієї причини всі плани впровадження 5G поділяються на дві основні категорії: Standalone і

Non-Standalone. Перші передбачають використання лише однієї технології або сумісне існування двох поколінь, що спрощує початкове впровадження мереж 5G.

Використання технології 5G відкриває нові можливості для розвитку цифрової економіки, покращення інфраструктури і створення нових послуг у таких галузях, як охорона здоров'я, освіта, транспорт та сільське господарство. У той же час, для повноцінного впровадження цієї технології необхідні ефективні стратегії розвитку, інвестиції в інфраструктуру та розвиток правової бази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Климаш М. М. Методи та моделі побудови гетерогенних мереж мобільного зв'язку 4G/5G [Текст] : монографія / М. М. Климаш, Т. А. Максимюк, М. І. Бешлей ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2020. - 387 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 360-386. - 300 прим. - ISBN 978-966-941-552-3
2. Г.В. Бешлей, М.О. Селюченко, І.А. Берневек, С.І. Пушак, М.І. Бешлей, "Алгоритм кластеризації, агрегації та класифікації M2M пристроїв в гетерогенній мережі 4G/5G," Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації, № 874, с. 95 – 102, 2017.
3. R. Odarchenko et al., "Enabling Multicast and Broadcast in the 5G Core for Converged Fixed and Mobile Networks," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 66, no. 2, pp. 428-439, June 2020, doi: 10.1109/TBC.2020.2991548
4. D. Mi, R. Odarchenko et al., "Demonstrating Immersive Media Delivery on 5G Broadcast and Multicast Testing Networks," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 66, no. 2, pp. 555-570, June 2020, doi: 10.1109/TBC.2020.2977546.
5. Roman Odarchenko, Baruch Altman, Rui Aguiar and Yevgeniya Sulema Multilink Approach for the Content Delivery in 5G Networks 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 – Conference Proceedings, pp 140-144
6. Odarchenko, R., Gimenez, J., Sulema, Y., Altman, B., Petersen, S. Multilink Solution for 5G: Efficiency Experimental Studies 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies, AICT 2019 – Proceedings 8847862, с. 336-339
7. Глоба, Л. С. Концепції побудови сучасних мереж / Глоба, Л. С., Скулиш М. А., Тимченко І. О. // Радиоэлектроника и информатика=Radioelectronics & informatics : научный журнал Харьковского национального университета радиоэлектроники. – Харьков : ХНУРЕ, 2018. – №1. – С. 25-29.

8. Бак Р.І. Метод балансування абонентського навантаження мережі комірковог-
го зв'язку / Бак Р.І., Чайковський І.Б., Бурачок Р.А. // Вісник Національного
університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації. –
2013. № 766. С. 110-115.
9. Яремко О.М. Метод адаптивного розподілення потужності в мобільній ме-
режі при варіації абонентського навантаження / О.М. Яремко, Т.А. Макси-
м'юк, Р.І. Бак // Національна академія наук України. Інститут проблем моде-
лювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. Збірник наукових праць. – Київ, 2012.
Вип. 66. – С. 137-143.
10. Максимюк Т. А. Підвищення енергетичної та спектральної ефективності
гетерогенних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління [Текст] : автореф.
дис. ... канд. техн. наук : 05.12.02 / Максимюк Тарас Андрійович ; Нац. ун-т
"Львів. політехніка". - Львів, 2015. - 21 с. : рис.
11. Одарченко Р.С. Обґрунтування основних вимог до систем безпеки стіль-
никових мереж 5-го покоління. - Безпека інформації. Віп №3 (Том 21) -
2015., С. 229-235
12. Проектування безпроводових стільникових мереж зв'язку [Електронний
ресурс] : навчальний посібник для виконання курсової роботи з дисципліни
«Телекомунікаційні дові системи» для студентів усіх форм навчання за на-
прямом підготовки 6.050903 «Телекомунікації» / НТУУ «КПІ» ; уклад.: В. В.
Пілінський, П. В. Попович, С. М. Веретюк. – Електронні текстові дані (1
файл: 1,52 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 69 с. – URL:
<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/21177>
13. Усік П.С., Полігенько О.О., Одарченко Р.С., Терещенко Л.Ю., Смірнов
О.А. «Інформаційна технологія та програмне забезпечення для підвищення
ефективності планування підсистеми базових станцій стільникового
зв'язку». Проблеми телекомунікацій. 2020 № 1(26). С. 83-96.
14. Усік П.С., Смірнов О.А. Дослідження перспектив використання техноло-
гічних рішень в мережах 5g. Кібербезпека та інформаційні технології: моно-
графія. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 122–135.

15. Скобцов Ю.О. Основи еволюційних обчислень.- Навчальний посібник.- Донецьк: ДонНТУ, 2008.-326с.
16. Калініна І. В. Використання генетичних алгоритмів в задачах оптимізації / І. В. Калініна, О. І. Лісовиченко // Адаптивні системи автоматичного управління. - 2015. - № 1. - С. 48-61.
17. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text>
18. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.
19. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>
20. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок (Правила устройства электроустановок. Элект рооборудование специальных установок). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>
21. ДСТУ EN 62305:2012 Блискавкозахист (європейський стандарт ІЕС 62305:2010). URL: <https://tdsb.com.ua/ru/dstu-en-62305/>
22. ДСТУБ В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с
23. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.
24. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf

25. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php
26. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
27. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
28. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
29. СН N 4557-88 Санитарные нормы ультрафиолетового излучения в производственных помещениях - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.znaytovar.ru/gost/2/455788_Sanitarnye_normy_ultraf.html

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ОСОБЛИВОСТІ ПЛАНУВАННЯ І ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖ 5G
назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

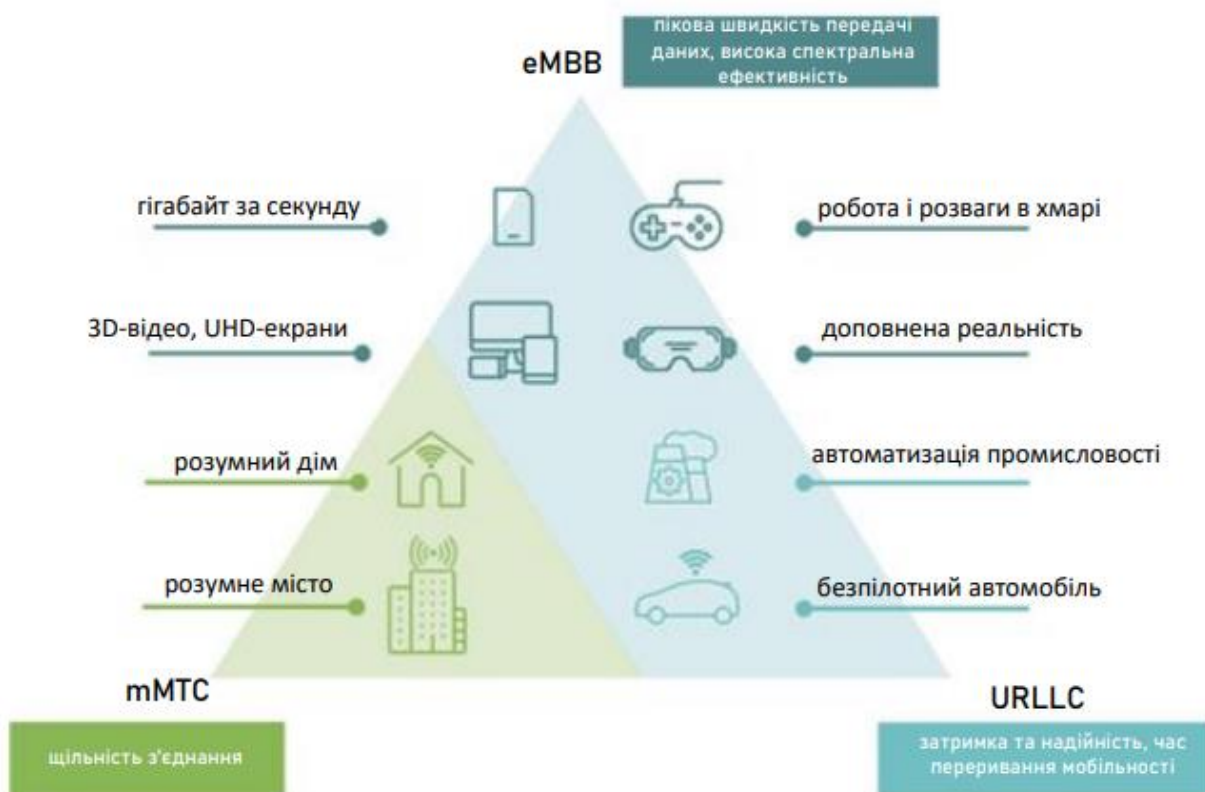


Рисунок 1 – Сценарії використання 5G

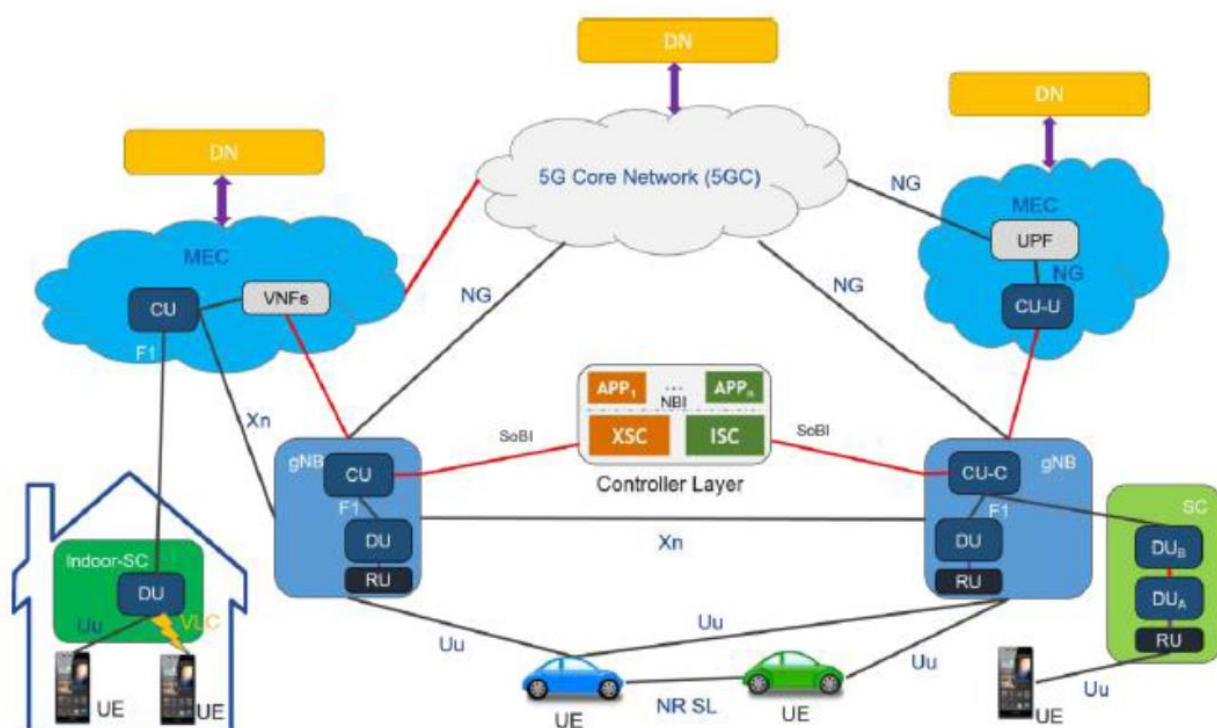


Рисунок 2 – Загальна архітектура мережі 5G

Таблиця 1 – Вимоги до продуктивності мережі

Параметр	Значення
Пікова швидкість	>10 Гбіт/с
Швидкість для користувача	до 1 Гбіт/с
Щільність підключень	Мільйон з'єднань/ км.кв.
Мобільність	До 500 км/год
Затримка	1 мс

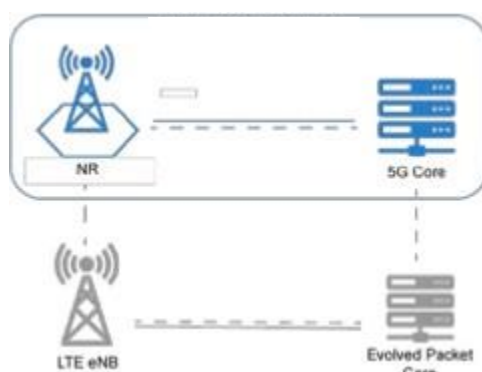


Рисунок 2 — Самостійна мережева архітектура

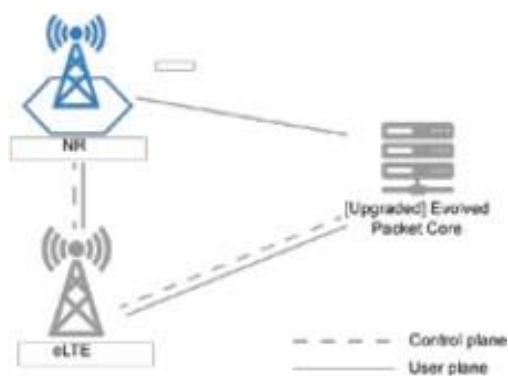


Рисунок 4 — Несамостійна мережева архітектура

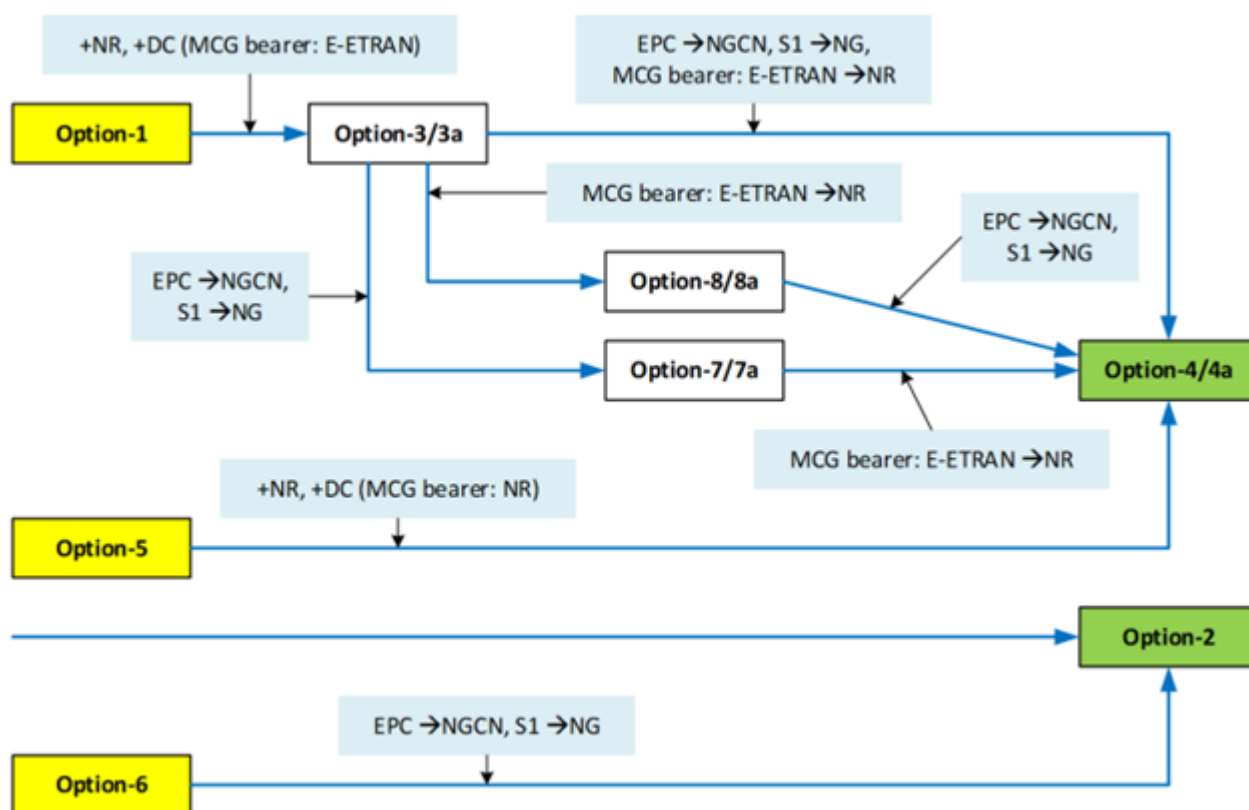


Рисунок 5 – Варіанти розгортання мереж 5G

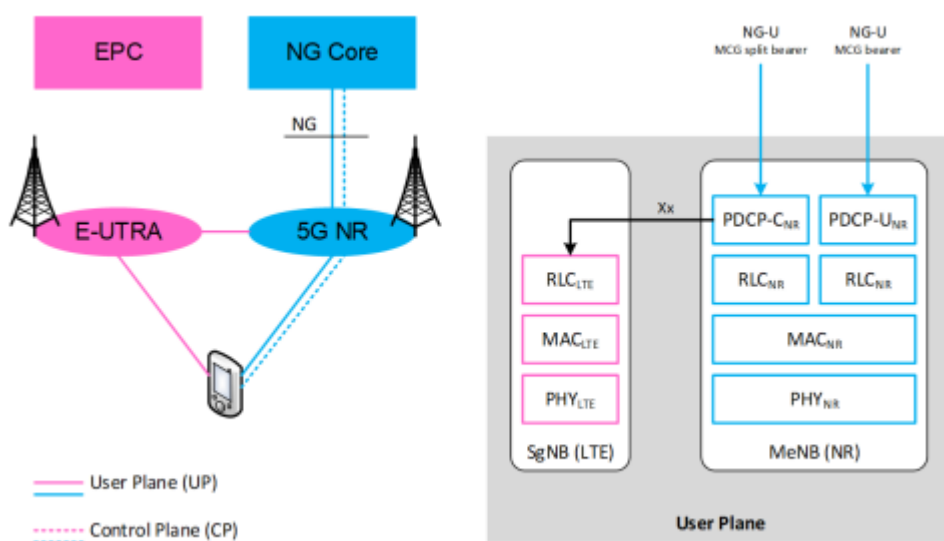


Рисунок 6 – Архітектура комбінованої мережі 5G/LTE

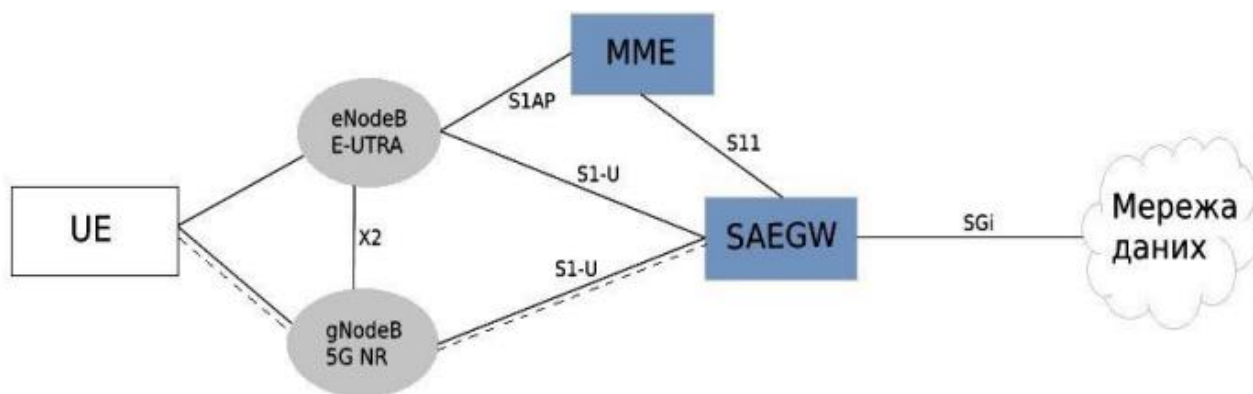


Рисунок 7 – Варіант архітектури 5G на основі LTE

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Особливості планування і проектування мережі 5G

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-21Б
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 3,4%

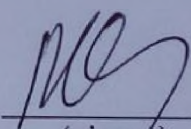
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

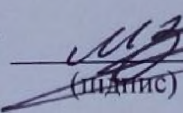
Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПП
(прізвище, ініціали, посада)

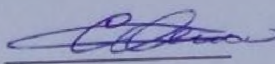

(підпис)


(підпис)

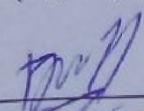
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Стальченко О.В., доцент кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Брацюха Н. К.
(прізвище, ініціали)