

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Електронних комунікацій та Інтернету речей

«До захисту допущено»

В.О. завідувача кафедри

_____ Вячеслав НОСКОВ

« ___ » _____ 2025 р.

Дипломна робота

**на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Системи електронних
комунікацій та Інтернету речей»
зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**на тему: «Аналіз технічних принципів побудови транспортної мережі
мобільного зв'язку 5G»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ТС-12

Геращенко Максим Ігорович _____

Керівник:

Доцент кафедри ЕКІР ІТС, доцент

Носков Вячеслав Іванович _____

Рецензент: ФІО

Незалежний експерт з телекомунікацій, кандидат

технічних наук, Вахрушев Володимир Платонович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Електронних комунікацій та Інтернету речей

Рівень вищої освіти – перший(бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.О. Завідувача кафедри

_____ Вячеслав НОСКОВ

« ___ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Геращенко Максиму Ігоровичу

1. Тема роботи «Аналіз технічних принципів побудови транспортної мережі мобільного зв'язку 5G», керівник роботи Носков Вячеслав Іванович, доцент, затверджені наказом по університету від 26 травня 2025 р. № 1755-с.

2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: матеріали статей та наукових видань, інформаційні ресурси мережі Інтернет, навчально-методичні матеріали. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.

4. Зміст роботи

Обґрунтувати актуальність теми. Розглянути еволюційний процес розвитку технологій мобільного зв'язку. Проаналізувати архітектуру транспортних мереж мобільного зв'язку 5G з використанням технологій SDN та NFV. Аналіз викликів та проблем мереж 5G. Окреслити основні напрямки подальшого розвитку мобільних мереж 5G та їх вплив на різні галузі.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 1) Тема та мета дипломної роботи; 2) Архітектура мережі 5G; 3) Організація транспорту в мережах 5G; 4) Використання технологій SDN, NFV, MEC в мережах 5G; 5) Проблеми впровадження мереж 5G; 6) Використання мереж 5G в різних галузях; 7) Висновки по роботі.

6. Дата видачі завдання 31.10.2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Аналіз еволюції технологій мобільного зв'язку	15. 11. 2024	Виконано
2	Дослідження архітектури транспортної мережі 5G	26.12.2024	Виконано
3	Оцінка основних технологічних рішень	05.02.2025	Виконано
4	Вивчення ролі віртуалізації та програмно-визначених мереж	04.03.2025	Виконано
5	Аналіз викликів та проблем побудови мобільних 5G	13.04.2025	Виконано
6	Розгляд перспектив розвитку 5G та його вплив на різні галузі	10.05.2025	Виконано
7	Оформлення дипломної роботи	10.06.2025	Виконано

Студент _____ Максим ГЕРАЩЕНКО

Керівник роботи _____ Вячеслав НОСКОВ

РЕФЕРАТ

Обсяг роботи 72 сторінки, 11 ілюстрацій, 45 джерел літератури.

Мета роботи: Проаналізувати технічні принципи побудови транспортної мережі мобільного зв'язку 5G, що дозволяють забезпечувати високошвидкісну, надійну і масштабовану інфраструктуру для передачі даних у сучасних мобільних мережах. Це дослідження спрямоване на вивчення ключових технологічних рішень, що лежать в основі транспортної мережі 5G, таких як використання міліметрових хвиль, багатоканальне передавання даних, віртуалізація мережевих функцій, програмно-визначені мережі, а також розподілені обчислення на периферії.

Актуальність теми: Розвиток мобільних комунікацій є одним із ключових факторів у цифровій трансформації суспільства, впровадженні інноваційних технологій і підвищенні ефективності багатьох галузей. П'яте покоління мобільного зв'язку (5G) є наступним важливим кроком у розвитку бездротових технологій, що дозволяє забезпечити значно вищу пропускну здатність, знижені затримки та масштабну підтримку підключених пристроїв. У сучасному світі, де обсяг переданих даних зростає експоненційно, 5G стає базовою технологією для реалізації концепцій Інтернету речей (IoT), розумних міст, індустрії 4.0, автономного транспорту та розширених реальностей (AR/VR).

Об'єкт дослідження: мережа мобільного зв'язку 5G.

Предмет дослідження: транспортні технології в мережах 5G.

Ключові слова: 5G, транспортна мережа, Fronthaul, Midhaul, Backhaul, SDN, NFV, MEC, mmWave.

ABSTRACT

The thesis comprises 72 pages, includes 11 illustrations, and references 45 literary sources.

The goal of the work: To analyze the technical principles underlying the design of the 5G mobile communication transport network, which enable the creation of a high-speed, reliable, and scalable infrastructure for data transmission in modern mobile networks. This study focuses on key technological solutions that form the foundation of 5G transport networks, such as the use of millimeter waves, multichannel data transmission, network function virtualization (NFV), software-defined networking (SDN), and distributed edge computing (MEC).

Topicality: The development of mobile communications is one of the key drivers of society's digital transformation, the implementation of innovative technologies, and the enhancement of efficiency across various sectors. Fifth-generation mobile communication (5G) represents the next major step in the evolution of wireless technologies, offering significantly higher bandwidth, reduced latency, and massive support for connected devices. In a world where the volume of transmitted data is growing exponentially, 5G becomes a foundational technology for implementing concepts such as the Internet of Things (IoT), smart cities, Industry 4.0, autonomous transport, and augmented/virtual reality (AR/VR).

Object of study: 5G mobile communication network.

Subject of study: Transport technologies in 5G networks.

Keywords: 5G, transport network, Fronthaul, Midhaul, Backhaul, SDN, NFV, MEC, mmWave.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І	
ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	9
1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ 5G.....	12
1.1 Еволюція мобільних комунікацій: від 1G до 5G	12
1.2 Основні технологічні інновації 5G	17
1.3 Принципи роботи мережі 5G: архітектура та ключові характеристики	
.....	26
1.4 Висновки з розділу 1	33
2 АРХІТЕКТУРА ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ 5G.....	35
2.1 Транспортна мережа 5G: основні компоненти (backhaul, fronthaul,	
midhaul)	35
2.2 Використання програмно-визначених мереж (SDN) і віртуалізації	
(NFV) в 5G	41
2.3 Інтеграція розподілених обчислень на периферії (MEC) в	
транспортну інфраструктуру	49
2.4 Висновки з розділу 2	52
3 ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ	
5G	54
3.1 Основні технічні виклики при побудові транспортної мережі 5G	
(затримка, енергоспоживання, безпека)	54
3.2 Перспективи розвитку транспортної інфраструктури та вплив	
технологій 6G	58
3.3 Запропоновані рекомендації щодо оптимізації транспортної мережі	
5G.....	63
3.4 Висновки з розділу 3	65
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

IoT	Internet of Things (Інтернет речей)
QoS	Quality of Service (якість обслуговування)
AR	Augmented Reality (доповнена реальність)
VR	Virtual Reality (віртуальна реальність)
LTE	Long Term Evolution (довгострокова еволюція)
5GC	5G Core (ядро мережі 5G)
BBU	Baseband Unit (блок обробки базової смуги)
CU	Centralized Unit (централізований блок)
DU	Distributed Unit (розподілений блок)
MEC	Multi-access Edge Computing (багатодоступні периферійні обчислення)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (множинний вхід/вихід)
mmWave	Millimeter Wave (міліметрові хвилі)
RRH	Remote Radio Head (віддалений радіомодуль)
SDN	Software Defined Networking (програмно-визначені мережі)
SBA	Service-Based Architecture (сервісно-орієнтована архітектура)
SMF	Session Management Function (функція керування сесією)
TSN	Time-Sensitive Networking (мережі з часовою чутливістю)

UE	User Equipment (абонентське обладнання)
UPF	User Plane Function (функція користувацької площини)

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток мобільних комунікацій є одним із ключових факторів у цифровій трансформації суспільства, впровадженні інноваційних технологій і підвищенні ефективності багатьох галузей. П'яте покоління мобільного зв'язку (5G) є наступним важливим кроком у розвитку бездротових технологій, що дозволяє забезпечити значно вищу пропускну здатність, знижені затримки та масштабну підтримку підключених пристроїв. У сучасному світі, де обсяг переданих даних зростає експоненційно, 5G стає базовою технологією для реалізації концепцій Інтернету речей (IoT), розумних міст, індустрії 4.0, автономного транспорту та розширених реальностей (AR/VR).

Однією з головних причин актуальності теми є те, що транспортна мережа є критично важливим компонентом інфраструктури 5G, який забезпечує швидку та надійну передачу даних між базовими станціями та ядром мережі. Переваги, які приносить 5G, такі як швидкість передачі даних до 20 Гбіт/с і затримка до 1 мс, безпосередньо залежать від ефективності транспортної мережі. Інноваційні рішення, такі як використання міліметрових хвиль (mmWave), багатоканальне передавання даних (MIMO) та програмно-визначені мережі (SDN), значно змінюють підхід до побудови та масштабування транспортних мереж.

Крім цього, впровадження 5G стикається з низкою викликів, таких як висока вартість розгортання інфраструктури, енергоспоживання, потреба в нових стандартах безпеки та управління мережею. Важливим фактором є те, що для підтримки всіх переваг 5G необхідно забезпечити не тільки модернізацію існуючих технологій зв'язку, а й побудову нової, гнучкої та масштабованої транспортної інфраструктури.

Актуальність теми дослідження також підтверджується тим, що впровадження 5G мереж стане основою для економічного зростання багатьох галузей: від телекомунікацій і транспорту до медицини та освіти.

Важливість ефективної транспортної мережі в цьому процесі зростає, оскільки вона є "хребтом" усієї мережі. Тому розуміння технічних принципів побудови транспортної мережі 5G є критично важливим для забезпечення її успішної реалізації в майбутньому.

Мета роботи: Проаналізувати технічні принципи побудови транспортної мережі мобільного зв'язку 5G, що дозволяють забезпечувати високошвидкісну, надійну і масштабовану інфраструктуру для передачі даних у сучасних мобільних мережах. Це дослідження спрямоване на вивчення ключових технологічних рішень, що лежать в основі транспортної мережі 5G, таких як використання міліметрових хвиль, багатоканальне передавання даних (MIMO), віртуалізація мережевих функцій (NFV), програмно-визначені мережі (SDN), а також розподілені обчислення на периферії (MEC).

Задачі дослідження:

1. Провести аналіз еволюції технологій мобільного зв'язку з акцентом на ключових відмінностях між попередніми поколіннями (2G, 3G, 4G) та новітньою 5G технологією, підкреслюючи основні переваги 5G.
2. Дослідити архітектуру транспортної мережі 5G, включаючи її компоненти (backhaul, fronthaul, midhaul), їхні функції та технічні особливості.
3. Оцінити основні технологічні рішення для побудови транспортної інфраструктури 5G, такі як використання міліметрових хвиль (mmWave), багатовимірне формування променів (beamforming), масивні MIMO-системи та технології оптимізації затримок у передачі даних.

4. Вивчити роль віртуалізації та програмно-визначених мереж (SDN і NFV) в організації та управлінні транспортною мережею 5G, а також вплив розподілених обчислень на периферії (MEC) на покращення продуктивності та гнучкості мережі.
5. Аналізувати виклики та проблеми, з якими стикаються оператори мобільних мереж при впровадженні та експлуатації 5G транспортної інфраструктури, зокрема питання енергоспоживання, безпеки, затримок і вартості розгортання мережі.
6. Розглянути перспективи розвитку 5G та його вплив на різні галузі економіки, включаючи індустрію 4.0, транспорт, медицину, сільське господарство та інші.
7. Запропонувати рекомендації щодо оптимізації транспортної мережі 5G, враховуючи майбутні вимоги до мереж 6G та подальшої еволюції мобільних комунікацій.

Об'єкт дослідження: мережа мобільного зв'язку 5G.

Предмет дослідження: транспортні технології в мережах 5G.

Практичне значення одержаних результатів:

Рекомендації щодо оптимізації транспортної мережі 5G.

Публікації:

1. Геращенко М. І. (2022). NETWORK LAYER: ITS ARCHITECTURE, SURVEY AND NETWORK SYSTEM. *Грааль науки*, 1(201), DOI: 10.36074/grail-of-science.23.12.2022.31.

Ключові слова: 5G, транспортна мережа, Fronthaul, Midhaul, Backhaul, SDN, NFV, MEC, mmWave.

1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ 5G

1.1 Еволюція мобільних комунікацій: від 1G до 5G

Мобільні комунікації за останні кілька десятиліть пройшли шлях від аналогової передачі голосу до повноцінної високошвидкісної цифрової екосистеми. Кожне покоління (G – Generation) мобільного зв'язку ознаменувало собою технологічний прорив, який визначав напрямок розвитку інфраструктури, протоколів, сервісів та рівень інтеграції у соціально-економічне середовище.

Мобільні технології зазнавали трансформацій відповідно до потреб часу. Основними драйверами змін у кожному поколінні були зростання обсягів даних та збільшення вимог до якості обслуговування (QoS) [1].

Перші комерційні мобільні системи, такі як AMPS (США), NMT (Скандинавія) і TACS (Велика Британія) використовували частоти близько 900 МГц і аналогову модуляцію [2].

1G. Мережі 1G були задумані та розроблені суто для голосових дзвінків, майже не враховуючи послуги передачі даних (за можливим винятком вбудованих модемів у деяких гарнітурах) [2].

Аналогова передача сигналу, робила зв'язок дуже чутливим до шумів, перешкод і втрати якості. У результаті цього телефонні дзвінки часто супроводжувалися спотворенням голосу, шипінням або взагалі перервами у з'єднанні. Це особливо помітно було під час пересування або на межі зони покриття.

Ще одним серйозним недоліком була повна відсутність шифрування даних. Розмови передавалися відкритим каналом, тому їх можна було легко перехопити за допомогою звичайного радіообладнання. Це створювало загрозу конфіденційності користувачів.

Крім того, 1G не підтримував жодної передачі даних, окрім голосу. Надсилати текстові повідомлення або підключатися до інтернету було

неможливо. Єдиною функцією мобільного телефону на той час був голосовий дзвінок [2].

Мережі 1G мали обмежену ємність, тобто могли обслуговувати не так багато користувачів одночасно. Через це в густонаселених районах часто виникали труднощі з підключенням до мережі. Самі ж мобільні пристрої були громіздкими, важкими й споживали багато енергії, що обмежувало зручність їх використання та автономність [1].

Усе це зумовило швидкий перехід до цифрових технологій, і вже у 1990-х роках на зміну аналоговому зв'язку прийшло друге покоління — 2G, яке усунуло більшість проблем, властивих 1G [2].

2G. Мобільний зв'язок другого покоління, або 2G, з'явився на початку 1990-х років і став значним кроком уперед порівняно з аналоговим 1G. Його головною особливістю була цифрова передача сигналу, що дозволило суттєво покращити якість голосового зв'язку, зменшити кількість перешкод і забезпечити кращу безпеку. Саме завдяки 2G з'явилися такі звичні нам функції, як SMS та MMS — короткі текстові та мультимедійні повідомлення [3].

Проте, незважаючи на проривні для свого часу можливості, 2G мало й низку обмежень. Найбільш відчутною проблемою була низька швидкість передачі даних [4]. Такі стандарти, як GPRS та пізніше EDGE, забезпечували інтернет-з'єднання на рівні десятків або максимум сотні кілобіт на секунду, чого явно не вистачало для зручного перегляду сайтів, завантаження файлів чи використання сучасних додатків.

Крім того, можливості 2G у сфері мультимедіа були обмеженими. Відео, потокове аудіо або відеодзвінки залишалися або недоступними, або вкрай неякісними. Незважаючи на загальне розширення зони покриття, у деяких віддалених регіонах сигнал залишався нестабільним, що ускладнювало використання зв'язку на природі, у горах чи в сільській місцевості.

Ще одним недоліком була обмежена ємність мереж — у великих містах із високою концентрацією користувачів мережа могла перевантажуватись, що призводило до складнощів із дозвоном. І хоча на момент появи 2G ці недоліки не були критичними, з часом вони стали очевидними, коли мобільні телефони перетворилися на багатофункціональні пристрої.

Попри все, 2G стало важливим етапом розвитку мобільного зв'язку. Воно принесло цифрову якість, безпеку, обмін повідомленнями й перший мобільний інтернет, а також стало фундаментом для створення більш сучасних стандартів — 3G, 4G та 5G.

2,5G. Технологія 2.5G (GPRS) стала перехідним етапом між 2G і 3G, дозволивши передавати дані пакетами з більшою швидкістю, ніж у 2G. Вона забезпечувала теоретичну швидкість до 56-114 Кбіт/с, що дозволяло використовувати базові сервіси, такі як мобільний Інтернет і електронна пошта. Однак реальна швидкість була значно нижчою, і GPRS не забезпечувала достатньої пропускну здатності для відео чи швидкого завантаження файлів. Крім того, обмеження старої інфраструктури 2G не дозволяли повністю розкрити потенціал цієї технології. Тим не менше, 2.5G стала важливим кроком до розвитку більш швидких і ефективних мереж, таких як 3G [5].

3G. Мобільний зв'язок третього покоління, або 3G, з'явився на початку 2000-х років і став черговим великим кроком уперед. Він був створений, щоб подолати обмеження 2G — зокрема, надати можливість швидкої передачі даних. Саме завдяки 3G користувачі вперше змогли комфортно переглядати веб-сторінки з телефону, користуватись мобільною електронною поштою, стрімити відео й аудіо. З'явилися мобільні додатки, відеодзвінки, месенджери, а мобільний інтернет перетворився з рідкісної функції на щоденну потребу.

Однак і 3G не було ідеальним. Хоча воно забезпечувало значно вищу швидкість порівняно з 2G, на практиці реальна пропускна здатність часто була значно нижчою за теоретично заявлену. Це пояснюється як обмеженнями мережевої інфраструктури, так і кількістю одночасно підключених користувачів. У місцях із великим навантаженням зв'язок міг бути повільним або нестабільним [6]. Ще однією проблемою був високий рівень енергоспоживання — смартфони на 3G працювали набагато менше на одному заряді, ніж у режимі 2G, що особливо відчувалося на перших моделях пристроїв.

Також у 3G залишалися певні технічні обмеження щодо затримок передачі сигналу [6], які заважали створенню по-справжньому реального часу для деяких сервісів. У багатьох регіонах впровадження 3G затягнулося через складну й дорогую модернізацію веж і покриття, а отже користувачі могли залишатися на старих технологіях ще роками.

Незважаючи на ці недоліки, 3G стало переломним моментом — воно дало поштовх до розвитку смартфонів, мобільних сервісів і цифрових комунікацій. Без нього не було б можливим поширення соціальних мереж, стрімінгу й мобільного банкінгу в тому вигляді, в якому ми знаємо їх сьогодні.

3,5G. Технологія 3.5G, або HSPA (High-Speed Packet Access), є покращенням 3G. Вона дозволяє досягати значно вищих швидкостей передачі даних: до 14.4 Мбіт/с на скачування та до 5.8 Мбіт/с на відправку. Це дозволило забезпечити більш стабільний мобільний Інтернет, покращити потокове відео та онлайн-ігри. HSPA також знижує затримки, що підвищує якість з'єднання [7]. Однак технологія все ще мала обмеження щодо пропускної здатності в умовах високого навантаження, і не могла повністю задовольнити потреби для нових вимог, таких як великі обсяги даних або безперебійний відео-стрімінг.

4G (LTE). LTE (Long-Term Evolution) — це стандарт для мобільних мереж четвертого покоління (4G), який став основною технологією для забезпечення високошвидкісного мобільного Інтернету. Він був розроблений для того, щоб значно збільшити швидкість передачі даних, знизити затримки та покращити ефективність використання спектра в порівнянні з попередніми поколіннями мобільного зв'язку.

Основною перевагою LTE є його швидкість. Технологія забезпечує теоретичну максимальну швидкість завантаження до 300 Мбіт/с і до 75 Мбіт/с для відправки даних [8]. Це дозволяє користувачам здійснювати безперебійний відео-стрімінг у високій якості (наприклад, 4K), швидко завантажувати великі файли та користуватися мобільним Інтернетом без затримок.

Ще одна важлива перевага LTE — зниження затримок у порівнянні з попередніми технологіями, що робить онлайн-ігри, відеоконференції та інші реального часу додатки більш зручними та стабільними [8]. Завдяки використанню OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) для передачі даних на різних частотах, LTE забезпечує високу пропускну здатність і ефективність використання мережевих ресурсів.

Проте LTE також має свої обмеження. Щоб забезпечити високу швидкість і знижену затримку, необхідно мати щільну мережу базових станцій, що створює значні витрати на розгортання інфраструктури [8]. Крім того, у густонаселених районах може виникати перевантаження мережі, що знижує швидкість з'єднання.

Технологія четвертого покоління, або 4G, з'явилася як відповідь на потреби в ще більшій швидкості мобільного інтернету, стабільнішому з'єднанні та кращій якості обслуговування для сучасних мультимедійних сервісів. 4G відкрила можливості для стрімінгу відео у високій якості, онлайн-ігор без суттєвих затримок, відеоконференцій, а також масової популяризації мобільного хмарного зберігання та навігації. Справжнім

проривом став перехід до повністю пакетної передачі даних на базі IP, що дозволило значно оптимізувати роботу мережі.

Але попри відчутне технічне зростання, 4G також має свої недоліки. Одним з головних є потреба в щільному покритті базовими станціями — для забезпечення високих швидкостей і низьких затримок потрібно більше інфраструктури, ніж у попередніх поколіннях. Це означає більші витрати на будівництво та обслуговування, особливо у сільських або гірських районах, де інтернет 4G часто або повільний, або відсутній.

Ще одна проблема — це енергоспоживання. Хоча у порівнянні з 3G ситуація трохи покращилась, проте в активному режимі 4G все ще суттєво розряджає батарею, особливо під час передавання великих обсягів даних, таких як відео у 4K чи стрімінг.

З безпекової точки зору 4G є значно досконалішим [9], однак залишаються деякі уразливості. Наприклад, у деяких реалізаціях LTE можливі атаки типу "downgrade", коли зловмисник змушує пристрій перейти на менш захищену мережу 3G або навіть 2G. Також виникали занепокоєння щодо відстеження користувачів за допомогою ідентифікаторів IMSI або через слабкі місця в сигналізаційних протоколах.

Крім того, хоча 4G задовольнило більшість вимог свого часу, з ростом IoT-пристроїв, потреб у наднизьких затримках та масовій одночасній підключеності стало зрозуміло, що його можливості мають межу. Саме це стало основним поштовхом до розробки 5G.

1.2 Основні технологічні інновації 5G

Мобільний зв'язок п'ятого покоління (5G) є наступним етапом еволюції телекомунікаційних технологій після 4G LTE. Його впровадження обумовлено необхідністю задовольнити зростаючі вимоги до швидкості передачі даних, зменшення затримки, забезпечення високої щільності

підключень та підтримки нових сценаріїв використання, таких як Інтернет речей (IoT), автономні транспортні засоби та віртуальна реальність.

Технологія мобільного зв'язку п'ятого покоління ґрунтується на низці глибоких технічних інновацій, які забезпечують її високий потенціал і універсальність у порівнянні з попередніми поколіннями. Її архітектура спроектована для досягнення високої швидкості передачі даних, мінімальної затримки, масової підключеності пристроїв та адаптивності до різних сценаріїв використання.

Одним із ключових напрямів удосконалення технічної бази 5G є розширення використовуваного частотного спектра.

Зокрема, важливу роль у побудові високопродуктивної транспортної інфраструктури відіграють *міліметрові хвилі (mmWave)*, що формують основу високошвидкісної транспортної інфраструктури мережі 5G [10].

Діаграму міліметрового діапазону зображено на рисунку 1.1.

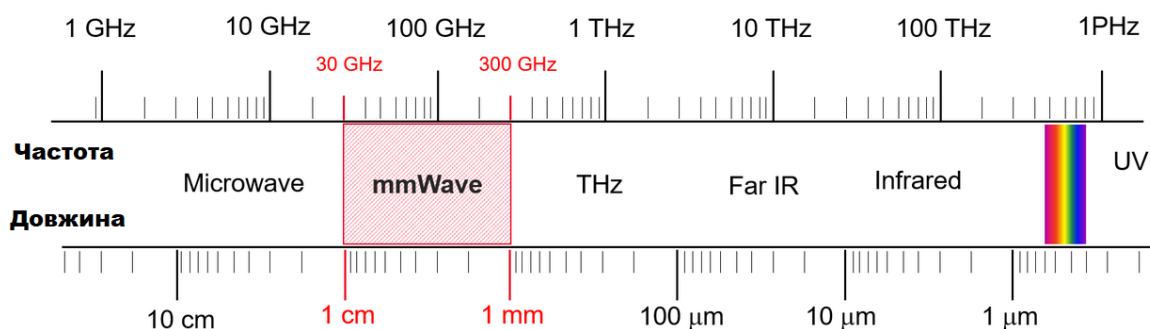


Рисунок 1.1 – Схематична діаграма міліметрового діапазону частот [11]

Вони охоплюють частотний діапазон приблизно від 24 до 100 ГГц, що значно перевищує традиційно використовувані діапазони в попередніх поколіннях мобільного зв'язку. Внаслідок коротшої довжини хвилі (від 1 до 10 міліметрів), mmWave дозволяють передавати дані з дуже високою швидкістю та забезпечують значно більшу пропускну здатність порівняно з нижчими частотами. Це робить їх надзвичайно привабливими для

задоволення зростаючих вимог до трафіку в умовах стрімкого зростання кількості підключених пристроїв і сервісів.

До ключових переваг використання міліметрових хвиль належить, передусім, наявність великої кількості ще не задіяного спектра, що дозволяє забезпечити ширші канали зв'язку і передавати більше даних за одиницю часу [16]. Це особливо важливо для підтримки сценаріїв з високою щільністю трафіку, таких як хмарні додатки, відео 4K/8K у реальному часі, або ж мережі критичного призначення, де надзвичайно важлива мінімальна затримка.

У контексті транспортної мережі 5G міліметрові хвилі особливо актуальні для реалізації рішень у сфері *fronthaul* та *backhaul* — ланок, які з'єднують елементи радіодоступу з транспортним ядром мережі. Схему основних елементів мережі 5G можна побачити на рисунку 1.2.

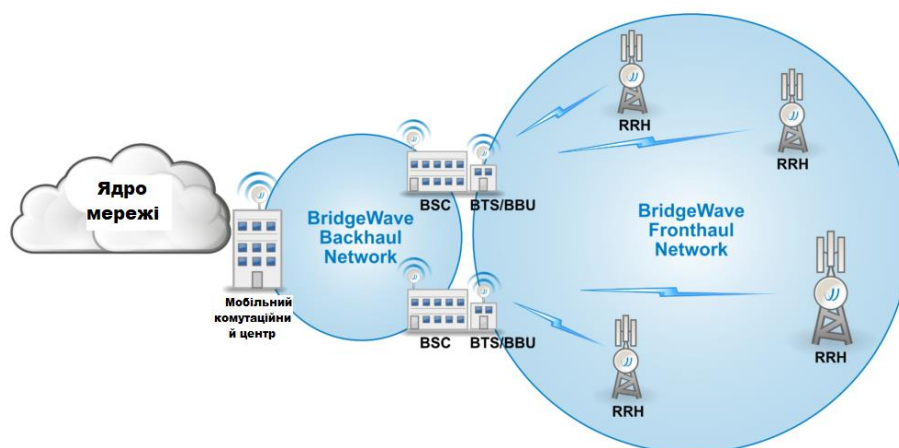


Рисунок 1.2 – Схема основних елементів мережі 5G [12]

Завдяки високій пропускній здатності mmWave ефективно застосовуються в щільнонаселених міських середовищах, де необхідне передавання великих обсягів даних на короткі відстані між базовими станціями, малими осередками (small cells) або вузлами ядра мережі [16]. Їх

використання дозволяє зменшити залежність від волоконно-оптичних рішень у тих випадках, коли прокладання кабелю є складним або економічно недоцільним.

Проте mmWave також мають ряд обмежень, що значною мірою впливають на їх застосування. Сигнали в цьому діапазоні зазнають значного загасання в атмосфері [16], особливо через поглинання киснем, водяною паром та дощем. Крім того, такі хвилі мають обмежену здатність проникати крізь стіни, вікна та інші перешкоди, а також можуть бути легко екрановані фізичними об'єктами, такими як дерева або транспортні засоби. Внаслідок цього зона покриття однієї базової станції, що працює на mmWave, значно менша порівняно з низькочастотними рішеннями, що вимагає більш щільного розміщення передавальних точок і ретельного проектування інфраструктури.

У зв'язку з цим виникає потреба в застосуванні передових методів просторового управління сигналами, здатних компенсувати обмеження, притаманні високочастотному радіозв'язку.

Однією з таких критично важливих технологій, яка забезпечує ефективне функціонування мереж 5G в умовах складного радіооточення, є *формування променя* (рисунок 1.3).

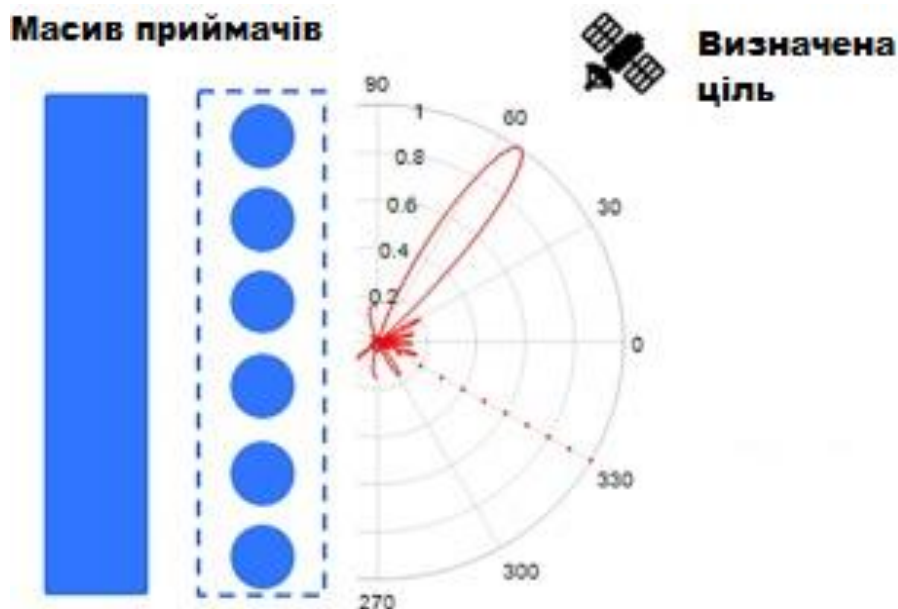


Рисунок 1.3 – Схема beamforming: підсилення сигналу в сторону до цілі [13]

Ця технологія дозволяє значно покращити якість радіосигналу, підвищити ефективність спектра та зменшити рівень інтерференції в мережі. Її суть полягає в динамічному спрямуванні переданого або прийнятого радіосигналу в конкретному напрямі шляхом узгодженого регулювання фази та амплітуди сигналів, що надсилаються з масиву антен. Спектр формування променя зображено на рисунку 1.4

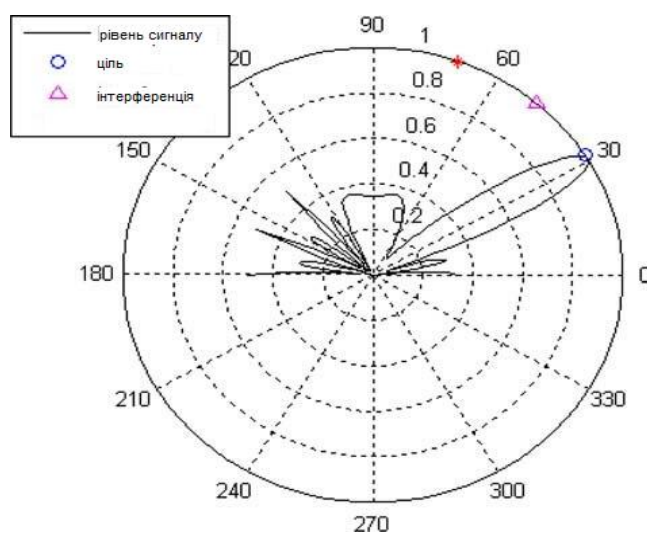


Рисунок 1.4 – Репрезентативний спектр формування променя [14]

Таким чином, замість традиційного всеспрямованого передавання, сигнал фокусується у вигляді вузького променя, що дозволяє доставляти його безпосередньо до цільового користувача або мережевого елемента.

Існує кілька основних типів формування променя — аналогове, цифрове та гібридне (рисунок 1.5).

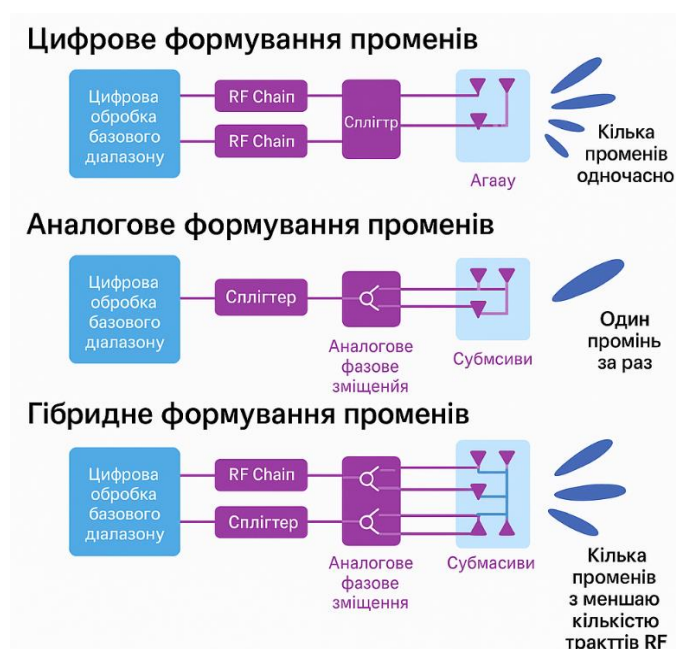


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення підходів до формування променя [15]

Аналогове beamforming здійснюється на рівні радіочастотного тракту за допомогою фазових зміщувачів і використовується переважно для відносно простих сценаріїв із обмеженою кількістю променів. Цифрове beamforming, своєю чергою, реалізується шляхом обробки сигналу на цифровому рівні, що дозволяє одночасно формувати кілька променів, спрямованих у різні сторони, і підтримувати множинні підключення (наприклад, за технологією massive MIMO). Гібридне beamforming поєднує переваги обох підходів — забезпечує високу гнучкість і зниження

енергоспоживання за рахунок оптимального розподілу обробки між аналоговим і цифровим рівнями.

Однією з ключових переваг beamforming є значне зменшення інтерференції між користувачами [18], адже сигнали не поширюються у всіх напрямках, а фокусуються безпосередньо на цільових приймачах. Це підвищує якість обслуговування, покращує показники пропускну здатності та спектральної ефективності, а також дозволяє підвищити енергоефективність системи за рахунок спрямованої передачі. Крім того, beamforming сприяє більш стабільному з'єднанню в умовах високої мобільності або складного радіооточення.

У контексті транспортної інфраструктури 5G технологія формування променя відіграє важливу роль у забезпеченні ефективної передачі даних між антенними системами та вузлами мережі, зокрема на рівнях *fronthaul* та *backhaul* [19]. Вона дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів у мережі, зменшити втрати сигналу та підтримувати високу якість з'єднання навіть у складних умовах міської забудови. Особливо ефективним є поєднання beamforming з технологією міліметрових хвиль (mmWave), адже останні потребують чіткого спрямування сигналу через високе загасання та обмежене покриття.

Ще однією важливою інновацією в мережаї 5G є *масивні системи з множинними входами і виходами (Massive MIMO — Massive Multiple Input Multiple Output)*. Вона дозволяє мобільним мережам п'ятого покоління значно збільшити продуктивність і спектральну ефективність.

Суть підходу полягає в оснащенні базових станцій великою кількістю антенних елементів — від кількох десятків до сотень — які працюють у координації для одночасної передачі та прийому сигналів. Відмінність між класичною та MIMO антеною можна побачити на рисунку 1.6. Така структура антени дозволяє формувати вузькі, незалежні канали зв'язку для

багатьох користувачів одночасно, навіть якщо вони перебувають у межах одного осередку покриття.

Основна перевага Massive MIMO полягає у здатності значно підвищити спектральну ефективність, тобто кількість даних, яку можна передати за одиницю часу в одиниці спектра [21]. Завдяки просторовому мультиплексуванню система може одночасно обслуговувати велику кількість користувачів або пристроїв, не створюючи між ними шкідливих перешкод. Крім того, більша кількість антен дозволяє ефективніше реалізовувати технології формування променя (beamforming) і просторову диверсифікацію, що підвищує стійкість до завад, покращує покриття та зменшує ймовірність втрати сигналу в умовах багатопроменевого поширення.

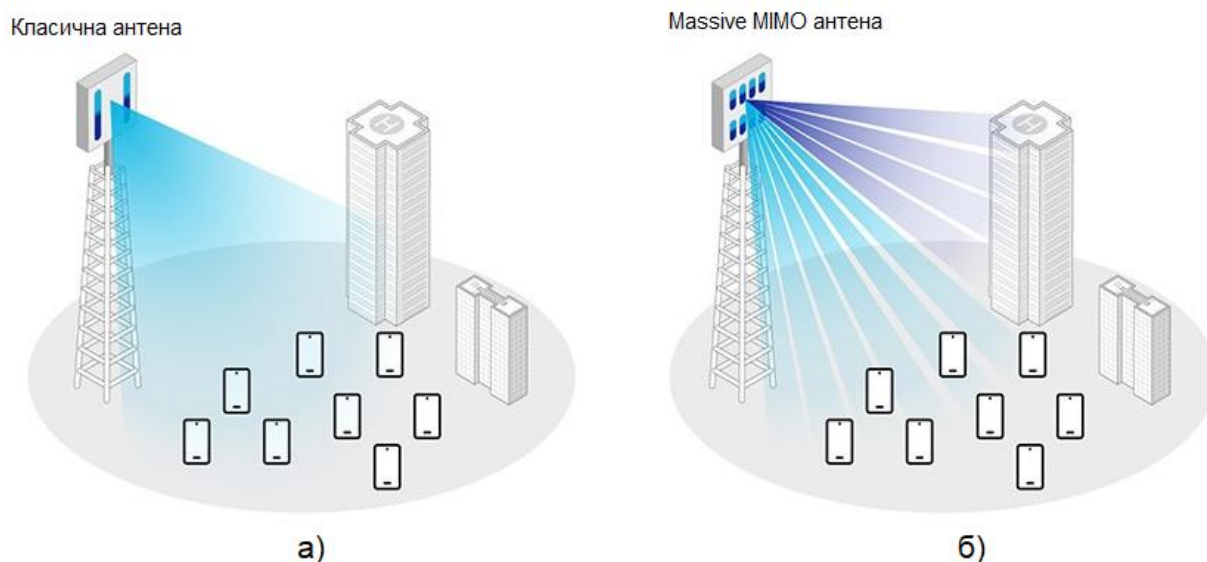


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення радіоканалів 5G антен. а) класична антена. б) Massive MIMO антена [20]

Ще однією важливою перевагою є покращення енергоефективності: система може фокусувати енергію лише в напрямках, де є користувачі,

зменшуючи марне випромінювання та втрати [22]. Також Massive MIMO позитивно впливає на загальну ємність мережі, що є критичним чинником для обслуговування сценаріїв з високою щільністю підключень — наприклад, у міських агломераціях, на транспортних вузлах або під час масових заходів.

У контексті транспортної інфраструктури 5G Massive MIMO відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного передавання даних на рівні *радіодоступу (RAN)*, а також на етапі *агрегації (aggregation)* у сегменті *midhaul* [25]. Завдяки своїй здатності підтримувати високий обсяг одночасних з'єднань, ця технологія дозволяє мережі адаптуватися до пікових навантажень, забезпечуючи при цьому стабільну якість обслуговування. Особливо важливим є її використання в поєднанні з іншими інноваціями, такими як mmWave та beamforming, що дозволяє розкривати повний потенціал транспортної мережі нового покоління.

Загалом, Massive MIMO забезпечує фундаментальні переваги в побудові гнучкої, масштабованої та високопродуктивної транспортної інфраструктури 5G, необхідної для задоволення вимог сучасних і майбутніх цифрових сервісів.

Зважаючи на всі описані вище інновації, ефективне функціонування транспортної мережі 5G неможливе без застосування комплексу взаємопов'язаних технологій. Хоча кожна з них має власні технічні характеристики, їхня цінність проявляється саме у взаємодії, що дозволяє компенсувати індивідуальні обмеження та реалізувати гнучку і масштабовану транспортну інфраструктуру.

Таким чином, ці технології не можуть розглядатися ізольовано одна від одної. Вони формують єдиний технологічний комплекс, де кожна виконує специфічну функцію. mmWave забезпечує надширокий канал зв'язку, beamforming підвищує ефективність використання спектра і

стабільність сигналу, а Massive MIMO дозволяє масштабувати транспортну мережу під зростаючі навантаження.

1.3 Принципи роботи мережі 5G: архітектура та ключові характеристики

Мережа п'ятого покоління (5G) є не просто еволюцією попередніх стандартів мобільного зв'язку, а комплексною трансформацією всієї архітектури бездротової комунікаційної системи. На відміну від своїх попередників, 5G не лише забезпечує вищу швидкість передавання інформації, а й орієнтується на масштабну підтримку пристроїв Інтернету речей (IoT), наднизькі затримки, високу надійність з'єднання і гнучкість у наданні мережевих послуг. Ці характеристики є визначальними для сучасних і майбутніх цифрових сервісів, включаючи автономні транспортні системи, телемедицину, розширену реальність, індустрію 4.0 та смарт-інфраструктури.

До основних *ключових характеристик* мережі 5G належать [24]:

- *Надвисока пропускна здатність*, що може сягати до 10–20 Гбіт/с, забезпечуючи комфортне використання вимогливих до трафіку сервісів, таких як 4K/8K-відео, VR/AR або хмарні відео ігри.
- *Низька затримка* — до 1 мс у кінцевому сценарії — є вирішальним чинником для застосувань, де критичне значення має час реакції, зокрема в дистанційних операціях, автономних транспортних системах та індустріальному контролі.
- *Висока щільність підключень*, що дозволяє одночасно обслуговувати до мільйона пристроїв на квадратний кілометр, що є необхідним для реалізації концепцій розумного міста та промислового IoT.
- *Підвищена енергоефективність*, що забезпечується завдяки динамічному керуванню ресурсами, новим протоколам передачі та

інтелектуальному формуванню променів, що знижує навантаження на батареї пристроїв та оптимізує роботу інфраструктури.

- *Гнучкість архітектури*, яка досягається за допомогою хмарних технологій, модульності мережевих функцій та можливості масштабування відповідно до потреб користувача або сервісу.
- *Інтелектуальна автоматизація*, включаючи елементи машинного навчання та штучного інтелекту для оптимізації трафіку, управління навантаженням і забезпечення якості обслуговування в реальному часі.

Відповідно до зазначених характеристик, мережа п'ятого покоління (5G) являє собою гнучку, масштабовану й сервісно-орієнтовану систему, центральну роль в якій відіграє розподілена модель.

Архітектура мережі 5G складається з двох основних частин: *радіодоступу (5G RAN)* та *ядра мережі (5G Core, або 5GC)*. Ці частини взаємодіють між собою через стандартизовані інтерфейси й утворюють єдину інфраструктуру для передачі даних, управління з'єднаннями й надання сервісів, де *5G RAN* відповідає за бездротову взаємодію з кінцевими пристроями, забезпечуючи високошвидкісний доступ і попередню обробку трафіку, а *5G Core* виконує функції маршрутизації, управління сесіями, мобільністю, безпекою та сервісною оркестрацією.

Рівень радіодоступу (5G RAN). У контексті архітектури мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G), рівень радіодоступу (5G RAN, Radio Access Network) зазнав суттєвих перетворень, що стали результатом як технологічного прогресу, так і прагнення до більшої гнучкості, масштабованості та продуктивності. Центральним елементом цієї еволюції є впровадження нового радіоінтерфейсу — 5G NR (New Radio), який підтримує роботу як у традиційних діапазонах нижче 1 ГГц, так і в міліметровому спектрі (до 52.6 ГГц у стандарті 3GPP Release 17, із подальшим розширенням у перспективі до 100 ГГц і вище) [25]. Цей

широкий спектральний діапазон забезпечує можливість використання як макро-, так і мікросот, а також інтеграцію з концепцією Ultra-Dense Networks (UDN).

Фізичну інфраструктуру 5G RAN формують базові станції нового покоління, позначені як gNB (next-generation Node B), які виконують функції як обробки сигналів фізичного рівня (PHY), так і протоколів доступу до середовища (MAC, RLC, PDCP), а також частково — функції керування ресурсами радіодоступу через рівень RRC (Radio Resource Control). Архітектурно gNB є логічно розділеною функціональною сутністю, що складається з двох ключових модулів — центрального блоку gNB-CU (Central Unit) та одного або кількох розподілених блоків gNB-DU (Distributed Units). У стандарті 3GPP TS 38.401 визначено типову реалізацію так званої опції розділення №2, за якої функції RRC та PDCP реалізуються на CU, тоді як функції RLC, MAC і PHY — на DU.

Такий підхід не є спонтанним розвитком, а становить продовження логіки, закладеної ще у попередніх поколіннях мобільного зв'язку, зокрема у концепціях Remote Radio Head (RRH) та Cloud RAN [25]. Протягом останніх двох десятиліть архітектура базових станцій пройшла шлях від монолітних шаф висотою до 2 метрів, встановлених у спеціалізованих технічних приміщеннях, до розподілених рішень, у яких базовий блок (BBU) взаємодіє з радіомодулями (RRU) через інтерфейс CPRI або eCPRI по оптичному волокну. З появою 5G і зростанням вимог до затримок, пропускної здатності та гнучкості керування, ця архітектура була трансформована у віртуалізовану модель, що передбачає динамічний розподіл функціональних блоків між фізичними і логічними доменами.

gNB-CU може бути реалізований як віртуальна мережева функція (VNF) у дата-центрах або у вузлах Mobile Edge Computing (MEC), що дозволяє не лише централізовано керувати ресурсами, а й зменшити затримки для критичних сервісів. Тим часом gNB-DU, будучи розміщеним

ближче до радіоінтерфейсу, виконує задачі реального часу, пов'язані з обробкою сигналу, розподілом ресурсів та фізичним мультиплексуванням. Зв'язок між CU і DU здійснюється через інтерфейс F1 (стандартизований у межах 3GPP), який забезпечує транспортування даних як на площині управління, так і на площині користувацького трафіку.

Не менш важливим є інтерфейс F2, який потенційно може реалізовуватись для подальшого розділення функцій усередині DU, зокрема для винесення радіоблоку (RU) як окремої сутності. Це дозволяє ще гнучкіше адаптувати мережеву інфраструктуру до фізичних умов розгортання, знижуючи витрати на обслуговування та спрощуючи модернізацію обладнання.

Сучасна архітектура gNB підтримує мультивендорну інтеграцію завдяки стандартизації інтерфейсів, таких як F1 (CU ↔ DU), E1 (CU-UP ↔ CU-CP), а також Xn (gNB ↔ gNB) для координації мобільності та безперервності обслуговування [26]. Інтерфейси N2 та N3 забезпечують взаємодію між gNB і ядром 5G Core, виконуючи функції сигналізації (через AMF) та передачі користувацького трафіку (через UPF), відповідно.

Однак технічна елегантність цієї архітектури є лише частиною загальної картини. Для забезпечення її реальної працездатності ключовим стає транспортний домен — опорна мережа, яка повинна підтримувати високопродуктивні інтерфейси з жорсткими вимогами до затримки, стабільності фази, пропускну здатності та надійності. Наприклад, навіть у випадку передачі даних між CU та DU через F1-інтерфейс, типовим значенням максимально допустимої затримки вважається ≈ 250 мкс для URLLC-сценаріїв. Ці параметри вимагають від мережевого обладнання повної підтримки технологій синхронізації (IEEE 1588v2, SyncE), QoS-орієнтованої маршрутизації та програмно-керованої топології. Схематичне зображення архітектури мережі 5G можна побачити на рисунку 1.7.

Ядро мережі (*5G Core, 5GC*). Ядро є цілковито перебудованою архітектурною конструкцією порівняно з Evolved Packet Core (EPC) [27], що використовувалася в мережах четвертого покоління. Концептуально та технологічно 5GC базується на сервісно-орієнтованій архітектурі (Service-Based Architecture, SBA), яка уніфіковано визначена стандартами 3GPP, зокрема в технічній специфікації TS 23.501. На відміну від монолітної або слабо модульованої структури попереднього покоління, архітектура SBA у 5GC передбачає мікросервісний підхід, у якому кожна функціональна одиниця реалізована у вигляді окремої мережевої функції (Network Function, NF), яка має автономний життєвий цикл і взаємодіє з іншими функціями через стандартизовані програмні інтерфейси на основі сучасних протоколів обміну даними, зокрема HTTP/2, JSON і RESTful API.

У функціональному плані мережеве ядро 5G складається з низки незалежних, але взаємопов'язаних сервісів, кожен з яких реалізує окрему групу управлінських, контрольних або оброблювальних функцій. Зокрема, окрема категорія мережевих функцій відповідає за процеси автентифікації користувачів, управління мобільністю, ініціалізацію та підтримку реєстрації в мережі, а також забезпечення безперервності з'єднання при зміні місцезнаходження кінцевого пристрою. Ці функції інтегруються в рамках так званої функції управління доступом і мобільністю, що в архітектурі 5GC позначається як AMF (Access and Mobility Management Function).

Інша критично важлива функціональна підсистема — це керування сесіями передачі даних. Тут йдеться про створення, модифікацію та завершення логічних підключень між користувацьким обладнанням (UE) та мережею, а також маршрутизацію користувацького трафіку до відповідних елементів користувацької площини. Ця функціональність втілена у вигляді компонента SMF (Session Management Function), який, у свою чергу, взаємодіє з компонентом UPF (User Plane Function), що виконує

безпосередню обробку користувачького трафіку на рівні пакетів, включаючи маршрутизацію, натуралізацію адрес (NAT), фільтрацію та передачу до зовнішніх мереж.

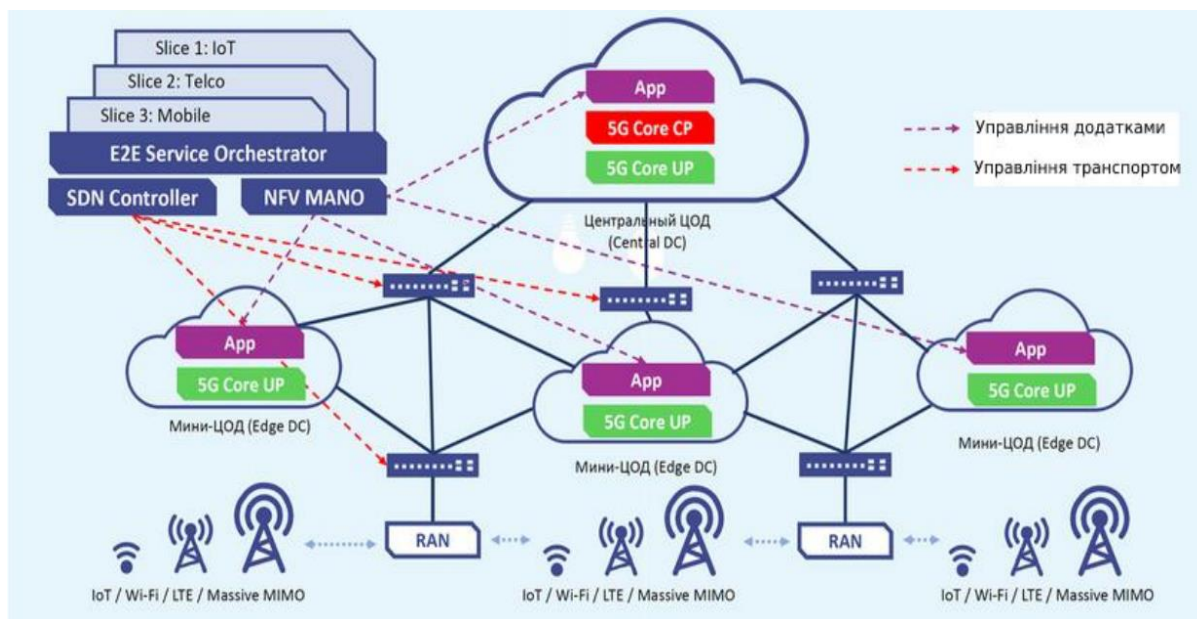


Рисунок 1.7 – Схематичне зображення загальної архітектури мережі 5G

Третій ключовий кластер функцій у межах 5GC пов'язаний із політикою обслуговування — від визначення класів обслуговування й розподілу пропускної здатності до реалізації пріоритетів доступу та контролю якості обслуговування (Quality of Service, QoS). Відповідальність за цю сферу покладена на функцію PCF (Policy Control Function), яка надає гнучкий механізм динамічного формування правил обробки трафіку згідно з вимогами конкретного сервісу або користувача.

Ще один принциповий сегмент функціональності стосується зберігання та управління абонентськими даними, включаючи профілі підписки, параметри конфігурації й дозвільні атрибути. Ці функції реалізуються в рамках модулів UDM (Unified Data Management) і UDR (Unified Data Repository), які забезпечують доступ до абонентських даних

для інших функціональних елементів мережі на основі принципів централізованого сховища та керованих політик доступу.

Крім того, архітектура 5GC включає мережеву функцію NRF (Network Repository Function), яка відіграє критичну роль у динамічному управлінні сервісами, зокрема шляхом ведення каталогу наявних функцій у мережі, забезпечення їхнього виявлення та маршрутизації запитів між ними на основі реєстраційного механізму. Це дозволяє реалізовувати гнучку оркестрацію ресурсів і масштабування функцій залежно від навантаження.

З технічного погляду всі згадані мережеві функції реалізовані як незалежні мікросервіси, які можуть бути розгорнуті у віртуалізованому середовищі або у хмарній інфраструктурі, що забезпечує адаптивність, незалежне оновлення, автоматизоване масштабування та підвищену надійність мережі в цілому. Цей підхід також дозволяє інтегрувати компоненти 5GC з платформами управління ресурсами (наприклад, NFV MANO) та системами динамічного оркестрування, включаючи програмно-конфігуровані мережі (SDN) і мережі з хмарним керуванням.

Проте функціонування ядра мережі було б неможливим без відповідної транспортної інфраструктури, яка забезпечує фізичне та логічне з'єднання між радіоелементами доступу (наприклад, базовими станціями) і центральними мережевими компонентами ядра. У контексті мереж п'ятого покоління транспортна інфраструктура класифікується на три рівні: fronthaul, midhaul і backhaul. Fronthaul забезпечує високошвидкісне з'єднання між антенними елементами (часто реалізованими у вигляді Remote Radio Head, RRH) та блоками цифрової обробки сигналу (DU, Distributed Unit), що розміщені ближче до центру мережі. Тут критичними є наднизькі затримки (менше 100 мкс, часто до 25 мкс) та дуже висока пропускна здатність, оскільки цей інтерфейс транспортує необроблені або частково оброблені сигнали.

Midhaul відповідає за з'єднання між DU та центральними вузлами обробки (CU, Centralized Unit), де відбувається високорівнева обробка протоколів доступу. Цей рівень забезпечує масштабованість архітектури, дозволяючи операторам оптимізувати розміщення функціональних елементів залежно від топології, навантаження та економічних міркувань.

Backhaul традиційно є найбільш відомим компонентом транспортної інфраструктури, оскільки забезпечує зв'язок між вузлами радіодоступу та ядром мережі. У 5G-вимірах backhaul повинен підтримувати не лише високу пропускну здатність (до кількох десятків гігабітів на секунду), але й гарантувати мінімальні коливання затримок, синхронізацію з точністю до наносекунд (через протоколи PTP — Precision Time Protocol) та високий рівень доступності. З огляду на вищезазначені вимоги, транспортна мережа 5G дедалі частіше базується на волоконно-оптичних рішеннях, доповнених SDN-технологіями, що дозволяють динамічно керувати маршрутизацією трафіку, балансуванням навантаження та оптимізацією використання ресурсів.

1.4 Висновки з розділу 1

У першому розділі розглянуто розвиток мобільних мереж від 1G до 5G. Встановлено, що 5G характеризується високою швидкістю передавання даних, низькою затримкою, підтримкою великої кількості підключень і підвищеною енергоефективністю.

Проаналізовано ключові технології 5G, зокрема mmWave, beamforming і Massive MIMO. Показано, що їх поєднання забезпечує гнучкість, масштабованість і високу пропускну здатність транспортної інфраструктури.

Описано архітектуру мережі 5G, включаючи розподіл функцій між компонентами RAN і ядром мережі. Визначено роль нових підходів до

побудови інфраструктури, які базуються на віртуалізації, сервісній орієнтації та підтримці МЕС.

Отримані результати є основою для подальшого аналізу транспортної мережі в наступних розділах.

2 АРХІТЕКТУРА ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ 5G

2.1 Транспортна мережа 5G: основні компоненти (backhaul, fronthaul, midhaul)

Як уже зазначалось вище, транспортна мережа є критично важливою частиною інфраструктури 5G, яка забезпечує передачу даних між базовими станціями, ядром мережі та периферійними компонентами. У контексті 5G її роль набуває ще більшого значення, оскільки нові архітектурні принципи (розділення функцій, децентралізація обробки, edge computing) вимагають високої пропускної здатності, наднизької затримки, масштабованості та гнучкого управління ресурсами.

Традиційна двокомпонентна структура у 5G еволюціонує в складнішу модель (рисунок 2.1), що включає три основні сегменти: fronthaul, midhaul і backhaul [28].

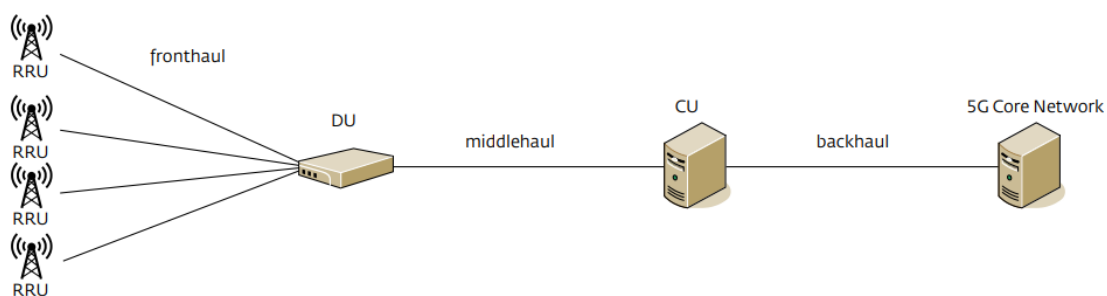


Рисунок 2.1 – Топологія транспортної мережі 5G/IMT-2020 (RRU – Radio Remote Unit, DU – Distributed Unit, CU – Central Unit) [29]

Розглянемо окремо кожний сегмент транспортної мережі, в напрямку від кінцевого користувача до ядра 5G.

Fronthaul. Першим сегментом транспортної мережі 5G є fronthaul, який виконує критичну функцію у процесі передачі високошвидкісного, синхронізованого сигналу від віддалених радіоблоків (Remote Radio Heads,

RRH) до блоків обробки сигналу (Baseband Units, BBU). У контексті мереж 4G функціонування цього сегменту ґрунтувалося на поєднанні радіомодуля (RRU) з антеною, розміщеною на вершині щогли, з підключенням до базової станції за допомогою оптичного або мідного кабелю, що використовували протокол CPRI (Common Public Radio Interface). Цей підхід передбачав жорсткі вимоги до затримок і пропускної здатності.

З переходом до концепції Centralized Radio Access Network (C-RAN), в якій блок обробки сигналу (Distributed Unit, DU) може бути фізично винесений на відстань до 20 км від RRU, виникла необхідність у більш ефективному протоколі обміну [30]. У зв'язку з цим було впроваджено eCPRI (enhanced CPRI) — модифіковану версію CPRI, яка підтримує пакетну передачу даних на основі Ethernet. Це дозволило зменшити вимоги до пропускної здатності фрактового каналу за рахунок часткової обробки сигналу (опція 7 функціонального розділення), яка тепер виконується безпосередньо в RRU (субопції 7.1 та 7.2), на відміну від класичного CPRI (опція 8).

Пакетна передача в fronthaul також забезпечує можливість використання стандартних методів синхронізації, зокрема SyncE або IEEE 1588v2, а також пріоритезацію трафіку відповідно до стандартів Time-Sensitive Networking (TSN). Застосування розширеного Ethernet-функціоналу (802.1CM, 802.1Qbv, 802.1Qbu, 802.1Qcc) забезпечує предиктивне управління затримками, підтримку критично важливого трафіку та гнучке резервування ресурсів.

Проте, варто зазначити, що стандартні Ethernet-комутатори не відповідають вимогам 5G через варіативність затримок та ймовірність втрати пакетів. На зміну приходять TSN-сумісні Ethernet-рішення та Carrier Ethernet, який передбачає розширені можливості керування, OAM-функціональність (за ІТУ-Т Y.1731), та масштабованість [31].

Альтернативою є також OTN (Optical Transport Network), який, незважаючи на більшу вартість, забезпечує визначені параметри надійності та управління (особливо у випадку використання DWDM-технологій). Зокрема, у Китаї активно просувається концепція OTN-lite з адаптованою інкапсуляцією (наприклад, FlexO-FR), яка забезпечує пряму сумісність з eCPRI/Carrier Ethernet при швидкостях, кратних 25 Гбіт/с.

Фізичне середовище fronthaul, у свою чергу, може базуватись на різних рішеннях: виділені оптичні волокна (dark fiber), активні або пасивні WDM-системи, PON (Passive Optical Network) та навіть бездротові канали на базі Microwave. Вибір конкретного рішення визначається економічною доцільністю та наявною інфраструктурою оператора.

Далі, оброблений сигнал проходить через сегмент midhaul, який являє собою проміжну ланку між сегментами fronthaul та backhaul. Ця ланка з'явилася у зв'язку з новою, більш гнучкою архітектурою розділення функцій у мережах п'ятого покоління. У традиційних мережах LTE архітектура мала лише два рівні (fronthaul та backhaul), однак із впровадженням 5G, особливо в умовах Cloud-RAN (C-RAN) та Open RAN, виникла потреба в додатковому рівні — midhaul, що забезпечує ефективний транспорт даних між дистрибутивними блоками обробки сигналу, які розміщуються на різних рівнях мережевої ієрархії.

Midhaul у контексті архітектури 5G виконує критичну функцію транспортування даних між Distributed Unit (DU) і Centralized Unit (CU), які утворюють дезагреговану базову станцію нового покоління — gNodeB. Така архітектура є відходом від традиційної монолітної Baseband Unit (BBU), що була характерна для попередніх поколінь мобільних мереж, зокрема LTE. У 5G DU виконує обробку нижніх рівнів протоколу — фізичного (PHY), MAC і частково RLC, тоді як CU зосереджений на виконанні функцій вищих рівнів, включаючи PDCP (Packet Data Convergence Protocol), SDAP (Service Data Adaptation Protocol) та керування

радіоресурсами (RRC — Radio Resource Control). Розділення цих функцій дає змогу покращити масштабованість мережі, зменшити затримки та реалізувати гнучкі сценарії обробки трафіку.

Фізична реалізація midhaul-з'єднання, як правило, базується на оптоволоконній інфраструктурі, здатній забезпечити симетричну пропускну здатність у діапазоні від 10 Гбіт/с до 100 Гбіт/с залежно від сценарію розгортання та щільності користувачів [32]. Найчастіше застосовуються оптичні інтерфейси Ethernet із підтримкою технологій, які підвищують детермінізм передачі, зокрема IEEE 802.1Qbu (frame preemption) і IEEE 802.1CM (Time-Sensitive Networking для fronthaul/midhaul). У сегментах з підвищеними вимогами до управління трафіком і якості обслуговування (QoS) використовуються IP/MPLS-мережі з механізмами сегментної маршрутизації (Segment Routing) і диференційованого обслуговування (DiffServ).

Попри те, що трафік midhaul є менш чутливим до затримок, ніж трафік fronthaul, однак вимоги до часової синхронізації залишаються досить жорсткими. Це пов'язано з тим, що DU і CU виконують взаємозалежні функції, і будь-яка десинхронізація може призвести до помилок у обробці трафіку, особливо в сценаріях, де використовуються технології об'єднання несучих (Carrier Aggregation), координації передачі (Coordinated Multi-Point, CoMP) або підтримки розподілених антен (Distributed MIMO). Для забезпечення точної синхронізації в midhaul-мережах застосовуються комбінації технологій IEEE 1588v2 (Precision Time Protocol) з профілем Telecom (G.8275.1/2), а також Synchronous Ethernet (SyncE), які забезпечують точність у межах ± 130 наносекунд [33]. У топологіях з багаторівневим розміщенням DU і CU часто використовуються проміжні вузли синхронізації Boundary Clock (BC) або Transparent Clock (TC), що дозволяє мінімізувати накопичення похибок у ланцюжку передачі часу.

З точки зору мережевого дизайну, *midhaul* виступає проміжним рівнем у так званій концепції *xHaul*, яка включає *fronthaul*, *midhaul* і *backhaul* як інтегровану транспортну систему. *Midhaul* повинен забезпечувати не лише високу пропускну здатність, а й підтримку сегментації трафіку за пріоритетами, ізоляції потоків у середовищах віртуалізації та інтеграції з механізмами програмно-визначених мереж (SDN). У таких сценаріях *midhaul* підтримує перенаправлення трафіку між DU і кількома CU або навпаки, реалізуючи гнучке керування ресурсами RAN та їхню оркестрацію в умовах хмарної архітектури (Cloud-RAN).

Функціональна гнучкість *midhaul* дозволяє підтримувати різні варіанти фізичного розміщення DU і CU, включаючи як централізовані, так і периферійні варіанти. Наприклад, у сценаріях із використанням MEC (Multi-access Edge Computing), DU розташовується поблизу точки обслуговування користувача, тоді як CU може бути віртуалізованим і розміщеним у регіональному або навіть центральному дата-центрі. Це дає змогу локалізувати обробку критичного до затримок трафіку, зменшуючи навантаження на ядро мережі (*core*) і підвищуючи масштабованість сервісів. Крім того, така архітектура спрощує реалізацію сценаріїв автономного транспорту, масового підключення IoT-пристроїв (mMTC) та сервісів з наднизькою затримкою (URLLC).

Backhaul — це традиційний сегмент, який забезпечує з'єднання базових станцій (або центральних мережевих вузлів) з ядром мережі. У 5G він також виконує роль каналу для керуючої сигналізації та користувацьких даних, які надходять до мережевого ядра або хмарних обчислювальних центрів. У порівнянні з неоднозначним вибором транспортної технології для *fronthaul*, у *backhaul*-сегменті переважає стек DWDM/OTN, здатний забезпечити як високу пропускну здатність, так і масштабованість, надійність та централізовану керованість.

З огляду на високі вимоги до пропускної здатності (до десятків Гбіт/с на одну базову станцію) та необхідність низької затримки, транспортна інфраструктура backhaul повинна підтримувати лінійні швидкості 100G, 200G, 400G, а також мати клієнтські інтерфейси 10GE, 25GE, 100GE для взаємодії з вузлами типу eNB-DU і eNB-CU. Сучасне обладнання провідних виробників підтримує ці вимоги, а результати вимірювань затримок, зокрема для продуктів компанії «Т8» [29], свідчать про рівень затримок у межах від кількох десятків наносекунд до десятків мікросекунд, залежно від архітектури пристрою та режиму роботи. При цьому, основний внесок у загальну затримку (RTT) дає саме оптичне волокно — приблизно 5 мкс/км, що є критичним у сценаріях URLLC, де RTT не має перевищувати 1 мс на всю мережу [34].

Фізично backhaul складається з волоконно-оптичних або бездротових ліній зв'язку, комутаційних вузлів (наприклад, ROADM, OTN-XC), транспондерів, а також допоміжної інфраструктури. У відмінності від топологій «точка-точка» у fronthaul, сегмент backhaul формує складні mesh-мережі, які потребують механізмів гнучкої комутації, включаючи перестроювані транспондери, адаптивну модуляцію та CDC-ROADM (Colorless, Directionless, Contentionless) як базу для динамічного мультиплексування та маршрутизації суперканалів (200G, 400G і вище). Стандарт Open ROADM MSA дозволяє розглядати такі пристрої не як фізичні блоки, а як абстрактні логічні елементи, керовані з системи управління.

SDN дозволяє централізовано керувати маршрутизацією трафіку між базовими станціями та ядром мережі за допомогою програмного контролера, який має глобальне уявлення про топологію, навантаження та стан каналів. Це забезпечує можливість швидкого переналаштування маршрутів у реальному часі, зменшуючи затримки, балансуючи навантаження і реагуючи на збої або перевантаження. У транспортному

сегменті використовуються SDN-комутатори, що підтримують відкриті протоколи управління, такі як OpenFlow або NetConf/YANG, і виконують команди контролера без втручання оператора.

NFV у свою чергу віртуалізує мережеві функції — маршрутизатори, балансувальники навантаження, шифрувальні шлюзи — і розміщує їх у вигляді програмних модулів на стандартному обчислювальному обладнанні. Це дає змогу масштабувати обробку трафіку відповідно до актуальних потреб, оптимізувати використання ресурсів і знижувати капітальні витрати. NFV-функції можуть бути розгорнуті на периферії (edge-ноди) або централізовано.

Особливу увагу заслуговують технології ASON/GMPLS як перший етап у напрямку до повноцінного SDN [35]. Вони реалізують розподілену площину управління (Control Plane), де за допомогою протоколів OSPF, RSVP, LMP відбувається обмін топологічною інформацією та побудова оптичних маршрутів (LSP) на основі складних критеріїв, включаючи затримку, оптичне відношення сигнал/шум (OSNR) та оптичні втрати.

Таким чином, backhaul у 5G — це не лише високошвидкісний канал, а інтегрована, керована та адаптивна система, де взаємодіють SDN, NFV, GMPLS/ASON, мультиформатна оптика та сучасні протоколи управління. Ефективна реалізація цього сегменту є визначальним чинником у забезпеченні вимог до пропускну здатності, надійності та затримок у новітніх мобільних мережах.

2.2 Використання програмно-визначених мереж (SDN) і віртуалізації (NFV) в 5G

З огляду на зростаючу складність транспортної інфраструктури 5G та необхідність ефективного управління мережевими ресурсами, традиційні підходи до побудови та адміністрування мереж уже не здатні повною мірою

забезпечити потрібну гнучкість і адаптивність. У цьому контексті ключову роль відіграють програмно-визначені мережі (SDN) і віртуалізація мережевих функцій (NFV), що відкривають нові можливості для централізованого управління, динамічного масштабування та оптимізації роботи мережі.

Програмно-визначені мережі (Software-Defined Networking, SDN) — це концепція побудови телекомунікаційної інфраструктури, в якій функції управління трафіком (контрольна площина) відокремлені від самої передачі даних (площина пересилання) та централізовано реалізуються через спеціалізовані контролери. На відміну від традиційної мережевої архітектури, де кожен пристрій самостійно приймає рішення щодо маршрутизації, SDN дозволяє централізовано управляти всіма елементами мережі за допомогою програмного забезпечення, що забезпечує більшу гнучкість, масштабованість та автоматизацію процесів. Архітектура SDN зображена на рисунку 2.2.

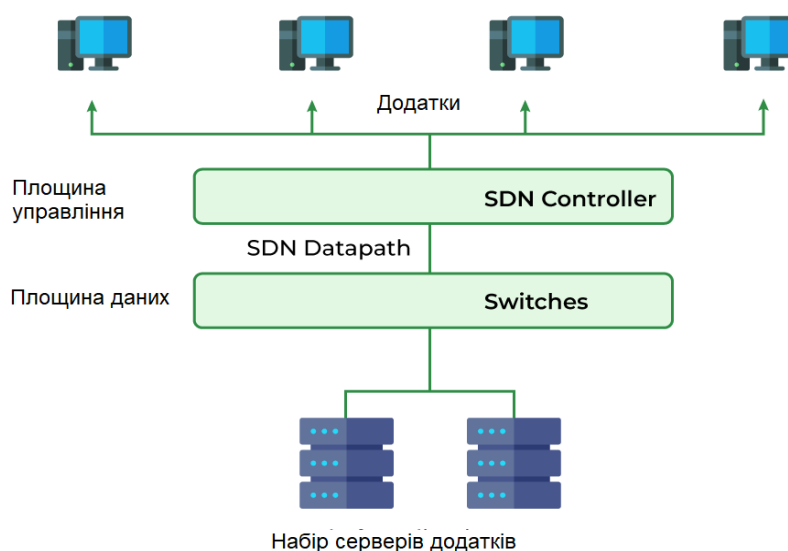


Рисунок 2.2 – Схема архітектури технології SDN [37]

У контексті побудови транспортної мережі 5G, SDN відіграє ключову роль у вирішенні ряду критичних проблем [37]. Насамперед, вона дозволяє

ефективно управляти великою кількістю мережевих елементів, які утворюють складну, багаторівневу структуру — зокрема сегменти *fronthaul*, *midhaul* та *backhaul*. Класичний підхід до маршрутизації даних та керування трафіком в таких умовах стає малоефективним через складність конфігурації, обмежену адаптивність та високу ймовірність затримок у випадку зміни навантаження чи маршруту. Саме тут SDN дозволяє динамічно адаптувати маршрути передачі даних, виходячи з поточного стану мережі, доступної пропускної здатності та вимог до затримок.

Ключовим механізмом для реалізації цієї архітектури виступає протокол OpenFlow, який дозволяє SDN-контролеру інстальовати правила в таблиці переспрямування комутаторів, програмуючи таким чином поведінку мережі в термінах потоків трафіку (flows). Це відкриває можливість гнучкого, детермінованого керування маршрутизацією, балансуванням навантаження, шифруванням, QoS, та іншими політиками на рівні окремих пакетів або потоків.

Архітектура SDN забезпечує логічну централізацію управління мережею. Контролер фактично виступає операційною системою для мережі, обробляючи запити від додатків (через northbound APIs), та керуючи пристроями переспрямування (через southbound APIs, наприклад, OpenFlow або NETCONF). На відміну від класичних децентралізованих моделей, де кожен мережевий пристрій має локальну логіку, SDN дає змогу реалізовувати політику згори вниз, з одного логічного ядра керування.

Глибока абстракція мережевої інфраструктури дозволяє програмам бачити мережу як єдине ціле. Це критично для адаптивності, оскільки зміни в трафіку, оновлення безпеки чи реконфігурації маршрутизації можуть відбуватись динамічно, з мінімальним втручанням вручну. У класичних мережах подібні дії вимагали б складного, часто помилкового конфігурування кожного пристрою окремо.

SDN природно вписується у сучасні парадигми хмарних обчислень, гіперконвергентних інфраструктур, мікросервісної архітектури, IoT і edge computing, де адаптивність і масштабованість є критичними. Зміна трафіку з "північ-південь" (від клієнта до сервера) до "схід-захід" (взаємодія між сервісами всередині датацентру) потребує інтелектуального маршрутизаційного ядра, яке може в реальному часі аналізувати та переконфігурувати шляхи.

У контексті реалізації, фізичні або віртуальні комутатори (напр., Open vSwitch) діють як SDN datapath — пристрої, що реалізують forwarding-функції згідно з інструкціями контролера. Вони мають таблиці потоків (flow tables), в які контролер записує правила обробки пакетів. Ці правила можуть бути встановлені проактивно — для вже відомих шаблонів трафіку, або реактивно — коли новий пакет ініціює запит до контролера.

Контролери можуть бути реалізовані централізовано, ієрархічно або децентралізовано. Централізований підхід простіший, однак страждає на масштабованість і єдиною точкою відмови. Ієрархічна модель передбачає розподілення обробки між кількома контролерами з логічним "root", тоді як децентралізовані варіанти обмінюються знаннями про мережу між собою для підвищення стійкості.

Важливим завданням при реалізації розподіленої архітектури є розміщення контролерів. Затримки у комунікації між контролером і комутатором можуть мати критичне значення, особливо в географічно рознесених мережах. Враховуються також фактори надійності, стійкості до збоїв і вимоги з боку додатків.

SDN також створює можливості для нових підходів до безпеки. Центральний контролер може отримувати повні статистики трафіку і застосовувати алгоритми класифікації для виявлення аномалій, таких як DDoS-атаки або поширення шкідливих програм. Можна реалізовувати динамічну зміну IP-адрес (moving target defense), симулювати відкриті

порти, змінювати топологію у відповідь на загрозу — все це можливо саме завдяки логічній централізації керування.

В контексті енергетичної ефективності SDN дає змогу динамічно вимикати неактивні лінії чи вузли, оптимізуючи витрати. Дослідження показали, що це особливо актуально для датацентрів гіпермасштабу, де тисячі комутаторів повинні працювати узгоджено, а енергоспоживання має прямий фінансовий і екологічний вплив.

У зв'язку з ростом об'ємів даних (big data), SDN дозволяє реалізовувати інтелектуальні групові доставки даних (RGDD), формуючи multicast-дерева для копіювання даних між датацентрами або між кластерами в межах одного кампусу. Наприклад, протоколи DCCast або QuickCast будують такі дерева з урахуванням поточної завантаженості мережі.

Network Function Virtualization (NFV) — це концепція, що передбачає перенесення традиційних мережевих функцій (таких як маршрутизатори, комутатори, брандмауери, шлюзи та інші елементи) з апаратного забезпечення на програмне. Ці функції реалізуються у вигляді програмних модулів (рисунок 2.3), які працюють на універсальному серверному обладнанні у віртуалізованому середовищі. NFV суттєво змінює підхід до побудови телекомунікаційної інфраструктури, дозволяючи знизити витрати, підвищити масштабованість і прискорити впровадження нових послуг.

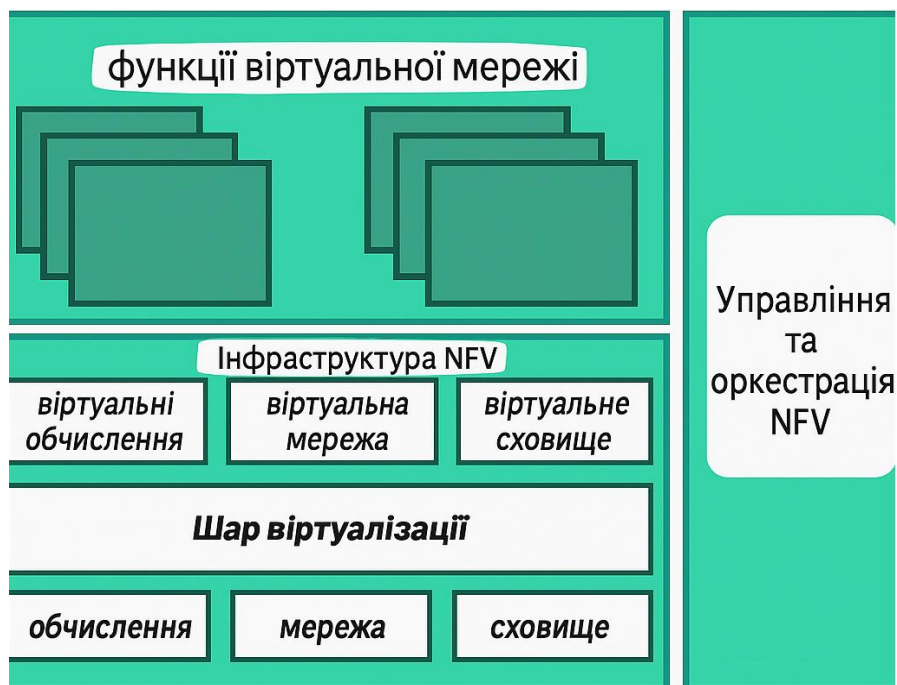


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення шарів віртуалізації в технології NFV [37]

У традиційній моделі кожна мережева функція — будь то маршрутизатор, брандмауер, шлюз або балансувальник навантаження — реалізується через спеціалізоване обладнання з фіксованими можливостями. NFV натомість переносить ці функції у вигляд програмного забезпечення — так званих віртуалізованих мережевих функцій (Virtualized Network Functions, VNF), які виконуються у віртуалізованому середовищі на загальноживаному серверному обладнанні, часто у хмарній інфраструктурі [37]. Цей підхід забезпечує підвищену гнучкість, зменшення витрат, прискорення розгортання послуг і суттєво покращує масштабованість телекомунікаційних рішень.

Архітектурно NFV складається з трьох основних компонентів, визначених у рамках ETSI NFV ISG:

1. *Virtualized Network Functions (VNFs)* — програмні реалізації мережевих функцій, які виконуються незалежно від фізичного апаратного забезпечення. Вони можуть бути структуровані з окремих

функціональних блоків — компонентів VNFC (VNF Component), кожен з яких може масштабуватись як вертикально (додавання ресурсів на одному хості), так і горизонтально (додавання екземплярів на інших хостах).

2. *Network Functions Virtualization Infrastructure (NFVI)* — сукупність фізичних ресурсів (обчислювальних, зберігання, мережевих) та програмного забезпечення віртуалізації (гіпервізорів, мережевих віртуальних перемикачів), які забезпечують середовище для розгортання та виконання VNFs. До NFVI також відносяться механізми для побудови віртуальних мереж (наприклад, VXLAN), взаємодії між VNFs і підсистемами доступу до зовнішніх або внутрішніх транспортних сегментів мережі.
3. *Management and Orchestration (MANO)* — набір функціональних блоків і інтерфейсів для управління життєвим циклом VNFs та ресурсами NFVI. Ключовими складовими є NFV Orchestrator (NFVO), Virtual Network Function Manager (VNFM) та Virtual Infrastructure Manager (VIM). MANO відповідає за автоматизоване розгортання, моніторинг, масштабування, відновлення після відмов і білінг мережевих сервісів.

У контексті транспортної мережі п'ятого покоління (5G) NFV відіграє критично важливу роль у побудові адаптивної, динамічно керованої інфраструктури. Завдяки децентралізованій моделі розгортання, яка підтримує концепцію *Distributed NFV*, оператори можуть розміщувати VNFs у різних точках мережі — у центральних дата-центрах, на периферії (edge), а також безпосередньо на майданчику клієнта (customer premises equipment, CPE) [37]. Така гнучкість дозволяє оптимізувати затримки, підвищити пропускну здатність і мінімізувати транспортні витрати в сегментах fronthaul, midhaul та backhaul.

Особливу значущість мають віртуалізовані маршрутизатори (vRouter), фаєрволи (vFirewall), шлюзи (vGateway), балансувальники навантаження (vLoad Balancer), які реалізуються у вигляді VNFs [37]. Вони можуть бути об'єднані в логічні ланцюги (service chains) і динамічно масштабуватись залежно від поточного трафіку, при цьому забезпечуючи функції фільтрації, маршрутизації, шифрування чи балансування навантаження у реальному часі.

Інтеграція з Software Defined Networking (SDN) посилює можливості NFV завдяки централізованому керуванню мережею, відокремленню контрольної та транспортної площин, гнучкій маршрутизації трафіку і реалізації політик безпеки. Наприклад, у межах NFVI на кожному об'єкті інфраструктури VIM може використовувати SDN-контролер для побудови оверлейних мереж, що з'єднують VNFs та фізичні мережеві функції (PNF), що входять до одного сервісу. Це дозволяє ефективно управляти трафіком навіть у міжрегіональних розгортаннях.

Використання відкритих стандартів, таких як ETSI NFV-SOL, гарантує інтероперабельність між різними платформами і постачальниками. Впровадження шаблонів опису сервісів (Network Service Descriptors, NSD) та функцій (VNF Descriptors, VNFD) дозволяє автоматизувати весь життєвий цикл сервісів — від проектування до відмовостійкості та оновлення.

У частині продуктивності важливим є використання високошвидкісних віртуальних комутаторів, таких як Open vSwitch (OVS) або його прискорені варіанти (наприклад, AVS). Ці компоненти відповідають за взаємозв'язок між VNFs та забезпечують низьку затримку, високу пропускну здатність і ефективне використання ресурсів.

Впровадження NFV також сприяє зменшенню vendor lock-in — залежності від конкретних постачальників обладнання, оскільки більшість рішень NFV реалізуються на стандартному “white box” залізі. Це відкриває

шлях до побудови гетерогенної інфраструктури з підтримкою мультивендорних середовищ, що є критично важливим в умовах еволюції 5G і перспективних технологій, таких як 6G.

Крім того, з огляду на майбутні виклики — масштабне впровадження IoT, обробку відео високої роздільної здатності (наприклад, 8K), підтримку мережевих зрізів (network slicing) — NFV виступає необхідним фундаментом для побудови інфраструктури, яка здатна швидко адаптуватися, забезпечувати масштабованість і високу доступність (понад 99.999%).

2.3 Інтеграція розподілених обчислень на периферії (MEC) в транспортну інфраструктуру

Однак навіть за умов використання SDN та NFV повноцінна реалізація можливостей 5G неможлива без скорочення затримок при обробці даних та підвищення швидкості реагування мережі. Саме тому ключового значення набуває інтеграція розподілених обчислювальних потужностей на периферії мережі — концепції, відомої як Multi-access Edge Computing (MEC).

Multi-access Edge Computing (MEC) — це архітектурний підхід, який передбачає перенесення обчислювальних ресурсів, обробки даних та зберігання інформації з централізованих хмарних дата-центрів ближче до користувача, тобто на мережеву "периферію" (edge). Основна ідея MEC полягає у зменшенні затримок, зменшенні навантаження на транспортну інфраструктуру та забезпеченні локальної обробки даних, що особливо важливо в умовах високих вимог 5G до продуктивності.

У транспортній мережі 5G MEC (рисунок 2.4) відіграє ключову роль у забезпеченні ультранизької затримки (до 1 мс), яка критично важлива для застосунків реального часу — таких як автономний транспорт, промислова

автоматизація, дистанційна хірургія, AR/VR тощо[38]. Розміщення обчислювальних ресурсів поблизу користувача дозволяє значно зменшити шлях, яким проходить трафік до центрів обробки даних, що зменшує завантаженість backhaul-каналів і покращує якість обслуговування (QoS).

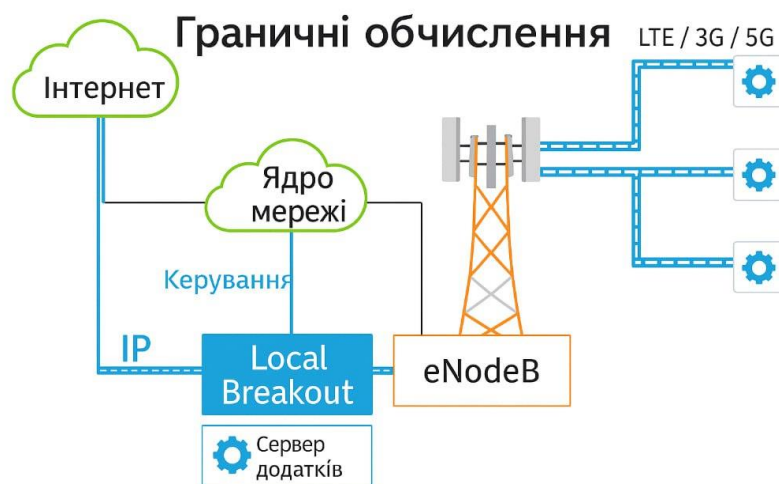


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення МЕС обчислень [39]

З точки зору побудови транспортної інфраструктури, МЕС дозволяє локалізувати частину мережевих функцій і зменшити потребу в передаванні великого обсягу даних на великі відстані. Це особливо актуально в міських середовищах з високою щільністю користувачів або в промислових зонах з підвищеними вимогами до часу відгуку. Наприклад, в умовах "розумної фабрики" обробка відео з датчиків може відбуватись локально за допомогою МЕС, а не через віддалений дата-центр.

Крім зменшення затримок, МЕС забезпечує масштабованість і гнучкість мережі, дозволяючи динамічно розгортати сервіси залежно від потреб конкретної географічної зони чи сценарію використання [38]. Це робить МЕС критично важливим для підтримки мережевої гетерогенності,

характерної для 5G, де співіснують мобільний інтернет, IoT, транспортні системи, стрімінгові сервіси тощо.

Ще одним аспектом є тісна інтеграція MEC з технологіями SDN та NFV [37-38], які забезпечують програмне управління ресурсами та віртуалізовану оркестрацію служб. У поєднанні ці три компоненти утворюють гнучку, розподілену та адаптивну транспортну інфраструктуру, здатну динамічно реагувати на зміну трафіку, збої або нові вимоги до якості сервісу.

Таким чином, MEC не лише оптимізує трафік у транспортній мережі 5G, але й розширює її функціональність, перетворюючи мережу передачі даних на розподілену обчислювальну платформу. Це відкриває шлях до нових бізнес-моделей, зменшує навантаження на центральні ресурси та робить транспортну інфраструктуру більш ефективною та готовою до майбутніх викликів, зокрема в контексті переходу до 6G.

Наприклад, у сфері автономного транспорту та інтелектуальних транспортних систем технологія MEC використовується для обробки даних безпосередньо поблизу місця їхнього виникнення, що дозволяє знизити затримки до кількох мілісекунд. У Німеччині оператор Deutsche Telekom реалізує проекти з підтримки комунікацій між транспортними засобами (V2X), де MEC дозволяє забезпечити майже миттєву реакцію на дорожні події, покращуючи безпеку та координацію автономного руху.

У промисловості MEC також демонструє високу ефективність. Зокрема, на виробничих підприємствах у Південній Кореї, таких як заводи компанії Samsung, MEC використовується для локальної обробки відео з інспекційних систем та даних з численних сенсорів. Це забезпечує швидку виявлення дефектів, зменшує затримки у виробничому циклі та підвищує гнучкість автоматизованих процесів у рамках концепції Industry 4.0.

У галузі розваг та доповненої реальності MEC застосовується для надання високоякісного контенту в режимі реального часу. Наприклад, при

трансляціях спортивних заходів або VR/AR-сценаріях, МЕС дозволяє значно зменшити час відгуку та покращити користувацький досвід завдяки обробці контенту на мережевій периферії. Деякі оператори в Японії та США вже розгорнули МЕС-платформи на стадіонах і в концертних залах для підтримки таких сценаріїв.

Крім того, МЕС активно використовується для розвантаження мережевого трафіку в міських агломераціях з високою щільністю користувачів. Наприклад, у мегаполісах Китаю МЕС-інфраструктура дозволяє обробляти великі обсяги даних IoT-пристроїв локально, мінімізуючи потребу у передачі інформації до центральних дата-центрів і покращуючи якість обслуговування в реальному часі.

Попри значні переваги та активне впровадження МЕС у різних сферах, зокрема в умовах високої щільності трафіку, ця технологія має і певні недоліки, які необхідно враховувати при її масштабному застосуванні. МЕС вимагає суттєвих початкових інвестицій. Розміщення обчислювальних ресурсів на периферії передбачає створення великої кількості вузлів із високим рівнем автономності, що включає витрати на обладнання, розгортання, інфраструктуру, канали зв'язку та технічну підтримку. На відміну від централізованих дата-центрів, де економія масштабу дозволяє знизити витрати, у МЕС кожен вузол потребує окремих ресурсів, що загалом підвищує вартість розбудови мережі.

2.4 Висновки з розділу 2

Другий розділ присвячено аналізу архітектурних принципів побудови транспортної мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління. Розглянуто структуру транспортної підсистеми, яка охоплює три логічно розмежовані сегменти: *fronthaul*, *midhaul* і *backhaul*. Зазначені компоненти утворюють ієрархічну модель передачі даних між базовими станціями та ядром мережі,

адаптовану до специфіки функціонального поділу між елементами радіодоступу.

На основі літературного і технічного аналізу висвітлено характерні особливості кожного сегмента. У фокусі уваги — вимоги до затримки, пропускної здатності, топологічної організації та методів синхронізації. Зокрема, підкреслено, що сучасні рішення на рівні *fronthaul* базуються на протоколі eCPRI, застосуванні TSN-технологій та, у окремих випадках, на OTN-інфраструктурі. Для *midhaul*-сегмента акцент зроблено на його ролі як гнучкої ланки між обробкою трафіку в режимі реального часу (DU) та централізованим керуванням (CU). Сегмент *backhaul* охарактеризовано як критично важливий з точки зору стабільності, QoS, масштабування та забезпечення доступу до ядра мережі 5GC.

Окрему увагу приділено застосуванню SDN (програмно-визначених мереж) та NFV (віртуалізації мережевих функцій) у транспортному контурі. Проаналізовано їх потенційні переваги — централізацію керування, динамічне виділення ресурсів, спрощення розгортання сервісів і підвищення адаптивності мережевої інфраструктури. Окреслено базові принципи інтеграції MEC (Multi-access Edge Computing) у транспортну мережу для реалізації сценаріїв із жорсткими вимогами до затримки та обробки даних на периферії.

3 ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ 5G

3.1 Основні технічні виклики при побудові транспортної мережі 5G (затримка, енергоспоживання, безпека)

Незважаючи на значні переваги технології 5G, її повноцінне впровадження вимагає глибокої трансформації всієї телекомунікаційної інфраструктури, зокрема транспортної мережі. Оператори мобільного зв'язку стикаються з низкою технічних, економічних та операційних проблем, які суттєво впливають на швидкість і масштаб впровадження нових мереж.

Основні технічні виклики при побудові транспортної мережі 5G — це затримка, енергоспоживання та безпека. Вони виникають через складність самої архітектури 5G, потребу в масовому підключенні пристроїв, високі вимоги до якості обслуговування (QoS) та очікування користувачів і бізнесу щодо швидкості, стабільності й надійності.

Затримки в мережах п'ятого покоління (5G) є одним із ключових параметрів, що визначають якість обслуговування та придатність інфраструктури до реалізації інноваційних сценаріїв зв'язку, зокрема таких, як автономне керування транспортом, дистанційна медицина або промислова автоматизація. Основною метою архітектури 5G є досягнення наднизького рівня затримки — на рівні однієї мілісекунди, що суттєво відрізняється від показників попередніх поколінь мобільного зв'язку. Проте забезпечення таких характеристик є надзвичайно складним технічним завданням, реалізація якого потребує істотної трансформації всієї мережевої екосистеми.

Серед основних перешкод на шляху до мінімізації затримки слід виокремити недостатню поширеність обчислювальних потужностей на периферії мережі (edge computing) [40], брак ефективної маршрутизації

трафіку, а також необхідність високого рівня синхронізації між мережею доступу, транспортною мережею та ядром. Традиційні архітектурні моделі мобільного зв'язку, зазвичай централізовані, не відповідають вимогам до миттєвої реакції системи, оскільки передбачають передачу даних до віддалених дата-центрів, що істотно збільшує час відгуку.

Розв'язання проблеми затримок у 5G передбачає інтеграцію технологій обчислень на периферії (Multi-access Edge Computing, MEC) [37], що дозволяють обробляти дані безпосередньо біля джерела їх виникнення. Одночасно з цим впроваджуються концепції програмно-визначених мереж (Software-Defined Networking, SDN) і віртуалізації мережевих функцій (Network Function Virtualization, NFV), які забезпечують гнучке управління потоками трафіку та оптимізують передачу даних у реальному часі. Також важливою є модернізація ядра мережі до моделі 5G Core (5GC), адаптованої для підтримки сервісів з ультранадійною та наднизькою затримкою (URLLC).

Водночас практична реалізація цих технологій супроводжується низкою складних проблем — як технічного, так і організаційного характеру. Нижче подано академічний виклад основних труднощів, пов'язаних із впровадженням кожної з цих технологій.

Однією з головних проблем, пов'язаних з реалізацією SDN, є питання централізації управління мережею [37]. У традиційній архітектурі функції контролю та пересилання трафіку інтегровані в одному пристрої, тоді як SDN передбачає їх логічне розділення та централізацію управління через SDN-контролер. Це зумовлює виникнення ризиків, пов'язаних із точками відмови (single point of failure), високим навантаженням на контролер, а також ускладненням безперервного функціонування в умовах динамічного навантаження. Крім того, відсутність усталених стандартів для взаємодії між різними SDN-рішеннями ускладнює інтеграцію обладнання від різних постачальників.

У контексті МЕС основною проблемою є складність масштабованого розгортання обчислювальних ресурсів на периферії мережі. Необхідність розміщення обчислювальних вузлів у фізично розподілених локаціях, часто за межами традиційних дата-центрів, породжує труднощі з фізичною інфраструктурою, енергоживленням, охолодженням, а також кібербезпекою таких вузлів. Залучення МЕС також створює нові виклики в управлінні ресурсами, зокрема в частині оркестрації обчислень і зберігання даних у реальному часі. Крім того, забезпечення консистентної якості обслуговування (QoS) на всій мережевій периферії потребує високої точності у плануванні трафіку та гнучких механізмів моніторингу.

Віртуалізація мережевих функцій (NFV), хоча й обіцяє значну гнучкість і зменшення витрат, створює нові труднощі у сфері *енергоспоживання* [37], безпеки та взаємодії віртуалізованих компонентів. Віртуальні функції можуть демонструвати нижчу продуктивність порівняно з фізичними апаратними рішеннями, особливо при обробці трафіку в реальному часі. Забезпечення ізоляції між віртуальними машинами або контейнерами є критичним для безпеки, однак це часто ускладнюється складністю управління гіпервізорами та оркестраційними платформами. Відсутність єдиних індустріальних стандартів також спричиняє проблеми сумісності та знижує рівень інтероперабельності в середовищі, де присутні різні постачальники мережевих функцій.

До тогож впровадження, МЕС і NFV не лише породжує низку технічних та організаційних викликів, але й прямо впливає на зростання енергоспоживання.

По-перше, віртуалізація мережевих функцій (NFV) передбачає активне використання обчислювальних ресурсів загального призначення (зокрема, x86-серверів) [37], які, порівняно зі спеціалізованими апаратними рішеннями, зазвичай мають нижчий рівень енергоефективності. Віртуалізоване середовище потребує постійної роботи гіпервізорів,

оркестраційних платформ та механізмів моніторингу, що призводить до зростання фонового навантаження на обчислювальні потужності й, відповідно, до збільшення енергоспоживання.

По-друге, розгортання МЕС-інфраструктури вимагає встановлення великої кількості периферійних обчислювальних вузлів у фізично розподілених локаціях. Кожен із таких вузлів потребує автономного електроживлення, систем охолодження та підтримки підключення до мережі. На відміну від централізованих дата-центрів, периферійні сайти мають обмежені можливості для енергетичної оптимізації, що в сукупності створює високий сукупний енергетичний слід. Особливо значущим цей чинник стає у випадку масштабного впровадження МЕС для підтримки сценаріїв з ультранизькою затримкою (URLLC), що передбачають безперервну роботу великої кількості вузлів навіть за відсутності пікового трафіку.

Також, перехід до гнучких програмно-керованих мереж, віртуалізації та обчислень на периферії суттєво змінює уявлення про мережеву безпеку. У традиційних телекомунікаційних системах структура була відносно стабільною: апаратні засоби й функції мали чітко визначене місце, і фізичний доступ до інфраструктури був основною точкою контролю. Сьогодні ж більшість мережевих функцій розгортаються у вигляді програмного забезпечення, яке може бути переміщене, масштабоване або оновлене буквально в реальному часі — і це відкриває нові вектори для атак.

Наприклад, коли контроль над мережею винесено в програмну площину, з'являється ризик компрометації систем управління. Якщо злоумисник отримує доступ до логіки, яка визначає, як маршрутизуються пакети чи які правила фільтрації застосовуються — він потенційно здатен не лише прослуховувати трафік, а й цілеспрямовано маніпулювати

маршрутизацією, обійти захист або навіть повністю зруйнувати сегменти мережі.

До цього додається складність фізичного захисту мережевих вузлів. На відміну від централізованих дата-центрів, нові обчислювальні сайти можуть бути розташовані в публічних місцях, на краю міста, на мобільному транспорті — там, де контроль за фізичним доступом слабший або взагалі відсутній [40]. Якщо зловмисник отримує доступ до такого пристрою, він може не тільки втрутитися в локальну обробку даних, а й спробувати розгорнути атаку на всю мережу.

Додатково, динамічність та гнучкість віртуалізованих мереж створює труднощі з відстеженням того, де саме на даний момент працює певна функція, яка обробляє критичні дані. Це ускладнює аудит, моніторинг та реагування на інциденти. У випадку атаки час на виявлення і нейтралізацію загрози може виявитися критично довгим — саме через те, що функції можуть бути перенесені або масштабовані вже в момент атаки.

3.2 Перспективи розвитку транспортної інфраструктури та вплив технологій 6G

Очікувані вимоги до транспортної мережі у 6G визначаються глобальними тенденціями цифрової трансформації та зростаючими потребами в ще більш високопродуктивному, гнучкому й енергоефективному середовищі для передавання даних. У порівнянні з 5G, шосте покоління мобільного зв'язку орієнтоване на досягнення набагато вищих технічних показників, зокрема забезпечення пікових швидкостей передавання даних на рівні до 1 Тбіт/с, середніх швидкостей понад 1 Гбіт/с, а також надзвичайно низьких затримок — до 0,1 мс або навіть нижче [41]. Ці характеристики необхідні для підтримки майбутніх сервісів, таких як голографічна комунікація в реальному часі, кіберфізичні системи нового

покоління, розширена автономія роботизованих систем, а також повна інтеграція цифрового й фізичного світів у межах концепцій Internet of Senses та повноцінної інтелектуалізації інфраструктури.

Ключовою вимогою до транспортної мережі 6G є її масштабованість, яка має забезпечити підтримку надзвичайно високої щільності підключень — до 10 мільйонів пристроїв на квадратний кілометр, що передбачає динамічне масштабування ресурсів залежно від навантаження [42]. Окрім цього, в умовах масового використання сенсорних мереж, інтегрованих в індустрію, транспорт, охорону здоров'я та інші сфери, транспортна інфраструктура повинна забезпечити гарантовану якість обслуговування (QoS) з урахуванням різномірних вимог до трафіку.

Одним із перспективних напрямів є використання високоплатформних станцій (HAPS), які, завдяки своїй автономності та широкому покриттю, можуть зменшити енергоспоживання транспортної мережі до 30% порівняно з традиційними наземними рішеннями. Це досягається за рахунок зменшення кількості наземних базових станцій та оптимізації розподілу трафіку [43].

Одним із підходів до зниження енергоспоживання є використання протоколу Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH), який застосовується в бездротових сенсорних мережах. LEACH організовує вузли в кластери, де кожен кластер має головний вузол, що агрегує та передає дані до базової станції. Це дозволяє зменшити кількість переданих повідомлень і, відповідно, енергоспоживання [44].

Іншим прикладом є Energy-Efficient Ethernet (EEE), який дозволяє мережевим пристроям переходити в режим низького енергоспоживання під час періодів низької активності. EEE використовує механізм Low-Power Idle (LPI), що дозволяє зменшити енергоспоживання без втрати сумісності з існуючим обладнанням.

На фізичному рівні досліджуються механізми впровадження так званого енергетично-чутливого MAC-рівня (Energy-Aware MAC), який дозволяє регулювати часові вікна активності вузлів та взаємодії з каналом відповідно до предиктивних моделей навантаження. Особливо актуальним є використання алгоритмів динамічного вимкнення інтерфейсів при відсутності активного трафіку, які з мінімальними часовими витратами повертаються до активного стану при виявленні вхідного запиту. Така техніка вже реалізована в концепції Energy Efficient Ethernet через режим Low-Power Idle, однак наразі ведуться роботи з його адаптації до високошвидкісних транспортних магістралей із мультигігабітною пропускною здатністю.

Велике значення має також застосування енергетично ефективної маршрутизації у середовищах з мультисегментною топологією, де реалізація багат шарових архітектур передбачає об'єднання наземних, підводних та оптичних каналів із неоднорідними характеристиками. У цьому контексті критично важливими є мультикритеріальні моделі маршрутизації, що інтегрують енергетичні витрати, час поширення сигналу, спектральну ефективність і прогнозовану стабільність з'єднання.

У галузі оптичного транспорту поширення набувають концепції Elastic Optical Networking (EON) та Gridless DWDM, які дозволяють гнучко адаптувати спектр відповідно до поточних вимог, забезпечуючи ефективніше використання енергетичних ресурсів, зокрема шляхом інтелектуального управління модуляцією та потужністю передавання. Також важливо зазначити дослідження у сфері енергетичного профілювання оптичних передавачів і приймачів, які дозволяють мінімізувати фонове споживання та застосовувати адаптивну амплітудну модуляцію відповідно до умов передачі.

На рівні управління мережею все більше значення мають інструменти програмно-визначених мереж (SDN) та мережевої функціональної

віртуалізації (NFV), які відкривають можливості для централізованого енергетичного моніторингу, динамічного масштабування віртуалізованих ресурсів відповідно до поточного трафіку, а також адаптивного розміщення функцій обробки даних у топологічно та енергетично оптимальних точках мережі. Зокрема, використовуються технології енергетично обізнаного оркестрування, що дає змогу мінімізувати переміщення трафіку через неефективні маршрути або перевантажені вузли обробки.

Не менш важливими є протоколи та архітектурні рішення, які підтримують концепцію «мережі з енергетичним зворотним зв'язком», де інформація про енергоспоживання передається між вузлами для прийняття колективних рішень. У таких системах застосовуються енергетичні метрики як частина протоколів маршрутизації (наприклад, у модифікованих версіях OSPF або BGP), що дозволяє створювати глобально енергетично оптимальні маршрути.

Таким чином, транспортна мережа 6G повинна поєднувати надвисоку продуктивність, ультранизьку затримку, адаптивну масштабованість і високу енергоефективність, що визначає необхідність подальшої еволюції архітектури мережі, впровадження інноваційних технологій обробки і маршрутизації трафіку, а також розширення можливостей віртуалізації та автоматизації на всіх рівнях мережевої взаємодії.

Однією з найперспективніших інновацій у побудові транспортної інфраструктури 6G є інтеграція наземних, повітряних і орбітальних сегментів у єдину комунікаційну систему — концепція, що отримала назву NTN (Non-Terrestrial Networks). На відміну від традиційних наземних мереж, де основну роль відіграють базові станції, фіксовані на поверхні, NTN передбачає залучення таких компонентів, як супутники низької орбіти (LEO), висотні платформи (HAPS — High Altitude Platform Systems), дрони та інші безпілотні літальні апарати, що функціонують як частина телекомунікаційної інфраструктури. Це дозволяє розширити покриття у

важкодоступних регіонах, зокрема у віддалених, сільських та морських зонах, а також забезпечити безперервний зв'язок у надзвичайних ситуаціях або умовах, коли наземна інфраструктура є частково або повністю зруйнованою.

Інтеграція NTN в архітектуру транспортної мережі 6G відкриває нові горизонти для реалізації глобального безшовного зв'язку з мінімальними затримками [45]. Одним із технічних завдань у цьому контексті є створення гібридної архітектури, здатної динамічно маршрутизувати трафік між наземними та не наземними сегментами з урахуванням поточного стану каналів зв'язку, навантаження, затримок і енергоспоживання. Важливим фактором є те, що сучасні супутникові системи (особливо LEO-сегмент) демонструють дедалі вищу ефективність у контексті передачі даних, наближаючись за показниками до наземних рішень, водночас забезпечуючи значно більший радіус покриття та більшу стійкість до фізичних загроз.

Крім того, NTN сприяє підвищенню загальної надійності транспортної мережі завдяки впровадженню багат шарової структури з можливістю резервування каналів та адаптивної маршрутизації в реальному часі. Для забезпечення ефективної взаємодії між компонентами різної природи (наземними, повітряними, орбітальними) застосовуються нові протоколи та стандарти, включно з тими, що розробляються в межах 3GPP Release 17 і наступних. Особливої уваги потребує проблема синхронізації, управління ресурсами та мінімізації затримок у системах з високою мобільністю та змінною якістю каналу, що стає актуальним при використанні супутників та HAPS.

Перспективним напрямом у розвитку транспортної інфраструктури мереж 6G є впровадження терагерцового (THz) спектра, який відкриває нові горизонти для досягнення надвисоких швидкостей передавання даних — на рівні сотень гігабіт або навіть терабіт за секунду. Діапазон частот між 100 ГГц і 10 ТГц, що раніше залишався малодоступним через технічні

обмеження, поступово стає придатним для використання завдяки прогресу в матеріалознавстві, антенних технологіях та розробці високочастотних компонентів. Залучення THz-спектра дозволить істотно розширити пропускну здатність транспортної мережі 6G, що є ключовим чинником для підтримки новітніх сервісів з надвисокою щільністю трафіку — таких як повноцінні голографічні трансляції, цифрові твіни, тактильний інтернет та розширена реальність нового покоління.

Важливою перевагою терагерцового спектра є його потенціал для точного позиціонування, моніторингу руху та аналізу просторового контексту, що дозволяє інтегрувати функції комунікації та сенсорики в єдиний інфраструктурний рівень. Разом із тим, широкомасштабне впровадження THz-технологій вимагає вирішення регуляторних питань щодо розподілу спектра, створення нових стандартів фізичного та каналного рівня, а також забезпечення економічної доцільності відповідного обладнання.

З огляду на це, терагерцовий спектр розглядається як один із ключових технологічних драйверів для формування нової парадигми транспортної мережі в 6G, яка поєднуватиме надвисоку швидкість, наднизьку затримку та багатофункціональність у складній і динамічній цифровій екосистемі.

3.3 Запропоновані рекомендації щодо оптимізації транспортної мережі 5G

Для того щоб транспортна мережа 5G могла ефективно підтримувати як поточні навантаження, так і стати основою для подальшого переходу до 6G, необхідно впроваджувати низку оптимізаційних заходів, орієнтованих як на підвищення продуктивності, так і на забезпечення довгострокової масштабованості інфраструктури.

Одним із ключових напрямів є уніфікація бездротових і волоконно-оптичних каналів у середовищі backhaul/midhaul шляхом впровадження гібридних архітектур, які комбінують mmWave-канали з WDM-технологіями. Це дозволяє підвищити гнучкість у міських середовищах та закласти технічний фундамент для подальшої інтеграції з повітряними чи супутниковими сегментами.

Адаптація транспортної мережі до роботи з чутливими до затримки сервісами вимагає впровадження протоколів Time-Sensitive Networking (TSN), які забезпечують гарантовану затримку та детерміновану доставку даних. Зокрема, стандарт IEEE 802.1CM визначає використання TSN у сегменті fronthaul, що дозволяє забезпечити реальний час передачі даних між радіообладнанням та базовими станціями, що є критично важливим для підтримки сервісів з низькою затримкою, таких як розширена реальність чи віддалене управління.

У межах концепції мережевої сегментації (network slicing) необхідно забезпечити наскрізну підтримку slice-aware маршрутизації на рівні транспортної мережі. Це передбачає впровадження технологій, таких як Segment Routing (SR/SRv6), які дозволяють динамічно адаптувати ресурси відповідно до вимог конкретного slice. Використання SRv6 у поєднанні з SDN-контролерами забезпечує гнучке та ефективне управління трафіком, дозволяючи реалізувати логічні мережі з ізольованими ресурсами для різних типів сервісів.

Розгортання кластерів розподілених обчислень (MEC) безпосередньо на транспортних вузлах дозволяє зменшити затримку доставки контенту та оптимізувати трафік за рахунок локальної обробки даних. Такий підхід формує основу для подальшого переходу до концепції персонального периферійного хмари користувача, забезпечуючи більш ефективне використання мережевих ресурсів та покращення якості обслуговування.

З урахуванням стрімкого зростання енергоспоживання, необхідно реалізовувати енергоефективні маршрутизаційні механізми, які використовують алгоритми штучного інтелекту для управління включенням/виключенням інтерфейсів, масштабуванням смуги пропускання та прогнозуванням трафіку. Це дозволить знизити вуглецевий слід та експлуатаційні витрати, сприяючи сталому розвитку мережевої інфраструктури.

Впровадження систем інтелектуального управління мережею на основі підходів intent-based orchestration дозволяє визначати бізнес- або сервісні цілі, які автоматично транслуються на технічні параметри транспортної інфраструктури. Такий підхід спрощує управління складними середовищами та готує архітектуру до високого рівня автономності, забезпечуючи адаптивність та гнучкість мережі у відповідь на змінні вимоги користувачів та сервісів.

Навіть якщо оператор наразі не планує інтеграцію із супутниковими каналами, оптимізація повинна враховувати можливість підключення до негеостаціонарних систем (LEO). Рекомендується проєктувати транспортну інфраструктуру з підтримкою інтерфейсів типу N3IWF/IF для забезпечення сумісності з NTN-нодами, що дозволить розширити покриття та забезпечити безперервний зв'язок у важкодоступних регіонах або в умовах надзвичайних ситуацій.

3.4 Висновки з розділу 3

У третьому розділі систематизовано основні технічні проблеми, що виникають при розгортанні та експлуатації транспортної мережі 5G. Зокрема, розглянуто виклики, пов'язані з досягненням наднизької затримки, забезпеченням енергоефективності, дотриманням вимог

кібербезпеки та гарантованою якістю обслуговування при зростаючих навантаженнях.

Окреслено, що існуюча інфраструктура вимагає адаптації до сценаріїв URLLC, mMTC і eMBB, що неможливо без впровадження програмно-керованих рішень (SDN), віртуалізації функцій (NFV) та інтеграції обчислень на периферії (MEC). Показано, що актуальним є впровадження оркестрації ресурсів, динамічного балансування навантаження, підтримки slice-архітектур та відкритих інтерфейсів для подальшої еволюції мереж.

Проаналізовано потенціал використання інтелектуальних механізмів керування трафіком, а також можливість майбутньої інтеграції із супутниковими компонентами (NTN) у контексті гібридних архітектур 5G/6G. Встановлено, що забезпечення стабільної роботи транспортної мережі вимагає узгодження технологій передачі, синхронізації та адаптивної маршрутизації з урахуванням сервісних пріоритетів.

Зроблено висновок, що подальший розвиток транспортної підсистеми 5G повинен орієнтуватися на гнучкість, масштабованість і здатність до самооптимізації, що є ключовими передумовами для переходу до наступного покоління мобільного зв'язку.

ВИСНОВКИ

У ході проведеного дослідження було проаналізовано архітектурні особливості транспортної підсистеми мережі п'ятого покоління, визначено її ключові компоненти, технологічні вимоги та перспективи розвитку. Особливу увагу приділено інтеграції новітніх технологій, таких як програмно-визначені мережі (SDN), віртуалізація мережевих функцій (NFV), MEC-інфраструктура, протоколи з детермінованими характеристиками затримки (TSN) та підтримка наскрізної slice-орієнтованої маршрутизації. На підставі огляду технічних джерел і сучасних стандартів зроблено обґрунтований висновок про те, що ефективна транспортна мережа відіграє вирішальну роль у забезпеченні гарантованих характеристик якості обслуговування (QoS), підтримці сервісів з ультранадійною низькою затримкою (URLLC), а також масштабованості для масових підключень у контексті IoT.

Також встановлено, що підвищення адаптивності, енергоефективності та керованості транспортної інфраструктури є необхідною умовою не лише для забезпечення поточних вимог мереж 5G, але й для поступової еволюції телекомунікаційної екосистеми. У цьому контексті розвиток гібридних транспортних архітектур, інтеграція периферійних обчислень і автоматизоване управління ресурсами на основі інтенцій (intent-based orchestration) розглядаються як ключові напрямки підвищення ефективності та готовності інфраструктури до майбутніх викликів. Таким чином, транспортна мережа виступає не лише як допоміжний елемент, а як стратегічна складова архітектури мобільного зв'язку нового покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rost, Peter, et al. "Mobile network architecture evolution toward 5G." *IEEE communications magazine* 54.5 (2016): 84-91.
2. Shukurillaevich, Usmonov Botir, Radjabov Ozod Sattorivich, and Rustamov Umedjon Amrillojonovich. "5G technology evolution." *2019 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)*. IEEE, 2019.
3. Saha, Rony Kumer, Poompat Saengudomlert, and Chaodit Aswakul. "Evolution toward 5G mobile networks-A survey on enabling technologies." *Engineering Journal* 20.1 (2016): 87-119.
4. Ghosh, Amitabha, et al. "5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15." *IEEE access* 7 (2019): 127639-127651.
5. Shukla, Sapna, et al. "Comparative Study of 1G, 2G, 3G and 4G." *J. Eng. Comput. Appl. Sci* 2.4 (2013): 55-63.
6. Korhonen, Juha. *Introduction to 3G mobile communications*. Artech House, 2003.
7. Qiu, Robert C., Wenwu Zhu, and Ya-Qin Zhang. "Third-generation and beyond (3.5 G) wireless networks and its applications." *2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Vol. 1. IEEE, 2002.
8. Dahlman, Erik, Stefan Parkvall, and Johan Skold. *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Academic press, 2013.
9. Dahlman, Erik, Stefan Parkvall, and Johan Skold. *4G, LTE-Advanced Pro and the Road to 5G*. Academic Press, 2016.
10. Niu, Yong, et al. "A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges." *Wireless networks* 21 (2015): 2657-2676.

- 11.DFRobot. (n.d.). *What is mmWave Millimeter Wave*. DFRobot Wiki. Retrieved February 29, 2025, from https://wiki.dfrobot.com/What_is_mmWave_Millimeter_Wave
- 12.BridgeWave Communications. (n.d.). *5G will throttle network backhaul – Here's how to power up*. Retrieved March 6, 2025, from <https://bridgewave.com/5g-will-throttle-network-backhaul-heres-how-to-power-up/>
- 13.Jiang, Siyuan, Shuai Liu, and Ming Jin. "An efficient null-broadening adaptive beamformer based on magnitude response constraints." *Digital Signal Processing* 139 (2023): 104096.
- 14.Kucuk, Kerem, et al. "A practical space-code correlator receiver for DSP based software radio implementation in CDMA2000." *Wireless personal communications* 49 (2009): 245-261.
- 15.Jiang, Siyuan, Shuai Liu, and Ming Jin. "An efficient null-broadening adaptive beamformer based on magnitude response constraints." *Digital Signal Processing* 139 (2023): 104096.
- 16.Karjalainen, Juha, et al. "Challenges and opportunities of mm-wave communication in 5G networks." *2014 9th international conference on cognitive radio oriented wireless networks and communications (CROWNCOM)*. IEEE, 2014.
- 17.Sakaguchi, Kei, et al. "Where, when, and how mmWave is used in 5G and beyond." *IEICE Transactions on Electronics* 100.10 (2017): 790-808.
- 18.Ali, Ehab, et al. "Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research." *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering* 18 (2017): 753-772.
- 19.Zhang, Zhongshan, et al. "Large-scale MIMO-based wireless backhaul in 5G networks." *IEEE Wireless Communications* 22.5 (2015): 58-66.

20. Huawei Community. (n.d.). *Что такое Massive MIMO?* Retrieved March 20, 2025, from <https://forum.huawei.com/enterprise/intl/ru/thread/Что-такое-Massive-MIMO/667494641169219584>
21. Chataut, Robin, and Robert Akl. "Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction." *Sensors* 20.10 (2020): 2753.
22. Prasad, KNR Surya Vara, Ekram Hossain, and Vijay K. Bhargava. "Energy efficiency in massive MIMO-based 5G networks: Opportunities and challenges." *IEEE Wireless Communications* 24.3 (2017): 86-94.
23. Habibi, Mohammad Asif, et al. "A comprehensive survey of RAN architectures toward 5G mobile communication system." *Ieee Access* 7 (2019): 70371-70421.
24. Ancans, Guntis, et al. "Analysis of characteristics and requirements for 5G mobile communication systems." *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* 54.4 (2017): 69.
25. Habibi, Mohammad Asif, et al. "A comprehensive survey of RAN architectures toward 5G mobile communication system." *Ieee Access* 7 (2019): 70371-70421.
26. Qasim, Nameer Hashim, et al. "DEVISING A TRAFFIC CONTROL METHOD FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH THE USE OF GNB-IOT IN 5G." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 117.9 (2022).
27. Rommer, Stefan, et al. *5G core networks: powering digitalization*. Academic Press, 2019.
28. Fiorani, Matteo, et al. "On the design of 5G transport networks." *Photonic network communications* 30 (2015): 403-415.
29. Богданова, Е. "Транспортная сеть 5G/IMT-2020." *Первая миля* 7 (2019): 40-47.

30. Xiao, Yuming, Jiawei Zhang, and Yuefeng Ji. "Energy-efficient DU-CU deployment and lightpath provisioning for service-oriented 5G metro access/aggregation networks." *Journal of Lightwave Technology* 39.17 (2021): 5347-5361.
31. Cattoni, Andrea F., et al. "Ethernet-based mobility architecture for 5G." *2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking (CloudNet)*. IEEE, 2014.
32. Pfeiffer, Thomas. "Next generation mobile fronthaul and midhaul architectures." *Journal of Optical Communications and Networking* 7.11 (2015): B38-B45.
33. Borenius, Seppo, et al. "Providing network time protocol based timing for smart grid measurement and control devices in 5G networks." *2019 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*. IEEE, 2019.
34. Ge, Xiaohu, et al. "5G wireless backhaul networks: challenges and research advances." *IEEE network* 28.6 (2014): 6-11.
35. Kaczmarek, Sylwester, and Magdalena Młynarczuk. "Simulator for performance evaluation of ASON/GMPLS network." *IEEE Access* 9 (2021): 108293-108304.
36. GeeksforGeeks. (n.d.). *What is Software Defined Networking (SDN)?* Retrieved April 2, 2025, from <https://www.geeksforgeeks.org/software-defined-networking/>
37. Barakabitze, Alcardo Alex, et al. "5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges." *Computer Networks* 167 (2020): 106984.
38. Kekki, Sami, et al. "MEC in 5G networks." *ETSI white paper* 28.2018 (2018): 1-28.
39. YateBTS. (n.d.). *Multi-access edge computing and current applications*. Retrieved April 2, 2025, from

https://yatebts.com/solutions_and_technology/mec-multi-access-edge-computing/

40. Al-Falahy, Naser, and Omar Y. Alani. "Technologies for 5G networks: Challenges and opportunities." *It Professional* 19.1 (2017): 12-20.
41. David, K., & Berndt, H. (2018). 6G Vision and Requirements: Is There Any Need for Beyond 5G? *IEEE Vehicular Technology Magazine*, September 2018. — doi:10.1109/mvt.2018.2848498
42. Chowdhury, Mostafa Zaman, et al. "6G wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions." *IEEE Open Journal of the Communications Society* 1 (2020): 957-975.
43. Song, Tailai, et al. "High altitude platform stations: the new network energy efficiency enabler in the 6G era." *2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2024.
44. Sean Michael Kerner (July 17, 2009). "Energy Efficient Ethernet hits standards milestone — InternetNews:The Blog — Sean Michael Kerner". *Internetnews blog*. Archived from [the original](#) on July 18, 2009. Retrieved July 5, 2011.
45. Hosseinian, Mohsen, et al. "Review of 5G NTN standards development and technical challenges for satellite integration with the 5G network." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 36.8 (2021): 22-31.