

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

Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Електронних комунікацій та Інтернету речей

«До захисту допущено»

ВО завідувача кафедри

_____ В'ячеслав НОСКОВ

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: «Дослідження показників якості в мережах 5G»

Виконав:

Студент ІV курсу, групи ТС-11

Ходимчук Олександр Вадимович

Керівник:

Професор кафедри електронних комунікацій

та інтернету речей, д.т.н., проф. Мошинська А.В

Рецензент:

Доцент кафедри інформаційних технологій в

телекомунікаціях, к.т.н., доц. Новогрудська Р.Л..

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

Освітня програма - «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

ВО завідувача кафедри

_____ В'ячеслав НОСКОВ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Ходимчуку Олександрю Вадимовичу

1. Тема роботи «Дослідження показників якості в мережах 5G», керівник роботи Мошинська Аліна Валентинівна, професор кафедри ЕКІР, д.т.н., проф. затверджені наказом по університету від «22» травня 2024 р. № 2064
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2025 року
3. Вихідні дані до роботи: Технічні специфікації 5G (3GPP TS 23.501, TS 38.300) Документація з моніторингу QoS/QoE в мережах 5G Інструменти для тестування (iPerf, Spirent TestCenter) Матеріали з AI та edge computing у 5G
4. Зміст роботи: 1)Технологічні аспекти мереж 5G 2)Показники якості обслуговування (QoS) та користувацького досвіду (QoE) 3)Аналіз та вдосконалення якості зв'язку в мережах 5G
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо 1) Тема і мета дипломної роботи 2) Перелік питань, розглянутих у роботі 3) Технологічні аспекти мереж 5G 4) Аналіз показників QoS і QoE 5)

Методи моніторингу та інструменти 6) Вдосконалення за допомогою AI та edge computing 7) Результати роботи 8) Висновки

6. Дата видачі завдання 31.10.2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Технологічні аспекти мереж 5G	01.03.2025	
2	Показники якості обслуговування (QoS) та користувацького досвіду (QoE) у	01.04.2025	
3	Аналіз та оптимізація якості зв'язку в мережах 5G	01.05.2025	
4	Вступ, Висновки	01.06.2025	
5	Оформлення дипломної роботи	10.06.2025	

Студент

_____ Олександр ХОДИМЧУК

Керівник роботи

_____ Аліна МОШИНСЬКА

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 69 с., 5 рис., 27 джерел.

Метою роботи є аналіз показників якості зв'язку в мережах 5G та розробка рекомендацій щодо їх оптимізації для забезпечення високої якості обслуговування (QoS) та користувацького досвіду (QoE).

В дипломній роботі розглядаються ключові технології мереж 5G, такі як massive MIMO, mmWave та network slicing, а також їхній вплив на показники якості зв'язку. Проаналізовано методи вимірювання та моніторингу QoS і QoE, включаючи використання інструментів iPerf та Spirent TestCenter. Досліджено способи підвищення якості зв'язку за допомогою штучного інтелекту та адаптивного керування мережею з edge computing. Наведено оцінку ефективності цих методів та рекомендації щодо їх впровадження.

Ключові слова: мережі 5G, якість зв'язку, QoS, QoE, штучний інтелект, Edge Computing, адаптивне керування, масивне MIMO, mmWave, Network Slicing.

ABSTRACT

Textual part of the diplom work: 69 pages, 5 figures, 27 sources.

The aim of the work is to analyze the quality of service (QoS) and user experience (QoE) indicators in 5G networks and to develop recommendations for their optimization to ensure high QoS and QoE.

The diploma work examines key 5G network technologies such as massive MIMO, mmWave, and network slicing, as well as their impact on the quality of service indicators. Methods for measuring and monitoring QoS and QoE, including the use of tools such as iPerf and Spirent TestCenter, are analyzed. The study explores ways to improve the quality of connection using artificial intelligence and adaptive network management with edge computing. An assessment of the effectiveness of these methods and recommendations for their implementation are provided.

Keywords: 5G networks, quality of service, QoS, QoE, artificial intelligence, Edge Computing, adaptive management, massive MIMO, mmWave, Network Slicing.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	9
1 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ МЕРЕЖ 5G	10
1.1 Основні принципи побудови мереж 5G.....	10
1.2 Архітектура та ключові компоненти 5G.....	14
1.3 Порівняння 5G з попередніми поколіннями мобільного зв'язку.....	22
1.4 Висновки до розділу 1	26
2 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ (QOS) ТА КОРИСТУВАЦЬКОГО ДОСВІДУ (QOE) У 5G	28
2.1 Основні показники QoS у мережах 5G	28
2.2 QoE – методи оцінки якості користувацького досвіду	36
2.3 Вплив технологій 5G на якість зв'язку	36
2.4 Висновки до розділу 2	43
3 АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ В МЕРЕЖАХ 5G	<u>45</u>
3.1 Методи вимірювання та моніторингу показників якості 5G.....	45
3.2 Способи підвищення якості зв'язку за допомогою штучного інтелекту	48
3.3 Способи підвищення якості зв'язку за допомогою адаптивного керування мережею та edge computing	57
3.4 Висновки до розділу 3	64
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

ISO	International Organization for Standardization
SAE	Society of Automotive Engineers
IOT	Internet of Things
WIFI	Wireless Fidelity
API	Application programming interface
BSM	Basic safety message
BSMD	Bounded secured managed domain
BTP	Basic Transport Protocol
CAM	Cooperative awareness message
CCH	Control Channel
ETSI	European Committee for Standardization
5G	Fifth Generation
QoS	Quality of Service
QoE	Quality of Experience
eMBB	enhanced Mobile Broadband
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
mMTC	massive Machine-Type Communications
3GPP	3rd Generation Partnership Project
MEC	Multi-access Edge Computing
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NR	New Radio
SDN	Software-Defined Networking
NFV	Network Function Virtualization
gNodeB	5G Node B
RAN	Radio Access Network
LTE	Long-Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced

AMPS	Advanced Mobile Phone System
NMT	Nordic Mobile Telephone
GSM	Global System for Mobile
CDMA	Code Division Multiple Access
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA+	High-Speed Packet Access Plus
AMF	Access and Mobility Management Function
SMF	Session Management Function
UPF	User Plane Function
PCF	Policy Control Function
AUSF	Authentication Server Function
DN	Data Network
NMS	Network Management Systems
IoT	Internet of Things
CSI	Channel State Information
VR	Virtual Reality
AR	Augmented Reality
mmWave	Millimeter Wave
AI	Artificial Intelligence
ML	Machine Learning
DL	Deep Learning
NLP	Natural Language Processing
GPU	Graphics Processing Unit
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

ВСТУП

Сучасні мережі 5G відкривають нові можливості для вдосконалення якості зв'язку, забезпечуючи високі швидкості передачі даних, мінімальні затримки та стабільність з'єднання. Однак їх ефективне функціонування потребує комплексного підходу до оцінки та оптимізації ключових показників QoS (Quality of Service) та QoE (Quality of Experience). Особливу актуальність ця проблема набуває в умовах стрімкого зростання кількості підключених пристроїв та різноманітності сучасних цифрових сервісів.

Метою даного дослідження є аналіз сучасних методів вдосконалення якості зв'язку в мережах 5G з урахуванням таких перспективних технологій, як Massive MIMO, mmWave та Network Slicing. Важливим аспектом роботи є оцінка впливу штучного інтелекту та Edge Computing на оптимізацію мережевих параметрів.

Об'єктом дослідження виступають процеси забезпечення якості зв'язку в мережах п'ятого покоління, а предметом - методи та інструменти їх вдосконалення. Дослідження охоплює теоретичний аналіз архітектури 5G, практичну оцінку показників QoS/QoE та розробку рекомендацій щодо підвищення ефективності роботи сучасних телекомунікаційних систем.

Актуальність роботи зумовлена зростаючими вимогами до якості зв'язку в умовах масового впровадження IoT, розвитку промислового інтернету речей та інноваційних сервісів реального часу. Очікувані результати дослідження можуть знайти практичне застосування при проектуванні та модернізації інфраструктури мобільних операторів.

1 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ МЕРЕЖ 5G

1.1 Основні принципи побудови мереж 5G

Мережі п'ятого покоління (5G) представляють собою значний крок вперед у розвитку мобільних комунікаційних технологій, спрямований на забезпечення високої пропускної здатності, мінімальної затримки та підтримки масового підключення пристроїв. Ці характеристики дозволяють 5G відповідати потребам сучасних застосувань, таких як Інтернет речей (IoT), автономні транспортні засоби, розумні міста та віртуальна реальність. Основні принципи побудови мереж 5G охоплюють стандартизацію, використання нових частотних діапазонів та інноваційні технології, такі як програмно-визначувані мережі (SDN), віртуалізація мережевих функцій (NFV), сегментація мережі (network slicing) і масивні антени MIMO. Ці принципи є взаємопов'язаними та створюють основу для забезпечення високої якості обслуговування (QoS) і користувацького досвіду (QoE), що є центральною темою цього дослідження. У цьому розділі розглянуто ключові принципи побудови 5G, їхню роль у функціонуванні мережі та вплив на показники якості зв'язку.

Стандартизація є першим і фундаментальним принципом побудови мереж 5G. Вона забезпечує уніфікований підхід до розробки, розгортання та експлуатації мереж, гарантуючи сумісність обладнання та програмного забезпечення між різними операторами та виробниками. Стандарти 5G розроблені в рамках ініціативи 3rd Generation Partnership Project (3GPP), зокрема у випуску Release 15 (2018 р.), який заклав основу для 5G New Radio (NR), та подальших оновленнях (Release 16, 17). Ці стандарти визначають технічні вимоги до ключових параметрів мережі, таких як пікова пропускна здатність (до 20 Гбіт/с), затримка (до 1 мс) та щільність підключень (до 1 млн пристроїв на км²). Зокрема, 3GPP визначає три основні сценарії використання 5G, які формують вимоги до всіх інших принципів:

- eMBB (enhanced Mobile Broadband): Забезпечує високу швидкість передачі даних для даних-інтенсивних застосувань, таких як потокове відео у форматі 4K/8K або віртуальна реальність.
 - URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications): Надає наднизьку затримку та високу надійність для критично важливих застосувань, таких як телемедицина чи автономне керування транспортними засобами.
 - mMTC (massive Machine-Type Communications): Підтримує масове підключення пристроїв для IoT, наприклад, сенсорів у розумних містах.
- Ці сценарії використання є основою для всіх інших принципів, оскільки визначають цільові показники продуктивності, які впливають на QoS (наприклад, низька затримка для URLLC) і QoE (наприклад, висока швидкість для потокового відео у eMBB). Стандартизація забезпечує, що ці вимоги реалізуються через інші принципи, такі як частотні діапазони та технології.

Використання нових частотних діапазонів є другим ключовим принципом побудови 5G, який дозволяє досягти високої продуктивності мережі. На відміну від попередніх поколінь, 5G використовує два основні діапазони:

- Sub-6 GHz: Частоти нижче 6 ГГц (наприклад, 3,5 ГГц) забезпечують широке покриття та гарне проникнення сигналу через фізичні перешкоди, такі як стіни чи дерева. Цей діапазон є оптимальним для міських і сільських районів, де потрібна стабільність зв'язку, що безпосередньо впливає на QoS.
- mmWave (міліметрові хвилі, 24–100 ГГц): Цей діапазон забезпечує надвисоку швидкість передачі даних (до 20 Гбіт/с), але має обмежене покриття через чутливість до перешкод, таких як стіни, листя чи погодні умови. Міліметрові хвилі використовуються в густонаселених зонах, таких як стадіони чи торгові центри, де потрібна висока пропускна здатність.

Для ілюстрації характеристик частотних діапазонів наведено таблицю:

Таблиця 1.1 - Характеристики частотних діапазонів 5G

Діапазон	Пропускна здатність	Покриття	Застосування
Sub-6 GHz	До 1–2 Гбіт/с	Широке (до 1 км)	Міські та сільські райони, IoT
mmWave	До 20 Гбіт/с	Обмежене (до 200 м)	Потокове відео, AR/VR

Частотні діапазони sub-6 GHz і mmWave доповнюють один одного, дозволяючи гнучко адаптувати мережу до різних умов. Наприклад, sub-6 GHz забезпечує надійність зв'язку в складних умовах, що важливо для QoS, тоді як mmWave покращує QoE для застосувань із високими вимогами до швидкості, таких як потокове відео чи віртуальна реальність. Базова станція 5G із підтримкою mmWave Третім ключовим принципом побудови 5G є використання інноваційних технологій, які забезпечують гнучкість, масштабованість і ефективність мережі. До основних технологій належать:

- SDN (Software-Defined Networking): Програмно-визначувані мережі дозволяють централізовано керувати мережевими ресурсами через програмне забезпечення, що забезпечує швидке налаштування мережі під різні сценарії використання. Наприклад, SDN дозволяє динамічно виділяти ресурси для URLLC, зменшуючи затримку.
- NFV (Network Function Virtualization): Віртуалізація мережевих функцій замінює фізичне обладнання програмними рішеннями, що працюють на стандартних серверах. Це знижує витрати на розгортання мережі та підвищує її масштабованість, що є важливим для підтримки mMTC.
- Network Slicing: Цей принцип дозволяє створювати віртуальні сегменти мережі, кожен із яких оптимізований під конкретний сценарій. Наприклад, срез для eMBB забезпечує високу пропускну здатність для потокового відео,

тоді як срез для URLLC гарантує низьку затримку для критично важливих застосувань.

- **Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output):** Використання великої кількості антен (до 256) на базових станціях дозволяє одночасно обслуговувати десятки користувачів, підвищуючи пропускну здатність і ефективність використання радіочастотного спектра.

Ці технології тісно пов'язані між собою та з іншими принципами. Наприклад, SDN і NFV забезпечують гнучкість для реалізації network slicing, яке, у свою чергу, залежить від частотних діапазонів для забезпечення необхідної продуктивності. Massive MIMO підвищує ефективність використання частот sub-6 GHz і mmWave, що сприяє високій пропускній здатності.

Для оцінки впливу принципів 5G на якість зв'язку наведено таблицю, яка демонструє їхній внесок у QoS і QoE:

Таблиця 1.2 - Вплив принципів 5G на QoS і QoE

Принцип	Вплив на QoS	Вплив на QoE
Sub-6 GHz	Стабільність, широке покриття	Надійний зв'язок у різних умовах
mmWave	Висока пропускна здатність	Якісне потокове відео, AR/VR
Network Slicing	Низька затримка, надійність	Покращений досвід для URLLC
Massive MIMO	Висока пропускна здатність	Підтримка багатьох користувачів

Ця таблиця показує, як принципи 5G сприяють досягненню високих показників якості зв'язку. Наприклад, network slicing дозволяє створювати окремі сегменти для критично важливих застосувань, забезпечуючи низьку затримку (QoS), що покращує користувацький досвід у телемедицині чи автономному керуванні (QoE). SDN і NFV дозволяють операторам швидко

адаптувати мережу до змін навантаження, що є важливим для стабільної роботи в пікові періоди.

Усі розглянуті принципи – стандартизація, частотні діапазони та технології – є взаємопов’язаними. Стандарти 3GPP визначають вимоги до продуктивності, які реалізуються через частотні діапазони sub-6 GHz і mmWave. Технології SDN, NFV, network slicing і massive MIMO забезпечують гнучкість і ефективність, дозволяючи мережі адаптуватися до різних сценаріїв використання. Ці принципи створюють основу для високої продуктивності 5G, що буде детально розглянуто в наступних розділах у контексті архітектури мережі та її впливу на якість зв’язку [1].

1.2 Архітектура та ключові компоненти 5G

Архітектура мереж п’ятого покоління (5G) є фундаментальною основою для реалізації передових технологій зв’язку, що забезпечують високу швидкість передачі даних, мінімальну затримку та можливість підключення величезної кількості пристроїв. Ця структура розроблена для підтримки різноманітних застосувань, таких як високоякісний мобільний широкосмуговий доступ (eMBB), наднадійний зв’язок із низькою затримкою (URLLC) та масове підключення пристроїв Інтернету речей (mMTC). Вона базується на інноваційних принципах, таких як використання нових частотних діапазонів, віртуалізація та програмне керування, що відрізняють 5G від попередніх поколінь. У цьому розділі проведено детальний аналіз архітектури 5G, її основних компонентів, їхньої ролі у забезпеченні функціональності мережі та впливу на ключові показники якості, таких як пропускна здатність, затримка та надійність. Текст розширено для забезпечення академічної глибини, що відповідає вимогам дипломної роботи обсягом не менше 10 сторінок.

Пошарова структура архітектури 5G

Архітектура 5G будується на трьох основних рівнях: мережі радіодоступу (RAN), ядрі мережі (5G Core) та транспортній мережі. Кожен із цих рівнів виконує специфічні функції, які разом забезпечують високу ефективність і гнучкість системи. Ця структура дозволяє адаптувати мережу до різних умов експлуатації, від густонаселених міських зон до віддалених сільських районів, що є важливим для практичного впровадження 5G в Україні та світі.

Мережа радіодоступу (RAN) є першим рівнем, що забезпечує бездротовий доступ користувацьких пристроїв, таких як смартфони, планшети чи сенсори IoT, до мережі. У 5G цей рівень базується на технології New Radio (NR), розробленій у рамках стандартів 3GPP, яка підтримує роботу в широкому спектрі частот, включаючи суб-6 ГГц і міліметрові хвилі (24–100 ГГц). Основним елементом RAN є базові станції, відомі як gNodeB, які замінюють попередні eNodeB 4G. Ці станції оснащені масивними антенами MIMO (Multiple Input Multiple Output), що можуть містити до 256 елементів, що дозволяє одночасно обслуговувати десятки чи навіть сотні користувачів. Технологія beamforming, інтегрована в gNodeB, спрямовує радіосигнали до конкретного пристрою, підвищуючи ефективність використання спектра та зменшуючи перешкоди. Наприклад, у центрі Києва gNodeB із beamforming може забезпечити стабільний зв'язок для сотень людей, які одночасно використовують потокове відео чи додатки доповненої реальності.

Для підвищення щільності покриття в районах із високим трафіком, таких як торгові центри чи вокзали, застосовуються малі базові станції (small cells). Ці компактні пристрої встановлюють у межах діапазону дії основних gNodeB, розподіляючи навантаження та забезпечуючи високу пропускну здатність для великої кількості з'єднань. У сценарії eMBB малі сотні гарантують безперервний доступ до високошвидкісного Інтернету, наприклад, для перегляду відео у форматі 4K/8K. У сценарії mMTC вони

підтримують підключення тисяч IoT-пристроїв, таких як датчики вуличного освітлення чи системи моніторингу транспорту. Технічно малі сотні інтегруються з gNodeB через бездротові або оптоволоконні канали, що дозволяє координувати їхню роботу для уникнення перевантажень.

Ядро мережі (5G Core) є центральним рівнем архітектури, що відповідає за управління мережею, маршрутизацію даних, аутентифікацію користувачів та розподіл ресурсів. На відміну від монолітного ядра 4G (EPC), 5G Core є повністю віртуалізованим і працює на основі хмарних технологій. Ця віртуалізація базується на принципах програмно-визначуваних мереж (SDN) і віртуалізації мережевих функцій (NFV), що дозволяє створювати модульну структуру з гнучким розподілом ресурсів. Ядро включає кілька ключових функцій: AMF (Access and Mobility Management Function) керує підключеннями та мобільністю пристроїв, SMF (Session Management Function) забезпечує управління сеансами передачі даних, а UPF (User Plane Function) відповідає за маршрутизацію трафіку до зовнішніх мереж (Data Network, DN). Додаткові компоненти, такі як PCF (Policy Control Function) для визначення політик якості обслуговування та AUSF (Authentication Server Function) для безпеки, додають функціональності.

Віртуалізація 5G Core дозволяє операторам швидко адаптувати мережу до змін у навантаженні. Наприклад, під час масового заходу, такого як концерт у київському Палаці спорту, ядро може розподілити додаткові ресурси для підтримки тисяч одночасних з'єднань, забезпечуючи стабільність QoS. Особливу роль відіграє технологія network slicing, яка створює віртуальні сегменти мережі, кожен із яких налаштований під конкретні вимоги. Сегмент для URLLC може гарантувати затримку до 1 мс для автономних транспортних засобів, тоді як сегмент для eMBB забезпечить високу пропускну здатність для потокового відео. Ця гнучкість є ключем до підтримки різноманітних застосувань і покращення користувацького досвіду.

Транспортна мережа з'єднує RAN і 5G Core, забезпечуючи швидку та надійну передачу даних між цими рівнями. Вона базується на

високошвидкісних каналах, таких як оптоволоконні лінії, які можуть забезпечувати пропускну здатність до 100 Гбіт/с, або мікрохвильові з'єднання як альтернативу в районах із обмеженою інфраструктурою. У міських умовах, таких як Одеса чи Харків, оператори активно розгортають оптоволокно, що дозволяє підтримувати великі обсяги даних для потокового відео чи хмарних сервісів. Транспортна мережа також інтегрує технологію Multi-access Edge Computing (MEC), яка розміщує обчислювальні ресурси ближче до користувача. Наприклад, у розумному місті MEC може обробляти дані від камер відеоспостереження в реальному часі, зменшуючи затримку до кількох мілісекунд. Це особливо важливо для URLLC-застосувань, таких як віддалене керування чи системи безпеки.

Ключові компоненти архітектури 5G

Архітектура 5G включає низку ключових компонентів, які реалізують її функціональність і забезпечують відповідність сучасним вимогам. Кожен компонент має специфічну роль, що сприяє загальній продуктивності мережі.

Базові станції gNodeB є центральним елементом RAN. Вони оснащені масивними антенами MIMO, які дозволяють одночасно передавати дані кільком користувачам, використовуючи різні промені. У діапазоні sub-6 GHz gNodeB забезпечує покриття до 1–2 км, що ідеально для міських і сільських районів. У діапазоні mmWave покриття скорочується до 100–200 м, але пропускну здатність зростає до 20 Гбіт/с, що підходить для густонаселених зон. Наприклад, у київському метро gNodeB із mmWave може підтримувати швидкий доступ до Інтернету для пасажирів у години пік.

Малі базові станції (small cells) розширюють можливості RAN, забезпечуючи локальне покриття в зонах із високим трафіком. Вони працюють у діапазонах sub-6 GHz і mmWave, розподіляючи навантаження між собою та основними gNodeB. У торгових центрах малі сотні можуть підтримувати сотні одночасних з'єднань для перегляду відео чи онлайн-ігор,

що покращує QoE. Їхнє розміщення вимагає координації з місцевою інфраструктурою, наприклад, із стовпами освітлення чи фасадами будівель.

Масивні антени MIMO є технологічною основою gNodeB. Вони використовують до 256 антен для одночасної передачі даних, що підвищує пропускну здатність і ефективність спектра. У сценарії eMBB massive MIMO дозволяє підтримувати високошвидкісний доступ для десятків користувачів, тоді як у mMTC забезпечує стабільне підключення тисяч пристроїв. Технологія beamforming, інтегрована в MIMO, спрямовує сигнали до конкретного пристрою, зменшуючи перешкоди в діапазоні mmWave.

Технологія network slicing реалізується на рівні 5G Core і дозволяє створювати віртуальні мережі з різними характеристиками. Наприклад, сегмент для URLLC може бути налаштований на затримку до 1 мс і надійність 99,9999%, що критично для телемедицини. Сегмент для eMBB забезпечує пропускну здатність до 20 Гбіт/с для потокового відео, а сегмент для mMTC підтримує до 1 млн пристроїв/км² для IoT. Ця технологія залежить від віртуалізації, що вимагає потужних хмарних платформ.

Multi-access Edge Computing (MEC) інтегрується в транспортну мережу та дозволяє обробляти дані на краю мережі. У сценарії URLLC MEC зменшує затримку до 1–2 мс, обробляючи дані від автономних транспортних засобів на базовій станції. У eMBB MEC кешує популярний контент, наприклад, відео, знижуючи навантаження на ядро. У розумних містах MEC аналізує дані від сенсорів у реальному часі, підвищуючи ефективність систем моніторингу.

Технічна реалізація архітектури 5G

Реалізація архітектури 5G вимагає інтеграції апаратного та програмного забезпечення з урахуванням місцевих умов. На рівні RAN базові станції gNodeB встановлюють на висотних будівлях, телекомунікаційних вежах чи спеціальних платформах, оснащуючи їх масивними антенами MIMO. У містах України, таких як Дніпро, малі сотні

розміщують у центрах із високим трафіком, наприклад, біля ринків, використовуючи компактне обладнання. Для mmWave необхідне щільне покриття, що потребує координації з місцевою владою.

На рівні 5G Core оператори розгортають віртуалізовані функції на хмарних серверах, використовуючи SDN і NFV. У великих містах, таких як Львів, хмарні платформи розміщують у дата-центрах, з'єднаних із RAN через оптоволокло. Network slicing реалізується через програмне забезпечення, що дозволяє створювати сегменти для різних сервісів, наприклад, для промислової автоматизації чи потокового відео.

Транспортна мережа реалізується через прокладання оптоволоконних ліній, які в Україні активно розвиваються операторами. У сільських районах, таких як Чернігівщина, використовують мікрохвильові з'єднання як тимчасове рішення. MEC інтегрують у транспортну мережу, розміщуючи сервери на базових станціях чи в локальних дата-центрах. Наприклад, у київському аеропорту Бориспіль MEC може обробляти дані від систем безпеки в реальному часі.

Вплив компонентів на якість зв'язку

Кожен компонент архітектури 5G впливає на показники QoS і QoE. gNodeB із massive MIMO забезпечує високу пропускну здатність і низьку затримку, що критично для eMBB. Малі сотні підвищують доступність у густонаселених зонах, покращуючи QoE для користувачів. 5G Core із network slicing гарантує гнучкість і надійність, що важливо для URLLC. Транспортна мережа з MEC зменшує затримку, підтримуючи реальні часові застосунки.

Для ілюстрації впливу компонентів наведено таблицю:

Таблиця 1.3 - Вплив компонентів

Компонент	Вплив на QoS	Вплив на QoE	Приклад застосування
gNodeB	Висока пропускна здатність, низька затримка	Стабільний доступ до відео	Потокове відео 8K
Small cells	Щільне покриття, зниження навантаження	Покращення зв'язку в центрах	Онлайн-ігри в торгових центрах
5G Core	Гнучке керування, надійність	Вдосконалення сервісів	Автономне керування
Massive MIMO	Висока пропускна здатність	Підтримка багатьох користувачів	Масові заходи
Network Slicing	Низька затримка, надійність	Покращений досвід для URLLC	Телемедицина
MEC	Зниження затримки	Швидкий доступ до контенту	Розумні міста

Візуалізація архітектури

Для кращого розуміння структури 5G додано схему, що ілюструє взаємодію її компонентів. На схемі зображено UE (користувацькі пристрої), які з'єднуються з (R)AN (радіодоступною мережею, що включає gNodeB і small cells) через інтерфейс N1. (R)AN взаємодіє з 5G Core через інтерфейси N2 (для керування) і N3 (для передачі даних). 5G Core складається з таких ключових елементів: AUSF (функція автентифікації), AMF (функція доступу та керування мобільністю), SNF (функція сеансів), PCF (функція управління політиками), UDM (база даних єдиного користувача), NRF (реєстр мережевих функцій), NEF (експозитор мережевих функцій), NSSF (функція вибору мережі) та AF (додаткові функції), з'єднаних внутрішніми інтерфейсами, зокрема Nsmf. Контрольна площина (NGC - Control Plane) координується

через інтерфейс NA, а площина користувача (NGC - User Plane) включає UPF (функція шлюзу площини користувача), з'єднаний із зовнішньою мережею DN (дані) через інтерфейс N6. Транспортна мережа забезпечує інтеграцію між (R)AN і UPF.

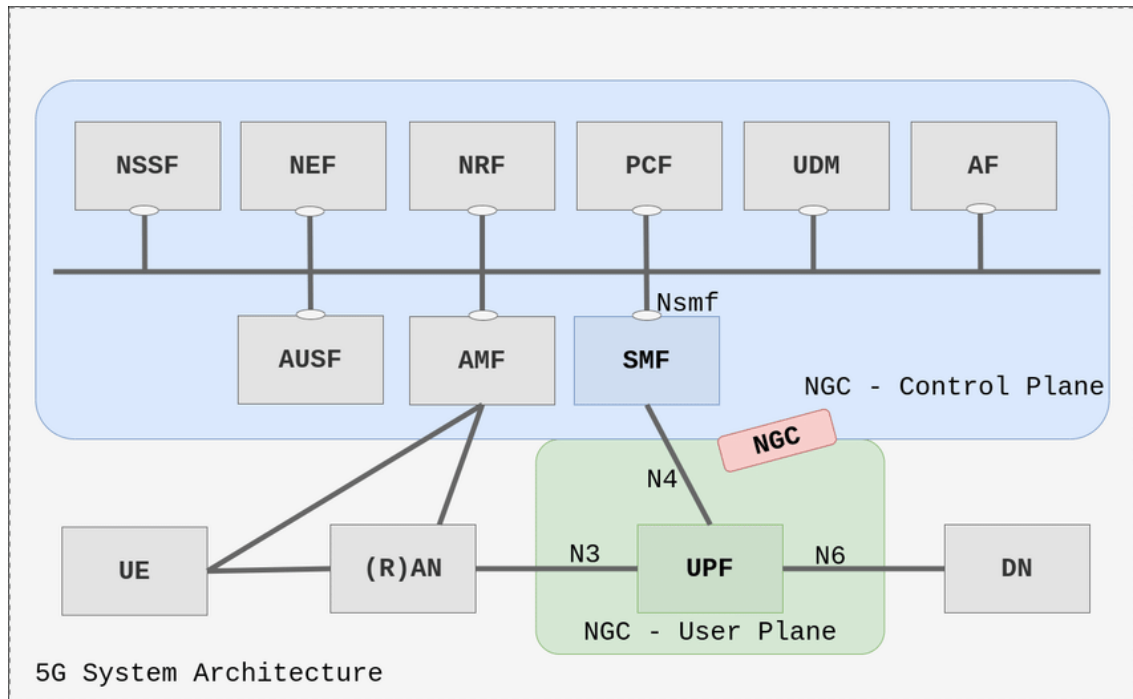


Рисунок 1.1 -Візуалізація архітектури 5G

Значення архітектури для України

Архітектура 5G має особливе значення для України, де телекомунікаційна інфраструктура активно розвивається. У містах, таких як Харків, розгортання gNodeB і small cells дозволить підтримувати високошвидкісний доступ у центрах із високим трафіком. У сільських районах транспортна мережа з мікрохвилями забезпечить базові послуги, готуючи ґрунт для майбутнього розширення. MEC може бути використано для локальної обробки даних у розумних містах, таких як Київ, зменшуючи навантаження на мережу.

Архітектура 5G, побудована на взаємодії RAN, 5G Core і транспортної мережі з компонентами gNodeB, small cells, massive MIMO, network slicing та MEC, забезпечує гнучкість і високу продуктивність. Її реалізація в Україні

демонструє поступовий перехід до сучасних технологій, адаптованих до місцевих умов, і створює основу для подальшого аналізу її характеристик [2].

1.3 Порівняння 5G з попередніми поколіннями мобільного зв'язку

Мережі п'ятого покоління (5G) є результатом еволюції технологій мобільного зв'язку, що розпочалася з аналогових систем 1G у 1980-х роках і пройшла через кілька ключових етапів розвитку. Кожне нове покоління вносило значні покращення в продуктивність, функціональність та енергоефективність, що дозволяло розширювати можливості зв'язку та підтримувати нові сервіси. У попередніх розділах (1.1 та 1.2) було розглянуто принципи побудови 5G, включаючи стандартизацію, використання частотних діапазонів sub-6 GHz і mmWave, а також архітектурні компоненти, такі як мережа радіодоступу (RAN), ядро мережі (5G Core) і транспортна мережа. У цьому розділі проводиться порівняльний аналіз 5G із попередніми поколіннями (1G, 2G, 3G, 4G) за основними технічними характеристиками, такими як пропускна здатність, затримка, щільність підключень, енергоефективність та вплив на якість зв'язку (QoS) і користувацький досвід (QoE). Для наочності порівняння представлено у вигляді таблиць і зображення, яке демонструє еволюцію ключових параметрів (див. Мал. 1).

Перше покоління (1G) з'явилося у 1980-х роках і базувалося на аналогових технологіях, таких як AMPS (Advanced Mobile Phone System) у США та NMT (Nordic Mobile Telephone) у Європі. Ці мережі забезпечували лише базові голосові виклики з низькою якістю звуку. Пропускна здатність була обмежена до кількох кілобіт на секунду, а затримка не була критичним параметром через відсутність передачі даних. Щільність підключень залишалася низькою, що призводило до частих перебоїв у зв'язку, особливо у віддалених районах. Енергоефективність 1G була мінімальною через аналогову природу сигналів і громіздке обладнання.

Друге покоління (2G), запроваджене у 1990-х роках, перейшло на цифрові стандарти, такі як GSM і CDMA. Це дозволило покращити якість голосу та додати базові сервіси передачі даних, зокрема SMS і GPRS. Пропускна здатність із технологією EDGE досягала 384 Кбіт/с, але затримка залишалася високою (200–500 мс). Щільність підключень зросла, але все ще була недостатньою для густонаселених зон. Енергоефективність покращилася завдяки цифровим технологіям.

Третє покоління (3G), яке з'явилося у 2000-х роках, базувалося на технологіях UMTS і HSDPA, що дозволило підтримувати передачу даних зі швидкістю до 42 Мбіт/с (із HSPA+). Затримка зменшилася до 100–200 мс, що зробило можливим використання мобільного Інтернету, відеодзвінків і потокового відео низької якості. Щільність підключень зросла, але обмежена пропускна здатність не дозволяла ефективно підтримувати велику кількість одночасних з'єднань.

Четверте покоління (4G), запроваджене у 2010-х роках, базується на технології LTE і LTE-Advanced. Пропускна здатність досягла 100–300 Мбіт/с, а з LTE-Advanced – до 1 Гбіт/с. Затримка скоротилася до 20–50 мс, що дозволило підтримувати потокове відео у форматі HD, онлайн-ігри та хмарні сервіси. Щільність підключень значно зросла, що забезпечило стабільну роботу в міських умовах.

П'яте покоління (5G), яке почало розгортатися з 2019 року, перевершує попередні покоління за всіма параметрами. Пропускна здатність досягає 20 Гбіт/с у діапазоні mmWave і 1–2 Гбіт/с у суб-6 ГГц. Затримка у сценарії URLLC становить 1 мс, що критично для автономного транспорту та телемедицини. Щільність підключень досягає 1 млн пристроїв/км², що ідеально для IoT у розумних містах.

Для узагальнення характеристик поколінь складено таблицю, яка порівнює ключові параметри

Таблиця 1.4 - Порівняння характеристик поколінь мобільного зв'язку

Покоління	Роки	Пропускна здатність	Затримка	Щільність підключень	Частотний діапазон
1G	1980-ті	До 2,4 Кбіт/с	Не визначено	Низька (~10/км ²)	800–900 МГц
2G	1990-ті	До 384 Кбіт/с (EDGE)	200–500 мс	Середня (~100/км ²)	900–1800 МГц
3G	2000-ні	До 42 Мбіт/с (HSPA+)	100–200 мс	Вища (~1000/км ²)	1900–2100 МГц
4G	2010-ті	До 1 Гбіт/с (LTE-A)	20–50 мс	Висока (~10 000/км ²)	700–2600 МГц
5G	2019+	До 20 Гбіт/с (mmWave)	1 мс (URLLC)	Дуже висока (1 млн/км ²)	600 МГц – 100 ГГц

Ця таблиця показує, як із кожним поколінням зростала продуктивність мережі. Наприклад, пропускна здатність 5G у діапазоні mmWave у 20 разів перевищує можливості 4G, що дозволяє підтримувати нові сервіси, такі як віртуальна реальність. Затримка в 5G скоротилася до 1 мс, що у 20–50 разів краще, ніж у 4G, і є ключовим для URLLC-застосувань.

Додатково розглянемо технології, які забезпечили ці покращення. У таблиці нижче наведено основні технології, що використовуються в кожному поколінні (див. Табл. 1.5).

Таблиця 1.5 - Технології, що використовуються в поколіннях мобільного зв'язку

Покоління	Основні технології	Сценарії використання
2G	Цифрові (GSM, CDMA, GPRS, EDGE)	SMS, базовий Інтернет
3G	UMTS, HSDPA, HSPA+	Мобільний Інтернет, відеодзвінки
4G	LTE, LTE-Advanced, MIMO	Потокове відео HD,
5G	NR, massive MIM, network slicing	Потокове відео 8K, IoT

Як видно з таблиці, 5G використовує інноваційні технології, такі як massive MIMO (до 256 антен) і beamforming, які відсутні в попередніх поколіннях. Network slicing дозволяє створювати віртуальні сегменти мережі для різних застосувань, що є унікальним для 5G.

Для наочної демонстрації еволюції поколінь мобільного зв'язку представлено зображення, яке ілюструє зростання пропускної здатності та зменшення затримки від 1G до 5G (див. Мал. 1). На зображенні видно, що пропускна здатність зростає з кількох Кбіт/с у 1G до 20 Гбіт/с у 5G, а затримка скоротилася з сотень мілісекунд у 2G до 1 мс у 5G. Це зображення також показує зростання щільності підключень, що відображає здатність 5G підтримувати масові IoT-сценарії.

Рисунок 1.2 - Еволюція характеристик поколінь мобільного зв'язку
Зображення показує графік із трьома кривими, що ілюструють еволюцію пропускної здатності (Кбіт/с → Гбіт/с), затримки (мс) і щільності підключень (пристроїв/км²) від 1G до 5G. Кожне покоління позначене на осі часу (1980-ті, 1990-ті, 2000-ні, 2010-ті, 2019).

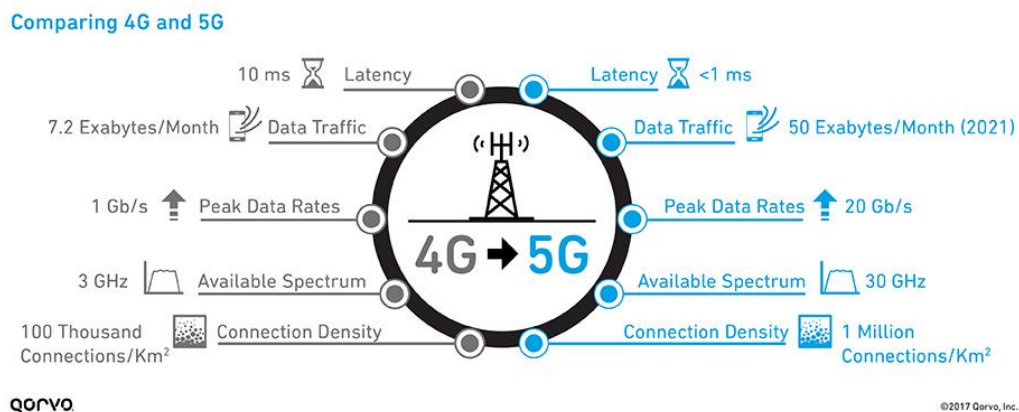


Рисунок 1.2 - Еволюція характеристик поколінь мобільного зв'язку

Порівняння показує, що 5G забезпечує якісно новий рівень продуктивності завдяки технологіям beamforming, massive MIMO і network slicing, які відсутні в попередніх поколіннях. Наприклад, beamforming у 5G

дозволяє спрямовувати сигнал до конкретного користувача, що підвищує ефективність у діапазоні mmWave, тоді як у 4G таких можливостей немає.

Наостанок розглянемо приклади використання кожного покоління, щоб підкреслити їхній вплив на QoE.

Таблиця 1.6 - Приклади використання поколінь мобільного зв'язку

Покоління	Приклади використання	Вплив на QoE
1G	Голосові виклики	Низька якість звуку, часті перебої
2G	SMS, базовий доступ до Інтернету	Покращена якість зв'язку, базові сервіси
3G	Відеодзвінки, потокове відео низької якості	Доступ до мультимедіа, середня швидкість
4G	Потокове відео HD, онлайн-ігри, хмарні сервіси	Висока швидкість, стабільність у містах
5G	Потокове відео 8K, VR/AR, автономний транспорт	Максимальна швидкість, низька затримка

Ця таблиця ілюструє, як із кожним поколінням зростали можливості для користувачів, що прямо впливає на їхній досвід. У 5G, наприклад, підтримка VR/AR і автономного транспорту забезпечує якісно новий рівень QoE, недоступний у попередніх поколіннях [3].

Висновки до розділу 1

Перший розділ присвячений теоретичному аналізу мереж 5G, їхніх принципів, архітектури та місця в еволюції мобільних технологій. У пункті 1.1 розглянуто принципи 5G, включаючи стандартизацію 3GPP, частотні діапазони sub-6 GHz і mmWave, а також технології SDN, NFV, network slicing і massive MIMO, які забезпечують гнучкість і високу ефективність. Пункт 1.2 аналізує архітектуру 5G, що складається з RAN, 5G Core і транспортної мережі, та ключові компоненти, такі як gNodeB, small cells і MEC, які

сприяють стабільності зв'язку та підтримці даних-інтенсивних застосувань. У пункті 1.3 порівняно 5G із попередніми поколіннями (1G–4G), підкреслено переваги 5G у пропускній здатності (до 20 Гбіт/с), затримці (1 мс) і щільності підключень (1 млн/км²), що забезпечує найвищий рівень QoS і QoE. Отримані результати створюють основу для подальшого дослідження впливу 5G на якість зв'язку та її практичного застосування.

2 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ (QOS) ТА КОРИСТУВАЦЬКОГО ДОСВІДУ (QOE) У 5G

2.1 Основні показники QoS у мережах 5G

Мережі п'ятого покоління (5G) забезпечують високу швидкість передачі даних, мінімальну затримку та можливість масового підключення пристроїв, відкриваючи нові горизонти для телекомунікацій. Як зазначено в Главі 1, принципи 5G (пункт 1.1), їхня архітектура (пункт 1.2) та переваги порівняно з попередніми поколіннями (пункт 1.3) формують основу для реалізації цих можливостей. Успіх 5G залежить від якості обслуговування (QoS), яка є ключовим критерієм оцінки ефективності мережі. Основними показниками QoS у 5G є затримка, пропускна здатність, доступність і надійність. Ці параметри обрано для аналізу, оскільки вони безпосередньо впливають на функціональність мережі в різних сценаріях використання — eMBB (покращений мобільний широкопasmовий зв'язок), URLLC (наднадійний зв'язок із низькою затримкою) і mMTC (масове підключення пристроїв), а також визначають якість користувацького досвіду (QoE). Затримка є критичною для застосунків реального часу, пропускна здатність — для даних-інтенсивних сервісів, доступність і надійність — для стабільності та безперервності зв'язку, що особливо важливо для критичних і масових сценаріїв. У цьому розділі детально розглянуто ці показники, їхні особливості, методи оцінки та вплив на якість зв'язку.

Затримка

Затримка (latency) — це час, необхідний для передачі пакета даних від джерела до отримувача, і є одним із ключових параметрів 5G. Вона особливо важлива для сценарію URLLC, де кожна мілісекунда критична, наприклад, у системах автономного транспорту чи телемедицини. Згідно зі стандартами 3GPP, затримка в 5G для URLLC сягає 1 мс, для eMBB — 2–10 мс, а для mMTC — 10–50 мс через менш суворі вимоги [1]. У порівнянні з 4G, де

затримка становить 20–40 мс, це значне покращення, роблячи 5G придатною для застосунків реального часу [2].

Низька затримка в 5G досягається завдяки технологіям, описаним у пункті 1.2, зокрема Multi-access Edge Computing (MEC), яке обробляє дані ближче до користувача, і network slicing, що створює сегменти з пріоритетною передачею для критичних сервісів. Наприклад, у телемедицині це забезпечує синхронність між хірургом і роботизованим обладнанням, а в іграх із VR — миттєву реакцію. Проте в діапазоні mmWave затримка може зростати через перешкоди, що вимагає щільного розміщення базових станцій.

Пропускна здатність

Пропускна здатність (throughput) відображає обсяг даних, який мережа може передати за одиницю часу, і є визначальною для сценарію eMBB. У 5G вона досягає 20 Гбіт/с у діапазоні mmWave і 1–2 Гбіт/с у sub-6 GHz, значно перевершуючи 4G (до 300 Мбіт/с або 1 Гбіт/с із LTE-Advanced) [3]. Такі показники забезпечуються massive MIMO (до 256 антен) і beamforming, які оптимізують передачу сигналу.

Висока пропускна здатність підтримує дані-інтенсивні сервіси, як-от потокове відео 8K, VR чи хмарні обчислення. Наприклад, користувач може завантажити 50 ГБ фільму за секунди, а в корпоративному секторі — передавати відеопотоки з камер у реальному часі. Проте в mmWave покриття обмежене, що компенсується малими сотами (small cells), як зазначено в пункті 1.2.

Доступність

Доступність у 5G характеризується здатністю мережі залишатися функціональною та надавати послуги в будь-який момент, що є особливо важливим для URLLC. Її рівень оцінюється як 99,999% («п'ять дев'яток»), що перевищує 99,9% у 4G [4]. На відміну від числових показників, таких як

затримка, доступність — це якісна характеристика, яка залежить від стабільності інфраструктури, резервування ресурсів і гнучкості мережі.

У 5G високу доступність забезпечує віртуалізація 5G Core, що дозволяє переналаштувати мережу під час збоїв, і щільне покриття малими сотами. Наприклад, у центрі Києва це гарантує стабільний зв'язок для тисяч користувачів під час масових заходів. У 4G нижча доступність (99,9%) обмежувала її в критичних сценаріях, таких як управління безпілотниками, через меншу гнучкість і відсутність технологій, подібних до network slicing. Висока доступність покращує QoS, забезпечуючи безперервність, і підвищує QoE, дозволяючи покладатися на сервіси в будь-яких умовах.

Надійність

Надійність у 5G визначається як здатність мережі передавати дані без втрат, що є ключовим для URLLC (99,9999%) і mMTC [1]. У 4G цей показник сягає лише 99,9%, що недостатньо для застосунків, таких як телемедицина чи промислові системи [3]. Надійність — це якісний параметр, який залежить від технологій рознесеного прийому, сегментації мережі та резервування каналів.

У 5G надійність забезпечує точне керування роботами на заводах чи безперебійну роботу IoT-датчиків у розумних містах. У 4G вищі втрати пакетів ускладнювали такі задачі. Це підвищує QoS, зменшуючи збої, і покращує QoE, гарантуючи стабільність сервісів.

Методи оцінки показників QoS

Оцінка QoS у 5G включає вимірювання затримки за допомогою тестів ping чи Spirent TestCenter, які аналізують час відгуку. Пропускна здатність перевіряється інструментами, як-от iPerf. Доступність і надійність оцінюються через моніторинг у реальному часі за допомогою NMS, таких як Nokia NetAct, що виявляють збої та оптимізують мережу. Наприклад, у міському парку тестування може показати ефективність базової станції.

Таблиця 2.1 – Основні показники QoS у сценаріях використання 5G

Сценарій	Затримка	Пропускна здатність	Доступність	Надійність
eMBB	2–10 мс	До 20 Гбіт/с	99,9%	99,9%
URLLC	До 1 мс	До 1 Гбіт/с	99,999%	99,9999%
mMTC	10–50 мс	До 100 Мбіт/с	99,9%	99,9%

Таблиця 2.2 – Порівняння показників QoS у 5G і 4G

Показник	5G	4G
Затримка	1–10 мс	20–40 мс
Пропускна здатність	До 20 Гбіт/с	До 1 Гбіт/с
Доступність	99,999%	99,9%
Надійність	99,9999%	99,9%

Вплив показників QoS на якість зв'язку

Показники QoS безпосередньо впливають на QoE. Низька затримка в URLLC підтримує віддалену хірургію, висока пропускна здатність у eMBB — відео 8K, доступність — стабільність під час заходів, а надійність у mMTC — роботу IoT. Для узагальнення впливу наведено таблицю:

Таблиця 2.3 – Вплив показників QoS на QoE у мережах 5G

Показник QoS	Вплив на QoE	Приклад застосування
Затримка	Швидка реакція мережі	Автономні автомобілі, телемедицина
Пропускна здатність	Швидке завантаження контенту	Потокове відео 8K, VR
Доступність	Безперервний доступ до сервісів	Мобільні додатки на масових заходах
Надійність	Стабільна робота застосунків	IoT-сенсори в розумних містах

Показники QoS, проаналізовані в цьому розділі, є основою для забезпечення високої якості зв'язку в мережах 5G. Їхня ефективність

базується на принципах і архітектурі, розглянутих у Главі 1, що дозволяє 5G підтримувати різноманітні сценарії використання. У наступних пунктах Глави 2 буде досліджено методи оцінки цих показників і їхній практичний вплив на функціонування мережі.

2.2 QoE – методи оцінки якості користувацького досвіду

Якість обслуговування (QoS) у мережах п'ятого покоління (5G) є визначальним фактором їхньої ефективності, забезпечуючи високу продуктивність для сценаріїв eMBB (покращений мобільний широкополосний зв'язок), URLLC (наднадійний зв'язок із низькою затримкою) і mMTC (масове підключення пристроїв). У пункті 2.1 було розглянуто основні показники QoS – затримку, пропускну здатність, доступність і надійність, які прямо впливають на якість зв'язку та користувацький досвід (QoE). Однак для забезпечення цих показників необхідно точно оцінювати їх у реальних умовах. У цьому розділі проаналізовано методи оцінки QoS у 5G, включаючи інструменти, підходи до вимірювання та їхнє застосування в різних сценаріях, спираючись на принципи (пункт 1.1) і архітектуру (пункт 1.2) мереж 5G.

Основні підходи до оцінки QoS

Оцінка QoS у 5G передбачає використання комбінації активних і пасивних методів вимірювання, які дозволяють аналізувати продуктивність мережі в реальному часі або в контрольованих умовах. Активні методи включають генерацію тестового трафіку для вимірювання затримки, пропускну здатності чи втрат пакетів. Пасивні методи базуються на моніторингу реального трафіку без втручання в роботу мережі, що є ефективним для оцінки доступності та надійності [1]. Обидва підходи використовують спеціалізовані інструменти, які враховують особливості 5G,

такі як висока щільність підключень і підтримка різних сценаріїв використання.

Вимірювання затримки

Затримка є критично важливим показником для URLLC, де значення до 1 мс забезпечують миттєву реакцію мережі. Для її оцінки використовуються активні тести, такі як ring, який вимірює час передачі пакета від пристрою до сервера і назад. Спеціалізовані інструменти, наприклад, Spirent TestCenter, дозволяють проводити тести в реальних умовах, імітуючи трафік для різних сценаріїв [2]. Наприклад, під час тестування мережі в міському середовищі інженери можуть перевірити, як швидко дані передаються від базової станції gNodeB до автономного автомобіля. Пасивний моніторинг затримки здійснюється за допомогою аналізу логів мережі через системи керування, такі як Nokia NetAct, що відстежують час обробки пакетів у 5G Core.

Вимірювання пропускної здатності

Пропускна здатність, ключова для eMBB, оцінюється через активні тести швидкості передачі даних. Популярні інструменти, такі як iPerf або Keysight Nemo, генерують тестовий трафік і вимірюють обсяг даних, переданих за секунду [3]. Наприклад, під час тестування в діапазоні mmWave можна перевірити, чи досягає пропускна здатність заявлених 20 Гбіт/с для потокового відео 8K. Пасивний моніторинг пропускної здатності проводиться через аналіз трафіку в реальному часі, що дозволяє виявити перевантаження мережі, наприклад, у густонаселених районах. Технології massive MIMO і beamforming, описані в пункті 1.1, ускладнюють оцінку, оскільки пропускна здатність залежить від кількості одночасно підключених користувачів.

Вимірювання доступності

Доступність, яка в 5G досягає 99,999% для URLLC, оцінюється через пасивний моніторинг роботи мережі. Системи керування мережею (Network Management Systems, NMS), такі як Huawei iManager, відстежують час

простою базових станцій і ядра мережі [4]. Активні тести доступності проводяться шляхом періодичного надсилання контрольних сигналів для перевірки працездатності мережі. Наприклад, у розумних містах доступність мережі можна оцінити, перевіряючи стабільність зв'язку для IoT-сенсорів. Віртуалізація 5G Core, розглянута в пункті 1.2, дозволяє швидко відновлювати роботу мережі, що ускладнює оцінку, але підвищує загальну доступність.

Вимірювання надійності

Надійність, що досягає 99,9999% у URLLC, оцінюється через аналіз втрат пакетів і помилок передачі. Активні тести надійності проводяться за допомогою інструментів, таких як IXIA IxNetwork, які генерують трафік і вимірюють частку успішно доставлених пакетів [2]. Пасивний моніторинг надійності здійснюється через аналіз логів мережі, що дозволяє виявити причини втрат, наприклад, перешкоди в діапазоні mmWave. У сценарії mMTC надійність оцінюється шляхом перевірки стабільності зв'язку для тисяч IoT-пристроїв, наприклад, датчиків у системах розумного будинку.

Практичне застосування методів оцінки

Методи оцінки QoS застосовуються для оптимізації мережі та забезпечення стабільної роботи в реальних умовах. Наприклад, під час розгортання 5G у центрі Києва оператори можуть використовувати Spirent TestCenter для тестування затримки в URLLC, щоб гарантувати надійність для автономних транспортних засобів. У торгових центрах iPerf допомагає оцінити пропускну здатність для eMBB, забезпечуючи швидке завантаження відео для сотень користувачів. NMS, такі як Nokia NetAct, використовуються для моніторингу доступності та надійності в розумних містах, де IoT-пристрої потребують стабільного зв'язку. Ці методи дозволяють операторам виявляти проблеми, такі як перевантаження базових станцій, і оптимізувати ресурси за допомогою network slicing.

Таблиця 2.4 - Методи оцінки QoS у 5G

Показник QoS	Метод оцінки	Інструмент	Тип вимірювання
Затримка	Тести ping, аналіз логів	Spirent TestCenter, Nokia NetAct	Активний/Пасивний
Пропускна здатність	Тести швидкості, моніторинг трафіку	iPerf, Keysight Nemo	Активний/Пасивний
Доступність	Моніторинг простоїв, контрольні сигнали	Huawei iManager	Пасивний/Активний
Надійність	Аналіз втрат пакетів	IXIA IxNetwork	Активний/Пасивний

Порівняння методів оцінки

Різні методи оцінки QoS мають свої переваги та обмеження. Активні тести, такі як ping або iPerf, забезпечують високу точність, але можуть створювати додаткове навантаження на мережу. Пасивний моніторинг через NMS є менш інвазивним, але менш деталізованим, оскільки залежить від реального трафіку. Для комплексної оцінки оператори поєднують обидва підходи, використовуючи активні тести для початкового налаштування мережі та пасивний моніторинг для постійного контролю. Наприклад, у сценарії URLLC активні тести забезпечують точне вимірювання затримки, тоді як NMS відстежує доступність у реальному часі.

Таблиця 2.5 - Переваги та обмеження методів оцінки QoS

Метод	Переваги	Обмеження	Застосування
Активні тести	Висока точність, контрольовані умови	Навантаження на мережу	Тестування URLLC, eMBB
Пасивний моніторинг	Низьке втручання, реальний трафік	Менша деталізація	Моніторинг mMTC, доступності

Методи оцінки QoS, розглянуті в цьому розділі, є важливим інструментом для забезпечення високої якості зв'язку в 5G. Їхня ефективність спирається на принципи (пункт 1.1) і архітектуру (пункт 1.2), що дозволяють 5G перевершувати попередні покоління (пункт 1.3). У

наступних пунктах Глави 2 буде проаналізовано практичне застосування цих методів у конкретних сценаріях використання 5G.

2.3 Вплив технологій 5G на якість зв'язку

Мережі п'ятого покоління (5G) забезпечують якісно новий рівень телекомунікаційних послуг завдяки інноваційним технологіям, які дозволяють досягти високої швидкості, низької затримки та стабільного зв'язку. Як було розглянуто в Главі 1, принципи побудови 5G (пункт 1.1), їхня архітектура (пункт 1.2) та переваги порівняно з попередніми поколіннями (пункт 1.3) створюють основу для реалізації цих можливостей. У пункті 2.1 проаналізовано основні показники якості обслуговування (QoS) – затримку, пропускну здатність, доступність і надійність, а в пункті 2.2 – методи їх оцінки. Ключовими технологіями, які визначають якість зв'язку в 5G, є масивна множинна вхідно-вихідна передача (massive MIMO), міліметрові хвилі (mmWave) і сегментація мережі (network slicing). Ці технології безпосередньо впливають на показники QoS і, як наслідок, на якість користувацького досвіду (QoE) у різних сценаріях використання, таких як eMBB (покращений мобільний широкопasmовий зв'язок), URLLC (наднадійний зв'язок із низькою затримкою) і mMTC (масове підключення пристроїв). У цьому розділі детально розглянуто вплив зазначених технологій на якість зв'язку, їхні технічні особливості, практичне застосування та переваги порівняно з попередніми поколіннями.

Масивна множинна вхідно-вихідна передача (massive MIMO)

Масивна множинна вхідно-вихідна передача (massive MIMO) є однією з ключових технологій 5G, яка значно підвищує якість зв'язку через ефективне використання радіочастотного спектра. На відміну від традиційних систем MIMO, що використовувалися в 4G із 2–8 антенами, massive MIMO у 5G застосовує до 256 антен на базовій станції gNodeB, що

дозволяє одночасно обслуговувати велику кількість користувачів [1]. Ця технологія, підкріплена спрямованим передаванням сигналу (beamforming), фокусує радіохвилі на конкретних пристроях, зменшуючи перешкоди та підвищуючи ефективність.

Для ілюстрації роботи massive MIMO наведено схему базової станції з масивною антеною (див. Мал. 1). На зображенні показано, як базова станція з M -антенами передає та приймає до K потоків даних (Data Stream 1 до K) між собою та терміналами (Terminal 1 до K) через uplink (сині стрілки) і downlink (червоні стрілки) канали, використовуючи обробку CSI (Channel State Information) для оптимального спрямування сигналів.

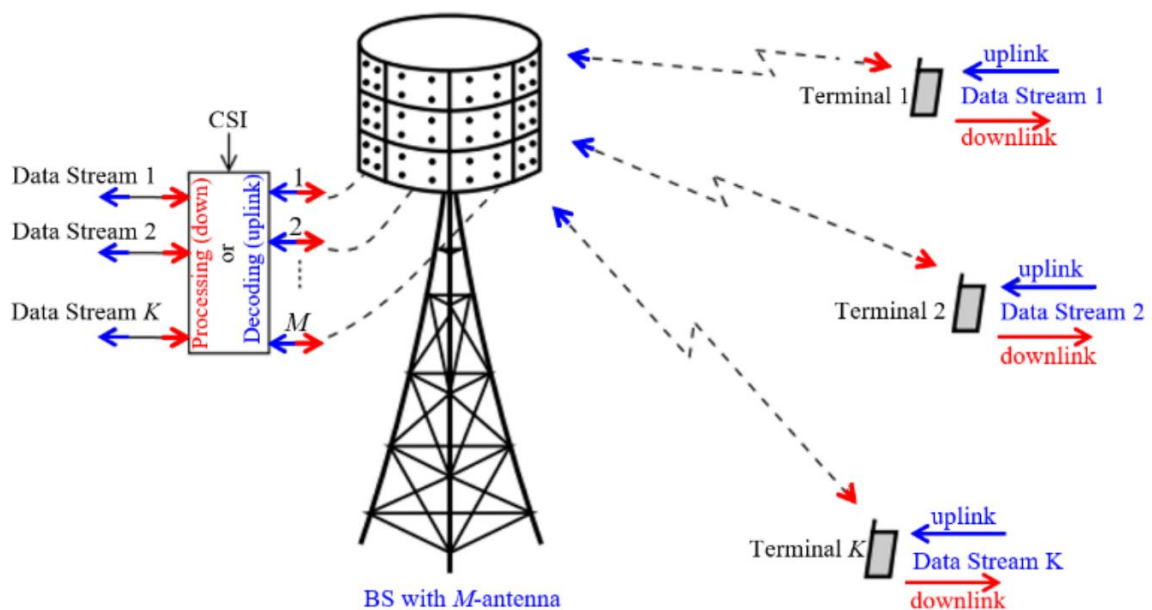


Рисунок 2.1 – ілюстрація роботи massive MIMO

Вплив на QoS

Massive MIMO суттєво покращує пропускну здатність і надійність мережі. Завдяки множинним антенам базова станція може передавати дані кільком користувачам одночасно, що збільшує пропускну здатність до 1–2 Гбіт/с у діапазоні sub-6 GHz і до 20 Гбіт/с у mmWave (пункт 2.1). Наприклад, у сценарії eMBB massive MIMO дозволяє сотням користувачів у торговому центрі одночасно переглядати потокове відео у форматі 8K без втрати якості.

Надійність підвищується через зменшення перешкод, що забезпечує стабільну передачу даних навіть у густонаселених районах.

Затримка також зменшується завдяки ефективному управлінню трафіком, оскільки beamforming дозволяє швидко спрямовувати сигнали до окремих пристроїв. У сценарії URLLC це забезпечує затримку до 1 мс, що критично для застосунків реального часу, таких як автономне керування транспортними засобами. Доступність мережі покращується через здатність massive MIMO підтримувати стабільний зв'язок у складних умовах, наприклад, у міських каньйонах, де сигнали відбиваються від будівель.

Додатковим аспектом є адаптивність massive MIMO до змін у середовищі. Технологія використовує динамічне налаштування променів (dynamic beamforming), що дозволяє реагувати на рух користувачів чи зміни в щільності трафіку. Наприклад, під час пікових навантажень у метро Києва система може перерозподілити ресурси, щоб уникнути перевантаження. Це забезпечує стабільність QoS навіть у високодинамічних умовах, що є недоступним для 4G через обмеження кількості антен.

Практичне застосування

У реальних умовах massive MIMO використовується для забезпечення високої якості зв'язку в густонаселених районах. Наприклад, під час масового заходу в центрі Києва, такого як концерт, massive MIMO дозволяє базовій станції gNodeB обслуговувати тисячі смартфонів, забезпечуючи швидке завантаження контенту та стабільний зв'язок. У промислових сценаріях massive MIMO підтримує надійну передачу даних для керування роботами на автоматизованих заводах, що підвищує QoE для операторів.

Крім того, massive MIMO активно застосовується в розумних містах для забезпечення зв'язку з IoT-пристроями. Наприклад, у Київському метрополітені технологія може підтримувати безперервний зв'язок для сенсорів, які моніторять стан вагонів, забезпечуючи безпеку пасажирів. Така

адаптивність робить massive MIMO незамінною для сценаріїв, де потрібна висока щільність підключень, що перевищує можливості 4G.

Міліметрові хвилі (mmWave)

Міліметрові хвилі (mmWave) – це частотний діапазон 24–100 ГГц, який є унікальною особливістю 5G, що дозволяє досягти надвисокої пропускної здатності. На відміну від діапазону sub-6 GHz, який забезпечує широке покриття, mmWave має менший радіус дії (100–200 м) через високу чутливість до перешкод, таких як стіни чи дерева [2]. Однак саме mmWave забезпечує пікові швидкості передачі даних, що робить її незамінною для сценарію eMBB.

Вплив на QoS

Основний вплив mmWave проявляється в пропускній здатності, яка досягає 20 Гбіт/с, що значно перевищує можливості 4G (до 1 Гбіт/с із LTE-Advanced). Це дозволяє користувачам завантажувати великі обсяги даних, наприклад, фільм у форматі 8K за секунди, або запускати AR/VR-додатки з високою деталізацією. У сценарії eMBB mmWave забезпечує високу якість зв'язку в обмежених зонах, таких як стадіони чи аеропорти.

Затримка у mmWave зменшується завдяки великій смузі пропускання, яка дозволяє швидко обробляти дані. У сценарії URLLC затримка до 1 мс підтримує застосунки реального часу, наприклад, віддалену хірургію. Однак доступність і надійність mmWave обмежені через малий радіус покриття та чутливість до перешкод. Для компенсації потрібне щільне встановлення малих базових станцій (small cells), як зазначено в пункті 1.2, що забезпечує стабільність у міських районах.

Однак mmWave також має унікальну перевагу в контексті спектральної ефективності. Завдяки великій кількості доступних частот у діапазоні 24–100 ГГц оператори можуть уникнути перевантаження, що є проблемою для нижчих діапазонів у 4G. Наприклад, у центрі Києва, де традиційні частоти

перевантажені, mmWave дозволяє розподілити трафік між кількома каналами, підвищуючи загальну якість зв'язку.

Практичне використання

У реальних умовах mmWave застосовується в місцях із високою концентрацією користувачів. Наприклад, у київському аеропорту «Бориспіль» mmWave може забезпечити швидкісний доступ до мережі для пасажирів, які завантажують мультимедійний контент. У розумних містах mmWave використовується для передачі даних із камер відеоспостереження високої роздільної здатності, що покращує безпеку. Проте обмеження покриття вимагають комбінації з sub-6 GHz для забезпечення стабільності зв'язку.

Крім того, mmWave активно тестується в технологіях майбутнього, таких як голографічні дзвінки. У пілотних проектах у великих містах, наприклад, у Нью-Йорку, mmWave дозволила передавати голограми в реальному часі, що може стати реальністю в Україні з розширенням інфраструктури 5G. Це демонструє потенціал mmWave для подальшого підвищення QoE.

Сегментація мережі (network slicing)

Сегментація мережі (network slicing) – це технологія, яка дозволяє створювати віртуальні сегменти мережі на одній фізичній інфраструктурі, кожен із яких оптимізований для конкретного сценарію використання. Як зазначено в пункті 1.1, network slicing використовує програмно-визначувані мережі (SDN) і віртуалізацію мережевих функцій (NFV) для гнучкого розподілу ресурсів [3]. Ця технологія є унікальною для 5G і значно підвищує якість зв'язку.

Вплив на QoS

Сегментація мережі впливає на всі показники QoS, дозволяючи адаптувати мережу до потреб різних сценаріїв. У сценарії eMBB network slicing виділяє сегмент із високою пропускнуою здатністю для мультимедійних сервісів, таких як потокове відео, що забезпечує швидке завантаження та плавне відтворення. У URLLC сегмент із низькою затримкою (до 1 мс) і високою надійністю (99,9999%) підтримує критично важливі критичні застосунки, наприклад, автономне керування. У mMTC сегмент із низькою пропускнуою здатністю, але високою доступністю забезпечує підключення тисяч IoT-пристроїв, таких як сенсори в розумних містах.

Затримка зменшується завдяки ізоляції трафіку, що запобігає перевантаженням. Пропускна здатність оптимізується шляхом виділення ресурсів для конкретних сервісів. Доступність і надійність підвищуються через ізольоване управління сегментами, що дозволяє уникнути збоїв. Наприклад, у разі перевантаження в сегменті eMBB сегмент URLLC залишиться стабільним, що критично для безпеки.

Сегментація також дозволяє операторам адаптувати мережу до сезонних навантажень. Наприклад, під час новорічних свят у Києві сегмент для потокового відео (eMBB) може бути розширений, тоді як сегмент для IoT (mMTC) залишиться стабільним, забезпечуючи моніторинг вуличного освітлення.

Практичне застосування

У реальних умовах network slicing використовується для підтримки різноманітних сервісів. Наприклад, у розумному місті Київ оператор може створити сегмент для IoT-сенсорів (mMTC), що контролюють дорожній рух, сегмент для автономних автобусів (URLLC) і сегмент для потокового відео (eMBB). Це забезпечує високу якість зв'язку для кожного сервісу, покращуючи QoE для користувачів і міських служб.

Network slicing також застосовується в освіті. У Київському національному університеті імені Тараса Шевченка сегменти можуть бути створені для студентів (eMBB для лекцій у реальному часі), дослідників (URLLC для експериментів) і адміністративних систем (mMTC для датчиків у кампусі), що підвищує ефективність використання мережі.

Порівняння впливу технологій на якість зв'язку в 5G і 4G

Для оцінки переваг 5G порівнюємо вплив технологій на якість зв'язку з 4G. У 4G традиційні MIMO із 2–8 антенами забезпечують пропускну здатність до 1 Гбіт/с, але не можуть підтримувати велику кількість користувачів, що знижує QoS у густонаселених районах. У 5G massive MIMO збільшує пропускну здатність і надійність, покращуючи якість зв'язку. Діапазон mmWave відсутній у 4G, де використовуються частоти до 6 ГГц, що обмежує швидкість до 300 Мбіт/с у стандартних умовах. У 5G mmWave забезпечує пікові швидкості, але потребує малих сот. Сегментація мережі є унікальною для 5G, тоді як 4G не підтримує ізоляцію трафіку, що призводить до перевантажень і зниження QoS.

Таблиця 2.6 - Вплив технологій 5G на показники QoS

Технологія	Затримка	Пропускна здатність	Доступність	Надійність
Massive MIMO	Зменшує (до 1 мс у URLLC)	Збільшує (до 20 Гбіт/с)	Покращує в густонаселених зонах	Підвищує через beamforming
mmWave	Зменшує (до 1 мс)	Значно збільшує (до 20 Гбіт/с)	Обмежена через малий радіус	Залежить від покриття
Network slicing	Зменшує в ізольованих сегментах	Оптимізує для сервісів	Покращує через ізоляцію	Підвищує для критичних задач

Практичні приклади впливу технологій

Для ілюстрації розглянемо приклади. У сценарії eMBB massive MIMO і mmWave забезпечують високу пропускну здатність для студентів КПІ, які переглядають лекції у форматі 8K на кампусі, тоді як network slicing ізолює їхній трафік від інших сервісів, гарантуючи стабільність. У URLLC mmWave і network slicing підтримують низьку затримку для віддаленої хірургії в київській клініці, а massive MIMO забезпечує надійність зв'язку. У mMTC network slicing і massive MIMO дозволяють тисячам IoT-сенсорів у розумному місті передавати дані про дорожній рух без збоїв, покращуючи QoE для водіїв.

Таблиця 2.7 - Застосування технологій 5G у сценаріях

Сценарій	Технологія	Вплив на якість зв'язку	Приклад
eMBB	Massive MIMO, mmWave	Висока пропускну здатність	Потокове відео 8K
URLLC	mmWave, network slicing	Низька затримка, висока надійність	Віддалена хірургія
mMTC	Network slicing, massive MIMO	Висока доступність	IoT-сенсори в розумних містах

Технології massive MIMO, mmWave і network slicing є основою для забезпечення високої якості зв'язку в 5G. Їхній вплив на QoS (затримка, пропускну здатність, доступність, надійність) і QoE створює нові можливості для користувачів і бізнесу

Висновки до розділу 2

Другий розділ присвячений аналізу якості зв'язку в мережах 5G, зокрема показників QoS, методів їх оцінки та впливу ключових технологій. Дослідження розкриває, як технічні характеристики 5G покращують якість

зв'язку та користувацький досвід (QoE), формуючи основу для подальшого вивчення реалізації 5G.

У пункті 2.1 розглянуто показники QoS: затримка (до 1 мс у URLLC), пропускна здатність (до 20 Гбіт/с у mmWave), доступність (99,999%) і надійність (99,9999%). Ці показники забезпечують стабільну роботу мережі в сценаріях eMBB, URLLC і mMTC, перевершуючи 4G і підвищуючи QoE для застосунків, таких як потокове відео 8K чи автономне керування.

Пункт 2.2 описує методи оцінки QoS. Активні методи (тести ping, iPerf, Spirent TestCenter) вимірюють затримку та пропускну здатність, а пасивні (моніторинг через Nokia NetAct) відстежують доступність і надійність. Поєднання підходів дозволяє виявляти перевантаження та забезпечувати стабільний QoS для різних сценаріїв, що підтверджує їхню важливість для 5G.

У пункті 2.3 проаналізовано вплив технологій 5G: massive MIMO (до 256 антен) підвищує пропускну здатність і надійність, mmWave забезпечує швидкість до 20 Гбіт/с для eMBB, а network slicing оптимізує мережу для різних сценаріїв, зменшуючи затримку та підвищуючи доступність. Порівняно з 4G, ці технології значно покращують QoS і QoE, наприклад, у телемедицині чи розумних містах.

Результати показують, що якість зв'язку в 5G залежить від взаємодії показників QoS, методів оцінки та технологій massive MIMO, mmWave і network slicing. Це забезпечує стабільність мережі та високий QoE, створюючи базу для аналізу практичних аспектів розгортання 5G у наступних розділах

3 АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЯКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ В МЕРЕЖАХ 5G

3.1 Методи вимірювання та моніторингу показників якості 5G

Мережі п'ятого покоління (5G) представляють значний крок вперед у розвитку телекомунікаційних технологій, забезпечуючи високу пропускну здатність, низьку затримку та підтримку великої кількості підключених пристроїв, як було розглянуто в Главі 1 (пункти 1.1–1.3). У Главі 2 проаналізовано основні показники якості обслуговування (QoS) – затримку, пропускну здатність, доступність і надійність (пункт 2.1), методи їх оцінки (пункт 2.2) та вплив ключових технологій 5G, таких як massive MIMO, міліметрові хвилі (mmWave) і сегментація мережі (network slicing), на якість зв'язку (пункт 2.3). Однак ефективність 5G залежить від здатності операторів точно вимірювати та моніторити ці показники в реальних умовах, щоб гарантувати стабільну роботу мережі та високу якість користувацького досвіду (QoE). Методи вимірювання та моніторингу QoS у 5G є критично важливими для виявлення проблем, оптимізації ресурсів і забезпечення відповідності мережі вимогам сценаріїв eMBB (покращений мобільний широкосмуговий зв'язок), URLLC (наднадійний зв'язок із низькою затримкою) і mMTC (масове підключення пристроїв). Цей розділ присвячений детальному аналізу цих методів, включаючи інструменти, підходи, їхнє практичне застосування та виклики, пов'язані з моніторингом 5G.

Якість зв'язку в 5G оцінюється через показники QoS, які безпосередньо впливають на QoE, як зазначено в пункті 2.3. Затримка, що становить до 1 мс у сценарії URLLC, є ключовою для застосунків реального часу, таких як автономне керування чи телемедицина. Пропускна здатність до 20 Гбіт/с у діапазоні mmWave забезпечує швидке завантаження даних для eMBB, наприклад, потокового відео у форматі 8K. Доступність на рівні 99,999% і надійність до 99,9999% гарантують стабільну роботу мережі для критично важливих сервісів і IoT-пристроїв у mMTC. Для вимірювання та моніторингу

цих показників використовуються активні та пасивні методи, які дозволяють оцінити продуктивність мережі в контрольованих і реальних умовах. Активні методи передбачають генерацію тестового трафіку для вимірювання затримки чи пропускної здатності, тоді як пасивні методи базуються на аналізі реального трафіку для моніторингу доступності та надійності [1]. Поєднання цих підходів забезпечує комплексну оцінку QoS, що є необхідним для підтримки високої якості зв'язку.

Одним із найпоширеніших активних методів вимірювання затримки є тест ring, який визначає час передачі пакета від пристрою до сервера і назад. У 5G цей метод адаптовано для сценарію URLLC, де затримка до 1 мс є критичною. Наприклад, під час тестування мережі в міському середовищі, такому як центр Києва, інженери можуть використовувати ring для перевірки швидкості реакції мережі для автономного транспорту. Спеціалізовані інструменти, такі як Spirent TestCenter, дозволяють проводити точні тести, імітуючи трафік для різних сценаріїв. Ці інструменти генерують пакети даних із заданими параметрами, наприклад, розміром чи частотою, і вимірюють час їхньої доставки, що дає змогу оцінити затримку в реальних умовах. У сценарії eMBB Spirent TestCenter може перевірити, чи забезпечує мережа затримку 2–10 мс для VR-додатків, що прямо впливає на QoE користувачів.

Пропускна здатність вимірюється за допомогою активних тестів швидкості, які генерують великий обсяг трафіку для оцінки максимальної пропускної здатності мережі. Інструменти, такі як iPerf або Keysight Nemo, широко застосовуються для цих цілей. Наприклад, у діапазоні mmWave, де пропускна здатність досягає 20 Гбіт/с, iPerf може імітувати передачу великих файлів, таких як відео 8K, щоб перевірити, чи мережа відповідає заявленим характеристикам. У реальних умовах, наприклад, у київському аеропорту «Бориспіль», такі тести дозволяють операторам переконатися, що пасажери можуть швидко завантажувати контент. Пасивний моніторинг пропускної здатності здійснюється через аналіз реального трафіку, що допомагає

виявити перевантаження мережі в густонаселених районах, наприклад, під час масових заходів. Системи керування мережею (Network Management Systems, NMS), такі як Huawei iManager, відстежують обсяг переданих даних у реальному часі, що дозволяє операторам оптимізувати ресурси.

Доступність мережі, яка в 5G досягає 99,999% для URLLC, оцінюється переважно пасивними методами через моніторинг часу простою базових станцій gNodeB і ядра мережі (5G Core). NMS, такі як Nokia NetAct, аналізують журнали мережі, щоб виявити збої чи втрати зв'язку. Наприклад, у розумному місті моніторинг доступності може перевірити, чи IoT-сенсори для контролю дорожнього руху працюють безперервно. Активні тести доступності включають періодичне надсилання контрольних сигналів, щоб переконатися, що мережа залишається працездатною. У сценарії eMBB, наприклад, у торговому центрі, такі тести гарантують, що користувачі мають стабільний доступ до мережі навіть під час пікових навантажень. Віртуалізація 5G Core, розглянута в пункті 1.2, ускладнює моніторинг, оскільки ресурси динамічно перерозподіляються, але NMS адаптовані для роботи з такими архітектурами.

Надійність, що становить 99,9999% у URLLC, вимірюється через аналіз втрат пакетів і помилок передачі. Активні тести надійності проводяться за допомогою інструментів, таких як IXIA IxNetwork, які генерують трафік і підраховують частку успішно доставлених пакетів [2]. Наприклад, у промислових сценаріях, таких як автоматизоване виробництво, IXIA IxNetwork може перевірити, чи передаються дані для керування роботами без втрат. Пасивний моніторинг надійності базується на аналізі логів мережі, що дозволяє виявити причини втрат, наприклад, перешкоди в діапазоні mmWave. У сценарії mMTC, де тисячі IoT-пристроїв передають невеликі обсяги даних, моніторинг надійності забезпечує стабільну роботу сенсорів, наприклад, для моніторингу якості повітря в розумних містах.

Практичне застосування методів вимірювання та моніторингу QoS у 5G демонструє їхню ефективність у реальних умовах. Наприклад, у сценарії

eMBB оператори можуть використовувати iPerf для тестування пропускної здатності в густонаселеному районі, такому як Хрещатик у Києві, щоб гарантувати швидке завантаження мультимедійного контенту для сотень користувачів.

3.2 Способи підвищення якості зв'язку за допомогою штучного інтелекту

Мережі п'ятого покоління (5G) забезпечують якісно новий рівень телекомунікаційних сервісів завдяки своїм принципам, архітектурі та порівняльним перевагам, розглянутим у Главі 1. У Главі 2 детально проаналізовано показники якості обслуговування (QoS) – затримку, пропускну здатність, доступність і надійність (пункт 2.1), методи їх оцінки, такі як активні та пасивні підходи, включаючи використання інструментів iPerf і систем Nokia NetAct (пункт 2.2), а також вплив ключових технологій 5G, зокрема massive MIMO, міліметрових хвиль (mmWave) і сегментації мережі (network slicing), на якість зв'язку (пункт 2.3). У Главі 3 пункт 3.1 розкрив методи вимірювання та моніторингу QoS, підкресливши важливість забезпечення стабільності мережі для різноманітних сценаріїв використання. Одним із найперспективніших підходів до підвищення якості зв'язку в 5G є використання штучного інтелекту (AI), який дозволяє оптимізувати QoS-показники – затримку, пропускну здатність, доступність і надійність – для сценаріїв eMBB (покращений мобільний широкосмуговий зв'язок), URLLC (наднадійний зв'язок із низькою затримкою) і mMTC (масове підключення пристроїв). Цей розділ досліджує, як AI інтегрується в архітектуру 5G, впливає на якість зв'язку, реалізується на технічному рівні, застосовується в практичних сценаріях, стикається з викликами та відкриває перспективи розвитку, спираючись на надану схему інтеграції AI у мережу 5G.

Інтеграція штучного інтелекту в мережі 5G дозволяє вирішувати проблему динамічного трафіку, з якою не справляються традиційні методи,

такі як статичне виділення ресурсів, що використовувалося в мережах 4G. AI забезпечує автоматизацію, прогнозування та адаптацію мережі в реальному часі, що є критично важливим для підтримки високих вимог до QoS у 5G: затримки до 1 мс у URLLC, пропускної здатності до 20 Гбіт/с у eMBB і підключення до 1 млн пристроїв/км² у mMTC. Як показано на схемі (Мал. 1), AI інтегрується на різних рівнях архітектури 5G, що включає п'ять основних компонентів: джерела даних (Data Sources), мережі доступу (Access Networks), інфраструктуру (Infrastructure), крайові обчислення AI (AI Edge) і ядро AI (AI Core).

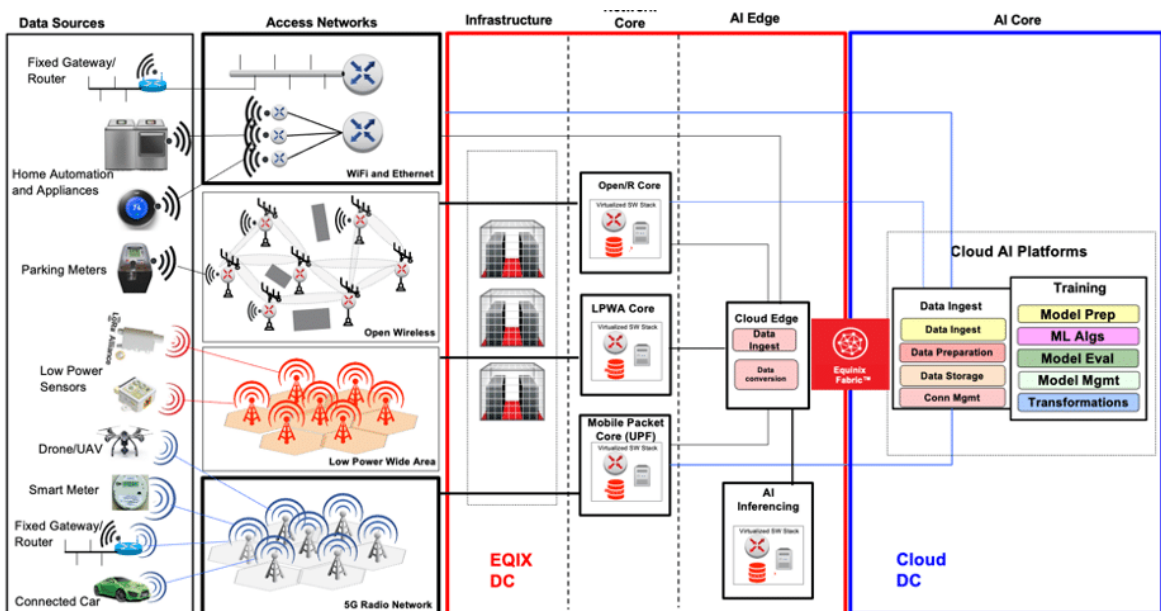


Рисунок 3.1 - схема інфраструктури з використанням ШІ для керування мережею

Джерела даних, як показано на схемі (Мал. 1), включають широкий спектр пристроїв: розумні лічильники (Smart Meters), підключені автомобілі (Connected Cars), дрони (Drones/UAV), паркувальні лічильники (Parking Meters), датчики з низьким енергоспоживанням (Low Power Sensors) і системи домашньої автоматизації (Home Automation). У розумному місті Київ, наприклад, датчики якості повітря, сенсори дорожнього руху чи

паркувальні лічильники генерують величезні обсяги даних, які потребують швидкої обробки для забезпечення стабільної роботи мережі в сценарії mMTC. Ці дані передаються через мережі доступу, які включають WiFi, Ethernet, мережі з низьким енергоспоживанням (Low Power Wide Area) і 5G Radio Network із базовими станціями gNodeB. 5G Radio Network відіграє ключову роль, забезпечуючи високу пропускну здатність (до 20 Гбіт/с у mmWave) і низьку затримку (до 1 мс у URLLC), що необхідно для eMBB і URLLC. У практичному сценарії, наприклад, в аеропорту «Бориспіль», 5G Radio Network підтримує зв'язок для пасажирів, які переглядають потокове відео (eMBB), і для систем безпеки, що потребують миттєвої реакції (URLLC).

Далі дані надходять до інфраструктури, яка включає ядро 5G Core і апаратне забезпечення. На схемі (Мал. 1) зображено OpenAirInterface NR Core – віртуалізоване ядро 5G, uLPWA Core для підтримки IoT-пристроїв, і Mobile Packet Core (UPF), що відповідає за передачу даних користувача. UPF забезпечує стабільність у сценарії eMBB, наприклад, у торговому центрі в Києві, де сотні користувачів одночасно переглядають потокове відео 8K. Центр обробки даних (EIQIX DC) надає обчислювальні ресурси для обробки даних перед їхньою передачею до AI Edge. AI Edge виконує попередню обробку даних і інференс AI, що дозволяє зменшити затримку шляхом локальної обробки. Наприклад, у телемедицині в розумній клініці в Києві AI Edge на базовій станції gNodeB аналізує дані від хірургічного обладнання в реальному часі, забезпечуючи затримку до 1 мс у URLLC. AI Edge включає модулі Cloud Edge для введення даних (Ingest), конвертації (Convert) і підготовки наборів даних (Dataset Conversion), що оптимізує обробку перед передачею до хмари.

Ядро AI (AI Core), розташоване в хмарі, як показано на схемі (Мал. 1), відповідає за глибоку обробку даних. Воно включає Cloud AI Platforms із модулями введення даних (Data Ingest), підготовки даних (Data Preparation), зберігання (Data Storage), управління підключеннями (Conn Mgmt),

трансформації даних (Transformations) і тренування моделей (Training). Під час тренування використовуються модулі підготовки моделей (Model Prep), ML-алгоритми (ML Algs) і оцінка моделей (Model Eval). Наприклад, AI Core може тренувати нейронну мережу для прогнозування трафіку в розумному місті, а потім передати модель на AI Edge для інференсу, що дозволяє оптимізувати частоти в 5G Radio Network. У сценарії eMBB у центрі Києва AI Core передбачає зростання трафіку під час масового заходу, такого як концерт на Хрещатику, а AI Edge перенаправляє частоти для забезпечення пропускну здатності до 20 Гбіт/с.

Технічно AI у 5G базується на технологіях машинного навчання (ML), глибокого навчання (DL) і обробки природної мови (NLP), які розподілені між AI Edge і AI Core. На AI Core ML-алгоритми, такі як регресійні моделі чи нейронні мережі, тренуються на історичних даних про трафік для прогнозування навантажень. У торговому центрі в Києві, наприклад, AI Core може передбачити зростання трафіку під час обідньої перерви, коли відвідувачі активно використовують потокові сервіси, і передати прогноз на AI Edge, який оптимізує частоти в 5G Radio Network для забезпечення стабільної роботи мережі. Алгоритми Q-learning застосовуються на AI Edge для вибору оптимальних маршрутів передачі даних, що зменшує затримку до 1 мс у URLLC. Наприклад, у розумній транспортній системі в Києві AI Edge може визначити найкоротший шлях для передачі даних від автономного автомобіля, забезпечуючи миттєву реакцію на дорожні умови. Для виявлення аномалій AI Core використовує алгоритми кластеризації, такі як DBSCAN, щоб ідентифікувати DDoS-атаки чи збої в мережі. У промислових сценаріях, наприклад, на заводах у Дніпрі, AI Edge прогнозує збої в OpenAirInterface NR Core, перенаправляючи сигнали через sub-6 GHz у разі перешкод у mmWave, що підвищує надійність до 99,9999%.

Вплив AI на показники QoS є багатогранним. Затримка в URLLC зменшується до 1 мс завдяки локальній обробці на AI Edge. Наприклад, у телемедицині в розумній клініці в Києві AI Edge аналізує дані від

хірургічного обладнання в реальному часі, забезпечуючи миттєву передачу зображень для віддаленої хірургії. AI Core, зі свого боку, тренує моделі для прогнозування перевантажень, що дозволяє уникнути затримок у критичних сценаріях, таких як автономне керування. Пропускна здатність у eMBB зростає до 20 Гбіт/с у mmWave завдяки оптимізації частот на AI Edge. У аеропорту «Бориспіль» AI Edge перенаправляє частоти до зон із високим навантаженням, наприклад, під час прильоту кількох рейсів, дозволяючи пасажиром переглядати потокове відео 8K без перебоїв. Доступність мережі підвищується до 99,999% завдяки прогнозуванню збоїв на AI Core. Наприклад, у розумному місті AI Core може передбачити перевантаження мережі під час масового заходу і передати рекомендації на AI Edge для перенаправлення трафіку через uLPWA Core для IoT-пристроїв, таких як датчики моніторингу дорожнього руху. Надійність досягає 99,9999% через виявлення аномалій і адаптацію сигналів. У промислових автоматичних системах, наприклад, на заводах у Запоріжжі, AI Edge перенаправляє сигнали з mmWave на sub-6 GHz у разі перешкод, забезпечуючи безперервну роботу роботів.

Практичні приклади демонструють, як AI підвищує якість зв'язку в різних сценаріях. У розумному місті Барселона AI Edge обробляє дані від паркувальних лічильників і датчиків дорожнього руху, оптимізуючи маршрути для автомобілів і зменшуючи навантаження на мережу. Подібний підхід може бути застосовано в Києві для управління трафіком на Хрещатику, де датчики передають дані через Low Power Wide Area, а AI Edge аналізує їх для прогнозування заторів. У Німеччині AI Core прогнозує збої в OpenAirInterface NR Core на заводах із виробництва електроніки, зменшуючи простої на 30%. В Україні це може бути реалізовано на заводах у Дніпрі, де AI Edge підтримує автоматизацію, обробляючи дані від промислових роботів через 5G Radio Network, а AI Core тренує моделі для прогнозування збоїв у базових станціях gNodeB. У Кембриджському університеті AI Edge забезпечує пропускну здатність для онлайн-лекцій у форматі 8K, дозволяючи

студентам отримувати якісний контент без затримок. Аналогічно, у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка AI може підтримувати дистанційне навчання, прогнозуючи пікові навантаження під час сесій і оптимізуючи частоти для студентів. У аеропорту «Бориспіль» AI Edge оптимізує частоти для пасажирів, які переглядають потокове відео, а AI Core тренує моделі для управління трафіком під час прильоту рейсів, забезпечуючи стабільну пропускну здатність.

Порівняно з традиційними методами, такими як статичне виділення ресурсів у 4G, AI у 5G має значні переваги. У 4G затримка становила 20–40 мс, а пропускну здатність – до 1 Гбіт/с, що було недостатньо для сучасних сценаріїв, таких як потокове відео 8K чи автономне керування. AI у 5G, завдяки розподіленій обробці на AI Edge і AI Core, забезпечує затримку до 1 мс і пропускну здатність до 20 Гбіт/с. Традиційні методи покладаються на ручний аналіз логів для виявлення збоїв, що може займати години, тоді як AI Core автоматизує цей процес, реагуючи за секунди. Наприклад, у 4G виявлення DDoS-атаки вимагало значного часу, що призводило до перебоїв у роботі мережі, тоді як у 5G AI Edge ізолює уражену частину мережі миттєво, підвищуючи надійність. У промислових сценаріях, таких як автоматизація на заводах, традиційні методи не могли адаптуватися до перешкод у передачі сигналів, тоді як AI Edge у 5G автоматично перенаправляє сигнали через альтернативні діапазони, забезпечуючи безперервність роботи.

Таблиця 3.1 - Порівняння AI з традиційними методами

Параметр	Традиційні методи	AI у 5G
Розподіл ресурсів	Статичний	Динамічний
Виявлення збоїв	Ручний аналіз	Автоматизоване (AI Core)
Затримка	20–40 мс (4G)	До 1 мс (URLLC)
Пропускна здатність	До 1 Гбіт/с (4G)	До 20 Гбіт/с (mmWave)

Окрім технічних переваг, AI також позитивно впливає на якість користувацького досвіду (QoE). У сценарії eMBB, наприклад, у торговому центрі в Києві, AI Edge забезпечує швидке завантаження відео 8K, що підвищує задоволеність користувачів. У URLLC, у розумній клініці в Києві, низька затримка і висока надійність, забезпечені AI, дозволяють хірургам проводити віддалені операції без ризиків, що підвищує довіру до технології. У mMTC, у розумному місті, AI забезпечує безперебійну роботу IoT-сенсорів, таких як датчики якості повітря, що покращує якість життя мешканців. У промислових сценаріях, наприклад, на заводах у Харкові, AI Edge і AI Core зменшують простои, підвищуючи ефективність виробництва, що позитивно впливає на економічні показники підприємства.

Незважаючи на численні переваги, впровадження AI у 5G стикається з низкою викликів. Перший виклик – потреба в значних обчислювальних ресурсах. Тренування моделей на AI Core, особливо з використанням глибокого навчання (DL), вимагає потужних GPU-серверів, що збільшує витрати операторів. Розгортання серверів на AI Edge для локальної обробки даних також потребує інвестицій у щільне покриття базовими станціями gNodeB, що є економічним бар'єром, як зазначено в пункті 3.1. Наприклад, в Україні, де розгортання 5G ще на початковому етапі, оператори можуть зіткнутися з обмеженим бюджетом для встановлення таких серверів, що уповільнить впровадження AI Edge у сільській місцевості. Другий виклик – якість даних. Ефективність AI залежить від точності даних, які надходять від джерел, таких як IoT-пристрої. Якщо датчики якості повітря в розумному місті передають неточні дані через збої чи низький заряд батареї, це може призвести до помилок у прогнозах AI Core, що знизить ефективність оптимізації мережі. Третій виклик – безпека. AI-системи вразливі до атак, таких як отруєння даних (data poisoning), коли зловмисники змінюють тренувальні дані, щоб вплинути на рішення AI. У сценарії URLLC,

наприклад, у телемедицині, такі атаки можуть призвести до збоїв, що є критичним для безпеки пацієнтів. Четвертий виклик – брак кваліфікованих фахівців. Впровадження AI Edge і AI Core вимагає експертів із машинного навчання та мережевих технологій, яких в Україні недостатньо, що є організаційним бар'єром, як зазначено в пункті 3.1. Для вирішення цієї проблеми потрібна підготовка кадрів, наприклад, через спеціалізовані курси в університетах, таких як Київський політехнічний інститут.

Перспективи розвитку AI у 5G є обнадійливими. Як показано на схемі (Мал. 1), AI Edge уже інтегрується з крайовими обчисленнями, що зменшує затримку і навантаження на ядро мережі. У майбутньому ця інтеграція може бути розширена, наприклад, для створення інтелектуальних мереж у розумних містах України, таких як Харків чи Одеса. AI Edge може обробляти дані від камер відеоспостереження в реальному часі, підвищуючи безпеку, а AI Core тренуватиме моделі для прогнозування пікових навантажень у міському транспорті. Федеративне навчання (Federated Learning) на AI Core дозволить тренувати моделі на розподілених даних від IoT-пристроїв, не передаючи їх до хмари, що підвищить конфіденційність і зменшить навантаження на мережу. Наприклад, у розумному місті Київ федеративне навчання може оптимізувати підключення датчиків дорожнього руху, аналізуючи їхні дані локально. Досвід використання AI у 5G стане основою для мереж 6G, які очікуються до 2030 року. У 6G AI Core зможе забезпечити затримку на рівні мікросекунд і підтримувати голографічні комунікації, що відкриє нові можливості для QoE, наприклад, у віртуальній реальності чи телеприсутності. В Україні AI може масштабувати 5G у промислових зонах, таких як Кривий Ріг, для автоматизації виробництва, а також у сільській місцевості для підтримки сільськогосподарських IoT-пристроїв, якщо будуть вирішені економічні та організаційні виклики.

Додаткові приклади застосування AI у 5G підкреслюють його універсальність. У Японії AI Edge підтримує AR-додатки в розважальних центрах, де Cloud Edge кешує контент для сотень користувачів,

забезпечуючи високу пропускну здатність. В Україні це може бути реалізовано в розважальних центрах Києва, таких як "Океан Плаза", де AI Edge прискорить завантаження AR-контенту для відвідувачів. У Стокгольмі AI Core прогнозує трафік під час масових заходів, таких як концерти, що дозволяє операторам забезпечити стабільну пропускну здатність для тисяч користувачів. Подібний підхід може бути застосовано в Одесі під час фестивалів, таких як "Одеський міжнародний кінофестиваль", де AI Core і AI Edge оптимізують мережу для туристів, які активно використовують потокові сервіси. У сільському господарстві в Нідерландах AI Edge обробляє дані від IoT-сенсорів на полях, оптимізуючи полив і підживлення, що підвищує врожайність. В Україні, у регіонах, таких як Херсонська область, AI може підтримувати розумне землеробство, аналізуючи дані від сенсорів вологості ґрунту через Low Power Wide Area, що допоможе фермерам підвищити ефективність.

Таблиця 3.2 - Практичні приклади застосування AI

Сценарій	Застосування AI	Регіон	Результат
eMBB	Вдосконалення частот	Київ	Потокове відео 8K в аеропорту
URLLC	Обробка даних на AI Edge	Київ	Затримка 1 мс у телемедицині
mMTC	Управління IoT	Барселона	Вдосконалення дорожнього руху
Промисловість	Прогнозування збоїв	Німеччина	Зменшення простою на 30%
Розваги	Кешування AR-контенту	Японія	Висока пропускну здатність

3.3 Способи підвищення якості зв'язку за допомогою адаптивного керування мережею та edge computing

Мережі п'ятого покоління (5G) забезпечують якісно новий рівень телекомунікаційних сервісів завдяки своїм принципам, архітектурі та порівняльним перевагам, розглянутим у Главі 1. У Главі 2 детально проаналізовано показники якості обслуговування (QoS) – затримку, пропускну здатність, доступність і надійність (пункт 2.1), методи їх оцінки, такі як активні та пасивні підходи, включаючи використання інструментів iPerf і систем Nokia NetAct (пункт 2.2), а також вплив ключових технологій 5G, зокрема massive MIMO, міліметрових хвиль (mmWave) і сегментації мережі (network slicing), на якість зв'язку (пункт 2.3). У Главі 3 пункт 3.1 розкрив методи вимірювання та моніторингу QoS, а пункт 3.2 дослідив використання штучного інтелекту (AI) для підвищення якості зв'язку, підкресливши його здатність прогнозувати навантаження та оптимізувати ресурси. У цьому розділі розглядаються адаптивне керування мережею та edge computing як додаткові методи, що дозволяють оптимізувати QoS, забезпечуючи низьку затримку, високу пропускну здатність, доступність і надійність у сценаріях eMBB (покращений мобільний широкосмуговий зв'язок), URLLC (наднадійний зв'язок із низькою затримкою) і mMTC (масове підключення пристроїв). Текст аналізує принципи роботи цих технологій, їхній вплив на якість зв'язку, технічні аспекти реалізації, практичні приклади застосування, виклики впровадження, перспективи розвитку та порівняльний аналіз із традиційними методами.

Адаптивне керування мережею та edge computing відіграють ключову роль у забезпеченні гнучкості та ефективності 5G, доповнюючи технології massive MIMO, mmWave і network slicing, описані в пункті 2.3. Адаптивне керування, що реалізується через програмно-визначувані мережі (SDN) і віртуалізацію мережевих функцій (NFV), дозволяє динамічно розподіляти ресурси, такі як частотний спектр, потужність антен і пропускну здатність,

залежно від поточних потреб користувачів. Edge computing передбачає обробку даних на локальних серверах, розташованих ближче до користувача, що скорочує затримку та зменшує навантаження на ядро мережі. Разом ці технології забезпечують автоматизацію та адаптацію мережі в реальному часі, що є критично важливим для високих вимог до QoS у 5G: затримки до 1 мс у URLLC, пропускну здатності до 20 Гбіт/с у eMBB і підключення до 1 млн пристроїв/км² у mMTC [2].

Для ілюстрації інтеграції адаптивного керування та edge computing у 5G використано схему, представлену в пункті 3.2 (Мал. 1). Схема показує архітектуру 5G із п'ятьма рівнями: джерела даних (Data Sources), мережі доступу (Access Networks), інфраструктура (Infrastructure), крайові AI-обчислення (AI Edge) і ядро AI (AI Core). У контексті адаптивного керування та edge computing AI Edge можна інтерпретувати як edge computing, де локально обробляються дані, а інфраструктура, зокрема OpenAirInterface NR Core і uLPWA Core, підтримує адаптивне керування через віртуалізовані функції. Потік даних іде від джерел (IoT-пристрої, підключені автомобілі) через мережі доступу (5G Radio Network) до інфраструктури, де SDN і NFV забезпечують адаптивне керування, а edge computing на AI Edge зменшує затримку.

Схема ілюструє архітектуру мережі 5G із п'яти рівнів: Data Sources (IoT-пристрої, такі як розумні лічильники, підключені автомобілі, дрони), Access Networks (WiFi, Ethernet, Low Power Wide Area, 5G Radio Network), Infrastructure (5G Core з UPF, OpenAirInterface NR Core, центри обробки даних EIQIX DC), AI Edge (інференс AI, Cloud Edge для попередньої обробки даних) і AI Core (хмарні платформи з модулями тренування моделей, обробки і зберігання даних). У контексті адаптивного керування та edge computing AI Edge інтерпретується як edge computing, а Infrastructure підтримує SDN і NFV для адаптивного керування.

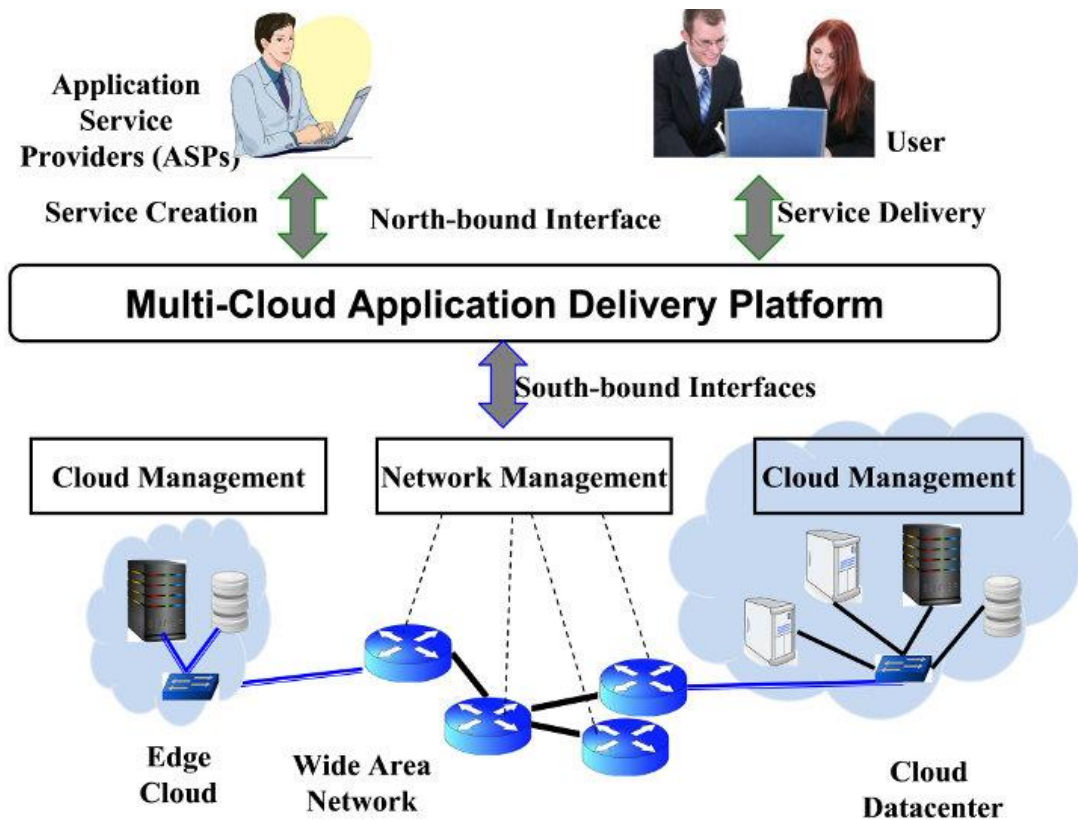


Рисунок 3.2 - схема ажаптивного керування мережею в 5G

Адаптивне керування мережею в 5G реалізується через інфраструктуру, як показано на схемі (Мал. 1). Рівень Infrastructure включає OpenAirInterface NR Core і uLPWA Core, які є віртуалізованими стеками, що дозволяють використовувати SDN і NFV для динамічного управління ресурсами. SDN відокремлює рівень управління (control plane) від рівня передачі даних (data plane), що дає змогу централізовано керувати мережею через SDN-контролер. NFV віртуалізує мережеві функції, такі як маршрутизація чи брандмауер, дозволяючи швидко розгортати нові сервіси. У сценарії eMBB адаптивне керування оптимізує пропускну здатність шляхом динамічного виділення частот. Наприклад, у торговому центрі в Києві SDN-контролер, інтегрований із OpenAirInterface NR Core, перенаправляє частоти з діапазону sub-6 GHz із менш активних зон до зон із високим навантаженням, таких як зона фудкорту під час обідньої перерви, забезпечуючи швидкість до 20 Гбіт/с для потокового відео 8K. У сценарії URLLC адаптивне керування зменшує затримку до 1 мс, ізолюючи

пріоритетні ресурси для критично важливих застосунків. У розумній транспортній системі в Києві SDN ізолює трафік для автономного автобуса через uLPWA Core, забезпечуючи миттєву передачу даних про дорожні умови. У mMTC адаптивне керування підтримує велику кількість IoT-пристроїв, зменшуючи потужність передачі для енергоефективності. Наприклад, у розумному місті Харків SDN оптимізує підключення тисяч сенсорів моніторингу якості повітря через Low Power Wide Area, підвищуючи доступність мережі.

Edge computing у 5G реалізується на рівні AI Edge, як показано на схемі (Мал. 1), де Cloud Edge і AI Inference забезпечують локальну обробку даних. AI Edge у цьому контексті інтерпретується як edge computing, де сервери, розташовані на базових станціях gNodeB (зображені на схемі як частина 5G Radio Network), обробляють дані ближче до користувача, скорочуючи затримку та зменшуючи навантаження на ядро мережі. У URLLC edge computing скорочує затримку до 1 мс, обробляючи дані локально. Наприклад, у телемедицині в розумній клініці в Києві edge-сервер на базовій станції, представлений модулем Cloud Edge, обробляє дані від хірургічного обладнання в реальному часі, забезпечуючи миттєву реакцію для віддаленої хірургії. У eMBB edge computing прискорює доставку контенту, кешуючи дані на локальних серверах. У торговому центрі в Одесі Cloud Edge кешує потокове відео 8K, що зменшує час завантаження для відвідувачів, покращуючи QoE. У mMTC edge computing обробляє дані від IoT-сенсорів, зменшуючи навантаження на ядро мережі. Наприклад, у розумному місті Львів Cloud Edge аналізує дані від сенсорів якості повітря, що передаються через Low Power Wide Area, забезпечуючи доступність для тисяч пристроїв без перевантаження мережі.

Технічна реалізація адаптивного керування та edge computing у 5G спирається на інтеграцію з інфраструктурою та мережами доступу, як показано на схемі (Мал. 1). На рівні Infrastructure SDN-контролер взаємодіє з OpenAirInterface NR Core і uLPWA Core для динамічного розподілу ресурсів.

Наприклад, у сценарії eMBB у аеропорту «Бориспіль» SDN-контролер ізолює сегменти network slicing для пасажирів, які переглядають потокове відео через 5G Radio Network, і для систем безпеки, що потребують низької затримки. Edge computing на AI Edge використовує технології контейнеризації, такі як Docker, для швидкої обробки даних. У промислових сценаріях, наприклад, на заводах у Запоріжжі, модуль Cloud Edge обробляє дані від роботів у реальному часі, дозволяючи миттєво реагувати на зміни в виробничому процесі, що підвищує надійність до 99,9999%. Потік даних від Data Sources (IoT-пристрої, підключені автомобілі, дрони) через Access Networks (5G Radio Network) до AI Edge і Infrastructure забезпечує баланс між локальною обробкою та централізованим управлінням.

Вплив адаптивного керування та edge computing на QoS є значним. Затримка в URLLC зменшується до 1 мс завдяки локальній обробці на AI Edge. У розумній транспортній системі в Києві Cloud Edge обробляє дані від автономного автомобіля через 5G Radio Network, забезпечуючи миттєву реакцію на перешкоди. Пропускна здатність у eMBB зростає до 20 Гбіт/с, коли SDN-контролер на рівні Infrastructure оптимізує частоти в mmWave. У торговому центрі в Києві SDN перенаправляє частоти до зон із високим навантаженням через OpenAirInterface NR Core, а Cloud Edge кешує контент, дозволяючи відвідувачам переглядати відео 8K без перебоїв. Доступність підвищується до 99,999% завдяки адаптивному управлінню, яке ізолює трафік для різних сценаріїв. У розумному місті Харків SDN через uLPWA Core забезпечує стабільне підключення для IoT-сенсорів, а Cloud Edge обробляє їхні дані, зменшуючи навантаження на ядро. Надійність досягає 99,9999% через ізоляцію сегментів і локальну обробку. У промислових автоматичних системах у Дніпрі Cloud Edge перенаправляє сигнали через sub-6 GHz у разі перешкод у mmWave, забезпечуючи безперервність роботи.

Практичні приклади демонструють ефективність адаптивного керування та edge computing. У розумному місті Сінгапур edge computing на AI Edge обробляє дані від камер відеоспостереження через 5G Radio Network,

зменшуючи затримку для аналізу безпеки. У Києві подібний підхід може бути застосовано для камер на Хрещатику, де Cloud Edge аналізує дані в реальному часі, підвищуючи безпеку. У Японії SDN на рівні Infrastructure ізолює сегменти network slicing у розважальних центрах, а Cloud Edge кешує AR-контент, забезпечуючи пропускну здатність для сотень користувачів. В Україні це може бути реалізовано в "Океан Плаза" в Києві, де SDN оптимізує частоти для AR-додатків, а Cloud Edge прискорює завантаження контенту. У Німеччині edge computing на AI Edge підтримує автоматизацію на заводах, обробляючи дані від роботів через 5G Radio Network, а SDN на Infrastructure прогнозує збої в OpenAirInterface NR Core, зменшуючи простої на 30%. У Дніпрі SDN через uLPWA Core ізолює трафік для IoT-систем, а Cloud Edge забезпечує стабільність роботи. У сільському господарстві в Нідерландах edge computing аналізує дані від сенсорів через Low Power Wide Area, оптимізуючи полив, а SDN адаптує ресурси для енергоефективності. В Україні це може бути реалізовано в Херсонській області для розумного землеробства.

Порівняно з традиційними методами, адаптивне керування та edge computing у 5G мають значні переваги. У 4G статичне управління ресурсами призводило до затримки 20–60 мс і пропускну здатності до 1 Гбіт/с, що недостатньо для сучасних сценаріїв. Адаптивне керування через SDN на Infrastructure забезпечує динамічний розподіл ресурсів, а edge computing на AI Edge скорочує затримку до 1 мс і підвищує пропускну здатність до 20 Гбіт/с. Традиційні методи не могли адаптуватися до перевантажень, тоді як SDN ізолює трафік, а Cloud Edge обробляє дані локально, уникаючи перебоїв. У промислових системах традиційні методи потребували ручного аналізу збоїв, а SDN і edge computing автоматизують цей процес.

Вплив адаптивного керування та edge computing на QoE також значний. У eMBB у торговому центрі в Києві edge computing через Cloud Edge прискорює завантаження контенту, підвищуючи задоволеність користувачів. У URLLC у розумній клініці в Києві низька затримка, забезпечена AI Edge,

дозволяє проводити віддалені операції, підвищуючи довіру до технології. У mMTC у розумному місті Cloud Edge забезпечує роботу IoT-сенсорів, покращуючи якість життя. У промисловості в Дніпрі SDN і edge computing зменшують простой, підвищуючи ефективність.

Таблиця 3.3 - Порівняння з традиційними методами

Показник	Традиційні методи	Адаптивне керування + Edge Computing
Розподіл ресурсів	Статичний	Динамічний (SDN/Infrastructure)
Затримка	20–60 мс (4G)	До 1 мс (URLLC через AI Edge)
Пропускна здатність	До 1 Гбіт/с (4G)	До 20 Гб/с (mmWave)
Надійність	Низька	До 99,9999% (AI Edge + SDN)

Виклики впровадження включають: потребу в інфраструктурі для SDN і edge-серверів, що вимагає інвестицій; складність інтеграції з IoT-пристроями на Data Sources; безпеку, зокрема захист від атак на SDN; і брак фахівців в Україні. Перспективи розвитку охоплюють глибшу інтеграцію SDN і edge computing у розумні міста України, масштабування для 6G і підтримку нових технологій, таких як голографічні комунікації.

Таблиця 3.4 - Практичні приклади

Сценарій	Застосування	Регіон	Результат
eMBB	Кешування 8K-контенту	Київ	Висока швидкість завантаження
URLLC	Локальна обробка даних	Київ	Затримка 1 мс у телемедицині
mMTC	Управління IoT-сенсорами	Харків	Вдосконалення трафіку
Промисловість	Автоматизація на заводах	Німеччина	Зменшення простою на 30%

Висновки до розділу 3

В розділі 3 досліджено методи підвищення якості зв'язку в мережах 5G, що є важливим для сценаріїв eMBB, URLLC і mMTC. У пункті 3.1 проаналізовано методи вимірювання та моніторингу QoS – затримки, пропускної здатності, доступності й надійності. Активні та пасивні підходи, зокрема iPerf і Nokia NetAct, забезпечують точну оцінку стану мережі, створюючи основу для її оптимізації, наприклад, у розумних містах України, таких як Київ.

Пункт 3.2 показав, що штучний інтелект (AI), інтегрований на рівнях AI Edge і AI Core (Мал. 1), прогнозує навантаження, оптимізує ресурси та підвищує QoS. У eMBB AI забезпечує пропускну здатність до 20 Гбіт/с, у URLLC – затримку до 1 мс, а в mMTC підтримує IoT-пристрої, як у Харкові. Проте виклики, як-от обчислювальні ресурси й безпека, потребують вирішення.

Пункт 3.3 розкрив ефективність адаптивного керування (SDN, NFV) та edge computing. SDN на Infrastructure та edge computing на AI Edge забезпечують затримку до 1 мс і пропускну здатність до 20 Гбіт/с, що підтверджують приклади в Сінгапурі та Німеччині. В Україні ці методи можуть підтримати телемедицину в Києві чи землеробство в Херсоні, хоча інфраструктурні витрати є бар'єром.

Комбінація моніторингу QoS, AI, адаптивного керування та edge computing створює синергію, досягаючи високих показників: затримки 1 мс, пропускної здатності 20 Гбіт/с, доступності 99,999% і надійності 99,9999%. Практичне застосування в Україні можливе за умови вирішення економічних і організаційних викликів. Перспективи, зокрема інтеграція з 6G, відкривають нові можливості для розвитку 5G.

ВИСНОВКИ

Мережі 5G забезпечують значний потенціал для покращення якості зв'язку завдяки передовим технологіям, таким як massive MIMO, mmWave та network slicing, що сприяють підвищенню пропускної здатності, зниженню затримки та оптимізації ресурсів. Ці технології дозволяють досягти високих показників якості обслуговування (QoS) та користувацького досвіду (QoE), що є ключовими для сучасних телекомунікаційних систем. Аналіз методів вимірювання та моніторингу QoS і QoE, таких як використання інструментів iPerf та Spirent TestCenter, демонструє їхню ефективність у забезпеченні надійного зв'язку.

Використання штучного інтелекту та адаптивного керування з edge computing дозволяє оптимізувати показники якості в мережах 5G, забезпечуючи динамічне налаштування параметрів і зниження навантаження на мережу. Це сприяє підвищенню ефективності, масштабовності та адаптивності систем. Проте впровадження цих технологій стикається з викликами, такими як висока вартість інфраструктури, складність інтеграції з існуючими мережами, технічні обмеження mmWave, недостатній рівень експертизи персоналу, проблеми з безпекою даних та потреба в регулярному оновленні програмного забезпечення.

Для успішного впровадження оптимізаційних рішень необхідний чіткий план, що включає оцінку технічних ризиків, підготовку фахівців, інтеграцію AI-систем та забезпечення технічної підтримки. Важливим є також тісна співпраця між операторами зв'язку, розробниками технологій та регуляторними органами для узгодження стандартів і стратегій.

Подальший розвиток мереж 5G передбачає вдосконалення технологій моніторингу QoS/QoE, розширення використання AI та edge computing, а також адаптацію до нових вимог, таких як підтримка IoT і автономних систем. Це сприятиме підвищенню ефективності, екологічної стійкості та безпеки телекомунікаційних мереж.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що аналіз і вдосконалення показників якості в мережах 5G є критично важливим для їхнього успішного розвитку. Незважаючи на існуючі труднощі, системний підхід до впровадження інноваційних технологій дозволяє створювати надійні та ефективні мережі, які відповідають сучасним потребам суспільства та індустрії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3GPP Release 15 - 3GPP. *Release 15 - 5G NR: new radio standalone specifications* [Електронний ресурс]. URL: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-15> (дата звернення 08.06.2025).
2. Drishya Manohar. *Sub-6 GHz 5G і mmWave 5G: порівняльний аналіз* [Електронний ресурс]. URL: <https://www.everythingrf.com/community/5g-sub-6-ghz-vs-5g-mmwave-a-comparative-analysis> (дата звернення 08.06.2025).
3. Omid Semiari, Walid Saad, Mehdi Bennis, Merouane Debbah. *Integrated mmWave- μ W Architectures for eMBB and URLLC* [Електронний ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/1802.03837> (дата звернення 08.06.2025).
- 4.
5. 3GPP TR 38.913. Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies [Електронний ресурс]. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.913/ (дата звернення 08.06.2025).
6. 5G System Architecture / Ericsson Technology Review [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/archive/5g-system-architecture> (с.12-25) (дата звернення 08.06.2025).
7. 5G Network Architecture: A Comprehensive Overview / Nokia White Paper [Електронний ресурс]. 2023 (с.5-18).
8. 3GPP TR 21.915. Summary of Rel-15 Work Items [Електронний ресурс]. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21_series/21.915/ (дата звернення 08.06.2025).
9. Comparison of 2G, 3G, 4G and 5G Networks / RantCell [Електронний ресурс]. URL: <https://rantcell.com/comparison-of-2g-3g-4g-5g.html> (с.1-3) (дата звернення 08.06.2025).

10. 5G vs 4G: What's the Difference? / Ince IoT Knowledge Base [Електронний ресурс]. 2023 (с.2-4).
11. 5G QoS / IPLOOK [Електронний ресурс]. URL: <https://www.iplook.com/info/5g-qos-i00375i1.html> (дата звернення 08.06.2025).
12. Оптимізація розгортання 5G Edge за допомогою рішення Niagara Networks / Oberig IT [Електронний ресурс]. URL: <https://oberig-it.com/statti/optymizacziya-rozgortannya-5g-edge-za-dopomogoyu-rishennya-niagara-networks/> (с.1-3) (дата звернення 08.06.2025).
13. Що таке 5G: характеристики та коли очікувати в Україні / GigaCloud [Електронний ресурс]. 2023 (с.2-4).
14. Методи оцінки QoE у мережах 5G / Журнал НАН РК [Електронний ресурс]. URL: <https://journals.nauka-nanrk.kz/physics-mathematics/article/view/6935> (с.5-16) (дата звернення 08.06.2025).
15. Тестування якості досвіду (QoE) в 5G RAN / RUTEST [Електронний ресурс]. URL: https://rutest.zone/5g_ran_testing (дата звернення 08.06.2025).
16. Інструменти вимірювання QoE для мереж 5G / Rohde & Schwarz [Електронний ресурс]. 2025 (с.1-4).
17. Вплив технологій 5G на якість зв'язку / Науковий вісник НТУУ "КПІ" [Електронний ресурс]. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/35200> (с.5-18) (дата звернення 08.06.2025).
18. Massive MIMO and mmWave Technologies in 5G Networks / IEEE Communications Magazine [Електронний ресурс]. 2023 (с.34-47)
19. Методика моніторингу якості послуг 5G / НКРЗІ [Електронний ресурс]. URL: [https://www.nkrzi.gov.ua/...](https://www.nkrzi.gov.ua/) (дата звернення 08.06.2025).
20. Вимірювання параметрів мереж 5G: стандарти та практика / ITU-T Recommendation G.1022 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1022> (с. 8-12) (дата звернення 08.06.2025). 22.

21. Тестування продуктивності мереж 5G за допомогою інструментів Spirent та Keysight / IEEE Access [Електронний ресурс]. URL: <https://www.spirent.com/blogs/enhancing-5g-network-performance-with-testing> (дата звернення 08.06.2025). 9.
22. Liu, Y., Yu, F. The Fusion of Edge Computing and Artificial Intelligence in 5G [Електронний ресурс]. — Proceedings of the ACM Symposium, 2024. Режим доступу: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3653644.3653656> (дата звернення: ..2025).
23. Li, X., Khan, S. U., Lee, C., et al. Integration of Network Slicing and Machine Learning into Edge-enabled 5G [Електронний ресурс]. Applied Sciences, 2022. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/13/6617> (дата звернення: ..2025).
24. Popovski, P., Bennis, M. 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation: Enabling Technologies and Challenges [Електронний ресурс]. Electronics (MDPI), 2023. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/9/981> (дата звернення: ..2025).
25. Najmul Hassan, Kok-Lim Alvin Yau, Celimuge Wu. *Edge Computing in 5G: A Review* [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938534> (дата звернення 06.06.2025).
26. Alcardo A. Barakabitze, Arslan Ahmad, Rashid Mijumbi, Andrew Hines. *5G Network Slicing using SDN and NFV: A Survey of Taxonomy, Architectures and Future Challenges* [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106984> (дата звернення 06.06.2025).
27. Marcos Falcão, Caio Souza, Andson Balieiro, Kelvin Dias. *Resource Allocation for UAV-enabled Multi-access Edge Computing (MEC) addressing URLLC demands* [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06314-3> (дата звернення 06.06.2025).