

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

«На правах рукопису»
УДК 621.396.3

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Марія СКУЛИШ
“ ” _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
на тему: Вдосконалення якості сервісів мережі lte шляхом урахування впливу
показників радіосигналу

Виконала: студентка VI курсу, групи ЦІ-41мп
Павляшик Юлія Вікторівна _____

_____ (підпис)

Науковий керівник: професор кафедри ІТТ НН ІТС,
доктор технічних наук, доцент
Астраханцев Андрій Анатолійович _____

_____ (підпис)

Рецензент: доцент кафедри штучного інтелекту,
кандидат технічних наук, доцент
Шаповал Наталія Віталіївна _____

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студентка _____

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

**Навчально науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях**
Рівень вищої освіти – другий магістерський за освітньо-професійною
програмою Інформаційно-комунікаційні технології

Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Марія СКУЛИШ
“ ____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці
Павляшик Юлії Вікторівні

**1. Тема дисертації Вдосконалення якості сервісів мережі LTE шляхом
урахування впливу показників радіосигналу**

Науковий керівник дисертації Астраханцев Андрій Анатолійович, професор
кафедри ІТТ НН ІТС, доктор технічних наук, доцент затверджені наказом по
університету від «03» листопада 2025 р. № 4772-с

2. Строк подання студентом дисертації «12» грудня 2025 р.

3. Об'єкт дослідження

Процеси підвищення та забезпечення якості сервісів у мережах мобільного
зв'язку LTE.

**4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за
освітньо-професійною програмою)**

Методи вдосконалення якості сервісів мережі LTE з урахуванням впливу
показників радіосигналу. Вихідні дані: реальні набори даних радіопараметрів та
показників якості сервісів LTE, що застосовуються для аналізу
взаємозалежностей та формування рекомендацій з оптимізації.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Визначити основні типи сервісів що надаються користувачам в мережах
LTE.
2. Визначити основні характеристики якості послуг, що надаються в мережі.
3. Оцінити вимоги сервісів до якості послуг.
4. Обрати програмну модель для досліджень.

5. Оцінити вплив показників радіосигналу на якість сервісів, надати рекомендації зі зменшення впливу.

6. Розробка стартап-проєкту

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

1. Мета та задачі
2. Актуальність
3. Об'єкт та предмет дослідження
4. Мережні послуги
5. Основні характеристики якості послуг
6. Вимоги до якості послуг
7. Програмна модель для дослідження
8. Результати досліджень
9. Висновки та рекомендації

7. Дата видачі завдання 28 жовтня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Дослідження та вивчення отриманого завдання	28.10.24	Виконано
2	Пошук та аналіз джерел інформації щодо загальних характеристик LTE	29.10.24-31.10.24	Виконано
3	Визначення основних типів сервісів що надаються користувачам в мережах LTE.	01.11.24 – 01.12.24	Виконано
4	Визначення основних характеристик якості послуг, що надаються в мережі.	02.12.24 – 03.02.25	Виконано
5	Проведення оцінки вимог сервісів до якості послуг	02.02.25 – 15.04.25	Виконано
6	Вибір програмної моделі для досліджень	16.04.25 – 25.05.25	Виконано
7	Дослідження впливу показників радіосигналу на якість сервісів	26.06.25 – 29.09.25	Виконано
8	Надання рекомендацій підвищення якості послуг	30.09.25 – 01.11.25	Виконано
9	Розробка стартап-проєкту	02.11.25 – 30.11.25	Виконано

Студентка

(підпис)

Юлія ПАВЛЯШИК

(ім'я, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Андрій АСТРАХАНЦЕВ

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Тема магістерської дисертації «Вдосконалення якості сервісів мережі LTE шляхом урахування впливу показників радіосигналу». Робота містить 86 сторінок тексту, 30 рисунків, 14 таблиць, використано 23 літературних джерела.

Актуальність теми дослідження полягає в необхідності динамічної адаптації сучасної високошвидкісної мережі (LTE) до мінливих радіоумов для гарантування необхідної якості послуг (низька затримка, висока пропускна здатність, низький рівень втрат пакетів) та ефективного планування мережевих ресурсів.

Мета роботи: оцінити вплив показників радіосигналу на якість послуг, що надаються в мережі LTE та запропонувати методи підвищення якості послуг.

Об'єктом дослідження є процеси підвищення та забезпечення якості сервісів у мережах мобільного зв'язку LTE.

Предметом дослідження є методи вдосконалення якості сервісів мережі LTE з урахуванням впливу показників радіосигналу.

Методи дослідження: Збір, обробка та статистичний аналіз радіопараметрів, побудова моделей та дослідження статистичних залежностей, експериментальна перевірка.

Ключові слова: LTE, ЯКІСТЬ СЕРВІСІВ, QOS, QOE, RSRP, RSRQ, SINR, ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ, РАДІОМЕРЕЖЕВЕ ПЛАНУВАННЯ, МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК, АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ.

ABSTRACT

The topic of the master's thesis is “Improving the quality of LTE network services by taking into account the influence of radio signal indicators.” The work contains 86 pages of text, 30 figures, 14 tables, and 23 references.

The relevance of the research topic lies in the need for dynamic adaptation of modern high-speed networks (LTE) to changing radio conditions in order to ensure the necessary quality of services (low latency, high throughput, low packet loss) and effective planning of network resources.

The purpose of the work is to assess the impact of radio signal indicators on the quality of services provided in the LTE network and to propose methods for improving service quality.

The object of the study is the processes of improving and ensuring the quality of services in LTE mobile communication networks.

The subject of the study is methods for improving the quality of LTE network services, taking into account the impact of radio signal indicators.

Research methods: Collection, processing, and statistical analysis of radio parameters, model building and study of statistical dependencies, experimental verification.

Keywords: LTE, SERVICE QUALITY, QOS, QOE, RSRP, RSRQ, SINR, NETWORK OPTIMIZATION, RADIO NETWORK PLANNING, MOBILE COMMUNICATIONS, PERFORMANCE ANALYSIS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ LTE	12
1.1 Архітектура мережі LTE/EPC	12
1.1.1. Користувацьке обладнання (User Equipment, UE).....	12
1.1.2. Елементи транспортної мережі (S1, X2 інтерфейси)	13
1.1.3. Компоненти EPC (MME, SGW, PGW, HSS)	16
1.2 Технологічні особливості LTE	18
1.2.1. OFDMA та SC-FDMA.....	18
1.2.2. MIMO, beamforming.....	21
1.2.3. Частотні діапазони LTE.....	25
1.2.4. Типи каналів у радіоінтерфейсі LTE.....	27
1.3. Основні сервіси LTE	29
1.3.1. Голосовий дзвінок у реальному часі (Conversational Voice)	30
1.3.2. Відеозв'язок у реальному часі (Conversational Video)	30
1.3.3. Онлайн-ігри в реальному часі (Real-time Gaming)	31
1.3.4. Буферизоване потокове відео (Buffered Streaming).....	31
1.3.5. IMS-сигналізація (IMS Signaling).....	32
1.3.6. Буферизоване відеострімінг-відтворення (Video Buffered Streaming)	33
1.3.7. Пряма трансляція (Live Streaming).....	33
1.3.8. TCP-сервіси з пріоритетом (TCP - Privileged Subscriber)	34
1.3.9. TCP-сервіси без пріоритету (TCP - Non-Privileged Subscriber).....	34
1.4. Протокольна архітектура LTE (PHY → APP)	34
1.5. Висновки до розділу 1	36
РОЗДІЛ 2 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ І СЕРВІСІВ LTE.....	37
2.1. Показники якості радіосигналу LTE	37
2.1.1 RSRP	37
2.1.2 RSRQ	38
2.1.3. SINR.....	38
2.1.4 Аналіз основних показників якості зв'язку LTE	39
2.2. Показники якості мережевих сервісів (QoS).....	41
2.3 Вимоги до якості для різних типів сервісів LTE	44

2.3.2. Вимоги для онлайн-ігор	44
2.3.3. Вимоги для VoLTE	45
2.3.4. Вимоги для веб-браузингу та соціальних мереж.....	45
2.3.5. Вимоги для сервісів великого трафіку (файлообмін)	45
2.3.6 Нормативні значення QCI-класів	46
2.4 Висновки до розділу 2	47
РОЗДІЛ 3 МЕТОДОЛОГІЯ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ	
ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ LTE	49
3.1 Зв'язок теоретичних показників якості з інструментальними вимірюваннями.....	49
3.2 Опис програмного забезпечення для тестування показників мобільної мережі.....	51
3.3 Висновки до розділу 3	53
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОСЛУГ LTE	54
4.1 Дослідження пропускної здатності	54
4.2 Залежність затримки передачі даних	58
4.3 Вплив RSRP на якість голосу	59
4.4 Дослідження невдалого встановлення з'єднання	61
4.5 Дослідження ймовірності обриву виклику.....	63
4.6 Рекомендації методів підвищення якості послуг.....	65
4.7 Висновки до розділу 4	66
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	68
5. 1 Інформаційна карта проекту	68
5.2 Ключова цінність продукту.....	68
5.3. Користувачі продукту.....	69
5.4 Випадки користування	70
5.5 Процес роботи проекту.....	71
5.6 Візуалізація та аналіз ефективності проекту.....	73
5.7 Висновки до розділу 5	81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ	85

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

QoS — Quality of Service

QoE — Quality of Experience

RSRP — Reference Signal Received Power

RSRQ — Reference Signal Received Quality

SINR — Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

UE — User Equipment

eNB — evolved Node B

RAN — Radio Access Network

MME — Mobility Management Entity

SGW — Serving Gateway

PGW — Packet Data Network Gateway

HSS — Home Subscriber Server

PHY — Physical Layer

MAC — Medium Access Control

RLC — Radio Link Control

PDCCP — Packet Data Convergence Protocol

APP — Application Layer

ВСТУП

Розвиток мобільних комунікаційних технологій супроводжується стрімким зростанням вимог до стабільності та якості надання сервісів, що потребує глибокого аналізу функціонування радіомереж та факторів, які впливають на їх продуктивність. Технологія LTE (Long Term Evolution), будучи основою більшості сучасних мобільних мереж, забезпечує широкий спектр сервісів, однак її ефективність значною мірою залежить від параметрів радіосигналу та умов поширення.

Якість сервісів у мережах LTE формується під впливом радіопоказників (RSRP, RSRQ, SINR, CQI) та мережевих характеристик (QoS, QoE), які визначають користувацьке враження від роботи сервісів. Зниження значень радіопараметрів призводить до погіршення пропускної здатності, збільшення затримок та зростання кількості втрат пакетів, що негативно впливає на голосові виклики, відеосервіси та інші типи трафіку. Тому дослідження взаємозалежностей між радіопоказниками та якістю сервісів є важливим інструментом для оптимізації мережі та підвищення рівня обслуговування користувачів.

Актуальність теми полягає у таких аспектах:

- *Зростання навантаження на мобільні мережі LTE* через поширення сервісів у реальному часі (VoLTE, відеоконференції, онлайн-ігри), що вимагають стабільної та високої якості обслуговування.
- *Висока чутливість радіопараметрів до зовнішніх факторів* (затінення, інтерференція, щільність користувачів), що призводить до нестабільності якості сервісів у різних умовах покриття.
- *Необхідність точного аналізу впливу радіопоказників на QoS/QoE*, що є передумовою для виявлення причин деградації сервісів та розроблення ефективних методів оптимізації.
- *Потреба операторів у підвищенні ефективності використання радіоресурсів*, особливо в умовах інтенсивного трафіку та зростання кількості користувачів.

- *Важливість формування рекомендацій для планування та модернізації мережі, що дозволяють забезпечити стабільне покриття та високий рівень якості послуг у реальних умовах експлуатації.*

Об'єктом дослідження є процеси підвищення та забезпечення якості сервісів у мережах мобільного зв'язку LTE.

Предметом дослідження є методи вдосконалення якості сервісів мережі LTE з урахуванням впливу показників радіосигналу.

Метою роботи є оцінити вплив показників радіосигналу на якість послуг, що надаються в мережі LTE та запропонувати методи підвищення якості послуг.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- *Проаналізувати основні типи сервісів, що надаються користувачам у мережах LTE та 5G, з урахуванням їхніх технічних особливостей та вимог до якості обслуговування.*
- *Визначити ключові характеристики якості послуг (QoS та QoE), які застосовуються для оцінювання роботи мережі та формування користувацького досвіду.*
- *Дослідити та класифікувати вимоги різних сервісів до показників якості, включаючи затримку, пропускну здатність, втрати пакетів та стабільність з'єднання.*
- *Обрати та обґрунтувати програмну або модельну платформу, яка буде використана для збору даних, моделювання та подальшого аналізу впливу радіопоказників на якість сервісів.*
- *Проаналізувати вплив зовнішніх факторів на радіопоказники та якість сервісів, визначити критичні фактори та розробити рекомендації щодо зменшення їх негативного впливу.*
- *Розробити стартап-проект, що ґрунтується на результатах дослідження та може бути впроваджений для оптимізації мереж LTE або підвищення якості сервісів у реальних умовах.*

РОЗДІЛ 1

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ LTE

1.1 Архітектура мережі LTE/EPC

Архітектура LTE передбачає наявність трьох ключових компонентів радіомережі: користувацького обладнання (User Equipment, UE), радіодоступу (E-UTRAN) та ядра мережі (Evolved Packet Core, EPC).

1.1.1. Користувацьке обладнання (User Equipment, UE)

Користувацьке обладнання (User Equipment, UE) є кінцевим пристроєм абонента, який забезпечує доступ до мережі LTE. Внутрішня архітектура UE загалом відповідає структурі обладнання попередніх поколінь (GSM/UMTS) та містить такі основні модулі:

Мобільний термінал (Mobile Terminal, MT) — відповідає за обробку всіх функцій радіозв'язку, включаючи прийом і передачу сигналів, взаємодію з базовою станцією, виконання протоколів PHY/MAC/RLC/PDCP та функцій безпеки.

Термінальне обладнання (Terminal Equipment, TE) — забезпечує інтерфейс користувача та завершення потоків даних (наприклад, робота додатків, браузера, мультимедіа-сервісів).

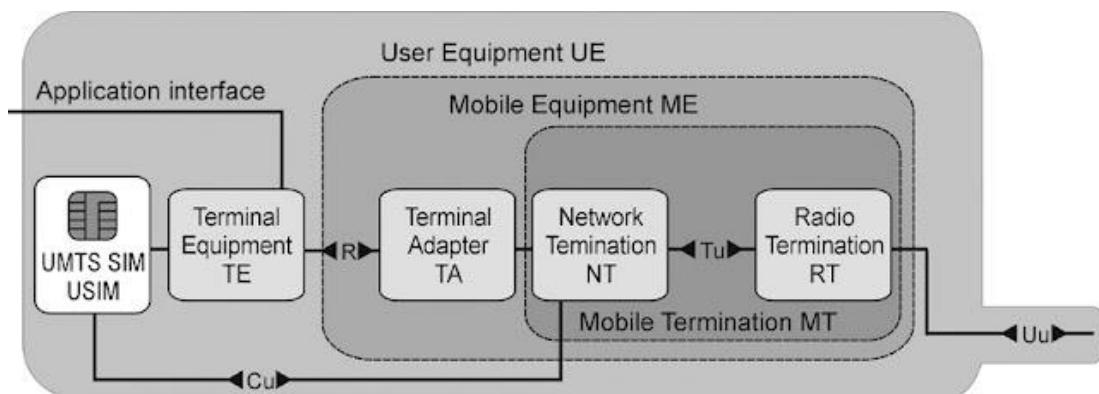


Рисунок 1.1. – Архітектура користувацького обладнання LTE [1]

UICC/USIM — універсальна інтегрована схема (UICC), що містить застосунок USIM (Universal Subscriber Identity Module). На USIM зберігаються ідентифікаційні дані абонента, ключі автентифікації та параметри конфігурації мережі. За функціональністю та структурою USIM у LTE є логічним продовженням SIM-карт UMTS, забезпечуючи сумісність та розширені можливості безпеки.

1.1.2. Елементи транспортної мережі (S1, X2 інтерфейси)

Розвинена наземна радіомережа доступу (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN) у системі LTE складається з базових станцій eNodeB, які забезпечують радіодоступ користувачам і одночасно здійснюють функції, що в попередніх поколіннях виконувались контролерами радіомережі (RNC). Така “плоска” архітектура зменшує затримку, спрощує взаємодію між елементами та підвищує ефективність використання радіоресурсів. Кожний eNodeB підключається до елементів ядра мережі Evolved Packet Core (EPC), яке виконує маршрутизацію, управління сесіями, мобільністю та автентифікацією абонентів.

Для взаємодії між базовими станціями eNodeB та ядром мережі EPC, а також для координації роботи сусідніх eNodeB, у LTE застосовуються ключові інтерфейси транспортної мережі — S1 та X2. Вони забезпечують передачу сигналізації, користувацьких даних, а також ефективне управління мобільністю користувачів. Нижче наведено їхню структуру та функціональне призначення.

Інтерфейс S1 забезпечує підключення eNodeB до компонентів EPC та складається з:

S1-MME (площина сигналізації) — використовується для обміну керуючими повідомленнями між eNodeB та MME. Через нього здійснюються: – автентифікація UE, – встановлення та модифікація bearer-каналів, – управління мобільністю (Idle/Connected mobility).

S1-U (площина користувача) — відповідає за передачу пакетних даних між eNodeB та шлюзом SGW. Саме через S1-U здійснюється маршрутизація трафіку від UE до зовнішніх мереж. У межах S1 відбувається підключення UE до мережі, управління сесіями та передача користувацьких даних. [2]

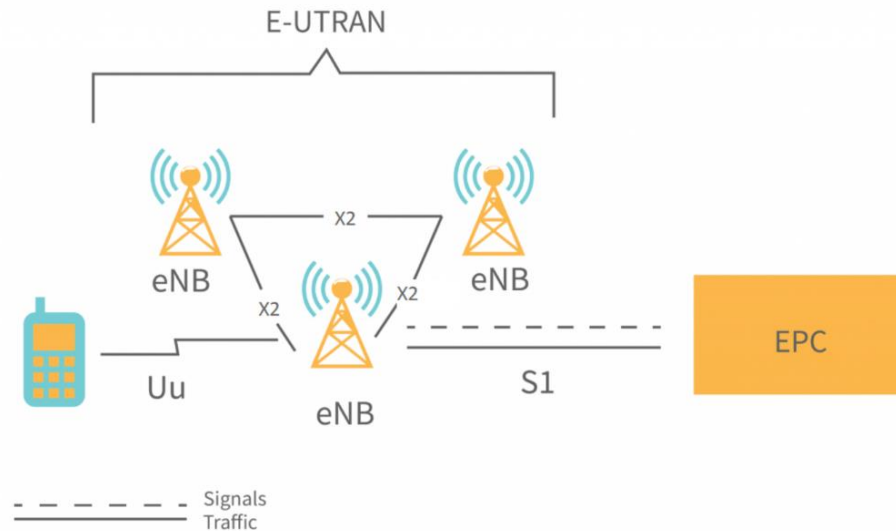


Рисунок 1.2 – Інтерфейси S1 та X2 у мережі LTE [3]

Інтерфейс X2 використовується для взаємодії між сусідніми eNodeB, що дає можливість виконувати передачу UE між сотами без затримок та без залучення центральних компонентів EPC, а також для координації завад (ICIC, eICIC), обміну інформацією про завантаження сот та оптимізації розподілу радіоресурсів. Він також складається з двох частин:

X2-C (control plane) — забезпечує сигналізацію, обмін вимірюваннями, координацію мобільності та процедури handover.

X2-U (user plane) — використовується для перенесення користувацьких даних під час передачі UE безпосередньо між eNodeB, що знижує затримку та навантаження на ядро.

Окремим компонентом RAN є *домашній eNodeB (HeNB)* — фемтосота, що встановлюється користувачем у приміщенні для покращення покриття. . HeNB підключається до EPC через інтерфейс S1 та може взаємодіяти з

сусідніми сотами через X2, якщо це передбачено конфігурацією. HeNB працює у двох режимах:

CSG (Closed Subscriber Group) — доступ дозволено лише вибраним абонентам з відповідним USIM.

Open mode — фемтосота доступна для будь-якого UE у зоні дії.

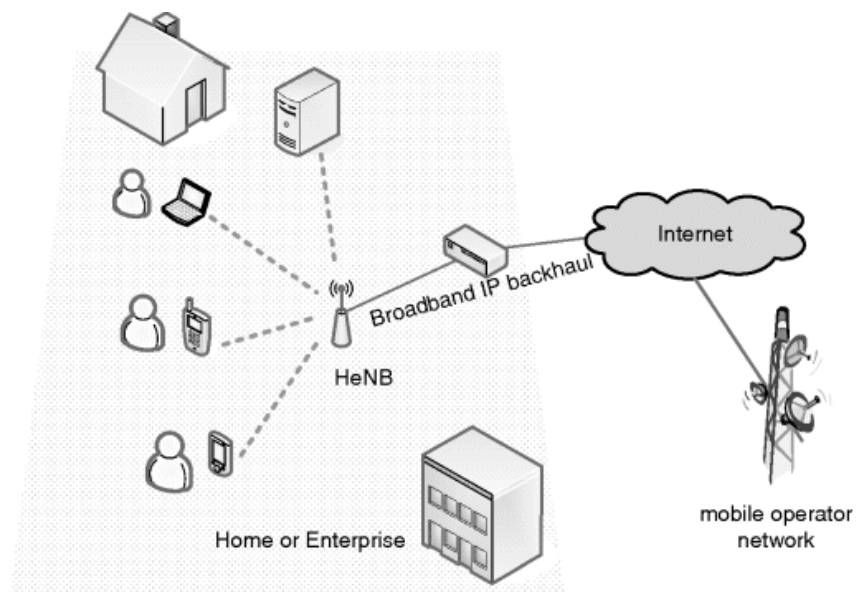


Рисунок 1.3 – Архітектура домашньої базової станції (HeNB) [4]

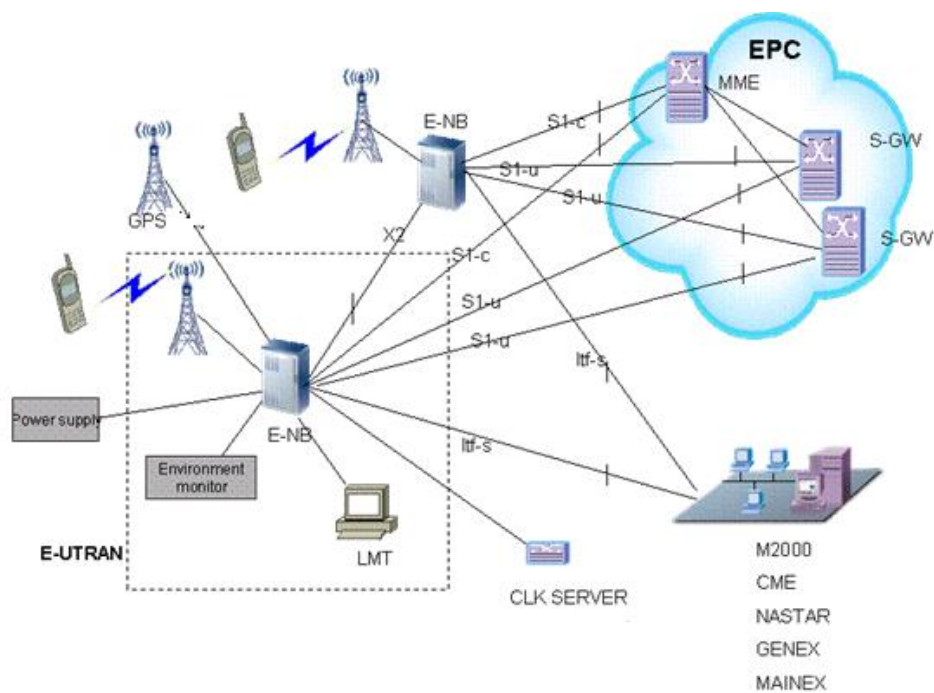


Рисунок 1.4 – Схема взаємодії E-UTRAN та EPC [5]

До додаткових інтерфейсів LTE також належать:

LTE-Uu — радіоінтерфейс між UE та eNodeB, що охоплює передачу сигналізації та користувацьких даних;

Itf-S — інтерфейс управління між eNodeB та системою OAM/EMS, який використовується для конфігурування, моніторингу та обслуговування обладнання.

1.1.3. Компоненти EPC (MME, SGW, PGW, HSS)

EPC (Evolved Packet Core — еволюціоноване пакетне ядро) є ядром мережі LTE. Він складається з декількох вузлів, основними з яких є MME, SGW, PGW і HSS. Ці вузли виконують різні функції, такі як управління мобільністю, аутентифікація, управління сеансами, налаштування носіїв і застосування різних рівнів якості послуг.

LTE EPC забезпечує функціонування основної мережі LTE, автентифікує абонентів, визначає доступ абонентів до мережі, допомагає визначати місцезнаходження UE та в основному сприяє управлінню мобільністю.

MME (Mobility Management Entity, об'єкт управління мобільністю) розташований на межі LTE EPC, між базовою мережею та радіомережею. MME відповідає за обробку сигналів між активними UE та мережею в архітектурі LTE EPC. Він також відповідає за сигналізацію між eNodeB та базовою мережею. Для безперервної роботи MME аутентифікує UE, спілкуючись з HSS, а функція мобільності дозволяє UE отримувати доступ до мережі та відстежує його місцезнаходження та стан.

HSS (Home Subscriber Server, домашній сервер абонентів) — це центральна база даних, яка містить всю необхідну інформацію про абонента та аутентифікацію користувача. Home Subscriber Server також надає інформацію для дзвінків та налаштування IP-сесій. Цей сервер полегшує постачальникам послуг управління інформацією про своїх абонентів у режимі реального часу. Звичайна мобільна мережа потребує лише одного HSS, але їх може бути більше

одного. Якщо їх два або більше, вони повинні спілкуватися між собою та оновлювати свої бази даних, оскільки сервери повинні мати синхронізовану базу даних для належного функціонування.

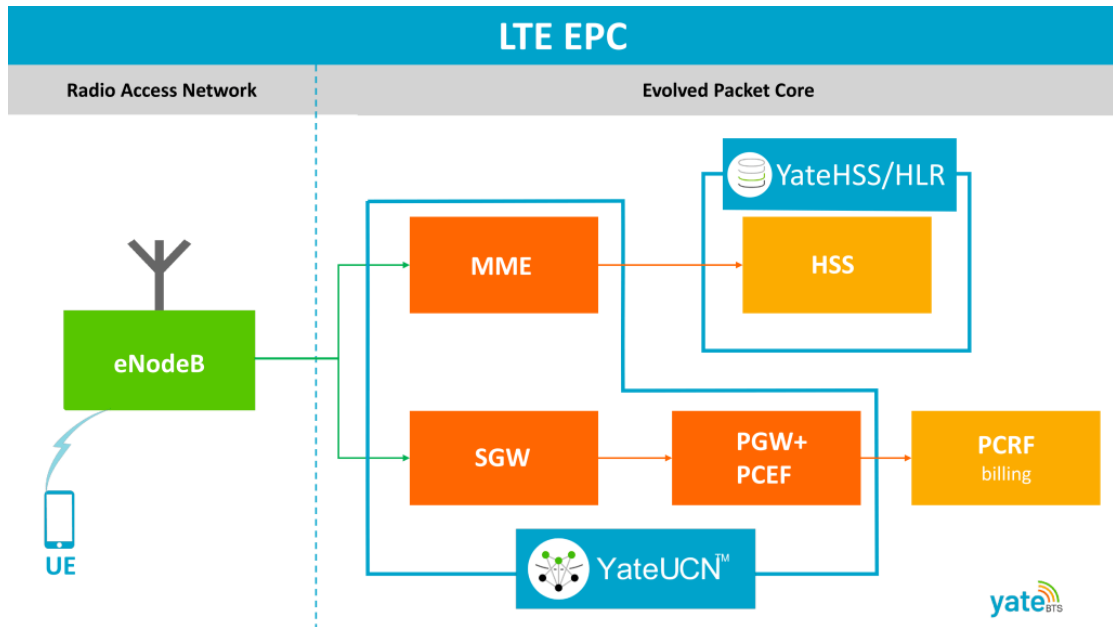


Рисунок 1.5 – Структурна схема EPC [6]

SGW (шлюз обслуговування) обробляє трафік даних користувачів, але не відповідає за використовувані сигналізаційні дані. Він передає IP-дані від UE до основної мережі LTE. SGW також маршрутизує вхідні та вихідні IP-пакети для кращої взаємодії системи та служить якорем для UE, коли він переміщується від одного eNodeB до іншого.

PGW (PDN Gateway) — це мережевий вузол, який з'єднує EPC із зовнішніми IP-мережами. PGW маршрутизує пакети до та з зовнішніх IP-мереж. Крім того, він також розподіляє IP-адреси між усіма UE та застосовує різні політики щодо IP-трафіку користувачів, такі як фільтрування пакетів.

PCRF (Policy and Charging Rules Function, функція політики та правил стягнення плати) визначає політику обслуговування та інформацію про якість обслуговування. Цей вузол гарантує, що користувачі отримуватимуть послуги відповідно до договору, тобто послуги оплачуються відповідно. Він також забезпечує визначення системи оплати.

PCEF (Функція забезпечення дотримання політики та оплати) забезпечує дотримання правил PCRF, вирішуючи, чи повинні дані проходити через PGW.[6]

1.2 Технологічні особливості LTE

1.2.1. OFDMA та SC-FDMA

Для повітряних інтерфейсів LTE використовуються дві технології ортогонального частотного мультиплексування (OFDM): SC-FDMA для висхідного каналу та OFDMA для низхідного каналу. OFDM схожий на FDM, але використовує менший інтервал між піднесучими для підвищення спектральної ефективності.

OFDMA: ортогональний частотний поділ множинного доступу

SC-FDMA: одночастотний поділ множинного доступу, який можна розглядати як технологію модуляції або мультиплексування

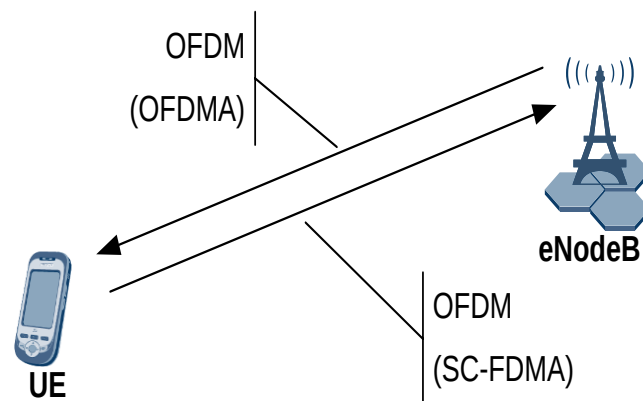


Рисунок 1.6 – Принципи роботи OFDMA та SC-FDMA [3]

У LTE для організації доступу до радіоканалу використовуються дві різні технології мультиплексування: *OFDMA* на низхідній лінії зв'язку (DL) та *SC-FDMA* на висхідній (UL). Їх вибір обумовлений особливостями формування сигналу, енергоспоживанням та вимогами до роботи термінального обладнання.

Основою OFDMA є технологія OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), у якій вихідна смуга пропускання розділяється на велику кількість ортогональних піднесучих. Кожна піднесуча модулюється окремо (QPSK, 16QAM або 64QAM у LTE). В системах LTE використовується інтервал між піднесучими 15 кГц, що дозволяє розмістити сотні піднесучих у заданій смузі частот.

Паралельна передача даних на багатьох піднесучих забезпечує:

- зменшення швидкості символів на кожній піднесучій.
- високу стійкість до міжсимвольної інтерференції (ISI).
- кращу роботу в умовах багатопробеневого поширення.
- можливість адаптивного розподілу частотно-часових ресурсів між користувачами.

Система LTE планує ресурси часової області для 12 піднесучих одночасно. Виділені ресурси області та 12 піднесучих складають фізичний ресурсний блок (PRB). 12 модульованих символів OFDM у кожному RB передаються одночасно.

Потужність, що використовується для передачі, є позитивним піковим значенням (однакові символи) або негативним порожнім значенням (різні символи). Тому система OFDM має високий PAPR, що висуває високі вимоги до підсилювача потужності в передавачі. Процес формування сигналу включає:

- Модуляцію символів (QPSK/16QAM/64QAM).
- Паралізування потоку даних на множину піднесучих.
- Застосування IFFT, яке перетворює сигнал із частотної області в часову.
- Додавання циклічного префікса (CP) для запобігання ISI.

У системах OFDM циклічні префікси (CP) використовуються для зменшення розсіювання затримки та мінімізації міжсимвольної інтерференції (ISI). Довгий CP збільшує здатність системи OFDM запобігати багатопробеневій затримці. Однак це також збільшує накладні витрати системи. [7]

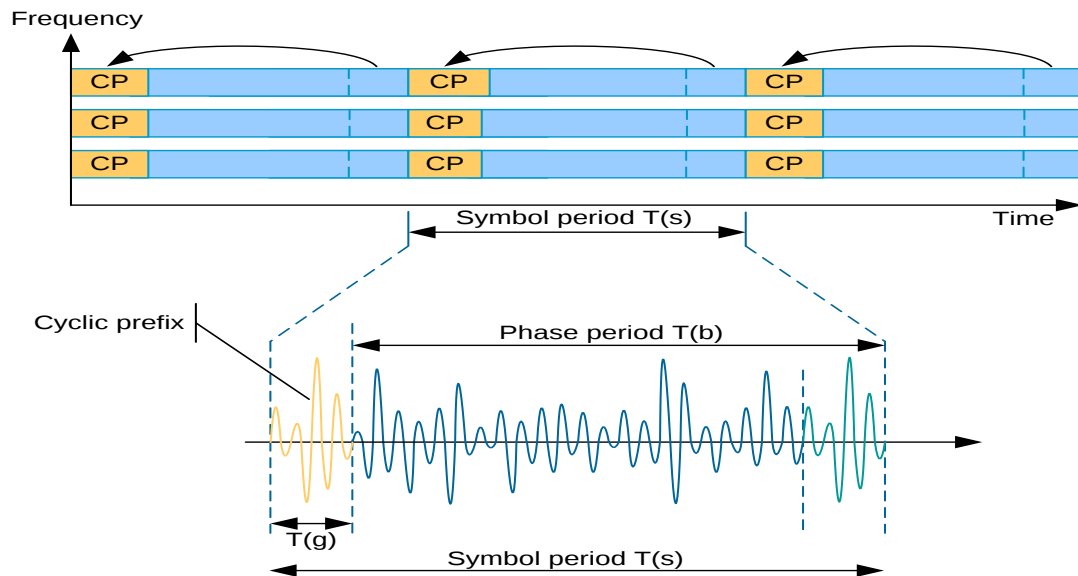


Рисунок 1.7 – Принцип роботи циклічного префікса (CP) [3]

OFDM — надає користувачам лише часовий ресурс.

OFDMA — дозволяє виділяти користувачам одночасно часові та частотні ресурси.

Це дає змогу реалізувати *frequency-selective scheduling*: базова станція може давати кожному користувачу ті піднесучі, де якість сигналу для нього найкраща. Завдяки цьому збільшується пропускна здатність та ефективність використання спектра. Саме тому OFDMA ідеально підходить для низхідного каналу LTE.

Використання OFDMA у висхідному каналі неможливе через високе *PAPR* (*Peak-to-Average Power Ratio*). Високе PAPR вимагає дуже лінійного підсилювача, що суттєво збільшує енергоспоживання UE.

Для вирішення цієї проблеми у UL застосовано *SC-FDMA*, яка має властивості сигналу з однією несучою і набагато нижчий PAPR.

Формування сигналу включає:

- Модуляцію даних.
- DFT-преобробку — перетворення символів у частотну область.
- IFFT — утворення багатопіднесучого сигналу.
- Додавання циклічного префікса.

DFT-преобробка забезпечує те, що після IFFT кожна піднесуча містить частину кожного символу. Це означає, що:

- Сигнал у часовій області має властивості однесучого сигналу.
- PAPR значно менший, ніж в OFDMA.
- Підсилювач UE працює ефективніше.
- Покращена енергетична стійкість висхідного каналу.

1.2.2. MIMO, beamforming

MIMO — це антенна технологія для бездротового зв'язку, в якій використовується кілька антен як на передавачі, так і на приймачі. *MIMO* може збільшити швидкість передачі за допомогою просторового мультиплексування та покращити якість каналу за рахунок просторового рознесення без збільшення потужності передачі чи пропускної здатності.

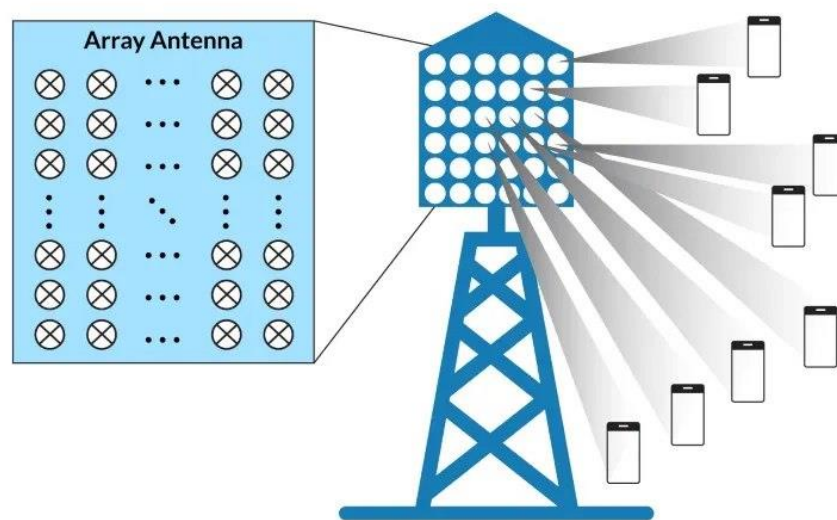


Рисунок 1.8 – Принцип роботи MIMO [8]

Дослідження стандарту MIMO починається з версії 3GPP 5 і завершується у версії 3GPP 7 двома стандартними рішеннями:

PARC (Керування швидкістю на антену) розвивається з теорії, що кількість MIMO-каналів з розімкнутим контуром може досягати межі пропускної здатності Шеннона. Рішення PARC застосовується до UTRA TDD.

D-TxAA (Подвійна передавальна антенна решітка) використовує технологію просторового мультиплексування для передачі кількох потоків даних.

Ефективність технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) у мережах LTE значною мірою залежить від умов радіоканалу та параметрів конфігурації системи, а саме від цих факторів:

Кількість передавальних (TX) та приймальних (RX) антен – збільшення числа антенних елементів розширює можливості просторового мультиплексування і забезпечує більше антенне посилення. Чим більше антен у конфігурації (наприклад, $2 \times 2 \rightarrow 4 \times 4 \rightarrow 8 \times 8$), тим вищий потенціал для підвищення пропускної здатності та надійності прийому.

Кореляція між просторовими каналами – низька кореляція каналів є ключовою умовою для отримання реального просторового виграшу. Коли сигнали з різних антен проходять незалежними шляхами, MIMO може ефективно розкласти просторові потоки. Висока кореляція призводить до втрати незалежності каналів і, відповідно, зменшує MIMO-посилення.

Співвідношення сигнал/перешкода+шум (SINR) – високий рівень SINR дозволяє мережі застосовувати складніші MIMO-схеми та кращі модуляції. За умов високого SINR просторові потоки можуть передаватися одночасно без істотних взаємних завад, що забезпечує більше підсилення.

Швидкість руху абонентського пристрою (UE mobility) – MIMO найефективніше працює у квазістаціонарних або повільнорухомих сценаріях, де характеристики каналу змінюються повільно. При високій мобільності часті зміни каналу ускладнюють точну оцінку просторової матриці та знижують можливе посилення.

У системах LTE реалізовано декілька режимів роботи MIMO, які можуть адаптивно змінюватися залежно від якості каналу, умов поширення та кількості доступних антен.

Spatial Multiplexing (просторове мультиплексування) – вимірюється за максимальною кількістю різних фрагментів даних, які система може передати одночасно, що зазвичай позначається рангом або кількістю шарів.

Просторове мультиплексування вимагає низької кореляції антен. Тобто канали є незалежними між кожною парою антен TX і RX. Це режим, за якого кілька незалежних потоків даних передаються одночасно через різні антени, використовуючи властивості багатопроменевого середовища. Одержувач розділяє ці потоки завдяки різниці просторових характеристик сигналів. [9]

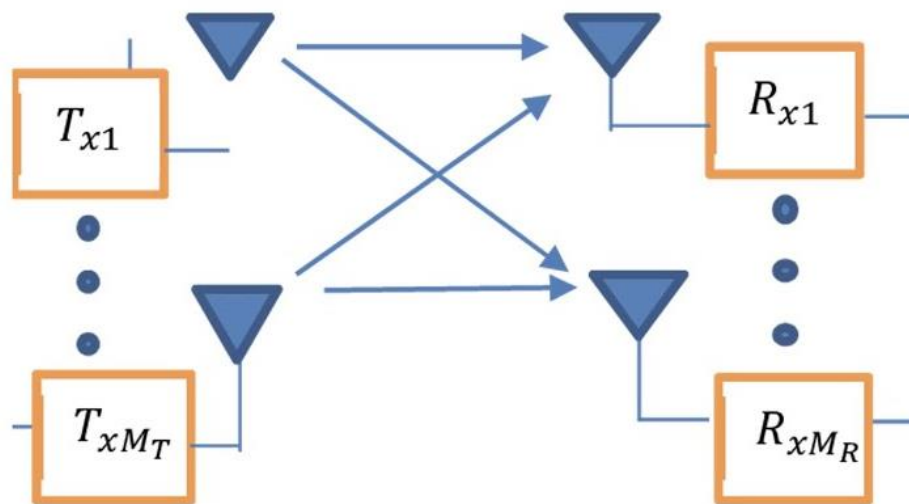


Рисунок 1.9 – Просторове мультиплексування [10]

Transmit Diversity (передавальна різноманітність) – у режимі диверсифікації фрагмент даних передається кілька разів, щоб підвищити ймовірність правильного прийому. Порядок диверсифікації — це теоретичне представлення відмовостійкості просторових каналів. Чим більший коефіцієнт диверсифікації, тим менша ймовірність символних помилок. Transmit Diversity спрямована на підвищення надійності передачі даних, особливо за складних умов поширення. Один і той самий інформаційний потік передається через кілька антен з використанням спеціальних схем обробки.

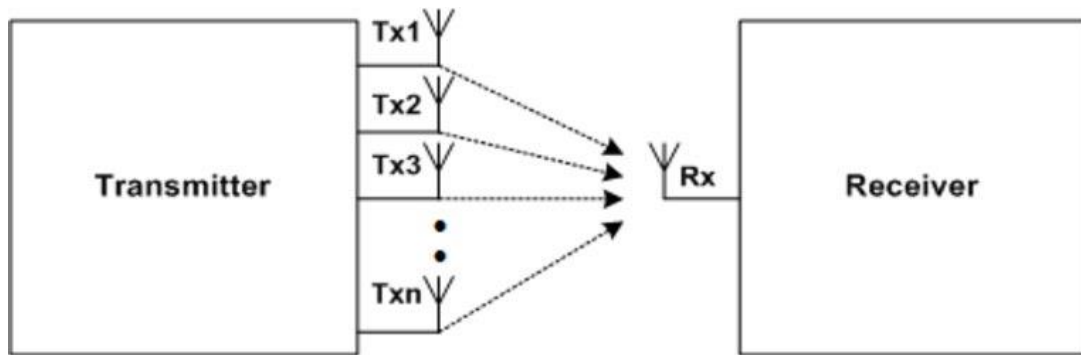


Рисунок 1.10 – Передавальна різноманітність [11]

На початковому етапі розгортання мережі MIMO та HSDPA працюють в одній комірці, щоб повністю використовувати частотні ресурси та зменшити витрати мережі. Якщо частотних ресурсів достатньо, можна налаштувати комірки, здатні використовувати лише MIMO, щоб максимізувати переваги просторового рознесення MIMO. Зокрема, MIMO покращує якість каналу без збільшення потужності передачі чи пропускної здатності.

Формування променя (Beamforming) – це функція низхідного каналу з кількома антенами. За допомогою формування променя eNodeB зважає дані низхідного каналу перед передачею, щоб сформувати вузький промінь до цільових UE, тим самим збільшуючи силу сигналу на стороні UE.



Рисунок 1.10 – Beamforming у системах MIMO [3]

Посилення решітки – завдяки суперпозиції, білий шум компенсує один одного, а енергія сигналів несучих збільшується, тим самим покращуючи SINR.

Посилення рознесення – у разі глибокого затухання забезпечується покращення рознесення, що покращує стабільність сигналу.

Посилення мультиплексування – для передачі різних даних використовуються однакові часово-частотні ресурси, що збільшує пропускну здатність.

eNodeB спрямовує промені до цільових UE у режимі реального часу, збільшуючи SINR. [12]

Коли формування променя не використовується, розмір променя та положення пелюсток фіксовані. Коли UE знаходиться між двома променями на краю комірки, сигнали слабкі.

Коли формування променя ввімкнено, eNodeB накладає вагові коефіцієнти на сигнали та регулює розмір променя таким чином, щоб головна пелюстка була спрямована на UE, покращуючи силу сигналу на стороні UE.

1.2.3. Частотні діапазони LTE

Однією з ключових переваг технології LTE є можливість її розгортання у широкому спектрі частотних діапазонів. Стандарт 3GPP визначає десятки LTE-бендів, які відрізняються частотами, шириною каналу та типом дуплексу. Усі діапазони LTE поділяються на дві основні групи:

- *FDD (Frequency Division Duplex)* — використовується розділення частот для UL (uplink) та DL (downlink).
- *TDD (Time Division Duplex)* — UL та DL передаються на одній частоті, але розділяються у часі.

Основні LTE FDD-діапазони

Band 1 (2100 МГц) — 1920–1980 МГц (UL), 2110–2170 МГц (DL)

Використовується для забезпечення високих швидкостей у міських умовах. Забезпечує хороший баланс між ємністю та покриттям.

Band 3 (1800 МГц) — 1710–1785 МГц (UL), 1805–1880 МГц (DL) Один із найпоширеніших LTE-бендів у Європі. Забезпечує хорошу пропускну здатність і відносно велике покриття, що робить його універсальним для міської та приміської зон.

Band 7 (2600 МГц) — 2500–2570 МГц (UL), 2620–2690 МГц (DL) Надає високу ємність, тому використовується у великих містах і зонах із великим навантаженням (стадіони, ТРЦ, ділові центри). Покриття менш радіусне через високу частоту.

Band 8 (900 МГц) — 880–915 МГц (UL), 925–960 МГц (DL) Низькочастотний діапазон з великим радіусом дії та високою проникністю сигналу в приміщення. Часто застосовується як базовий шар покриття та для забезпечення VoLTE. У багатьох країнах отриманий шляхом refarming GSM-900.

Band 20 (800 МГц) — 832–862 МГц (UL), 791–821 МГц (DL) Забезпечує дуже велике покриття завдяки низьким частотам. Оптимальний для сільських територій, автомагістралей і глибокого indoor-покриття.

Band 28 (700 МГц) — 703–748 МГц (UL), 758–803 МГц (DL) Сучасний низькочастотний бенд, який часто застосовується для розширення покриття у великих зонах та покращення сигналу всередині будівель.

Основні LTE TDD-діапазони

Band 38 (2600 TDD) — 2570–2620 МГц Використовується у міських умовах для збільшення ємності мережі. Підтримує гнучке співвідношення UL/DL.

Band 40 (2300 TDD) — 2300–2400 МГц Поширений у країнах Азії. Підходить для високої ємності та щільного міського покриття.

Band 41 (2500 TDD) — 2496–2690 МГц Широкий діапазон зі значним потенціалом пропускної здатності. Часто використовується в LTE-A для Carrier Aggregation.

Вищі частоти (наприклад, 2600 МГц) забезпечують високу швидкість, але малий радіус дії. Нижчі частоти (700–900 МГц) забезпечують велике покриття та добру проникність, але меншу ємність.

Важливою характеристикою LTE є також підтримка різних значень *смуги пропускання (channel bandwidth)*. Стандарт LTE дозволяє використовувати

ширину каналу: 1.4, 3, 5, 10, 15 і 20 МГц, що робить технологію надзвичайно адаптивною до умов спекτροвої доступності.

Вузькі канали (1.4–5 МГц) використовуються у випадках обмеженого спектра або як допоміжні несучі для розширення покриття.

Широкі канали (10–20 МГц) забезпечують високі швидкості та високу ємність мережі, особливо у міських умовах. [13]

1.2.4. Типи каналів у радіоінтерфейсі LTE

Архітектура радіоінтерфейсу LTE організована за трирівневою системою каналів, де кожен рівень відповідає за свій тип інформації та виконує чітко визначені функції. Логічні, транспортні та фізичні канали спільно забезпечують передачу службових сигналів, керуючих команд і користувацьких даних.

У таблицях нижче наведено детальний опис кожної групи каналів, їхні функції та роль у забезпеченні надійного покриття, стабільної енергетики сигналу та ефективної роботи LTE-мережі.

Таблиця 1.1 – Логічні канали (Logical Channels)

Тип	Канал	Призначення
Керуючі канали (Control Channels)	BCCH (Broadcast Control Channel)	Транслює системну інформацію (MIB/SIB), необхідну UE для доступу до мережі, вибору соти, конфігурації радіоінтерфейсу та параметрів безпеки.
	PCCH (Paging Control Channel)	Використовується мережею для пейджингу UE, коли необхідно встановити з'єднання або повідомити про вхідний дзвінок/дані у станах Idle/Connected DRX.
	CCCH (Common Control Channel)	Канал початкової сигналізації UE, використовується на етапі Random Access, поки UE ще не має виділених ресурсів.
	DCCH (Dedicated Control Channel)	Передає індивідуальну сигналізацію RRC для конкретного UE: встановлення bearer, handover,

		налаштування безпеки, вимірювальні звіти.
Трафікові канали (Traffic Channels)	DTCH (Dedicated Traffic Channel)	Канал для передачі користувацьких даних (інтернет, відео, VoLTE), індивідуально виділений конкретному UE.
	MTCH (Multicast Traffic Channel)	Передає групові мультимедійні трансляції (eMBMS, broadcast/multicast відео).

Таблиця 1.2 – Транспортні канали (Transport Channels)

Напрямок	Канал	Призначення
Downlink (DL)	BCH (Broadcast Channel)	Передає MIB, використовується UE після початкової синхронізації для отримання базових параметрів соти.
	DL-SCH (Downlink Shared Channel)	Основний транспортний канал передачі даних у DL: користувацькі дані, SIB, RRC, NAS. Підтримує HARQ, адаптивну модуляцію та кодування.
	PCH (Paging Channel)	Транспортний канал у мережі LTE, який використовується для передачі пейджингових повідомлень від базової станції до користувацького обладнання (UE), коли воно знаходиться в стані очікування (idle mode).
	MCH (Multicast Channel)	Канал для доставки eMBMS-трафіку багатьом користувачам одночасно.
Uplink (UL)	UL-SCH (Uplink Shared Channel)	Основний транспортний канал UL — передає користувацькі дані та частину RRC/NAS сигналізації; підтримує адаптивну модуляцію, HARQ.
	RACH (Random Access Channel)	Використовується UE для ініціалізації доступу (Random Access), синхронізації та запиту ресурсів при вході/поверненні до мережі.

Таблиця 1.3 – Фізичні канали (Physical Channels)

Напрямок	Канал	Призначення
Downlink (DL)	PBCH (Physical Broadcast Channel)	Передає MIB та базову системну інформацію, що дозволяє UE ініціалізувати роботу з мережею.
	PDCCH (Physical Downlink Control Channel)	Передає DCI — розподіл ресурсів, MCS, HARQ-інструкції для DL/UL.
	PDSCH (Physical Downlink Shared Channel)	Головний канал передачі користувацьких даних та частини службової інформації.
	PCFICH (Control Format Indicator Channel)	Вказує UE розмір control region у першому OFDM-символі кадру (скільки ресурсів займає PDCCH).
	PHICH (Hybrid ARQ Indicator Channel)	Передає ACK/NACK для UL-HARQ, вказуючи UE на успішність передачі.
Uplink (UL)	PUSCH (Physical Uplink Shared Channel)	Основний канал UL передачі даних та частини сигналізації.
	PUCCH (Physical Uplink Control Channel)	Передає ACK/NACK, CQI, SR та інші UL-контрольні повідомлення.
	PRACH (Physical Random Access Channel)	Канал для початкового доступу UE: надсилання прелюда (preamble) для Random Access.

1.3. Основні сервіси LTE

Мережа LTE створена як універсальна платформа для доставки широкого спектра цифрових послуг. Вона забезпечує ефективну роботу сервісів як реального часу, так і додатків, що не потребують миттєвої реакції. На відміну від попередніх поколінь, LTE базується виключно на пакетній комутації, а традиційний голос передається у вигляді IP-пакетів. Це дозволило уніфікувати архітектуру, підвищити гнучкість мережі та забезпечити якісну роботу різноманітних сервісів.

1.3.1. Голосовий дзвінок у реальному часі (Conversational Voice)

Conversational Voice — це двосторонній голосовий зв'язок у режимі реального часу. Основна характеристика цього сервісу — взаємодія із затримкою, що має бути непомітною для користувача. У мережах LTE голос реалізується через технологію VoLTE (Voice over LTE), яка використовує IMS-архітектуру та кодеки широкого діапазону (AMR-WB, EVS). Особливості сервісу: обмін голосовими пакетами в обох напрямках одночасно; висока чутливість до коливань затримки та втрат пакетів; оптимізація під постійний і рівномірний трафік невеликого обсягу; використання спеціальних профілів QoS у мережі для стабільності. Основною метою Conversational Voice є забезпечення можливості природного спілкування, коли реакції співрозмовників синхронні та без відчутних затримок.

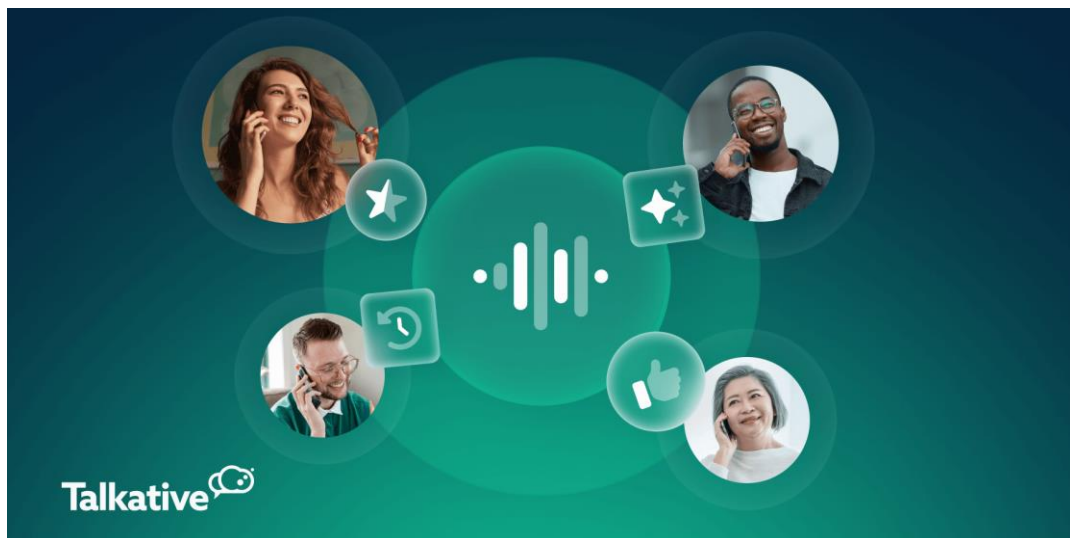


Рисунок 1.11 – Голосовий дзвінок у реальному часі [14]

1.3.2. Відеозв'язок у реальному часі (Conversational Video)

Conversational Video — це сервіс відеозв'язку в реальному часі, який поєднує аудіо- та відеопотоки між двома користувачами. Він належить до найбільш вимогливих типів трафіку, оскільки одночасно потребує: низької затримки для синхронності діалогу; достатніх швидкостей передачі відео;

стабільності каналу в обох напрямках. Прикладами таких сервісів є відеодзвінки у WhatsApp, FaceTime, Zoom або IMS Video Telephony. Особливістю є використання кодеків, що адаптують якість зображення до доступної пропускної здатності, зменшуючи роздільність або частоту кадрів при погіршенні радіосигналу.

1.3.3. Онлайн-ігри в реальному часі (Real-time Gaming)

Real-time Gaming — це інтерактивні онлайн-ігри, де взаємодія між користувачами або між користувачем і сервером відбувається в режимі реального часу. Найважливішими аспектами для цього типу сервісів є: дуже мала затримка; стабільність каналу; висока частота обміну короткими пакетами. У мобільному середовищі це особливо складно забезпечити через зміну радіоумов, хендовери та навантаження на мережу. Ігри жанру FPS або Battle Royale (наприклад, PUBG Mobile, Fortnite, Call of Duty Mobile) потребують оперативної доставки кожного пакета, оскільки затримка безпосередньо впливає на результат.

1.3.4. Буферизоване потокове відео (Non-conversational Video / Buffered Streaming)

Буферизоване потокове відео — це потокове відео, яке відтворюється з буфером. На відміну від сервісів реального часу, тут допускається значна затримка між моментом отримання даних і їх відтворенням. Аплікація створює буфер із кількох секунд відео, завдяки чому: не потрібні дуже низькі затримки; можлива компенсація короточасних втрат або коливань пропускної здатності; відеоплеєр може динамічно регулювати якість. Типові приклади — YouTube, Netflix, TikTok та інші стримінгові платформи, де використовуються алгоритми адаптивного бітрейту (наприклад, MPEG-DASH або HLS). Сервіс формує запити на сегменти відео різної якості залежно від доступної швидкості LTE.

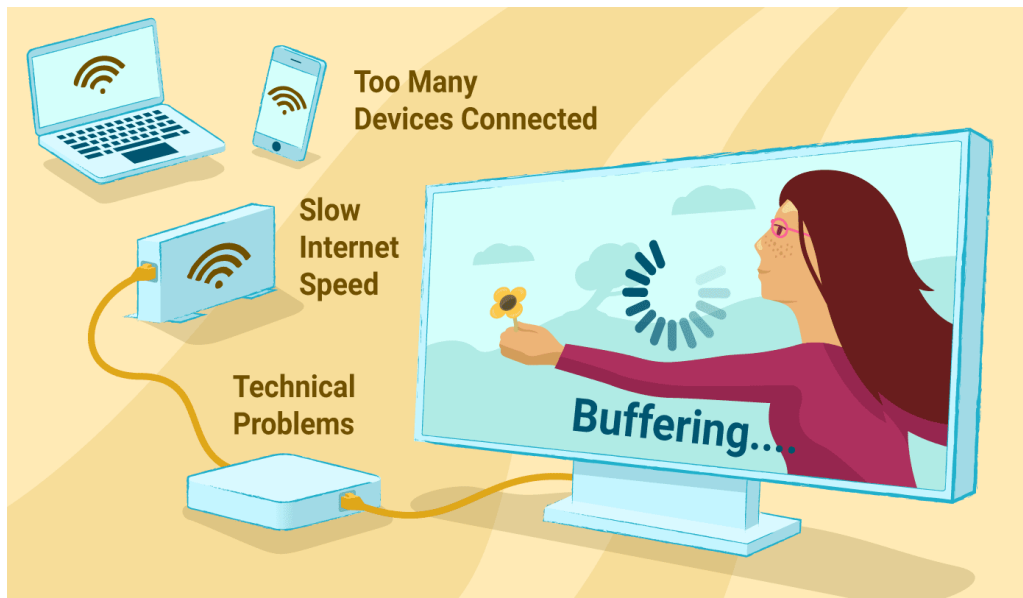


Рисунок 1.12 – Буферизоване потокове відео [15]

1.3.5. IMS-сигналізація (IMS Signaling)

IMS Signaling — це службові дані, що забезпечують роботу голосових, відео- та мультимедійних послуг у LTE. Сигналізація включає: встановлення з'єднання; аутентифікацію; параметри QoS; підтримання сесії; завершення виклику. Хоча такі пакети мають невеликий обсяг, вони критичні для функціонування сервісів, таких як VoLTE або IMS Video Telephony. Порушення в IMS-сигналізації призводять до збоїв під час набору номера, затримок при встановленні виклику або обривів сесії

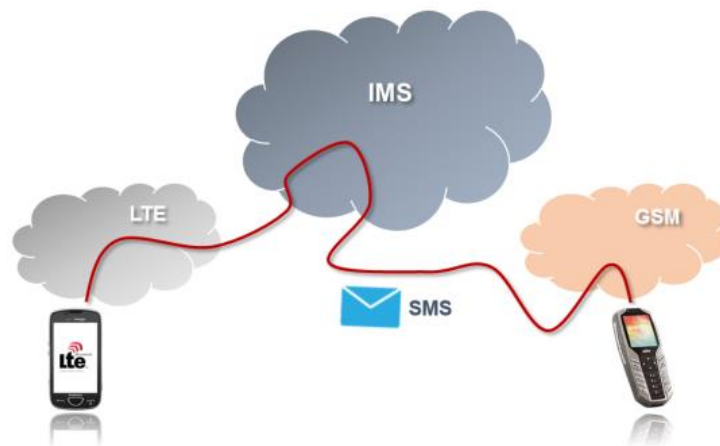


Рисунок 1.13 – IMS-сигналізація [16]

1.3.6. Буферизоване відеострімінг-відтворення (Video Buffered Streaming)

Цей тип сервісу схожий із non-conversational streaming, але робить акцент саме на відеоконтенті, що має можливість масштабування бітрейту. Стрімінгові платформи використовують складні алгоритми адаптації до умов LTE-мережі, що дозволяє: уникати буферизації при тимчасовому падінні швидкості; підбирати відповідну якість залежно від SINR та рівня завантаження соти; зменшувати втрати пакетів за допомогою буферів та механізмів виправлення. Цей сервіс є одним із найпоширеніших у LTE через його невибагливість і зручність для користувачів.

1.3.7. Пряма трансляція (Live Streaming)

Live Streaming — це пряма трансляція аудіо- або відеоконтенту. На відміну від buffered streaming, цей сервіс потребує: значно меншої затримки, стабільного висхідного та низхідного каналу, однакового потоку даних у часі. Прикладами є прямі спортивні трансляції, стріми ігор, концерти, вебінари. Відео не можна заздалегідь завантажити у буфер, тому мережа повинна забезпечити рівномірний потік у режимі близькому до реального часу.

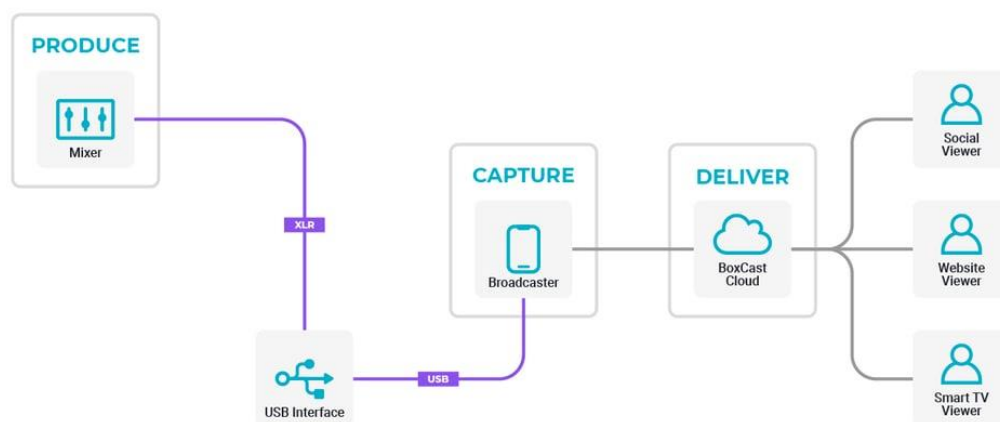


Рисунок 1.14 – Робочий процес прямої трансляції [17]

1.3.8. TCP-сервіси з пріоритетом (TCP Based Application - Privileged Subscriber)

TCP-сервіси з пріоритетом – це мережні сервіси, що використовують транспортний протокол TCP і забезпечуються з вищим пріоритетом для певних категорій користувачів — зазвичай корпоративних або спеціальних (premium). Такі сервіси можуть включати: хмарні офісні застосунки; зашифровані корпоративні VPN-канали; віддалений доступ до серверів; критично важливі бізнес-процеси. Пріоритет тут важливий, адже TCP погано працює при втраті пакетів або нестабільній смузі: він зменшує швидкість і суттєво падає в продуктивності.

1.3.9. TCP-сервіси без пріоритету (TCP Based Application - Non-Privileged Subscriber)

Це стандартні інтернет-сервіси, якими користуються звичайні абоненти LTE: перегляд веб-сторінок; завантаження файлів; месенджери; поштові сервіси; неінтерактивні мобільні додатки. Ці сервіси відносно нечутливі до затримки, адже TCP має власні механізми переподавлення й контролю помилок. Проте їх швидкодія напряду залежить від пропускну здатності й рівня радіосигналу.

1.4. Протокольна архітектура LTE (PHY → APP)

Протокольна архітектура LTE складається з кількох рівнів, кожен з яких виконує свою функцію в процесі передачі користувацьких та службових даних.

На найнижчому рівні знаходиться *фізичний рівень (PHY)*, який відповідає за модуляцію, кодування, формування радіосигналу, роботу з ресурсними блоками та передачу інформації по радіоканалу. Саме тут реалізується OFDMA

в downlink та SC-FDMA в uplink, виконується корекція помилок, адаптація модуляції та потужності відповідно до умов радіоканалу.

Над PHY працює *рівень MAC*. Його основним завданням є розподіл радіоресурсів між користувачами, мультиплексування різних потоків даних, ARQ-перепередачі, а також формування транспортних блоків для передачі на фізичний рівень. MAC визначає пріоритети трафіку, забезпечує QoS та адаптивно реагує на зміну навантаження в соті, керуючи ресурсами у реальному часі.

Вище розташований *рівень RLC*, що забезпечує сегментацію та збирання пакетів, контроль цілісності передачі та, залежно від режиму (AM/UM/TM), може виконувати або не виконувати повторні передачі. RLC відповідає за поділ великих IP-пакетів на менші RLC-PDU та їх об'єднання на приймальній стороні, забезпечуючи правильний порядок доставки.

Наступний рівень — *PDCP*, який виконує шифрування та цілісність даних користувача, а також хедер-компресію (ROHC) для зменшення службової інформації в IP-пакетах. PDCP також грає важливу роль у процесі handover, забезпечуючи буферизацію та пересилання PDCP-PDU між базовими станціями при переміщенні UE.

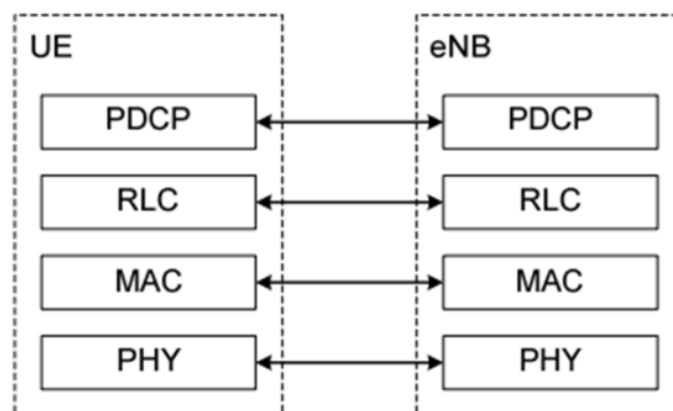


Рисунок 1.15 – Протокольний стек в LTE [18]

На верхньому рівні розташований *рівень застосувань (APP)*, де працюють різні сервіси: VoLTE, відеострімінг, онлайн-ігри, мобільний інтернет,

месенджери тощо. АРР генерує користувацькі ІР-пакети, які проходять усі нижчі рівні перед відправленням по радіоінтерфейсу.

Узгоджена система взаємодії рівнів забезпечує оптимальну передачу даних залежно від типу сервісу та умов мережі. Кожен рівень виконує свої специфічні функції, а разом вони формують гнучку та ефективну платформу для сучасних мобільних послуг.

1.5 Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто архітектуру мережі LTE/EPC, її ключові компоненти та принципи функціонування радіоінтерфейсу. Проаналізовано роль користувацького обладнання, транспортних інтерфейсів та елементів ядра мережі, що забезпечують обмін даними та управління з'єднаннями.

Було висвітлено основні технологічні особливості LTE, зокрема використання OFDMA та SC-FDMA, впровадження MIMO та beamforming, а також специфіку частотних діапазонів. Ці технології визначають ефективність передачі та безпосередньо впливають на якість сервісів у мережі.

Розглянуто типи логічних, транспортних і фізичних каналів, основні сервіси LTE та протокольну архітектуру, що забезпечує взаємодію між рівнями передачі даних. Особливу увагу приділено тим компонентам та механізмам, які формують показники радіосигналу та визначають рівень якості обслуговування користувачів.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що якість сервісів LTE значною мірою залежить від технологічних рішень та радіопараметрів мережі, а тому їх детальне вивчення є ключовим для подальшого вдосконалення мережевих сервісів. Це створює основу для розробки методів підвищення якості шляхом урахування впливу показників радіосигналу.

РОЗДІЛ 2

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ І СЕРВІСІВ LTE

2.1. Показники якості радіосигналу LTE

Для забезпечення належної якості обслуговування (QoS) у мережах LTE необхідно виконувати комплексну оцінку ключових показників продуктивності (KPI), які визначають здатність мережі підтримувати стабільний та надійний зв'язок за різних умов. Ці параметри дозволяють не лише оцінити поточний стан радіомережі, а й визначити її ефективність у задоволенні потреб користувачів щодо швидкості, затримки та стабільності сервісів. Регулярний моніторинг KPI допомагає виявляти проблемні ділянки покриття, перевантаження секторів, підвищений рівень інтерференції, а також оптимізувати розподіл ресурсів у зоні обслуговування.

Функції QoS охоплюють забезпечення достатньої пропускну здатності для високонавантажених сервісів, мінімізації затримок для чутливих до часу додатків, зниження впливу шумів та інтерференції, а також коректне пріоритезування трафіку залежно від типу сервісу. Завдяки точному аналізу показників якості оператор може підтримувати стабільну роботу мережі навіть за умов зростаючого трафіку та підвищувати загальну якість досвіду користувача (QoE).

До ключових показників QoS належать параметри радіочастотного рівня (RSRP, RSRQ, SINR). Сукупність цих метрик дозволяє комплексно оцінити, наскільки ефективно мережа забезпечує доступ до сервісів та чи відповідає вона вимогам сучасних користувацьких додатків.

2.1.1 RSRP

RSRP (Reference Signal Received Power) – це основний показник, що вимірює рівень потужності прийнятого сигналу від базової станції. Цей

показник вимірюється в дБм (децибел-міліметр) і є критичним для оцінки якості мобільного зв'язку.

- $RSRP > -80$ дБм: висока якість зв'язку
- $-80 \text{ дБм} \geq RSRP > -100$ дБм: середня якість зв'язку
- $RSRP < -100$ дБм: низька якість зв'язку

Чим вищий рівень RSRP, тим краща якість зв'язку, оскільки користувач отримує сильніший сигнал від базової станції. Гарний RSRP забезпечує стабільне з'єднання, знижуючи кількість обривів та втрат сигналу. Низький RSRP може призводити до поганої якості зв'язку, що включає повільну передачу даних, часті обриви з'єднання та слабкий сигнал

2.1.2 RSRQ

RSRQ (Reference Signal Received Quality) характеризує відносну якість прийнятого сигналу, враховуючи вплив шумів та інтерференції. Це важливий показник для визначення ефективності використання частотного спектра та оцінки якості покриття.

- Висока якість сигналу: від -3 до -10.
- Прийнятна якість: від -10 до -15.
- Низька якість: нижче -15.

Високий рівень RSRQ свідчить про ефективне використання частотного спектру, що забезпечує стабільну передачу даних. Низький рівень RSRQ може призвести до зменшення швидкості передачі даних через погіршення якості сигналу. Під час переходу між сотами (хендовер) мережа використовує RSRQ для вибору найкращої базової станції.

2.1.3 SINR

SINR вимірює співвідношення між корисним сигналом, шумом та перешкодами. Вимірюється в дБ (децибелах) і показує, наскільки добре

користувач може отримати корисний сигнал у порівнянні з шумом та інтерференцією.

- $SINR > 20$ дБ: висока якість зв'язку
- $10 \text{ дБ} \leq SINR \leq 20$ дБ: середня якість зв'язку
- $SINR < 10$ дБ: низька якість зв'язку

Високий рівень SINR означає менше шуму та інтерференції, що дозволяє передавати дані швидше та з меншою кількістю помилок. Вищий SINR забезпечує більш стабільне з'єднання без частих обривів. Гарний SINR допомагає зменшити затримки (пінг), що важливо для реального часу додатків, таких як відеодзвінки та онлайн-ігри.

На SINR впливають такі показники як перешкоди, відстань до базової станції, навколишнє середовище, стан обладнання та кількість підключених користувачів. [19]

2.1.4 Аналіз основних показників якості зв'язку LTE

Одним із найважливіших ключових показників продуктивності (KPI) у мережах LTE є вимірювання потужності прийнятого сигналу, оскільки він містить важливу інформацію для оцінки якості зв'язку. Кожна точка вимірювання здійснюється через елементи ресурсу (RE), які містять еталонний символ (RS). Найменшою одиницею даних у специфікації LTE є RE, який відповідає одному часовому інтервалу та смузі 15 кГц у частотній області. Кожен ресурсний блок (RB), що складається з 12 RE, передає RS у першому та четвертому OFDM-символах, а всередині OFDM-символу RS присутній у четвертому та шостому RE. Таким чином, визначається середнє значення вимірювань по часових і ресурсних блоках.

Отримана потужність еталонного сигналу (RSRP, Reference Signal Received Power) є одним із найважливіших KPI у LTE. RSRP показує середню потужність сигналу від обслуговуючої комірки в опорному елементі сигналу та не враховує потужність шуму й перешкод. Кожен eNodeB має можливість

регулювати RSRP залежно від обмежень потужності, наприклад через параметр «Енергія на елемент ресурсу» (EPRE) в дБм/15 кГц або через RB. Діапазон значень RSRP коливається від -44 дБм для відмінного сигналу до -140 дБм для слабкого.

Якість отриманого еталонного сигналу також оцінюється за показником RSRQ (Reference Signal Received Quality), який характеризує відносну якість сигналу, враховуючи вплив шумів та інтерференції. Середній діапазон значень RSRQ становить від -20 дБ для сигналу низької якості до -3 дБ для сигналу відмінної якості. Даний показник дозволяє оцінити ефективність використання частотного спектра та стабільність покриття. Низький рівень RSRQ може призводити до зменшення швидкості передачі даних і проблем під час переходу між комірками (хендовер), тоді як високий рівень забезпечує надійну передачу даних і стабільну роботу мережі.

Таблиця 2.1 – Метрики для оцінки якості радіосигналу

Метрика	Формула
Співвідношення корисного сигналу до рівня шуму та перешкод	$SINR = 1/(1/(12 \cdot RSRQ) - x)$
Потужність прийнятого опорного сигналу	$RSRP = (RSRQ \cdot RSSI) / N$

Відношення сигнал/завада (SINR, Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) визначає співвідношення потужності корисного сигналу до сумарної потужності перешкод і шуму. Він враховує вплив сусідніх комірок, інтерференції та теплового шуму. Високий SINR забезпечує швидку передачу даних із мінімальною кількістю помилок та стабільне з'єднання, що важливо для додатків реального часу, таких як відеодзвінки, голосові виклики або онлайн-ігри. Низький рівень SINR сигналізує про наявність перешкод або слабкий сигнал, що призводить до зниження швидкості передачі даних, збільшення затримок та нестабільності з'єднання.

Разом, RSRP, RSRQ та SINR дозволяють оцінити не лише силу сигналу, а й його якість, стабільність та ефективність використання частотного спектра, що є критично важливим для забезпечення надійної роботи LTE-мережі та високого рівня якості обслуговування (QoS) для кінцевих користувачів.

2.2. Показники якості мережевих сервісів (QoS)

Якість роботи мережевих сервісів у LTE значною мірою визначається групою параметрів, що характеризують здатність мережі забезпечувати стабільну, передбачувану та ефективну передачу даних. Основними показниками, що впливають на сприйняття сервісів користувачем, є пропускна здатність, затримка, джиттер, втрати пакетів, а також клас пріоритизації трафіку згідно з QCI-профілями. Кожен із цих параметрів відіграє критичну роль у забезпеченні належної якості обслуговування (QoS), особливо для сервісів реального часу, таких як VoLTE, відеоконференції чи онлайн-ігри.

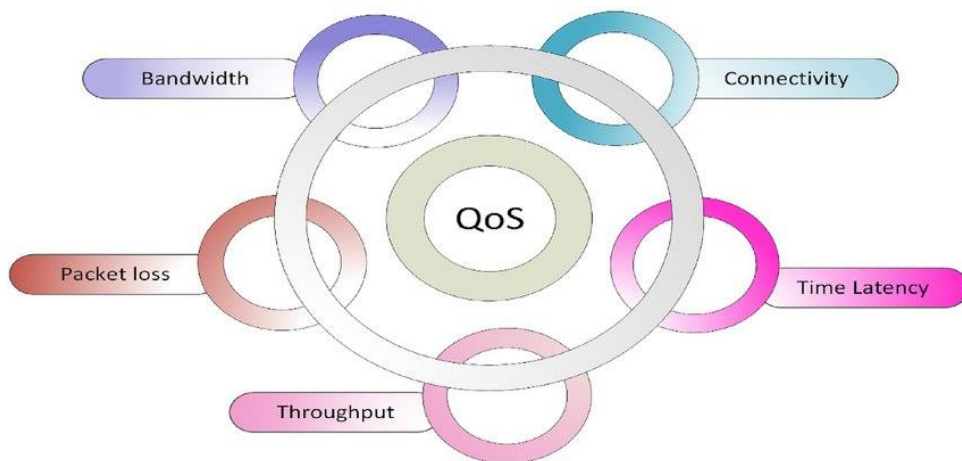


Рисунок 2.1. – Параметри якості обслуговування (QoS) [20]

Пропускна здатність (throughput) є одним із ключових показників QoS у LTE та визначає фактичну швидкість передачі даних, яку отримує користувач у прямому або зворотному напрямку. Throughput залежить від якості радіоканалу, модулювання, доступної кількості ресурсних блоків та завантаженості соти. Високе значення пропускної здатності є критично важливим для сервісів із

великими обсягами трафіку, зокрема потокового відео, завантаження файлів та веб-браузингу.

Затримка (latency) описує час, необхідний пакету даних для проходження від джерела до отримувача. У мережах LTE затримка є мінімальною завдяки оптимізованій архітектурі та використанню EPC. Низька затримка є особливо важливою для сервісів, чутливих до часу, таких як голосові виклики через VoLTE, онлайн-ігри та дистанційне керування. Збільшення затримки погіршує взаємодію користувача зі сервісом, викликаючи затримки реакцій чи погіршення чіткості голосу.

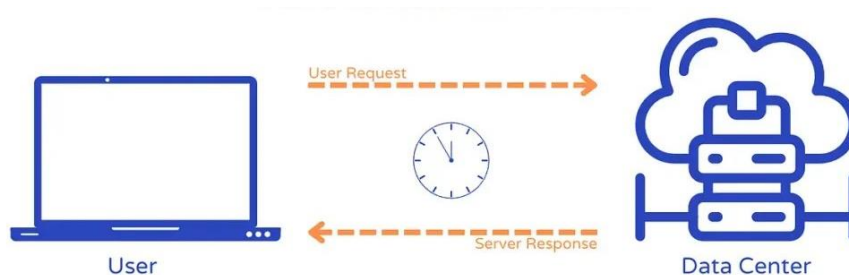


Рисунок 2.2 – Затримка (Latency) у мережі LTE [21]

Джиттер (jitter) визначається як варіація у часі доставки пакетів. Він виникає через коливання затримки в мережі та є критичним параметром для сервісів реального часу. Надмірний джиттер може спричиняти спотворення голосу у VoLTE або погіршення якості відеоконференцій. У мережах LTE джиттер мінімізується завдяки ефективній роботі транспортної мережі та механізмам пріоритизації трафіку.

Для зменшення джиттеру в LTE застосовуються методи буферизації та синхронізації трафіку, що дозволяють вирівняти час прибуття пакетів. Крім того, мережеві елементи використовують параметри QoS (Quality of Service) для забезпечення стабільної передачі даних у сервісах з низькою допустимою затримкою.

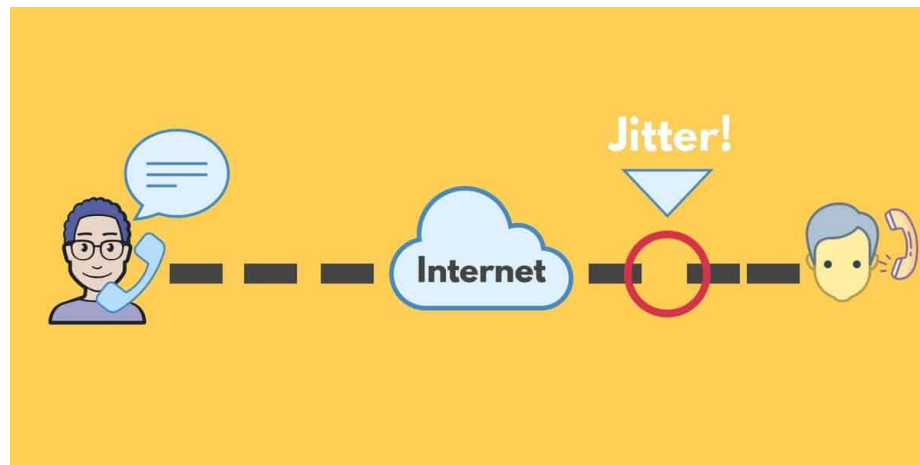


Рисунок 2.3 – Коливання затримки (Jitter) [22]

Втрати пакетів (packet loss) відображають частку пакетів, що не були успішно доставлені до отримувача. Причинами втрат можуть бути інтерференція, нестача ресурсів, перевантаження мережі або помилки на транспортному рівні. Низький рівень втрат є необхідним для стабільної роботи VoLTE, відеострімінгу та важливих сервісів, що потребують надійної передачі даних. Підвищені втрати пакетів призводять до ривків відео, переривань звуку та загального зниження якості сервісу.

Показник пріоритетності (Priority), який визначає черговість обробки трафіку в разі навантаження мережі. Він використовується під час планування ресурсів eNodeB і визначає, які пакети будуть обслуговуватися першочергово. Трафік із вищим пріоритетом отримує доступ до ресурсних блоків раніше, що дозволяє гарантувати стабільну роботу критично важливих сервісів, таких як VoLTE, навіть у перевантажених мережах. Завдяки механізму пріоритетності забезпечується справедливий та ефективний розподіл ресурсів, що на пряму впливає на якість досвіду користувача.

У LTE bearer'и поділяються на *GBR (Guaranteed Bit Rate)* та *non-GBR*, де перші забезпечують гарантовану пропускну здатність для сервісів зі строгими QoS-вимогами (наприклад, VoLTE), тоді як другі використовують доступні ресурси за найкращим зусиллям. Кожен bearer має власний ідентифікатор та параметри QoS, які визначають пріоритет, затримку і надійність передачі

даних. Це дозволяє мережі ефективно розподіляти ресурси радіоінтерфейсу відповідно до типу трафіку та потреб користувачів.

2.3 Вимоги до якості для різних типів сервісів LTE

Різні типи сервісів у LTE мають специфічні вимоги до параметрів якості зв'язку, таких як пропускна здатність, затримка, джиттер, стабільність радіосигналу та допустимі втрати пакетів. Відповідність цим умовам визначає, наскільки повноцінно користувач отримує доступ до відео, голосових викликів, онлайн-ігор та інших сервісів. У LTE якість обслуговування також регулюється через класи QCI, які задають пріоритет, тип ресурсу та допустимі межі затримок і втрат.

2.3.1. Вимоги для потокового відео

Потокове відео потребує стабільного каналу зв'язку з достатньою пропускною здатністю та мінімальними втратами пакетів. Для такого трафіку критичною є не миттєва затримка, а стабільність передачі та відсутність різких провалів у швидкості, які можуть спричиняти буферизацію. Відеосервіси також чутливі до коливань рівня сигналу та якості радіоканалу. У LTE такі сервіси зазвичай обслуговуються через класи QCI, які допускають більшу затримку, але регламентують дуже низький рівень втрат пакетів (QCI 4, QCI 6).

2.3.2. Вимоги для онлайн-ігор

Онлайн-ігри високо чутливі до затримки та джиттера, тому найважливішою характеристикою для них є швидкість реакції мережі. Навіть невелике збільшення затримки може погіршити ігровий досвід або призвести до «ривків» у грі. Втрати пакетів, нестабільність каналу або зниження SINR також безпосередньо позначаються на плавності роботи сервісу. У LTE для такого

типу трафіку використовуються класи з мінімальними допустимими затримками та підвищеним пріоритетом (QCI 3).

2.3.3. Вимоги для VoLTE

VoLTE потребує стабільної та передбачуваної передачі голосових пакетів. Для голосу критичними є затримка, втрати пакетів та джитер, адже голосові пакети не можуть бути повторно передані — у разі втрат це одразу впливає на якість. Важливо, щоб мережа забезпечувала послідовність доставки пакетів та утримувала канал на постійному рівні якості. VoLTE обслуговується класом QCI 1, який має один із найвищих пріоритетів та жорсткі вимоги до затримки.

2.3.4. Вимоги для веб-браузингу та соціальних мереж

Такі сервіси менш чутливі до миттєвої затримки та невеликих коливань швидкості, але потребують стабільного з'єднання та достатньої пропускної здатності для швидкого завантаження сторінок, зображень і мультимедіа. Найважливішим є відсутність серйозних втрат пакетів і сталий рівень SINR для підтримання рівномірної швидкості передачі даних. У більшості випадків цей трафік проходить за найнижчими пріоритетами, наприклад QCI 8–9.

2.3.5. Вимоги для сервісів великого трафіку (файлообмін)

Сервіси, що генерують великі обсяги даних, перш за все потребують високої пропускної здатності та стабільних умов роботи радіоканалу. Основною вимогою є максимально швидка передача даних без різких падінь швидкості. Допустима затримка може бути значною, однак втрати пакетів повинні залишатися мінімальними, щоб уникнути надмірних повторних

передач, характерних для TCP. У LTE такі сервіси працюють здебільшого через класи QCI 8–9, які не мають жорстких вимог до затримок.

2.3.6 Нормативні значення QCI-класів

Вимоги до якості роботи різних типів сервісів у LTE безпосередньо визначаються їхньою чутливістю до затримки, втрат пакетів, джитера та пропускної здатності. Для забезпечення оптимальної роботи цих сервісів у мережі застосовуються класи QCI, що формалізують необхідні параметри обслуговування — пріоритетність, максимально допустиму затримку доставки пакета, рівень втрат та тип ресурсу (GBR або non-GBR).

Завдяки цьому мережа може коректно розподіляти радіоресурси між користувачами та сервісами, забезпечуючи вищий пріоритет для критичних потоків (VoLTE, онлайн-ігри) та більш гнучке обслуговування для сервісів із невисокими вимогами (веб-браузинг, файлообмін). [23]

Нормативні значення затримки, втрат пакетів, пріоритетів та типів ресурсів для різних сервісів визначаються QCI-класами та наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.2 – Нормативні значення QCI-класів

QCI LTE	Services	Resource Type	Priority	Packet Delay Budget	Packet Error Loss Rate
QCI1	Conversational Voice	GBR	2	$\leq 100\text{ms}$	$\leq 1\%$
QCI2	Conversational Video		4	$\leq 150\text{ms}$	$\leq 0.1\%$
QCI3	Real-time Gaming		3	$\leq 50\text{ms}$	$\leq 0.1\%$
QCI4	Non- conversational Video (Buffered Streaming)		5	$\leq 300\text{ms}$	$\leq 0.0001\%$
QCI5	IMS Signaling	non-GBR	1	$\leq 100\text{ms}$	$\leq 0.0001\%$

QCI6	Video (Buffered Streaming)		6	$\leq 300\text{ms}$	$\leq 0.0001\%$
QCI7	Voice Video (Live Streaming)		7	$\leq 100\text{ms}$	$\leq 0.1\%$
QCI8	TCP Based Application (Privileged Subscriber)		8	$\leq 300\text{ms}$	$\leq 0.0001\%$
QCI9	TCP Based Application (Non- Privileged Subscriber)		9		

2.4 Висновки до розділу 2

У другому розділі було розглянуто основні показники якості радіосигналу LTE, серед яких ключову роль відіграють RSRP, RSRQ та SINR. Було показано, що ці параметри безпосередньо визначають умови прийому сигналу, рівень інтерференції та стабільність радіоз'єднання, а також впливають на подальші показники якості передачі даних. Проведений аналіз дозволив встановити взаємозв'язок між радіопараметрами та якістю обслуговування користувачів у мережі.

Окрему увагу приділено показникам якості мережевих сервісів (QoS), які характеризують реальну продуктивність мережі з точки зору користувача, зокрема затримку, пропускну здатність, втрати пакетів та якість голосу. Було також наведено вимоги до якості для різних типів сервісів LTE, таких як потокове відео, онлайн-ігри, VoLTE, веб-браузинг та сервіси великого трафіку. Кожен із цих сервісів має специфічні вимоги до затримок, стабільності та пропускну здатності, що зумовлює різні підходи до їх підтримки в мережі. У роботі також проаналізовано нормативні значення QCI-класів, які задають контрольовані параметри якості для різних категорій трафіку та забезпечують коректне пріоритезування сервісів.

Узагальнення наведених матеріалів дає можливість зробити висновок, що якість сервісів LTE визначається сукупністю радіопараметрів та вимог конкретних типів трафіку. Тому для підвищення якості обслуговування необхідно враховувати вплив радіосигналу на ключові KPI та адаптувати мережеві механізми відповідно до потреб користувачів.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДОЛОГІЯ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ LTE

Ефективність функціонування мереж LTE істотно залежить від стабільності радіоканалу та здатності мережі забезпечувати належну якість обслуговування (Quality of Service, QoS) для різних категорій трафіку. В умовах зростання навантаження та розширення спектра сервісів — від VoLTE до потокового відео та хмарних застосунків — визначальним є встановлення залежностей між параметрами радіосигналу та якістю роботи користувацьких сервісів.

У цьому дослідженні основна увага приділяється оцінці впливу ключових радіопоказників LTE — RSRP та SINR — на якість роботи мережевих сервісів. Оскільки показник RSRQ розраховується на основі RSRP та тісно корелює з рівнем прийнятого сигналу, його значення відображає ті самі радіопроектні особливості, що й RSRP. З огляду на це RSRQ у межах даного дослідження не розглядається як окрема метрика, а враховується опосередковано через параметр RSRP.

Основною метою є визначення впливу зазначених радіопоказників на ключові характеристики якості обслуговування, зокрема пропускну здатність (Throughput), затримку (Ping), якість голосу (POLQA), а також показники Call Setup Fail Rate та Call Drop Rate. Саме ці параметри формують реальну якість користувацького досвіду (Quality of Experience, QoE) та відображають здатність мережі підтримувати стабільний зв'язок у різних умовах роботи.

3.1 Зв'язок теоретичних показників якості з інструментальними вимірюваннями

Оцінювання якості сервісів LTE у практичних умовах здійснюється за допомогою інструментальних вимірювань, які фіксують фактичні значення

параметрів мережі та сервісів. Теоретичні показники якості — пропускна здатність, затримка, джиттер, втрата пакетів, якість голосу тощо — у реальних умовах визначаються за допомогою спеціалізованих тестів та методів, що моделюють поведінку мережі під навантаженням. Детальний зв'язок між теоретичними параметрами QoS та показниками, застосованими у дослідженні, наведено в таблиці нижче.

Таблиця 3.1 – Відповідність показників QoS у дослідженні

Показник якості (QoS)	Відповідність у дослідженні	Пояснення (чому саме цей показник пов'язаний)
Затримка (Latency / Delay)	Пінг (Ping)	Ping вимірює час проходження пакета до мережевого вузла та назад, що безпосередньо відповідає параметру затримки в QoS.
Джиттер (Jitter)	Якість голосу (POLQA / MOS)	Джиттер впливає на рівномірність доставки голосових пакетів. POLQA оцінює сприйняття голосу користувачем і враховує вплив коливань затримки, тому відображає саме ефект джиттера.
Втрати пакетів (Packet Loss)	Відмови встановлення з'єднання (Call Setup Fail Rate), Обриви викликів (Call Drop Rate)	Втрата пакетів під час сигналізації викликає невдале встановлення виклику (CSFR) або обриви з'єднання (CDR). У голосових сервісах втрати пакетів погіршують якість звучання, що фіксується POLQA.
Пропускна здатність (Throughput DL/UL)	Пропускна здатність (Throughput DL/UL)	Throughput у дослідженні безпосередньо вимірює реальну швидкість передачі даних, тобто фактичну пропускну здатність каналу

		для downlink та uplink.
Пріоритет трафіку (Priority)	Стабільність роботи VoLTE та доступність сервісів (Service Availability)	Пріоритет визначає, який трафік обслуговується першим. Це впливає на доступність ресурсів для голосового трафіку, що проявляється у стабільності VoLTE та відсутності деградацій сервісу.
Гарантована / негарантована швидкість (GBR / Non-GBR)	Якість голосу (POLQA), Обриви викликів (Call Drop Rate)	VoLTE використовує GBR-профіль. Якщо гарантована смуга не забезпечується, виникають затримки, втрати пакетів та обриви викликів, що знижує POLQA і збільшує CDR.

3.2 Опис програмного забезпечення для тестування показників мобільної мережі

У процесі виконання дослідження було використано програмне забезпечення *PHU Smart*, яке призначене для вимірювання та аналізу ключових показників якості мобільних телекомунікаційних мереж. Дана програма забезпечує проведення комплексних тестів у реальних умовах експлуатації та дозволяє отримувати точні дані щодо параметрів передачі даних і голосового трафіку.

Програма виконує вимірювання таких показників, як пропускна здатність (Throughput), затримка (Ping), якість голосу за стандартом POLQA, а також показники доступності та стабільності з'єднань, зокрема Call Setup Failure Rate та Call Drop Rate. Отримані дані фіксуються з високою часовою та просторовою точністю, що дає можливість проводити детальний аналіз покриття, інтенсивності трафіку та якості обслуговування користувачів.

Особливістю програмного забезпечення є автоматизований збір даних із багатьох тестових сценаріїв, що забезпечує репрезентативність результатів та

зменшує вплив випадкових факторів. Вбудовані механізми статистичної обробки дозволяють оцінити середні значення, варіативність та тенденції розвитку показників у різних умовах.

Інтерфейс програми містить інструменти для візуалізації результатів у вигляді графіків, карт покриття, що підвищує наочність аналізу та спрощує інтерпретацію даних.

Програмне забезпечення *PHU Smart* широко використовується у практиці тестування показників якості мобільного зв'язку в операторських мережах, що свідчить про його високий рівень надійності та відповідності галузевим стандартам. Такий практичний досвід застосування підсилює довіру до отриманих результатів та робить інструмент особливо придатним для наукових досліджень.

Завдяки поєднанню точності вимірювань, функціональності та зручності використання *PHU Smart* є високоякісним інструментом для оцінювання якості мобільних мереж та забезпечує отримання достовірних і відтворюваних результатів, що є важливою умовою для проведення досліджень у сфері телекомунікацій.

Нижче наведено зображення інтерфейсу програмного забезпечення.

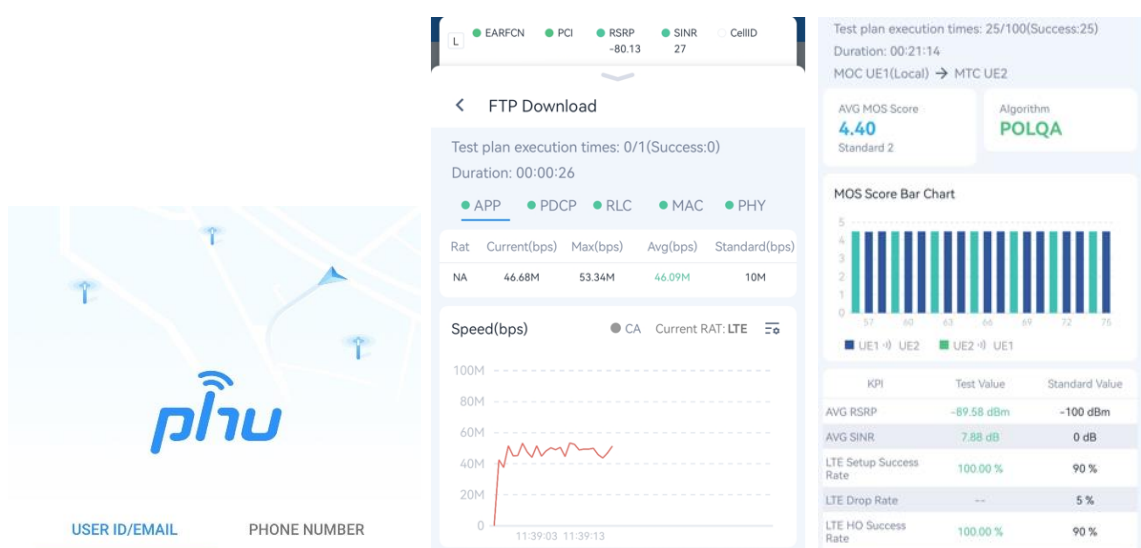


Рис. 3.1 – Інтерфейс програмного забезпечення PHU Smart

3.3 Висновки до розділу 3

У третьому розділі було сформовано методологічну основу дослідження шляхом узгодження теоретичних показників якості з інструментальними вимірюваннями, що застосовуються у мережах LTE. Було показано, що радіопараметри, зокрема RSRP та SINR, можуть бути коректно оцінені за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, а отримані вимірювання трансформуються у практичні KPI, які характеризують якість сервісів.

Описане програмне забезпечення для тестування мобільних мереж забезпечує можливість проведення вимірювань у реальних умовах експлуатації, а також подальшої обробки даних, що дозволяє отримати значення ключових показників, таких як Throughput, Ping, POLQA, Call Setup Fail Rate та Call Drop Rate. Це створює основу для порівняння інструментальних результатів із теоретичними моделями та подальшого аналізу впливу радіосигналу на якість обслуговування.

Загалом методологія, викладена у розділі, забезпечує цілісний підхід до оцінювання якості мережі LTE, поєднуючи теоретичні положення з практичними вимірюваннями та розрахунками. Це дозволяє отримати надійні результати та сформувані обґрунтовані рекомендації щодо вдосконалення якості сервісів шляхом урахування впливу радіопараметрів.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОСЛУГ LTE

У рамках дослідження було проведено моделювання залежностей між параметрами радіосигналу (RSRP, SINR) та якістю сервісів на всіх рівнях протоколів LTE. Таке моделювання дозволяє оцінити, як зміна умов радіоканалу впливає на пропускну здатність, затримку, стабільність викликів та якість голосу. Для цього було виконано серію тестувань у різних умовах прийому сигналу, що забезпечило широку варіативність значень радіопараметрів.

Програма здійснює безперервне вимірювання параметрів з фіксацією геолокації, часу, ID соти та типу з'єднання, що дозволяє здійснювати детальний просторово-часовий аналіз якості обслуговування. Кожен запис містить повний набір радіо- та сервісних показників, що забезпечує можливість статистичного порівняння та виявлення закономірностей.

Отримані дані було згруповано за діапазонами RSRP та SINR, після чого обчислено середні значення показників якості сервісів (Throughput, Ping, POLQA, CSFR, CDR). На основі узагальнених результатів побудовано графіки залежностей, які наочно відображають взаємозв'язок між радіопараметрами та якістю обслуговування. Далі наведено детальний аналіз кожної залежності.

4.1 Дослідження пропускну здатності

Для з'ясування впливу умов радіоканалу на продуктивність мережі було побудовано модель залежності пропускну здатності від параметрів RSRP та SINR. Таке моделювання дає можливість оцінити, як зміна сили та якості сигналу відображається на реальних характеристиках передачі даних.

Було розглянуто два випадки:

$\text{SINR} \approx 25$ дБ — умови стабільного сигналу з мінімальними завадами;

$\text{SINR} \approx 0$ дБ — умови сильних завад і низької якості прийому. На рис. 4.1-4.4 наведено результати аналізу залежності швидкості передачі даних (Throughput) у напрямках uplink (UL) та downlink (DL) від рівня сигналу RSRP при різних значеннях SINR. Дослідження охоплювало вимірювання показників якості для обох напрямків передачі даних — Downlink (DL) та Uplink (UL) — на всіх рівнях протокової архітектури (від PHY до APP). Отримані залежності (рис. 1–4) свідчать про те, що зі зниженням рівня сигналу RSRP відбувається поступове зменшення пропускної здатності як у напрямку передачі даних (Downlink, DL), так і у напрямку прийому (Uplink, UL). Це узгоджується з теоретичними положеннями про вплив рівня сигналу на можливості модуляції та надійність передачі.

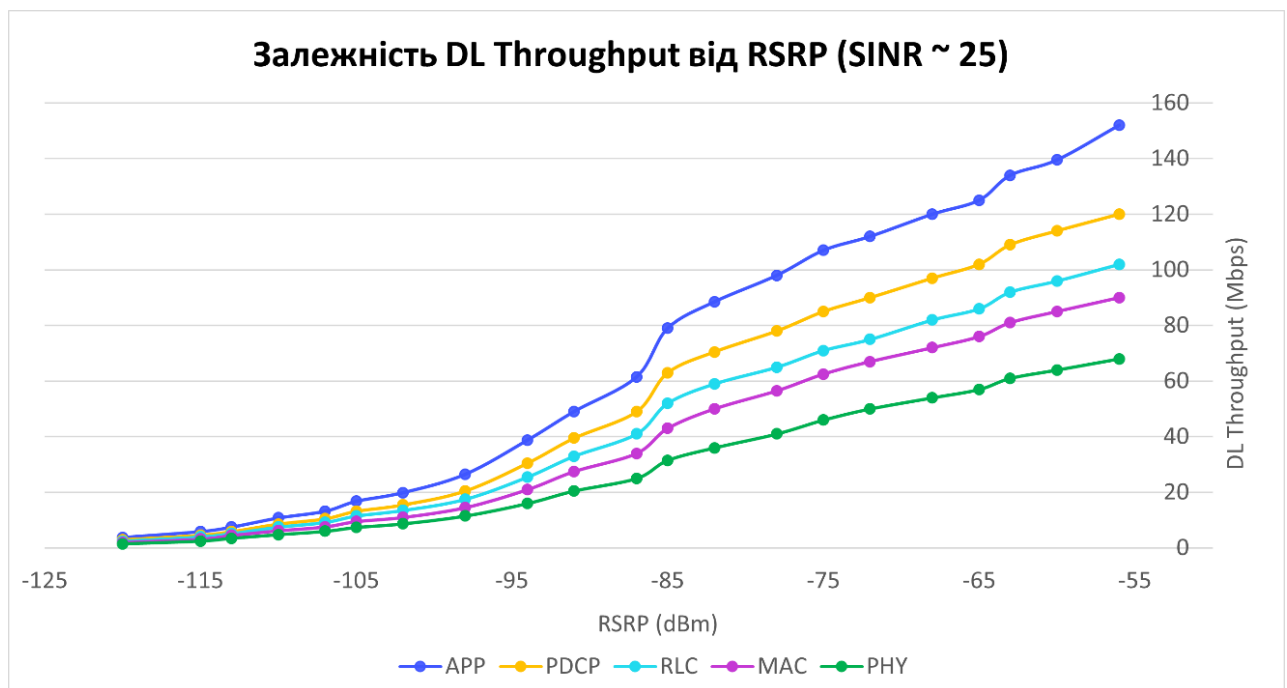


Рис. 4.1 – Залежність пропускної здатності низхідного каналу від радіопоказників (SINR $\approx$ 25)

У випадку з високим значенням SINR (≈ 25 дБ) з рисунків 4.1 – 4.2 можна побачити, що пропускна здатність у DL залишається стабільною навіть за помірно низьких значень RSRP. Це пояснюється тим, що високий SINR забезпечує достатній запас по якості каналу, що дозволяє використовувати

високі схеми модуляції та ефективні механізми адаптації кодування. У DL, де потужність передавача базової станції значно перевищує потужність мобільного пристрою, механізми компенсації завад працюють особливо ефективно, що зменшує вплив зниження рівня сигналу на кінцеву пропускну здатність.

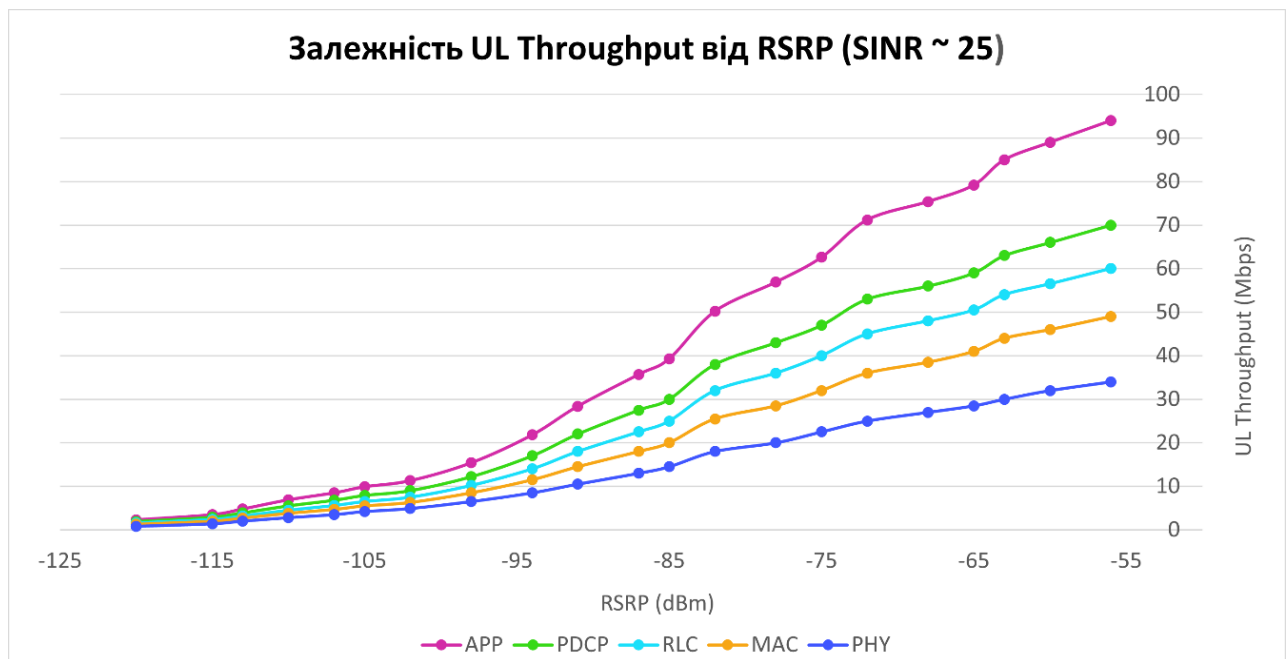


Рис. 4.2 – Залежність пропускну здатності висхідного каналу від радіопоказників (SINR $\approx$ 25)

У напрямку UL за тих самих умов високого SINR також спостерігається відносна стабільність пропускну здатності, однак її абсолютні значення нижчі через обмеження потужності передавача мобільного пристрою. Незважаючи на це, високий SINR дозволяє підтримувати достатню якість каналу та мінімізувати кількість помилок, що забезпечує стабільний рівень передачі даних.

У випадку з низьким SINR ($\approx$ 0 дБ) з рисунків 4.3 – 4.4 можна побачити, що пропускну здатність зменшується значно сильніше, причому вплив цього ефекту у DL та UL має різну інтенсивність. У DL зниження throughput зумовлене переходом до нижчих схем модуляції та збільшенням надлишковості

кодування у відповідь на високий рівень завад. Проте завдяки високій потужності передавача базової станції деградація відбувається поступово.

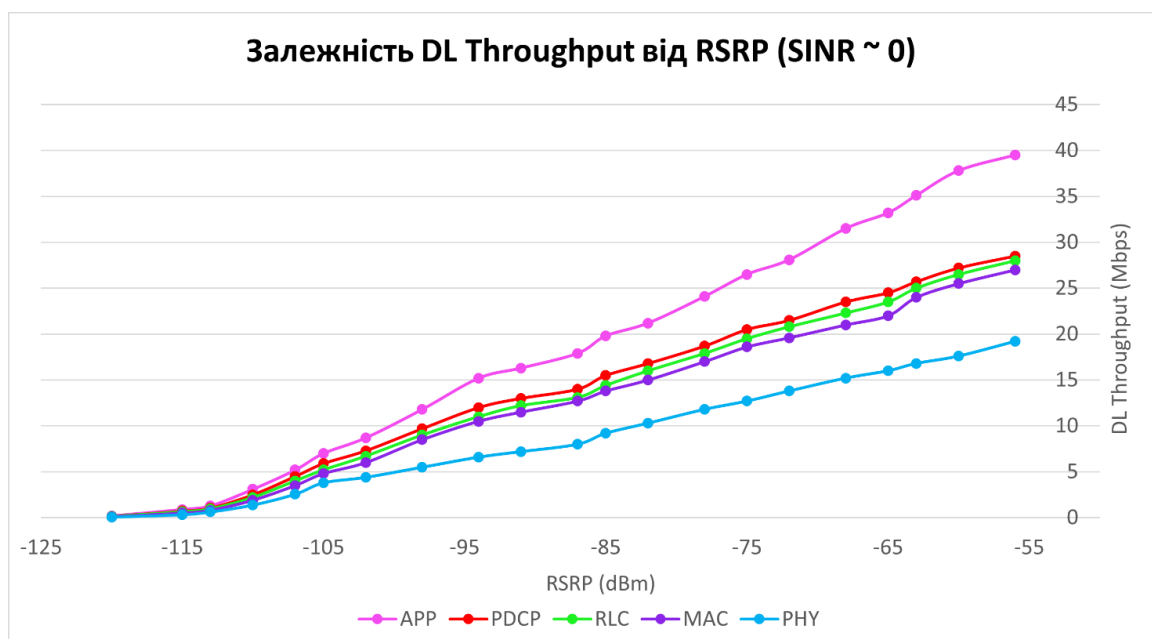


Рис. 4.3 – Залежність пропускної здатності низхідного каналу від радіопоказників (SINR ≈ 0)

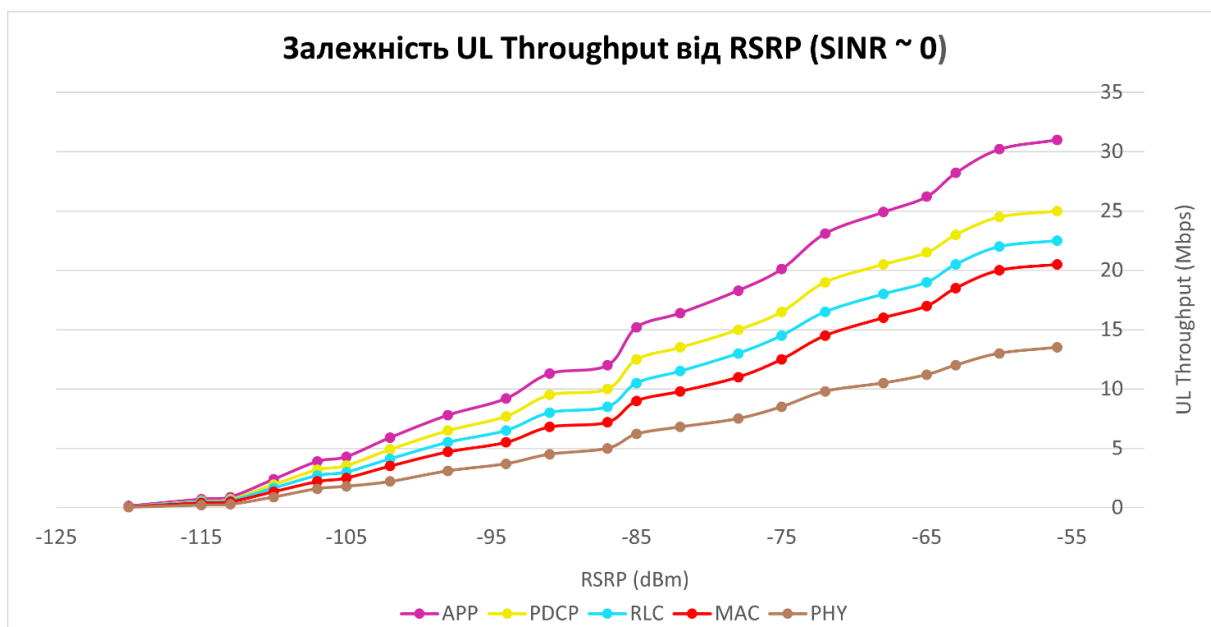


Рис. 4.4 – Залежність пропускної здатності висхідного каналу від радіопоказників (SINR ≈ 0)

Натомість у UL зниження пропускної здатності є більш різким. Це пояснюється тим, що мобільний пристрій має значно менший запас потужності, а також більшу чутливість до зовнішніх завад. При SINR близько 0 дБ навіть невеликі флуктуації рівня шуму призводять до значного зростання кількості помилок та переходу до мінімальних схем модуляції, що викликає різке падіння пропускної здатності.

4.2 Залежність затримки передачі даних

Затримка передачі даних (Ping) є одним із ключових показників якості сервісів реального часу, оскільки вона визначає швидкість реакції мережі та впливає на плавність роботи застосунків, таких як відеоконференції, онлайн-ігри та VoIP. Зростання затримки може свідчити про перевантаження мережі або про погіршення радіоканальних умов, тому аналіз Ping дозволяє оцінити стабільність та ефективність роботи планувальника ресурсів у різних сценаріях.

На рис. 4.5 наведено залежність затримки передачі (Ping) від рівня сигналу (RSRP) та кількості активних користувачів у соті.

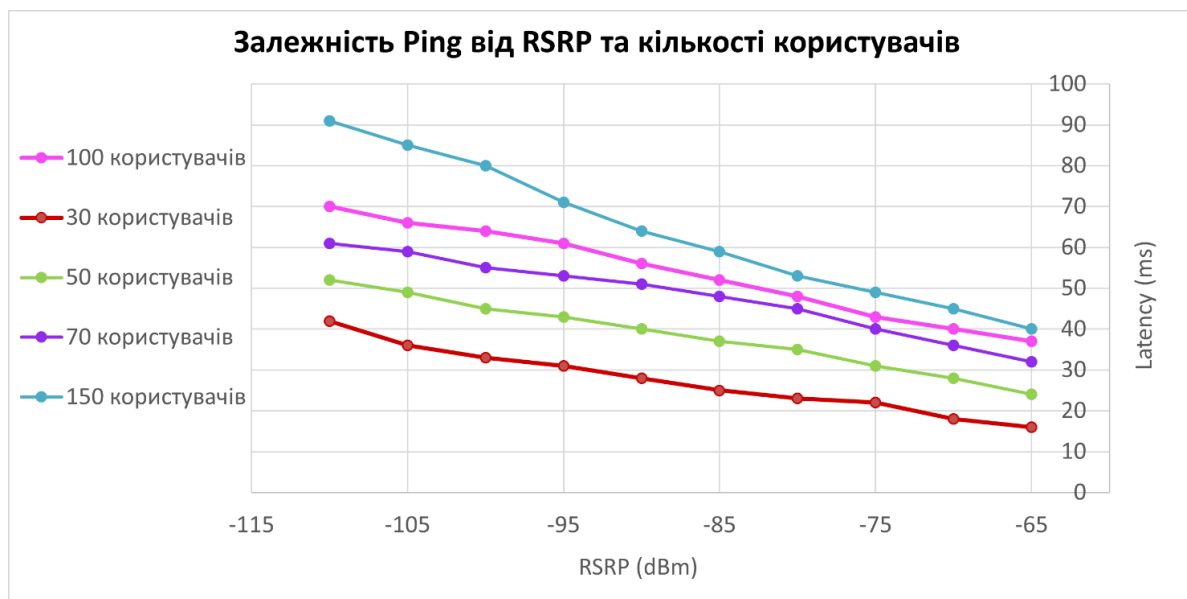


Рис. 4.4 – Залежність затримки передачі даних від кількості користувачів

Затримка є ключовим показником якості сервісів у реальному часі, тому її зміна в умовах різної якості радіоканалу та навантаження має важливе значення для оцінювання стабільності мережі. Аналіз результатів показує, що за умов низького рівня сигналу затримка передачі суттєво зростає. Це зумовлено зниженням ефективності використання радіоресурсів, переходом до нижчих схем модуляції та збільшенням кількості повторних передач (retransmissions), що характерно для RNY-рівня при високому рівні помилок. У результаті збільшується час доставки пакетів, що безпосередньо відображається на значеннях Ping.

Окремо слід зазначити вплив навантаження на соту. При зростанні кількості активних користувачів затримка збільшується навіть за умов задовільного рівня RSRP. Це пояснюється підвищенням конкуренції за радіоресурси та зростанням черг у планувальнику (scheduler), який розподіляє ресурси між користувачами. У таких умовах пакети очікують довше, що веде до зростання середньої затримки. Таким чином, Ping виявляє складну залежність як від якості радіоканалу, так і від рівня навантаження мережі. Низький сигнал погіршує функціонування механізмів передачі на фізичному рівні, тоді як високий рівень завантаження збільшує час обслуговування пакетів на транспортному рівні. Це підтверджує, що затримка є багатофакторним показником, який чутливо реагує як на радіохарактеристики, так і на поведінку мережі в умовах конкуренції за ресурси.

4.3 Вплив RSRP на якість голосу

Показник POLQA є стандартизованою метрикою об'єктивної оцінки якості голосового виклику, яка відображає суб'єктивне сприйняття користувачем чіткості та природності мовлення. Він враховує вплив як радіоканальних умов, так і алгоритмів кодування, тому є важливим індикатором працездатності VoLTE-сервісів. Аналіз залежності POLQA від

параметрів сигналу дозволяє визначити, за яких умов голосове з'єднання зберігає високу якість, а за яких відбувається помітна деградація мовлення.

На рис. 4.5 наведено залежність об'єктивної якості голосового виклику (POLQA) від рівня прийнятого сигналу (RSRP) за трьома сценаріями: низьким, середнім та високим рівнем SINR. Така багатоваріантна оцінка дозволяє простежити вплив як сили сигналу, так і характеру завад на якість мовлення в мережі LTE, що є важливим для повного розуміння роботи VoLTE-сервісів у різних радіоумовах.

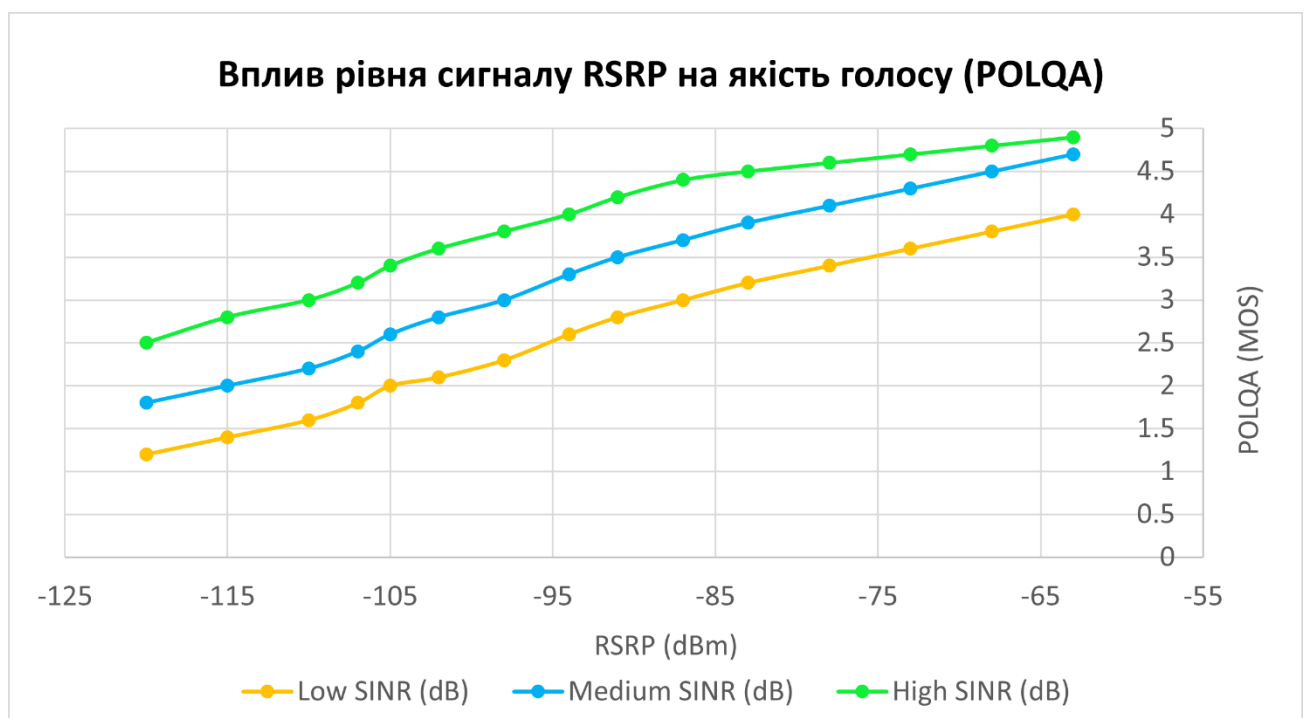


Рис. 4.5 – Залежність якості голосу від рівня сигналу RSRP

У випадку з низьким SINR якість мовлення погіршується найшвидше. POLQA демонструє стрімке зниження вже при помірних значеннях RSRP, що пов'язано з високою ймовірністю помилок на фізичному рівні та значною кількістю втрат пакетів. При таких умовах механізми HARQ та адаптації модуляції працюють менш ефективно, що призводить до збільшення затримок, переривань та спотворень у голосовому потоці. У зоні слабкого сигналу деградація стає критичною, що робить передачу мовлення практично непридатною для користувача.

За середнього рівня SINR POLQA зберігає прийнятні значення у випадках достатнього RSRP, коли каналні умови дозволяють використовувати високі схеми модуляції та забезпечувати стабільну передачу. Проте при переході до зон зниженої потужності сигналу зростає частота помилок, а механізми повторної передачі не можуть повністю компенсувати втрати. У результаті якість мовлення поступово погіршується, що відображається у плавному, але помітному зниженні POLQA.

Навіть у випадку з високим SINR якість голосу не залишається стабільною за критично низьких значень RSRP. Хоча рівень завад у каналі мінімальний, недостатня сила сигналу призводить до зменшення енергетичного запасу та зростання ймовірності помилок. Це змушує систему переходити до простіших схем модуляції (QPSK), що знижує пропускну здатність та погіршує якість аудіопотоку. Поліпшення в умовах високого SINR проявляється лише у вигляді менш різкого зниження POLQA, однак повної стабільності досягти не вдається.

Результати свідчать, що POLQA є мультифакторним показником, який залежить не тільки від рівня сигналу, а й від співвідношення сигнал/шум у каналі. Для підтримання високої суб'єктивної якості VoLTE-викликів необхідно забезпечити одночасно достатню силу сигналу та високий SINR. Втрата будь-якого з цих параметрів призводить до помітної деградації голосового сервісу, що має ключове значення для планування та оптимізації радіомереж.

4.4 Дослідження невдалого встановлення з'єднання

Call Setup Fail Rate (CSFR) є одним із ключових показників якості голосових та відеосервісів у мережах LTE, оскільки він характеризує здатність мережі успішно ініціювати та завершити процедуру встановлення з'єднання. Високе значення CSFR свідчить про проблеми на етапах сигналізації та може бути індикатором нестабільної роботи радіоканалу або перевантаження мережі.

Тому даний показник дозволяє оцінити надійність механізмів встановлення викликів та виявити зони, де користувачі стикаються з труднощами при запуску сервісів.

На рисунку 4.6 наведено залежність ймовірності невдалого встановлення з'єднання від рівня прийнятого сигналу (RSRP) та якості радіоканалу (SINR). Процедура встановлення виклику в LTE включає кілька послідовних сигналізаційних кроків, які потребують стабільного прийому та передачі даних. Недостатня сила сигналу або високий рівень завад може порушити передачу критичних повідомлень, що призводить до переривання процедури та фіксації невдалого виклику.

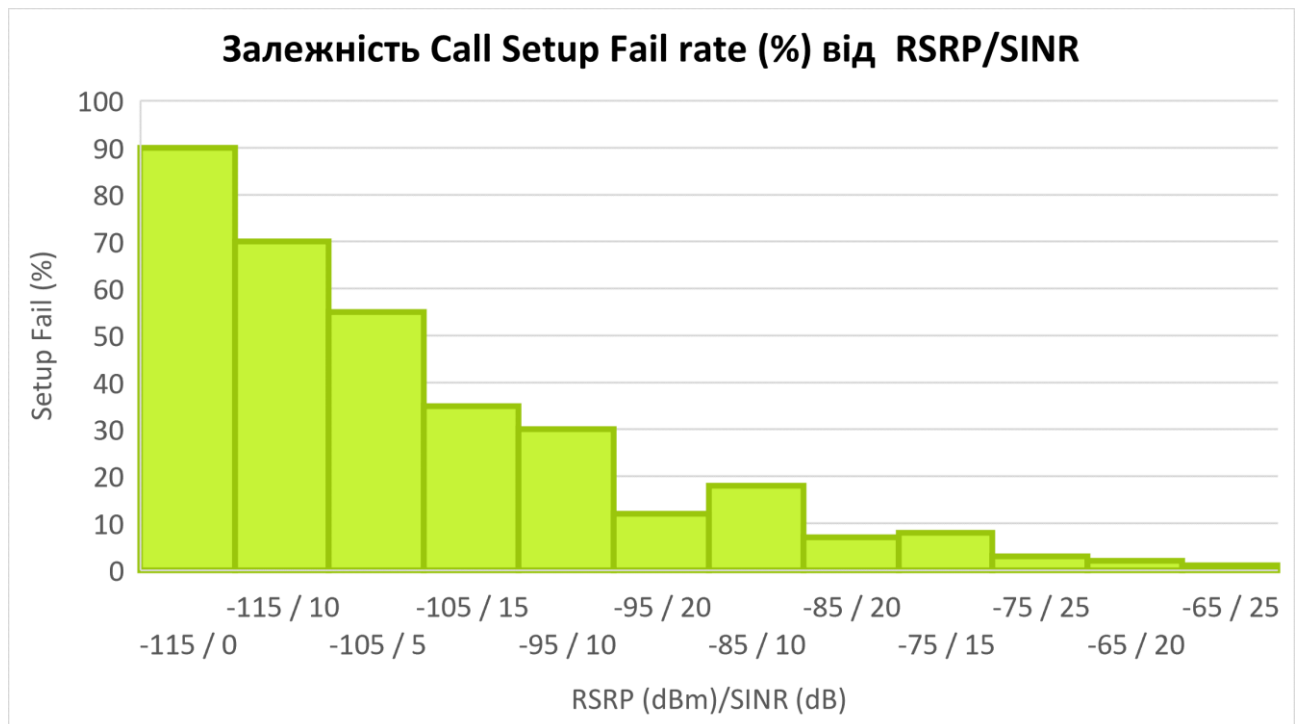


Рис. 4.6 – Залежність невдалого встановлення з'єднання від рівня сигналу

Аналіз отриманих даних показує, що зі зниженням RSRP або погіршенням SINR ймовірність невдалих з'єднань зростає суттєво. У зонах слабого сигналу базова станція часто не може коректно прийняти або передати сигналізаційні повідомлення, що викликає помилки у процедурі RRC Connection Setup та подальших етапах. Погіршення SINR збільшує кількість помилок у передаваних пакетах, і навіть механізми HARQ не завжди здатні

компенсувати втрати. За результатами вимірювань встановлено, що підвищення RSRP приблизно на 10 дБ зменшує CSFR майже вдвічі. Це свідчить про значний вплив радіопараметрів на успішність встановлення з'єднань: навіть невелике покращення сили сигналу дозволяє зменшити кількість помилок у сигналізації та забезпечити стабільніший запуск голосових і відеосеансів. Таким чином, CSFR є надзвичайно чутливим до параметрів радіоканалу, а RSRP та SINR виступають ключовими факторами, які визначають успішність процедури встановлення виклику. Для забезпечення високої надійності сервісів VoLTE необхідно підтримувати достатню силу сигналу та мінімізувати рівень завад у каналі.

4.5 Дослідження ймовірності обриву виклику

Call Drop Rate (CDR) є важливим показником стабільності голосових та відеосервісів, оскільки він відображає ймовірність переривання вже активного виклику. Високі значення CDR свідчать про нестабільність радіоз'єднання, проблеми у підтриманні зв'язку або недостатню якість сигналу під час передачі голосового потоку. Тому даний показник є ключовим для оцінювання якості користувацького досвіду, особливо у сервісах реального часу, де навіть короткі втрати пакета можуть призвести до розриву виклику.

На рисунку 4.7 наведено залежність ймовірності обриву виклику від рівня прийнятого сигналу (RSRP) та якості радіоканалу (SINR). Під час активної мовної сесії мережа повинна підтримувати стабільний потік даних, а також надійне функціонування механізмів HARQ та адаптації модуляції.

Будь-які значні коливання сигналу або зростання завад можуть призвести до зниження рівня прийому нижче критичного порогу, що викликає втрату пакета та, за умов багатьох послідовних помилок, завершення виклику. Аналіз результатів показує, що зі зниженням RSRP або погіршенням SINR ймовірність розриву виклику зростає різко та майже нелінійно. Особливо помітним є вплив сили сигналу: підвищення RSRP приблизно на 10 дБ зменшує ймовірність

обривів приблизно на 40%. Це свідчить про те, що навіть помірне покращення радіопокриття може значно підвищити стабільність сервісів.

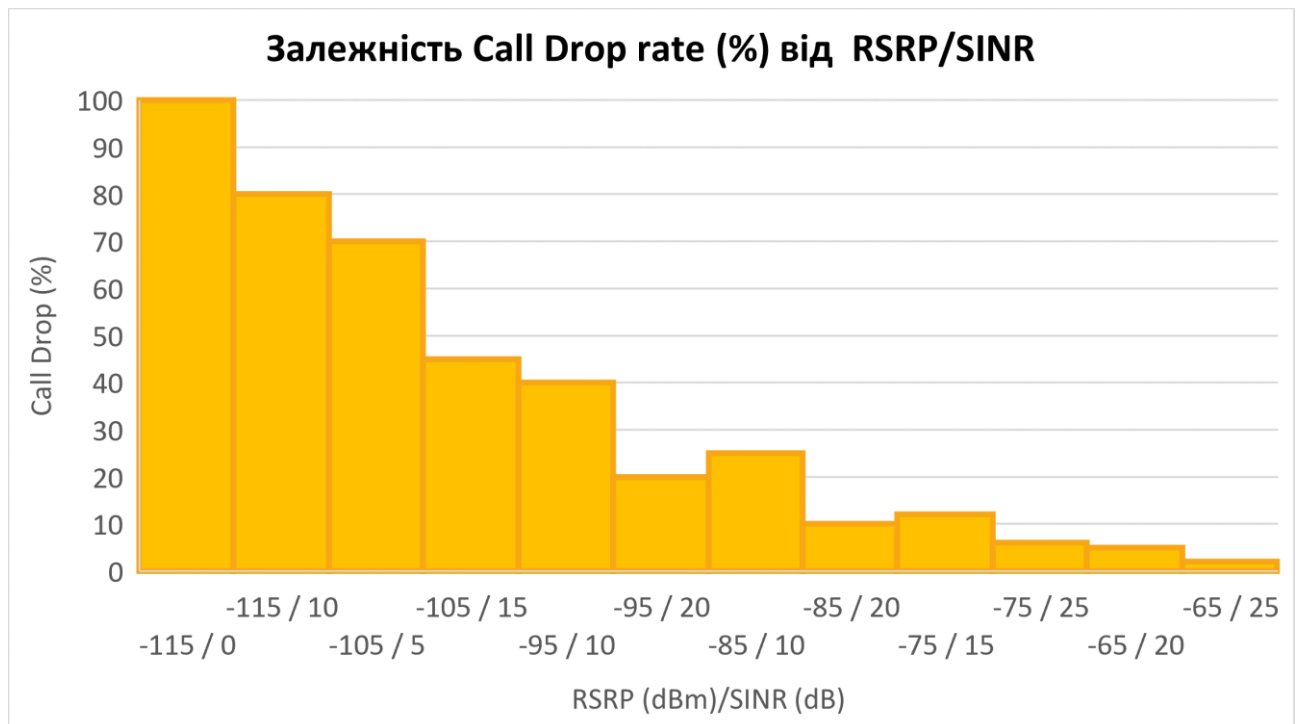


Рис. 4.7 – Залежність ймовірності обриву виклику від рівня сигналу

Високий рівень RSRP забезпечує більший запас по енергії та зменшує кількість помилок у передаваних пакетах, що дозволяє підтримувати безперервність мовлення навіть за умов помірних завад. Подібно до інших показників, SINR також відіграє важливу роль у формуванні CDR. Низькі значення SINR свідчать про сильні завади або інтерференцію, що призводить до зниження ефективності модуляції та збільшення частоти повторних передач. У таких умовах навіть при відносно високому RSRP підтримання виклику стає проблематичним. Call Drop Rate є надзвичайно чутливим до параметрів радіоканалу, а RSRP та SINR виступають ключовими факторами, які визначають стабільність активних викликів.

Забезпечення достатньої сили сигналу та високої якості каналу є необхідною умовою для мінімізації обривів та підтримання високої якості голосових сервісів у мережах LTE.

4.6 Рекомендації методів підвищення якості послуг

Отримані результати експериментальних вимірювань свідчать про значну чутливість ключових показників якості (Throughput, Ping, POLQA, Call Setup Fail Rate та Call Drop Rate) до параметрів радіоканалу, зокрема RSRP та SINR. Це підкреслює необхідність впровадження механізмів динамічної адаптації та оптимізації роботи мережі з урахуванням мінливих радіоумов.

На основі проведеного аналізу можна сформулювати низку рекомендацій, спрямованих на підвищення якості сервісів та забезпечення стабільності функціонування мережі LTE.

По-перше, доцільно впроваджувати та активно використовувати механізми адаптивного керування радіоресурсами, зокрема динамічне регулювання потужності передавання, адаптивний вибір схем модуляції та кодування (AMC), а також інтелектуальне планування ресурсів (scheduler), яке враховує поточне навантаження та якість каналу. Такі механізми дозволяють підтримувати високий рівень пропускну здатності та зменшувати ймовірність помилок навіть у умовах нестабільного сигналу.

По-друге, важливо оптимізувати параметри покриття шляхом коригування конфігурацій базових станцій, включаючи налаштування секторів, кута нахилу антен, потужності та параметрів MIMO. Особливу увагу слід приділити зонам з поганим RSRP або високою інтерференцією, де спостерігається різке зростання CDR та CSFR. Локальне покращення покриття в таких областях дозволить значно знизити кількість обривів та невдалих викликів.

По-третє, рекомендацією є впровадження механізмів самооптимізації мережі (SON), які забезпечують автоматичне реагування на зміни радіоумов та навантаження. SON-системи можуть адаптивно коригувати параметри передавання, балансувати трафік між сотами та зменшувати інтерференцію, що особливо актуально у густонаселених або складних радіооточеннях.

По-четверте, для покращення стабільності голосових сервісів доцільно оптимізувати алгоритми управління викликами та механізми обробки сигналізації, зокрема процедури RRC та HARQ. Зменшення кількості помилок на етапах сигналізації дозволить знизити CSFR, а підвищення надійності передачі у фазі активного виклику — зменшити CDR.

По-п'яте, рекомендацією є регулярне проведення drive-тестів та моніторингу ключових KPI з подальшим кореляційним аналізом радіопараметрів. Такий підхід дає можливість оперативно виявляти зони деградації, відстежувати тенденції та приймати обґрунтовані рішення щодо модернізації мережі.

Також, з огляду на тенденції розвитку мобільних мереж, перспективним напрямом є інтеграція адаптивних алгоритмів на основі методів машинного навчання, які дозволяють прогнозувати стан радіоканалу та завчасно коригувати конфігурацію мережі. Це підвищує адаптивність системи та забезпечує стабільну якість сервісів навіть за умов високої динамічності радіооточення.

Таким чином, підвищення якості сервісів у мережах LTE потребує комплексного підходу, який включає технічну оптимізацію, автоматизацію та інтелектуальні механізми адаптації. Реалізація запропонованих рекомендацій сприятиме підвищенню стабільності роботи мережі, зменшенню кількості помилок та забезпеченню високої якості користувацького досвіду.

4.7 Висновки до розділу 4

У цьому розділі було проведено комплексний аналіз результатів дослідження залежностей між показниками радіосигналу LTE та якістю надання мобільних сервісів. Результати моделювання та інструментальних вимірювань підтвердили, що параметри RSRP та SINR мають визначальний вплив на пропускну здатність, затримку передачі даних, якість голосових сервісів та стабільність з'єднань.

Показано, що зі зниженням RSRP та SINR спостерігається закономірне падіння швидкості передачі даних у напрямках DL та UL, зростає мережна затримка, а також підвищуються показники CSFR та CDR, що свідчить про погіршення здатності мережі забезпечувати надійне встановлення та утримання з'єднань. Аналіз POLQA продемонстрував, що якість голосу також істотно знижується в умовах погіршеного радіосигналу, особливо при наявності інтерференції та низьких рівнях SINR.

На основі отриманих результатів було сформульовано практичні рекомендації щодо підвищення якості послуг LTE, які включають оптимізацію параметрів радіопланування, зменшення інтерференції, підвищення ефективності використання ресурсів мережі та удосконалення алгоритмів розподілу навантаження. Реалізація запропонованих заходів дозволить покращити користувацький досвід (QoE) та забезпечити стабільну роботу сервісів у широкому діапазоні умов радіопокриття.

Загалом отримані результати підтверджують критичну роль радіопараметрів у формуванні якості мобільних послуг та демонструють необхідність урахування впливу RSRP і SINR під час оптимізації та модернізації LTE-мереж.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Інформаційна карта проекту

У цьому підрозділі подано розгорнутий опис стартап-ідеї у форматі інформаційної карти проекту.

Назва проекту: *SmartQoS-Analytics* — це програмно-аналітичний модуль, який інтегрується у систему планування та оптимізації мобільних мереж (OSS/NMS) і автоматично прогнозує якість сервісів LTE на основі поточних параметрів радіосигналу (RSRP, RSRQ, SINR) на всіх рівнях — PHY, MAC, RLC, PDCP та APP. Продукт не просто аналізує покриття — він визначає, як радіопараметри вплинуть на реальну якість користувацького досвіду: швидкість (UL/DL), затримку (Ping), POLQA, CSFR, CDR.

5.2 Ключова цінність продукту

Система *SmartQoS-Analytics* вирізняється серед існуючих рішень завдяки унікальному поєднанню радіоаналізу та оцінювання якості користувацьких сервісів. Вона створена як інтелектуальна платформа, що не лише фіксує проблеми мережі, а й пояснює їх причини та пропонує практичні шляхи усунення. Завдяки цьому система забезпечує новий рівень контролю та оптимізації якості послуг у мережах LTE.

Її ключові особливості полягають у тому, що вона:

Прогнозує реальну якість послуг (QoE), а не тільки рівень сигналу (KPI). Система моделює кінцевий користувацький досвід, враховуючи вплив радіопараметрів на пропускну здатність, затримку, стабільність викликів та якість голосу.

Аналізує всі рівні протоколів LTE — від PHY до APP. Це дозволяє точно визначити, на якому рівні виникає деградація: фізичному, каналному чи прикладному.

Генерує конкретні рекомендації з оптимізації мережі. До них належать налаштування tilt, балансування потужності, оптимізація handover, а також коригування параметрів VoLTE.

Створює автоматичні heat-maps проблемних зон. Карти відображають не тільки слабкий сигнал, а й місця з високими затримками, втратами пакетів чи поганою якістю голосу.

Оцінює економічний ефект впровадження рекомендацій. Система розраховує можливе зниження відтоку, збільшення ARPU (середній дохід з одного користувача) та скорочення витрат, що дає оператору чітку фінансову мотивацію для оптимізації.

5.3. Користувачі продукту

Мобільні оператори (Kyivstar, Vodafone, Lifecell) — основними користувачами платформи є оператори мобільного зв'язку, для яких критично важливо підтримувати високу якість послуг у мережі LTE. SmartQoS-Analytics дозволяє їм оперативно виявляти проблемні ділянки покриття, прогнозувати деградацію сервісів та приймати рішення щодо оптимізації мережі без значних фінансових витрат.

Вендори (Huawei, Ericsson, Nokia) — виробники мережевого обладнання можуть використовувати платформу для оцінювання ефективності власних рішень, тестування алгоритмів радіооптимізації, а також для демонстрації переваг їхніх продуктів замовникам. Система допомагає вендорам проводити глибокий технічний аналіз та порівняння продуктивності.

Команди оптимізації (RF/PERF teams) — фахівці з радіомереж та продуктивності отримують інструмент, який автоматизує аналіз KPI та зменшує потребу в ручних вимірюваннях. Платформа дає змогу швидко

визначити джерело деградації (PHY/MAC/APP), оцінити вплив радіопараметрів на QoS та сформувавши рекомендації щодо налаштувань.

Компанії з drive-test сервісами – для компаній, що виконують вимірювання мережі, SmartQoS-Analytics може виступати як доповнення до традиційних drive-тестів. Воно дозволяє зменшити кількість виїздів, скоротити витрати та підвищити точність аналізу за рахунок моделювання та прогнозування.

Технічні департаменти (OSS/BSS units) – підрозділи, відповідальні за керування мережею та сервісами, отримують інструмент для формування регулярних звітів щодо якості обслуговування, моніторингу тенденцій та прийняття стратегічних рішень щодо розвитку інфраструктури.

5.4 Випадки користування

Оптимізація LTE мережі без додаткових drive-тестів – платформа дозволяє аналізувати якість мережі на основі існуючих KPI та моделювати вплив радіопараметрів без проведення дорогих польових вимірювань. Це значно зменшує витрати на оптимізацію та прискорює процес прийняття рішень.

Прогнозування QoS у нових районах (greenfield deployment) – при запуску нових базових станцій або розгортанні мережі у ще необслуговуваних районах система може прогнозувати фактичну якість послуг на основі теоретичних моделей та радіопараметрів. Це допомагає оцінити потребу в додаткових ресурсах ще до фактичної експлуатації.

Виявлення проблем у VoLTE – SmartQoS-Analytics аналізує POLQA, CSFR, CDR та інші параметри голосового сервісу, що дає можливість виявити проблеми у VoLTE (наприклад, затримки, «роботизацію», збої при установці викликів) та визначити причини їх появи.

Підготовка звітів щодо QoE для керівництва – система формує зрозумілі аналітичні звіти на основі даних, що дозволяють керівництву оцінити поточний рівень якості, виявити ризикові зони та напрямки для інвестицій.

Обґрунтування модернізації мережі – на основі аналізу KPI та прогнозів QoS платформа оцінює економічний ефект від оптимізації: зменшення відтоку абонентів, зростання ARPU, покращення задоволеності користувачів. Це надає матеріал для фінансово-технічного обґрунтування модернізації мережі або впровадження нових технологій.

5.5 Процес роботи проєкту

Платформа SmartQoS-Analytics функціонує як інтелектуальна аналітична система, що поєднує радіоаналіз, моделювання якості сервісів та автоматизовані рекомендації з оптимізації.

Робота продукту складається з кількох послідовних етапів:

1. Збір та інтеграція вхідних даних

Система приймає широкий спектр показників, які характеризують як радіоканал, так і якість сервісів. До вхідних даних належать:

- Радіопоказники: RSRP, RSRQ, SINR, CQI
- Сервісні KPI: throughput (UL/DL), ping, POLQA П
- показники голосових сервісів: Call Drop Rate (CDR), Call Setup Failure Rate (CSFR)
- Додаткові параметри: навантаження, кількість користувачів, тип сервісу, параметри комірок

2. Предобробка та нормалізація даних

Перед аналізом дані проходять: очищення від аномалій, синхронізацію за часовими мітками, нормалізацію значень, агрегацію за діапазонами RSRP та SINR, усереднення KPI у відповідних групах. Це дозволяє отримати коректні статистичні набори для подальшої моделюючої аналітики.

3. Порівняння з теоретичними моделями

Алгоритм аналізу використовує моделі, отримані в дипломному дослідженні, де було побудовано залежності між радіопараметрами та якістю сервісів.

Система порівнює фактичні виміряні значення з теоретичними кривими, визначає відхилення, оцінює ступінь деградації сервісу, встановлює, чи є проблема радіоцентричною або сервісною.

Таким чином всередині продукту працює модуль кореляційного аналізу, який виявляє закономірності між радіопоказниками та KPI.

4. Побудова ключових залежностей

Для кожного сервісу система автоматично формує графіки та залежності, зокрема:

RSRP $\rightarrow$ DL/UL Throughput: визначає вплив рівня сигналу на пропускну здатність.

SINR $\rightarrow$ Ping: показує, як інтерференція впливає на затримку.

RSRP $\rightarrow$ POLQA: відображає зв'язок між якістю сигналу та якістю голосу.

SINR $\rightarrow$ CDR: дає можливість оцінити, при яких умовах збільшується кількість обривів викликів.

5. Генерація висновків та рекомендацій

На основі порівняння фактичних даних з теоретичними моделями система формує конкретні рекомендації, наприклад:

«RSRP < -112 dBm $\rightarrow$ зниження DL throughput на 38% $\rightarrow$ рекомендовано збільшити eTilt на 3°»

«SINR < 5 dB $\rightarrow$ підвищення CDR $\rightarrow$ провести балансування потужностей між сусідніми сотами»

«POLQA < 3.2 при RSRP -105 dBm $\rightarrow$ рекомендація оптимізувати VoLTE jitter buffer»

Рекомендації містять: причину проблеми (PHY/MAC/APP), її наслідки на KPI, конкретні технічні дії, оцінку очікуваного ефекту.

6. Візуалізація результатів

Дашборд платформи відображає результати у зручній аналітичній формі:

Heat-maps проблемних зон – показують не тільки зони слабого сигналу, а й області з високими затримками, падінням throughput чи поганою якістю голосу. Динаміка KPI у часі – дає можливість відстежити тенденції та оцінити ефективність оптимізації.

Кореляційні графіки – візуально демонструють зв'язок між RSRP/SINR та сервісами.

Панель рекомендацій – містить автоматично згенеровані поради з оптимізації.

7. Оцінка економічного ефекту

На основі моделі впливу QoS на користувацький досвід система розраховує: зменшення відтоку абонентів (Churn), приріст ARPU, скорочення витрат на drive-тести, окупність впровадження рекомендацій. Це дає оператору фінансово обґрунтовану мотивацію для реалізації оптимізації.

5.6 Візуалізація та аналіз ефективності проєкту

Для забезпечення системного та поетапного впровадження стартапу *SmartQoS-Analytics* було визначено ключові етапи реалізації проєкту. Кожен етап передбачає конкретні дії, відповідальних осіб, строки виконання та необхідні ресурси. Це дозволяє чітко контролювати процес розробки, своєчасно виявляти ризики та забезпечує ефективну координацію між учасниками команди. Нижче наведена таблиця 5.1, яка узагальнює основні етапи та їх характеристики.

Таблиця 5.1 – Етапи реалізації проєкту

№	Етап	Зміст робіт	Тривалість	Очікуваний результат
1	Формування набору даних	Збір вимірювань RSRP, SINR, KPI; очищення даних; нормалізація	2 тижні	Структурований набір даних

2	Статистичний аналіз	Кореляція, регресії, побудова моделей впливу	3 тижні	Математичні моделі
3	Розробка алгоритму прогнозування	Створення логіки прогнозування QoS на основі моделей	4 тижні	Прототип алгоритму
4	Програмна реалізація	Розробка модулів аналізу, візуалізації та рекомендацій	4 тижні	Робочий програмний модуль
5	Інтеграційне тестування	Перевірка алгоритмів, відлагодження, тестування на даних	2 тижні	Стабільна система
6	Валідація моделей	Обчислення MAE, RMSE, R ² , порівняння з реальними даними	2 тижні	Підтвердження точності
7	Формування рекомендацій	Створення правил оптимізації мережі (tilt, power, HO тощо)	1 тиждень	Набір рекомендацій
8	Створення візуалізації	Дашборди, графіки, heat-maps, звіти	2 тижні	Повноцінна візуалізація
9	Підготовка до впровадження	Економічна оцінка, технічна документація, презентація	1 тиждень	Продукт готовий до впровадження

Загальна тривалість проекту: $\approx$ 21 тиждень (5 місяців)

Для реалізації стартап-проекту SmartQoS-Analytics було сформовано бюджет (таб. 5.2), який включає витрати на ключових фахівців, інфраструктуру, програмне забезпечення та тестування. Кожен учасник виконує специфічні функції, пов'язані з аналізом радіопараметрів, розробкою алгоритмів та створенням програмного продукту. Тривалість робіт оцінено виходячи з повного циклу розробки — від збору даних до впровадження.

Таблиця 5.2 – Вартість та розподіл ресурсів для реалізації проекту

Ресурси проекту	Вартість (грн)	Період робіт	Основні завдання
Data scientist	80 000	4 місяці	Аналіз KPI, побудова моделей залежностей RSRP/SINR $\rightarrow$ QoS, валідація результатів

RF engineer	70 000	3 місяці	Інтерпретація радіопоказників, формування рекомендацій (tilt, HO, power), перевірка моделей
Developer (backend/frontend)	90 000	5 місяців	Розробка алгоритмів, API, інтеграція, створення dashboard
Сервери / хмарні ресурси	20 000	6 місяців	Обчислювальні ресурси для моделювання та зберігання даних
Ліцензії ПЗ	10 000	Разово	BI інструменти (Business Intelligence tools), бібліотеки аналітики, інструменти візуалізації
Тестування (drive-test + валідація)	15 000	1 місяць	Контрольні вимірювання, перевірка прогнозів, коригування алгоритмів
Разом	285 000 грн		

У таблиці 5.3 подано прогноз доходів стартап-проєкту на перші три роки. Прогноз базується на очікуваній кількості підключених користувачів та середньому доході на одного користувача (ARPU). Дані дозволяють оцінити потенційну рентабельність та темпи зростання проєкту.

Таблиця 5.3 – Прогноз доходів проєкту

Рік	Кількість користувачів	ARPU (грн/міс)	Дохід за рік (грн)
1	2 000	120	2 880 000
2	5 000	130	7 800 000
3	10 000	140	16 800 000

У таблиці 5.4 наведені одноразові інвестиційні витрати, необхідні для запуску стартап-проєкту. CAPEX включає закупівлю обладнання, сервісів та інфраструктурних рішень.

Таблиця 5.4 – Основні капітальні витрати (CAPEX)

Стаття	Сума (грн)	Опис
Закупівля серверів	120 000	Фізичні сервери або первинний пул хмарних машин
Налаштування інфраструктури	30 000	Первинне конфігурування, розгортання контейнерів, CI/CD
Закупівля ліцензійного ПЗ	25 000	Аналітичні інструменти, IDE, системи моніторингу
Початковий маркетинг	20 000	Реклама, сторінка продукту, презентації
Разом	195 000	

Операційні витрати (таблиця 5.5) відображають щомісячні та щорічні витрати на підтримку проекту після запуску. Вони включають технічну підтримку, інфраструктурні платежі та супровід.

Таблиця 5.5 – Операційні витрати (OPEX)

Стаття	Сума на місяць (грн)	Сума на рік (грн)
Хмарні ресурси	18 000	216 000
Технічна підтримка	25 000	300 000
Маркетинг	10 000	120 000
Підтримка ПЗ	8 000	96 000
Разом	61 000	732 000

Таблиця 5.6 показує фінансовий результат проекту шляхом порівняння прогнозованих доходів та операційних витрат. Вона включає очікувані надходження від впровадження платформи та витрати на оплату праці, сервери, ліцензії та тестування. Різниця між доходами та витратами дозволяє оцінити чистий фінансовий результат і економічну ефективність проекту.

Таблиця 5.6 – прибутковість проєкту

Рік	Дохід (грн)	Витрати (грн)	Прибуток (грн)
1	2 880 000	732 000	2 148 000
2	7 800 000	732 000	7 068 000
3	16 800 000	732 000	16 068 000

Ризики — важлива частина оцінки будь-якого стартап-проєкту. Таблиця 5.7 демонструє можливі ризики та підходи до їх зниження.

Таблиця 5.7 – Можливі ризики стартап-проєкту

Ризик	Ймовірність	Вплив	Метод мінімізації
Затримка розробки	Середня	Високий	Додавання буферу часу, SCRUM-спринти
Недостатня кількість користувачів	Середня	Середній	Активний маркетинг, пілотні проєкти
Перевищення бюджету	Низька	Високий	Контроль витрат, резерв 10%
Технічні проблеми	Середня	Високий	Резервні сервери, моніторинг
Конкуренція	Висока	Середній	Розробка унікальних функцій

Розширення функціональних можливостей дозволяє підвищити ринкову цінність рішення, розширити цільову аудиторію та збільшити майбутній дохід. Таблиця 5.8 містить основні стратегічні напрямки масштабування, їх технічні вимоги, потенційних споживачів та фінансову оцінку додаткового ефекту.

Реалізація цих напрямків сприятиме зміцненню конкурентних позицій продукту на ринку телекомунікаційних аналітичних рішень. Вона також

забезпечить довгостроковий розвиток проекту за рахунок впровадження інноваційних технологій та розширення партнерської екосистеми.

Таблиця 5.8 – Потенціал масштабування продукту

Напрямок масштабування	Опис можливостей	Технічні вимоги	Потенційні користувачі	Орієнтовний додатковий дохід
Підтримка 5G SA/NSA	Додавання аналізу NR KPI, beamforming efficiency, SS-RSRP/SS-SINR, QoS Flow	Розширення моделей ML, інтеграція з gNB counters, оновлення бази даних	Оператори, вендори 5G	+30–40%
Додавання VoNR аналізу	Оцінка голосової якості у 5G (MOS/POLQA, jitter, packet loss)	Нові алгоритми оцінки QoE, доступ до IMS logs	Оператори зі впровадженням VoNR	+20%
Геоаналітика у реальному часі	Streaming-аналітика KPI + побудова heat-maps онлайн	Apache Kafka, Flink/Spark Streaming, GPU-сервер	Центри моніторингу операторів, NOC	+25%
Модуль прогнозування навантаження	Прогноз трафіку на 30/60/120 хв, добу, тиждень	LSTM/Prophet моделі, історична база KPI	RF-команди, Capacity-планування	+15%
5. API для OSS/BSS систем	Інтеграція з планувальниками, trouble-ticketing, SLA dashboards	REST API, JSON/XML, безпека	Оператори, інтегратори	+10–20%
Пакет для Drive-Test заміни	Модель, яка точно оцінює RSRP/SINR без виїзду команд	Датасети для навчання, crowdsourced дані, ML-калібрування	Drive-test компанії, оператори	+40%

Модуль для приватних мере)	Підтримка фабрик, кампусів, складів, портів	Adaptation під small cells, локальні KPI	Бізнес-клієнти, Industry 4.0	+50%
SaaS модель для малого ринку	Легка версія: QoS Dashboard + heat-maps + сповіщення	Хмарна інфраструктура, веб-інтерфейс	Малі оператори, MVNO	+10–15%
Аналітика для FWA (Fixed Wireless Access)	Оцінка QoS для домашнього інтернету через 4G/5G	Доопрацювання алгоритмів QoE, збирання CPE даних	Інтернет-провайдери, мобільні оператори	+20%
Експорт рішення на міжнародний ринок	Локалізація під EMEA/Asia (політики NO, KPI naming)	Підтримка мультимовності, адаптація під регіональні стандарти	Оператори у Європі, Азії, Африці	x2–x5 доходу

Рисунок 5.1 показує витрати компанії до та після впровадження стартап-проекту, який мав на меті оптимізацію ключових процесів та підвищення ефективності. Аналіз свідчить про значне зменшення фінансових витрат у всіх основних категоріях:

Drive-test витрати до впровадження проекту: 650 000 грн, після — 240 000 грн. Економія досягнута завдяки автоматизації тестових маршрутів, використанню нових технологій для контролю якості мережі та оптимізації роботи технічного персоналу, які були впроваджені стартап-проектом.

Скарги абонентів витрати зменшилися з 180 000 грн до 120 000 грн (на 33%). Стартап-проект впровадив систему швидкого реагування на звернення клієнтів, покращив обслуговування та впровадив автоматизовані інструменти підтримки, що знизило кількість скарг та витрати на їх обробку.

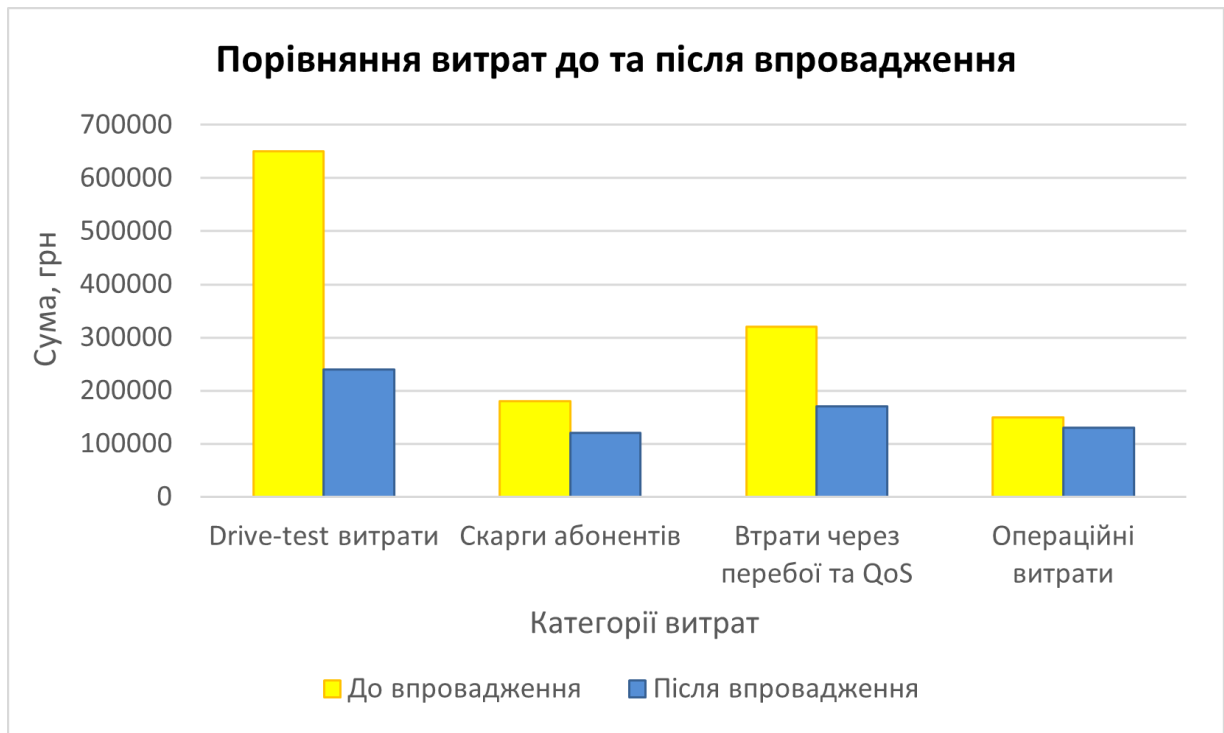


Рис. 5.1 – Порівняння витрат до та після впровадження проєкту

Втрати через перебої в мережі / QoS скоротилися з 320 000 грн до 170 000 грн (~47%). Проєкт дозволив моніторити мережу в режимі реального часу, запобігати обривам та підвищити якість послуг, що безпосередньо зменшило фінансові втрати, пов'язані з компенсаціями та незадоволеними абонентами.

Операційні витрати зменшилися з 150 000 грн до 130 000 грн. Оптимізація процесів, впроваджена стартап-проєктом, дозволила раціональніше використовувати ресурси, скоротити непотрібні витрати та підвищити ефективність внутрішніх операцій.

Загальні витрати знизилися з 1 300 000 грн до 660 000 грн, тобто економія перевищує 50%. Це наочно демонструє ефективність стартап-проєкту у підвищенні продуктивності та скороченні фінансових втрат компанії.

Рисунок 5.2 ілюструє прогноз окупності стартап-проєкту протягом перших шести місяців після його впровадження. На графіку показано, як початкові інвестиції у проєкт поступово окупаються за рахунок економії витрат та підвищення ефективності в різних категоріях. Позитивна динаміка свідчить, що економія коштів стає відчутною вже після першого місяця, а повна окупність очікується ближче до четвертого–п'ятого місяця. Таким чином,

графік демонструє швидку віддачу інвестицій та економічну ефективність проекту, що підтверджує його доцільність. Також графік підкреслює стабільність зростання фінансового результату навіть при мінімальних коливаннях витрат і доходів. Це свідчить про надійність моделі окупності та знижує ризики для потенційних інвесторів.

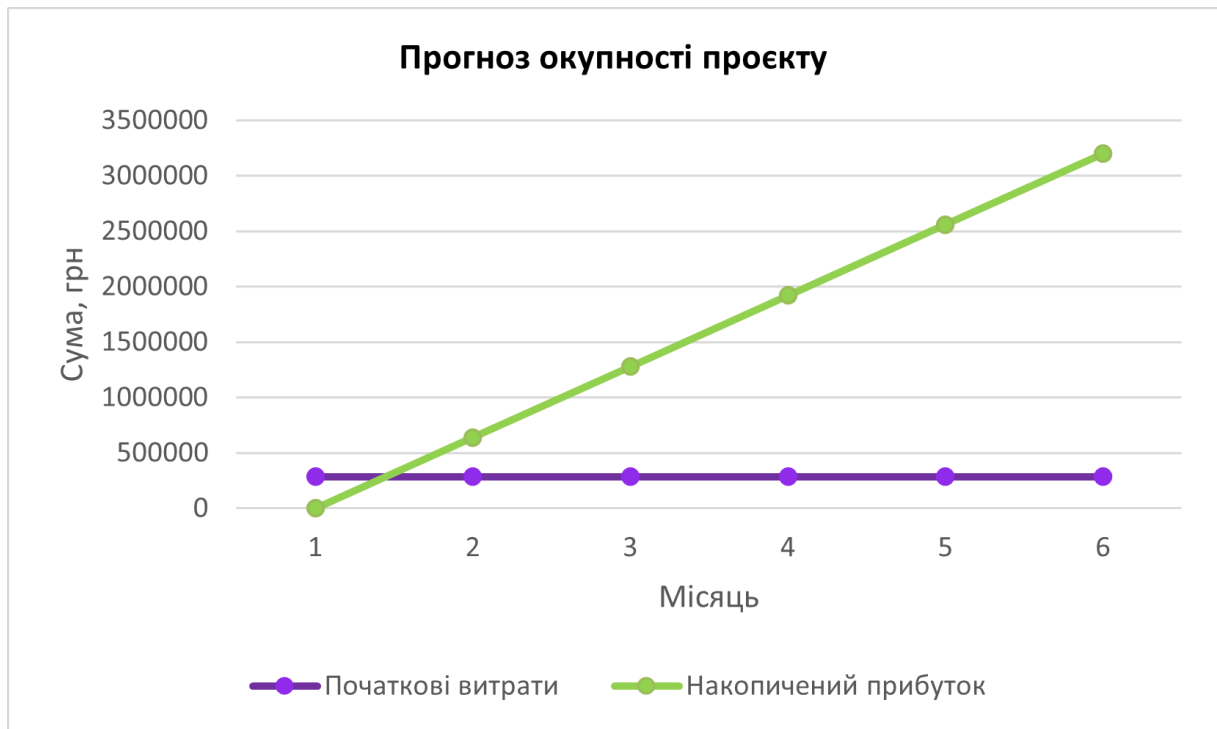


Рис. 5.2 – Прогноз окупності проекту протягом шести місяців

5.7 Висновки до розділу 5

Проект SmartQoS-Analytics демонструє значний потенціал для трансформації процесу управління якістю мобільних мереж LTE. Розроблена платформа поєднує радіоаналіз та оцінку користувацького досвіду (QoE), що дозволяє не лише фіксувати проблеми мережі, а й визначати їх причини та пропонувати конкретні шляхи оптимізації.

Ключові переваги продукту включають прогнозування реальної якості послуг, аналіз усіх рівнів LTE-протоколів, автоматичне формування рекомендацій та heat-map проблемних зон, а також оцінку економічного ефекту від впровадження оптимізацій. Це забезпечує мобільним операторам, вендорам

та командам оптимізації інструмент для ефективного підвищення якості сервісів, зменшення витрат та підвищення доходів.

SmartQoS-Analytics здатна скоротити потребу у дорогих польових вимірюваннях, прискорити прийняття рішень щодо налаштувань мережі, прогнозувати якість послуг у нових районах та обґрунтовувати модернізацію інфраструктури на основі економічно-технічних показників.

Таким чином, платформа поєднує інноваційні технології аналізу та практичну користь для бізнесу, створюючи новий стандарт управління якістю мобільних мереж і відкриваючи можливості для масштабування на ринку телекомунікацій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Результати виконаного дослідження дозволили сформувати цілісне уявлення про вплив радіопараметрів на якість сервісів мережі LTE. Проведений аналіз підтвердив, що параметри радіосигналу, зокрема RSRP та SINR, відіграють вирішальну роль у формуванні технічної ефективності мережі та визначенні рівня користувацького досвіду. Теоретичне дослідження показало, що якість сервісів у мобільних мережах залежить не тільки від фізичних умов поширення сигналу, а й від взаємодії між різними рівнями протоколів LTE — від RNC до APP.

Розроблена модель, яка охоплює всі рівні LTE-протоколів, дозволила провести всебічний аналіз впливу радіопараметрів на ключові показники якості, такі як пропускна здатність, затримка, якість голосу та стабільність з'єднання. Отримані результати узгоджуються з теоретичними положеннями та підтверджують наявність чітких кореляцій між фізичними характеристиками сигналу та якістю надання послуг.

Практична частина дослідження базувалася на вимірюваннях у реальних умовах функціонування мережі. Збір даних здійснювався за допомогою інструментального програмного забезпечення, яке забезпечувало фіксацію радіопараметрів та сервісних показників у прив'язці до часу та простору. Це дозволило оцінити вплив показників радіосигналу та встановити причини деградації якості сервісів у конкретних умовах експлуатації.

У процесі аналізу було виявлено недоліки у роботі мережі, пов'язані з нестабільністю радіоканалу та недостатньою адаптацією параметрів у зонах слабого сигналу. На основі отриманих даних сформовано рекомендації щодо оптимізації мережі LTE, спрямовані на підвищення стабільності з'єднань, зменшення затримок, покращення голосових сервісів та підвищення пропускної здатності.

Окремим результатом роботи стало розроблення стартап-проекту, який базується на аналітичних висновках дослідження та може бути впроваджений у

практичну діяльність операторів для автоматизованої оцінки та підвищення якості сервісів. Реалізація такого проєкту є перспективним напрямом, що може сприяти подальшому розвитку та модернізації мобільних мереж.

Таким чином, виконане дослідження підтверджує важливість комплексного підходу до аналізу радіопоказників та їх впливу на якість сервісів, а також демонструє можливість застосування отриманих результатів для покращення обслуговування користувачів та підвищення ефективності мереж LTE.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. User Equipment in LTE: <https://ltesignaling.blogspot.com/2011/11/user-equipment.html>
2. Difference Between X2 and S1 Handover: <https://techbearer.wordpress.com/difference-between-x2-and-s1-hand-over/>
3. Huawei iLearning Portal: <https://ilearning.huawei.com/edx/next/>
4. Radio Protocols for LTE and LTE-Advanced – Chapter 9: <https://www.oreilly.com/library/view/radio-protocols-for/9781118188569/chapter09.html>
5. LTE-Advanced E-UTRAN and EPC Architecture: https://www.researchgate.net/figure/LTE-Advanced-E-UTRAN-and-EPC-architecture_fig1_256871809
6. LTE EPC Overview – YateBTS: https://yatebts.com/solutions_and_technology/lte-epc/
7. Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA): <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/orthogonal-frequency-division-multiple-access-OFDMA>
8. Massive MIMO Comes of Age – Samsung White Paper: <https://images.samsung.com/is/content/samsung/p5/global/business/networks/insights/white-paper/massive-mimo-comes-of-age/global-networks-insight-massive-mimo-comes-of-age-0.pdf>
9. The Role of MIMO in LTE Networks: <https://techlteworld.com/the-role-of-mimo-in-lte-networks/>
10. Spatial Multiplexing for MIMO Systems: https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-spatial-multiplexing-for-MIMO-system_fig1_322746646
11. Space Diversity – Transmit Diversity: https://www.researchgate.net/figure/Space-Diversity-Transmit-Diversity_fig3_228919989

12. Beamforming – Huawei Encyclopedia: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/Beamforming.html>
13. LTE – Basics of Mobile Communication: <https://www.bfs.de/EN/topics/emf/mobile-communication/basics/lte/lte.html>
14. Conversational Voice AI for Customer Support: <https://gettalkative.com/info/conversational-voice-ai-for-customer-support>
15. How to Avoid Buffering Issues: <https://www.lifewire.com/how-to-avoid-buffering-issues-1847399>
16. IMS (IP Multimedia Subsystem): <https://realtimecommunication.wordpress.com/2015/07/27/summer-ims/>
17. Simplest Live Streaming Workflow for Beginners: <https://www.boxcast.com/blog/simplest-live-streaming-workflow-for-beginners>
18. Protocol Stack in LTE: <https://techlteworld.com/protocol-stack-in-lte/>
19. LTE Signal Strength Measurement (RSRP, RSRQ, RSSI, SINR): <https://www.repeater24.com/support/blog/lte-signalstaerke-messen-verbessern-rsrp-rsrq-rssi-sinr>
20. Quality of Service (QoS) Parameters: https://www.researchgate.net/figure/Quality-of-Service-QoS-parameters_fig3_365853850
21. Understanding High Internet Latency: <https://starlinkinstallationpros.com/understanding-high-internet-latency-causes-effects-and-solutions/>
22. Network Jitter Tools: <https://www.comparitech.com/net-admin/network-jitter-tools/>
23. QoS in LTE (4G QCI): <https://nickvsnetworking.com/qos-in-lte-4g-qci/>