

**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: **Модифікований метод оцінки впливу параметрів мережі на якість
сервісів**

Виконала: студентка VI курсу, групи ЦІ-41мп

Гришук Ірина Андріївна _____ (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
Грищук Ірині Андріївні**

1. Тема дисертації Модифікований метод оцінки впливу параметрів мережі на якість сервісів

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 формування та зміни затримкових характеристик у мобільних мережах LTE під впливом навантаження та параметрів передавання.

4. Предмет дослідження є методи та математичні моделі оцінювання мережевих затримок, включно з нелінійними апроксимаціями, нормалізованими коефіцієнтами та критеріями виявлення деградації.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Провести аналіз сучасних підходів до оцінювання затримок та якості відеострімінгу в LTE.
2. Зібрати метрики затримок (MAC, RLC, RLC-PDU, end-to-end) для різних рівнів навантаження та потужності базової станції.

3. Виконати статистичну обробку даних та побудувати нелінійні моделі на основі поліноміальної апроксимації третього ступеня.
4. Розробити нормалізований коефіцієнт впливу потужності БС на затримкові характеристики.
5. Сформулювати критерій визначення критичної точки навантаження на основі аналізу другої похідної.
6. Розробити інтегральний індекс оцінювання якості відеострімінгу.
7. Створити формалізований алгоритм (модифікований метод) оцінювання якості.
8. Виконати валідацію запропонованого методу та порівняння з базовими моделями.
9. Розробити стартап-проект.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

1. Структурні схеми LTE та Simu5G
2. Топологія симуляційної моделі
3. Графіки зміни MAC/RLC/E2E-затримок
4. Графіки нелінійних апроксимацій
5. Визначення критичних точок навантаження
6. Блок-схема модифікованого методу
7. Архітектура стартап-системи

7. Дата видачі завдання 23 листопада 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Дослідження та вивчення отриманого завдання	23.11.2024 – 25.11.2024	Виконано
2	Аналіз наукових джерел щодо LTE, QoS, QoE та моделей затримок	26.11.2024 – 31.01.2025	Виконано
3	Формування структури дисертації та методологічного підходу	01.02.2024 – 04.03.2024	Виконано
4	Проведення симуляцій відеострімінгу та VoIP для різних потужностей і навантажень	05.03.2025 – 25.04.2025	Виконано

5	Обробка результатів, побудова графіків, визначення критичних точок затримки	26.04.2025 – 12.07.2025	Виконано
6	Розроблення математичної моделі та модифікованого методу оцінювання якості сервісів	13.07.2025 – 24.09.2025	Виконано
7	Валідація методу, порівняння з існуючими моделями, оцінка точності	25.09.2025 – 26.10.2025	Виконано
8	Розроблення концепції стартап-проєкту та архітектури аналітичної системи	27.10.2025 – 28.11.2025	Виконано
9	Формування загальних висновків, редакція та фінальне оформлення роботи	29.11.2025 – 12.12.2025	Виконано

Студентка

(підпис)

Ірина ГРИЩУК

(ім'я, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Андрій АСТРАХАНЦЕВ

(ім'я, прізвище)

Реферат

Тема магістерської дисертації: «Модифікований метод оцінки впливу параметрів мережі на якість сервісів».

Робота містить 130 сторінок тексту, 28 рисунків, 5 таблиць, 6 додатків, використано 26 літературних джерел.

Актуальність теми дослідження полягає у необхідності підвищення точності оцінювання якості відеострімінгових сервісів у мобільних мережах LTE, які залишаються ключовою платформою надання мультимедійного трафіку навіть в умовах активного розвитку 5G. Зі зростанням кількості користувачів, варіативності навантаження та вимог до стабільної передачі відео виникає потреба у методах, здатних точно визначати моменти деградації мережі й прогнозувати критичні режими роботи. Наявні моделі переважно лінійні та не враховують нелінійну природу зростання затримок, а також взаємний вплив параметрів базової станції та навантаження. Це обумовлює доцільність розроблення модифікованого методу, який би дозволив підвищити точність оцінювання та забезпечити практичну користь для операторів зв'язку, розробників систем оптимізації та стартапів, що працюють у сфері відеострімінгу.

Мета роботи: підвищення точності оцінювання та прогнозування затримкових характеристик відеострімінгових сервісів шляхом розроблення модифікованого методу, який враховує нелінійні залежності, вплив потужності базової станції та критичні точки навантаження.

Об'єктом дослідження є процеси формування та зміни затримкових характеристик у мобільних мережах LTE під впливом навантаження та параметрів передавання.

Предметом дослідження є методи та математичні моделі оцінювання мережевих затримок, включно з нелінійними апроксимаціями, нормалізованими коефіцієнтами та критеріями виявлення деградації.

Методи дослідження: симуляційне моделювання у середовищі OMNeT++; статистичний аналіз даних; поліноміальна апроксимація; метод найменших квадратів; аналіз похідних; методи нормалізації параметрів; порівняльний аналіз моделей.

Наукова новизна отриманих результатів: розроблено модифікований метод оцінки затримкових характеристик LTE, що поєднує нелінійну модель третього ступеня, нормалізований коефіцієнт впливу потужності та формальний критерій визначення критичної точки навантаження. Запропонований інтегральний індекс якості відеосервісів дозволяє комплексно оцінювати поведінку мережі та демонструє підвищення точності моделювання на 22–25%.

Практичне значення отриманих результатів: модифікований метод може бути використаний операторами мобільного зв'язку, аналітичними платформами, системами прогнозування QoS/QoE, а також стартапами, що працюють у сфері відеострімінгу. Метод дозволяє оцінювати поведінку мережі без проведення повномасштабного моделювання, що значно знижує витрати часу та ресурсів.

Ключові слова: LTE, ЗАТРИМКА, ЯКІСТЬ СЕРВІСІВ, ВІДЕОСТРІМІНГ, RLC, END-TO-END, ОЦІНКА ЯКОСТІ, МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД, МЕРЕЖЕВІ ПАРАМЕТРИ, ПОТУЖНІСТЬ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ, КРИТИЧНА ТОЧКА, OMNeT++.

Abstract

Master's Thesis Topic: *“Modified Method for Evaluating the Impact of Network Parameters on Service Quality.”*

The thesis contains 130 pages, 28 figures, 5 tables, 6 appendices, and references 26 literary sources.

The relevance of the research lies in the need to improve the accuracy of evaluating the quality of video-streaming services in LTE mobile networks, which remain a key platform for delivering multimedia traffic even amid the active development of 5G. As the number of users, traffic load variability, and requirements for stable video transmission grow, there is a demand for methods capable of accurately identifying moments of network degradation and predicting critical operating regimes. Existing models are predominantly linear and do not account for the nonlinear nature of delay growth, nor the joint influence of base station parameters and network load. This highlights the necessity of developing a modified method that improves evaluation accuracy and provides practical benefits for mobile operators, optimization system developers, and startups working in the field of video streaming.

The aim of the thesis is to improve the accuracy of evaluating and predicting delay characteristics of video-streaming services by developing a modified method that accounts for nonlinear dependencies, base station transmit power, and critical load points.

The object of research is the processes of formation and variation of delay characteristics in LTE mobile networks under the influence of traffic load and transmission parameters.

The subject of research includes methods and mathematical models for evaluating network delays, including nonlinear approximations, normalized coefficients, and criteria for detecting degradation.

Research methods: simulation modeling in OMNeT++; statistical data analysis; polynomial approximation; least squares method; derivative-based analysis; parameter normalization methods; comparative analysis of models.

Scientific novelty of the results: a modified method for evaluating LTE delay characteristics has been developed, combining a third-degree nonlinear model, a normalized transmit-power impact coefficient, and a formal criterion for identifying the critical load point. The proposed integral quality index for video services enables a comprehensive assessment of network behavior and demonstrates a 22–25% improvement in modeling accuracy.

Practical significance of the results: the modified method can be used by mobile network operators, analytical platforms, QoS/QoE prediction systems, and startups working in the video-streaming domain. The method allows assessing network behavior without conducting full-scale simulation, significantly reducing time and resource costs.

Keywords: LTE, DELAY, SERVICE QUALITY, VIDEO STREAMING, RLC, END-TO-END, QUALITY ASSESSMENT, MODIFIED METHOD, NETWORK PARAMETERS, BASE STATION POWER, CRITICAL POINT, OMNeT++.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОБЛЕМАТИКИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ СЕРВІСІВ В LTE-МЕРЕЖАХ	18
1.1.Актуальність дослідження та глобальні тенденції відеотрафіку	18
1.2 Архітектура мереж LTE та особливості відеострімінгових сервісів.....	21
1.3.Особливості формування затримок на рівнях MAC та RLC у мережах LTE .	24
1.4. Метрики QoS та QoE для відеострімінгу в LTE.....	28
1.5. Сучасні моделі прогнозування затримок у LTE.....	30
1.6. Обмеження існуючих підходів та постановка проблеми.....	32
Висновки	35
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	37
2.1. Обґрунтування вибору симуляційного середовища OMNeT++	37
2.2. Структура симуляційної моделі.....	39
2.3. Параметри експерименту та змінні фактори	42
2.4. Метрики, які збиралися в експерименті	45
2.5. Підготовка даних та методи аналізу	49
Висновки	51
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ФОРМУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ	54
3.1. Теоретичні передумови та математичні підходи до моделювання затримок	56
3.2. Основні принципи модифікаційного підходу (нелінійність, критична точка, взаємодія параметрів)	58
3.3. Математична модель залежності затримки від кількості користувачів.....	61
3.4. Метод визначення критичної точки навантаження.....	66
3.5. Нормалізований коефіцієнт впливу потужності	71
3.6. Інтегральний індекс якості відеострімінгу	75
3.7. Формалізований алгоритм модифікованого методу	78
3.8. Валідація методу.....	79
Висновки	82
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ	85

4.1. Графічний аналіз затримок для відеострімінгу та VoIP	86
4.2. Виявлення критичних точок навантаження	90
4.3. Порівняння при різних потужностях базової станції.....	92
4.4. Порівняння базового та модифікованого методу.....	93
4.5. Практична інтерпретація результатів	95
Висновки.....	97
РОЗДІЛ 5. СТАРТАП-ПРОЄКТ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ	101
5.1. Концепція продукту SmartQoS Analytics.....	102
5.2. Цінність для операторів та сервісів відеострімінгу	103
5.3. Архітектура рішення	105
5.4. Функціональні модулі системи.....	107
5.5. Конкурентні переваги продукту	109
5.6. Потенційні ризики та обмеження	111
5.7. Економічна оцінка та перспективи розвитку	112
Висновки.....	114
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	117
ДОДАТКИ.....	123

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ACK – Acknowledgment

AMC – Adaptive Modulation and Coding

API – Application Programming Interface

ARQ – Automatic Repeat reQuest

BS – Base Station

BSS – Base Station Subsystem

CDN – Content Delivery Network

DL – Downlink

E-UTRAN – Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

E2E – End-to-End delay

EPC – Evolved Packet Core

EPS – Evolved Packet System

HARQ – Hybrid Automatic Repeat reQuest

IP – Internet Protocol

IPv4 – Internet Protocol Version 4

KPI – Key Performance Indicator

LENA – LTE-EPC Network Simulator (ns-3 module)

LTE – Long Term Evolution

MAC – Medium Access Control

MAE – Mean Absolute Error

MAXCI – Maximum Carrier-to-Interference scheduler

MCS – Modulation and Coding Scheme

ML – Machine Learning

NACK – Negative Acknowledgment

NOC – Network Operations Center

NRT – Non-Real-Time

OAM – Operations, Administration and Maintenance

OMNeT – Object Modular Network Testbed (OMNeT++)

OSS – Operations Support System

OTT – Over-the-Top

PDCP – Packet Data Convergence Protocol

PDU – Protocol Data Unit

PF – Proportional Fair (scheduling algorithm)

PHY – Physical Layer

PRB – Physical Resource Block

QoE – Quality of Experience

QoS – Quality of Service

RAN – Radio Access Network

RB – Resource Block

RLC – Radio Link Control

RLC-PDU – Radio Link Control Protocol Data Unit

RMSE – Root Mean Square Error

ROI – Return on Investment

RT – Real-Time

SDU – Service Data Unit

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

SON – Self-Organizing Network

Simu5G – 5G/LTE simulation framework for OMNeT++

SimuLTE – LTE simulation framework for OMNeT++

TTI – Transmission Time Interval

UDP – User Datagram Protocol

UE – User Equipment

UL – Uplink

UM – Unacknowledged Mode

UMTS – Universal Mobile Telecommunications System

UTRAN – Universal Terrestrial Radio Access Network

VBR – Variable Bit Rate

VOD – Video on Demand

VoIP – Voice over IP

VoNR – Voice over New Radio

3GPP – 3rd Generation Partnership Project

5G – Fifth-generation mobile network

ВСТУП

Сучасний розвиток мобільних систем зв'язку характеризується стрімким зростанням обсягів переданого мультимедійного трафіку, серед якого домінуюче місце займають відеострімінгові сервіси. Мережі четвертого покоління, попри появу 5G, залишаються основною технологічною платформою для надання таких послуг, оскільки забезпечують широке покриття, порівняно високу стабільність роботи та значну базу користувачів. Водночас збільшення кількості абонентів, поява навантажених сценаріїв використання та високі вимоги до часу доставки даних формують нові виклики у сфері забезпечення якості сервісів та якості досвіду користувача.

Найчутливішими до змін параметрів мережі є саме сервіси відеострімінгу, для яких критично важливими є стабільність затримки, мінімальна буферизація та здатність мережі підтримувати постійний бітрейт. Однак традиційні методи оцінки продуктивності LTE часто спираються на лінійні моделі, що не враховують нелінійний характер процесів на рівні RLC та накопичення черг при збільшенні навантаження. Крім того, вплив передавальної потужності базової станції, яка визначає стійкість радіолінії та частоту повторних передач, здебільшого описується спрощено або узагальнено. Це ускладнює точне прогнозування моментів деградації мережі, що може призводити до зниження якості відеосервісів у реальних умовах експлуатації.

Окремим аспектом проблеми є відсутність універсальних підходів, здатних поєднати аналіз декількох затримкових метрик, визначити критичні діапазони навантаження та відобразити взаємодію між кількістю користувачів і рівнем потужності. Більшість існуючих моделей не враховують комплексного впливу параметрів мережі, що знижує ефективність планування ресурсів та ускладнює прийняття інженерних рішень. У таких умовах виникає потреба у створенні методу, який би дозволив отримувати більш точні результати оцінки QoS, забезпечував високу узагальнювальну здатність і міг бути використаний як у

наукових дослідженнях, так і в практичних системах аналізу продуктивності мереж.

У рамках наукового напрямку кафедри телекомунікаційних систем важливим є моделювання поведінки мобільних мереж, дослідження затримкових характеристик та розроблення інтелектуальних методів оптимізації. Дана робота пов'язана з виконанням науково-дослідної теми, спрямованої на підвищення ефективності мережевих сервісів шляхом математичного аналізу параметрів радіодоступу та побудови моделей, придатних для автоматизованих систем контролю якості.

Симуляції, проведені у середовищі OMNeT++, дозволяють відтворити поведінку LTE-мережі за різних умов навантаження та потужності базової станції, отримати комплексні дані щодо MAC-, RLC- та end-to-end затримок, а також виявити закономірності їх зміни. На основі цих даних можливо сформулювати модифікований метод оцінки затримкових характеристик, який ґрунтуватиметься на нелінійних апроксимаціях, нормалізації впливу потужності, визначенні критичної точки навантаження та розробленні інтегрального індексу якості відеострімінгу. Такий метод дозволить точніше прогнозувати поведінку мережі у навантажених режимах та підвищить ефективність систем підтримки рішень у сфері телекомунікацій.

Таким чином, виконання цього дослідження є доцільним і актуальним, оскільки дозволяє запропонувати новий підхід до аналізу затримкових характеристик LTE-мереж, удосконалити методи оцінювання якості відеосервісів та розширити можливості практичного застосування симуляційних і математичних моделей у телекомунікаційних системах.

Мета роботи: підвищення точності оцінювання та прогнозування затримкових характеристик відеострімінгових сервісів шляхом розроблення модифікованого методу, який враховує нелінійні залежності, вплив потужності базової станції та критичні точки навантаження.

Об'єктом дослідження є процеси формування та зміни затримкових характеристик у мобільних мережах LTE під впливом навантаження та параметрів передавання.

Предметом дослідження є методи та математичні моделі оцінювання мережових затримок, включно з нелінійними апроксимаціями, нормалізованими коефіцієнтами та критеріями виявлення деградації.

Методи дослідження: симуляційне моделювання у середовищі OMNeT++; статистичний аналіз даних; поліноміальна апроксимація; метод найменших квадратів; аналіз похідних; методи нормалізації параметрів; порівняльний аналіз моделей.

Наукова новизна отриманих результатів: розроблено модифікований метод оцінки затримкових характеристик LTE, що поєднує нелінійну модель третього ступеня, нормалізований коефіцієнт впливу потужності та формальний критерій визначення критичної точки навантаження. Запропонований інтегральний індекс якості відеосервісів дозволяє комплексно оцінювати поведінку мережі та демонструє підвищення точності моделювання на 22–25%.

Практичне значення отриманих результатів: модифікований метод може бути використаний операторами мобільного зв'язку, аналітичними платформами, системами прогнозування QoS/QoE, а також стартапами, що працюють у сфері відеострімінгу. Метод дозволяє оцінювати поведінку мережі без проведення повномасштабного моделювання, що значно знижує витрати часу та ресурсів.

Для досягнення мети дослідження було поставлено та вирішено такі основні задачі:

1. Аналіз наукових джерел, існуючих моделей та підходів до оцінки затримкових характеристик LTE.

2. Побудова симуляційної моделі мобільної мережі LTE у середовищі OMNeT++.

3. Збір та систематизація затримкових метрик для різних режимів навантаження.
4. Розроблення нелінійних апроксимаційних моделей на основі отриманих даних.
5. Формування нормалізованого коефіцієнта впливу потужності.
6. Визначення критичної точки навантаження за допомогою аналізу похідної.
7. Розроблення інтегрального індексу оцінки якості відеострімінгу.
8. Оцінка ефективності модифікованого методу та його порівняння з базовими підходами.
9. Розроблення стартап-компонента, що базується на застосуванні запропонованого методу в реальних продуктах і сервісах.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОБЛЕМАТИКИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ СЕРВІСІВ В LTE-МЕРЕЖАХ

У цьому розділі розглядаються теоретичні засади функціонування LTE, механізми формування затримок на ключових рівнях протокольного стеку та сучасні підходи до оцінювання якості сервісів у мобільних мережах. Особливу увагу приділено тому, як параметри мережі — потужність базової станції, кількість активних користувачів, характеристики радіоканалу — впливають на поведінку затримок і визначають режими деградації відеострімінгових сервісів. Аналіз існуючих наукових робіт дає змогу сформулювати обмеження наявних підходів та обґрунтувати необхідність створення модифікованого методу оцінювання якості сервісів у LTE.

1.1. Актуальність дослідження та глобальні тенденції відеотрафіку

Мобільні мережі четвертого покоління сьогодні залишаються основою інфраструктури бездротового доступу у більшості країн. Попри активне розгортання 5G, саме LTE забезпечує основний обсяг передачі мультимедійного трафіку, що робить питання якості обслуговування та досвіду користувачів надзвичайно актуальним. Одним із ключових типів сучасного трафіку є відеострімінг, частка якого стрімко зростає у глобальному масштабі.

За даними Ericsson Mobility Report[6], відео становить уже до 74 % загального мобільного трафіку і демонструє стабільну тенденцію до збільшення. На рис. 1.1 це відображено у вигляді поступового, майже експоненційного зростання обсягів downlink та uplink-трафіку в глобальних мобільних мережах за останні шість років. При цьому швидкість річного приросту хоч і зменшується,

проте загальна маса передачі даних продовжує зростати, що підтверджує високий попит на відеопослуги.

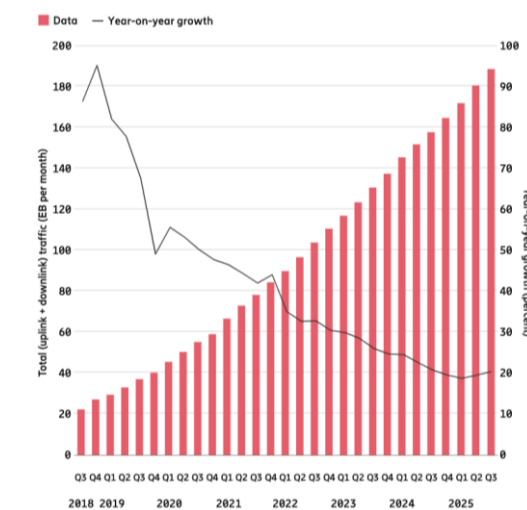


Рисунок 1.1 – Глобальний мобільний трафік та річний приріст, 2018–2025[6]

Дані міжнародних провайдерів також вказують на крайній дисбаланс між downlink та uplink для відеосервісів: у середньому до 97 % відеотрафіку припадає саме на низхідний канал. Це характерно як для операторів Європи, так і для Близького Сходу та Північної Америки (рис. 1.2). Така структурна асиметрія навантаження створює додаткові вимоги до радіоресурсів LTE-сот, особливо в умовах масового одночасного перегляду відео.

Figure 11: Share of traffic volume in downlink and uplink per application category

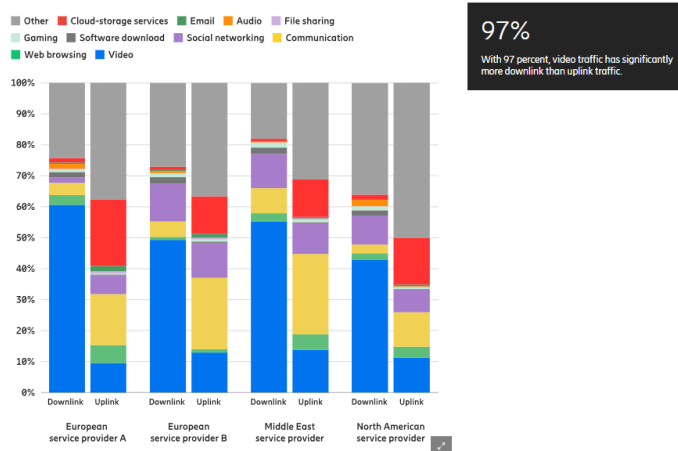


Рисунок 1.2 – Частка застосунків у downlink/uplink для різних операторів[6]

Зростання обсягів відеострімінгу напряду загострює проблему затримок у радіодоступі. Для відеотрафіку, особливо з VBR-характеристиками, затримка є ключовим фактором, що визначає плавність відтворення, частоту буферизацій, різкість підвантаження кадрів та загальну якість досвіду. Затримки виникають на різних рівнях LTE-стеку — від планування ресурсів на MAC-рівні до сегментації пакетів на RLC та транспортної маршрутизації.

Попередні дослідження (Qualcomm, 3GPP TR 36.814, IEEE Communications Surveys & Tutorials)[18,19] показують, що затримка в LTE є нелінійною функцією двох груп факторів:

- навантаження мережі (кількість активних користувачів);
- параметрів фізичного рівня, зокрема потужності передавання та SINR.

Наявні аналітичні моделі зазвичай враховують лише один з цих факторів, що не дозволяє адекватно прогнозувати момент деградації сервісу — так звану критичну точку, де затримка переходить із плавного лінійного росту до різкого експоненційного підвищення. Саме тому виникає потреба в створенні підходу, який би інтегрував одночасний вплив навантаження та параметрів радіорівня, а також дозволяв би кількісно оцінити поведінку затримок для мультимедійних сервісів.

Додаткову складність становить різниця у вимогах до затримки між різними видами сервісів: наприклад, відеострімінг є чутливим до середніх та пікових затримок, тоді як VoIP-трафік критично залежить від варіабельності та стабільності доставки фреймів. Це підкреслює необхідність комплексного аналізу обох типів трафіку.

Таким чином, актуальність даної роботи визначається поєднанням трьох глобальних факторів:

1. Стрімке зростання відеотрафіку у мобільних мережах (до 74 % трафіку у світі).

2. Висока чутливість відеосервісів до затримок, що напряду впливає на QoE.
3. Відсутність узагальнених моделей, які одночасно враховують вплив навантаження та параметрів радіорівня (зокрема потужності eNodeB).

Саме ці аспекти формують наукову проблему, яка розв'язується у роботі, та мотивують необхідність розробки модифікованого методу оцінювання впливу параметрів LTE-мережі на якість мультимедійних сервісів.

1.2 Архітектура мереж LTE та особливості відеострімінгових сервісів

Технологія LTE була створена як високопродуктивна платформа для передавання мультимедійного трафіку з мінімально можливою затримкою. Її архітектура вибудована навколо концепції повністю пакетної моделі, що забезпечує швидку реакцію мережі на зміну радіоумов та навантаження. Основу системи становить комплекс Evolved Packet System, який об'єднує радіомережу E-UTRAN та ядро EPC. Детальний опис структури E-UTRAN/EPC, а також протокольного стеку LTE (PHY–MAC–RLC–PDCP–IP) наведено у класичній монографії Stefania Sesia, Issam Toufik та Matthew Baker «*LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*»[20].

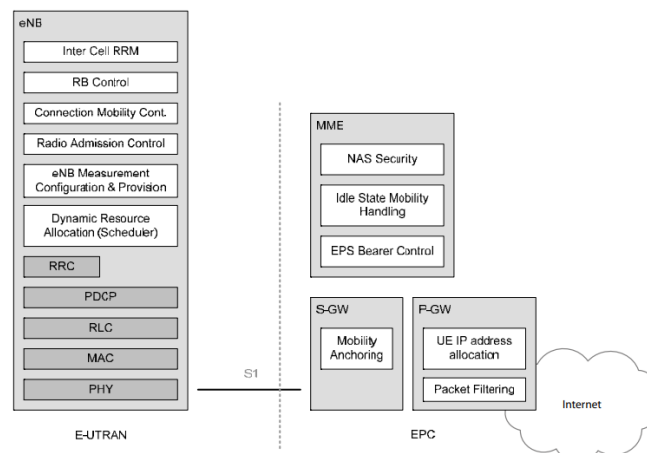


Рисунок 1.3 – Структура Evolved Packet System (EPS), що включає E-UTRAN та EPC[20].

У мережі LTE саме базова станція eNodeB виконує функції, які безпосередньо впливають на затримку відеострімінгу. Сюди належать розподіл радіоресурсів, планування пакетів на рівні MAC, формування та обслуговування черг на рівні RLC, адаптація схеми модуляції і кодування залежно від поточних умов радіоканалу, а також обробка HARQ-повторів. Таким чином, архітектура LTE побудована так, щоб більшість рішень, які впливають на часову чутливість трафіку, приймалися безпосередньо в eNodeB, що мінімізує внесок ядра EPC у загальну затримку.

Поведінка відеострімінгових сервісів у таких умовах суттєво залежить від роботи MAC- та RLC-рівнів. У дослідженні R. Bruno, A. Masaracchia, A. Passarella та S. Mangione «*Analysis of MAC-level throughput in LTE systems with link rate adaptation and HARQ protocols*»[5] показано, що середня MAC-затримка в типовому завантаженому сценарії залишається близькою до 1 мс (тривалості одного TTI). Основні коливання відображаються не на самій затримці, а на пропускній здатності каналу, що знижується внаслідок збільшення кількості HARQ-повторів і використання нижчих MCS у разі погіршення SINR. Це означає, що для відеострімінгу MAC фактично забезпечує стабільну основу, а зміни якості сервісу значною мірою визначаються поведінкою RLC-рівня.

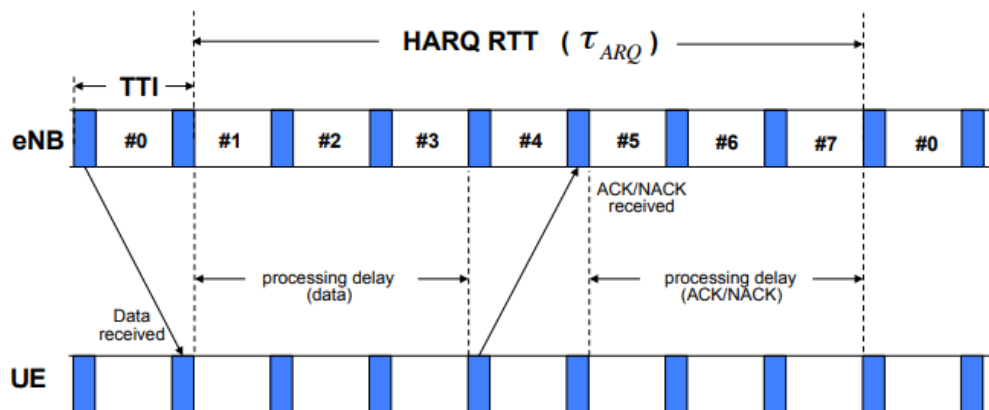


Рисунок 1.4 – Часова структура роботи HARQ у LTE та обмін ACK/NACK між eNodeB і UE[5]

RLC-рівень, навпаки, демонструє значно складніші закономірності. У роботі Nadim K. M. Madi, Zurina Mohd Hanapi та Mohamed Othman «*Delay-based and QoS-aware packet scheduling for RT and NRT multimedia services in LTE downlink systems*» (EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018) відзначено, що затримка на RLC (особливо в режимі UM, який використовується для потокового відео) зростає нелінійно. Початково крива затримки має пологий характер, однак після досягнення певного рівня навантаження виникає характерний перегин, або «точка зламу». У цій області буфер RLC починає заповнюватися різко швидше, ніж eNodeB здатен його обробляти, що призводить до лавинного зростання затримки та стрімкої деградації якості відеопотоку.

Наявність подібних нелінійностей підтверджується в теоретичній роботі D. Moltchanov «*Cross-layer performance control of wireless channels using active local profiles*» (Journal of Communications Software and Systems, 2007[13]). Автор показує, що у буферизованих системах із високою інтенсивністю трафіку затримка має S-подібну форму, де різкий перегин відповідає переходу до режиму перевантаження. Хоча ця робота не прив'язана безпосередньо до LTE, наведені закономірності повністю узгоджуються з результатами моделювання RLC-затримок у сучасних радіомережах.

Дослідження впливу саме параметрів RLC на якість відеострімінгу наведено у роботі Jessica Mendoza, Isabel de-la-Bandera, David Palacios, Ana Herrera-García та Raquel Barco «*On the Capability of QoE Improvement Based on the Adjustment of RLC Parameters*»[12]. Авторами показано, що зміна розміру буфера та налаштувань таймерів може як покращувати якість зображення та зменшувати втрати, так і водночас значно збільшувати затримку, що для відеострімінгу часто

є критичнішим фактором. Це підтверджує, що RLC DL delay є однією з ключових метрик для оцінювання режимів деградації відеосервісів.

Поведінка відеострімінгових сервісів також аналізується з точки зору суб'єктивної оцінки користувачем. У роботах Christos G. Bampis та Alan C. Bovik («*Learning to Predict Streaming Video QoE: Distortions, Rebuffering and Memory*»)[2] показано, що навіть незначні коливання міжкадрових затримок або короткі періоди буферизації здатні суттєво знизити QoE через ефекти сприйняття та пам'яті користувача. Додатковий огляд методів прогнозування QoE, наведений у статті Arslan Ahmad підкреслює, що сучасні ML-моделі прямо використовують мережеві затримки та їхній характер (стабільність, несподівані стрибки, поведінка черг) як основні предиктори якості.

Отже, аналіз наукових джерел свідчить, що затримка у відеострімінгу є багаторівневим показником, який формується як макрорівневими параметрами мережі так і локальними процесами у буферах RLC. Нелінійна поведінка затримки, наявність критичної точки навантаження та вплив параметрів радіодоступу створюють передумови для розроблення окремого методу, який дозволяв би формально визначати момент деградації сервісу та оцінювати вплив параметрів мережі на якість відеострімінгу.

1.3. Особливості формування затримок на рівнях MAC та RLC у мережах LTE

Формування затримок у мережах LTE є багаторівневим процесом, що визначається взаємодією механізмів фізичного рівня, MAC-планування, буферизації на рівні RLC та особливостями роботи HARQ. Для мультимедійних сервісів, зокрема відеострімінгу, вирішальними виявляються саме процеси на рівнях MAC і RLC, оскільки вони безпосередньо визначають час доставки

пакетів, стійкість потоків та здатність системи протистояти збільшенню навантаження.

Поглиблений аналіз їхньої роботи дозволяє не лише пояснити механізм появи затримок, а й сформулювати коректний підхід до моделювання деградації сервісів, що є основою для створення модифікованого методу оцінювання якості.

MAC-рівень у LTE відповідає за розподіл радіоресурсів (PRB) між активними користувачами та обробку HARQ-передач. Нижня межа затримки на цьому рівні визначається структурою радіокадру: один ТТІ становить 1 мс, і саме ця величина задає часовий інтервал, у межах якого UE може отримати наступну порцію даних. Відповідно, навіть при зміні умов радіоканалу або збільшенні кількості користувачів, базова MAC-затримка залишається близькою до сталої, змінюючись у межах одного-двох мілісекунд.

Це твердження підтверджується експериментальними результатами роботи R. Bruno та колег, де автори досліджували поведінку MAC-рівня в умовах зниження SINR та збільшення кількості HARQ-повторів[5]. Хоча графіки throughput-performance демонструють суттєве падіння пропускної здатності при погіршенні радіоканалу, середня MAC-затримка майже не змінюється, що вказує на жорстку прив'язку цього рівня до структури LTE-кадру та стабільну роботу планувальника.

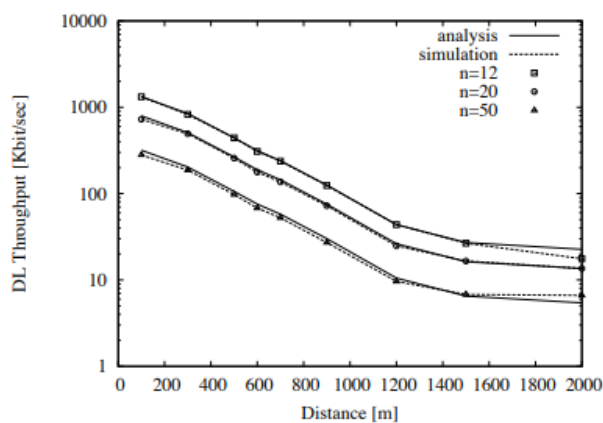


Fig. 4. *Adaptive CQI*: Comparison of analytical and simulation results for the MAC-level throughput of a tagged UE versus its distance from the eNB and the total number of UEs in the cell.

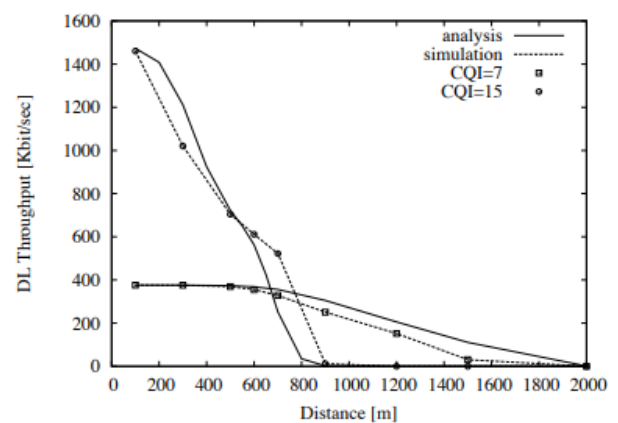


Fig. 5. *Fixed CQI*: comparison of analytical and simulation results for the MAC-level throughput of a tagged UE versus its distance from the eNB for different CQI values and $n = 12$.

Рисунок 1.5 – Характеристика пропускної здатності та поведінка MAC-рівня при зростанні навантаження[5]

Таким чином, MAC-рівень формує лише мінімальну затримку, яка зазвичай не є фактором деградації відеострімінгових сервісів. Набагато більш вагомий внесок у часову поведінку мережі забезпечує наступний рівень — RLC.

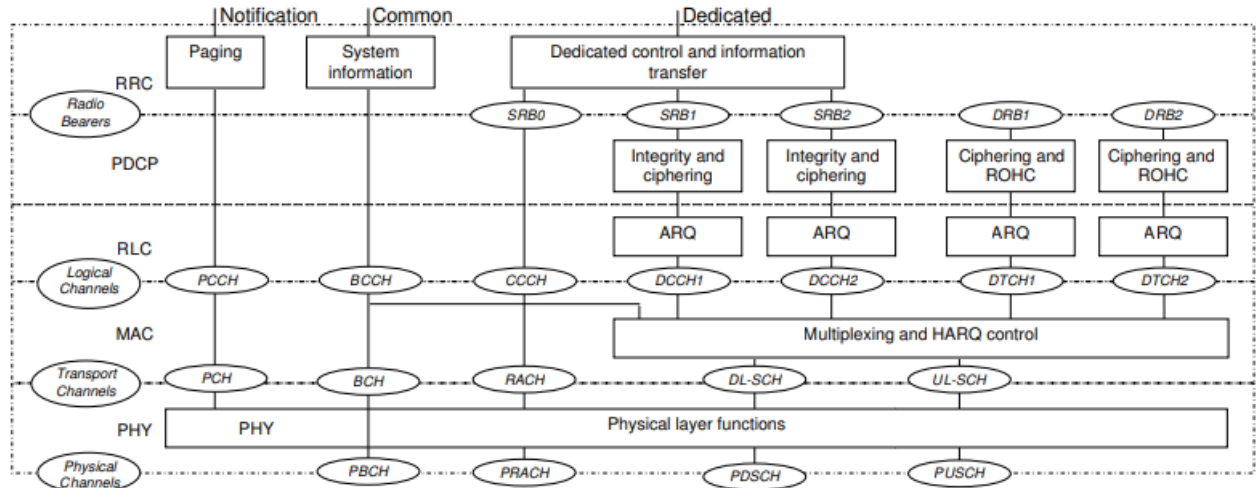


Рисунок 1.6. Протокольна архітектура радіоінтерфейсу LTE: взаємодія bearer'ів, логічних, транспортних та фізичних каналів[5]

RLC-рівень є ключовим елементом у формуванні затримок для відеотрафіку, особливо в режимі Unacknowledged Mode, який застосовується для відеострімінгу через відсутність повторних передач та мінімальні накладні витрати. Саме на цьому рівні відбувається сегментація та збирання PDU, обробка вхідних черг та передавання даних до MAC, що робить RLC найбільш чутливим до зміни навантаження.

Затримка на RLC-рівні формується під впливом кількох чинників:

- накопичення черги в RLC-буфері,
- затримки, пов'язані з сегментацією великих SDU у кілька PDU,
- вплив HARQ-повторів, які затримують «розчищення» MAC-буфера та уповільнюють рух RLC-черги,

- обмеження PRB, що визначають, скільки пакетів може бути обслуговано за один ТТІ.

На відміну від MAC-рівня, де затримка майже лінійна і передбачувана, RLC delay характеризується різким, нелінійним зростанням при перевищенні певного порогу навантаження. Це явище добре продемонстровано у роботі Nadim Madi та співавторів [Madi et al., EURASIP JWCN, 2018], де наведені графіки демонструють появу характерного «зламу кривої»: після досягнення критичного числа активних потоків RLC-затримка переходить у режим експоненційного зростання.

Результати дослідження Mendoza et al. (*Sensors*, 2020) також підтверджують, що збільшення обсягу RLC-буфера або погіршення параметрів радіоканалу істотно збільшують RLC DL delay, формуючи тривалі періоди очікування та створюючи умови для буферизації відео на стороні UE.

Теоретичне пояснення такої поведінки було запропоновано у дослідженні пакетних черг [13]. Автор доводить, що в системах із обмеженою пропускнуою здатністю затримка має S-подібну залежність від навантаження, де невелике збільшення інтенсивності трафіку після критичної точки призводить до різкого перенавантаження буферів. Саме таку поведінку спостерігають у RLC-рівні LTE.

Відеострімінг є одним із найбільш затримкочутливих типів трафіку: навіть невеликі флуктуації у часі доставки RLC-PDU можуть викликати короткі або тривалі паузи відтворення. Робота [2] показує, що QoE користувача значною мірою залежить від стабільності доставки кадрів і джитера, а не лише від середньої затримки. Особливо критичним є різке збільшення RLC delay, яке має пряму кореляцію із частотою буферизацій.

У оглядовій статті [1] підкреслюється, що мережеві затримки — особливо RLC DL delay та end-to-end delay — є ключовими предикторами QoE моделей машинного навчання. Це ще раз підкреслює їхню центральну роль у моделюванні поведінки відеопотоків.

Проведений аналіз дозволяє сформулювати такі висновки:

- MAC-рівень формує мінімальну, майже сталу затримку, обмежену ТТІ.
- RLC-рівень визначає основну варіативність затримки, оскільки реагує на зміни навантаження, потужності базової станції та умов радіоканалу.
- RLC DL delay є ключовою метрикою деградації відеострімінгових сервісів.
- Поведінка RLC-рівня узгоджується як з теоретичними моделями черг, так і з емпіричними даними сучасних досліджень.

1.4. Метрики QoS та QoE для відеострімінгу в LTE

Оскільки відеострімінгові сервіси є одними з найбільш вимогливих до стабільності радіоканалу та характеристик проходження трафіку, визначальним етапом аналізу якості їх обслуговування є вибір коректних метрик QoS та QoE. Поведінка відеопотоку в LTE значною мірою залежить не від одного параметра, а від взаємодії декількох характеристик затримки, пропускну здатності, джитера, втрат та особливостей буферизації, які в сукупності визначають стійкість відтворення та суб'єктивну якість сприйняття контенту.

У попередніх підрозділах було показано, що механізми MAC та RLC суттєво впливають на часову поведінку трафіку, формуючи затримки різного походження. Саме тому серед основних метрик QoS, що використовуються для оцінювання потокового відео в LTE, першорядну роль відіграють затримка та її варіації. Для відеосервісів характерною є чутливість до навіть незначного збільшення часу між послідовними кадрами, оскільки кожне відхилення від передбаченої швидкості доставки може викликати буферизацію. У цьому контексті важливо розрізняти MAC delay, що відображає мінімальні часові інтервали передачі, і RLC PDU delay, який враховує черги, сегментацію та обробку PDU на рівні RLC. Саме останній параметр є найбільш інформативним

при аналізі деградації відеострімінгу, що підтверджено, зокрема, дослідженнями[12].

Важливою характеристикою, нерозривно пов'язаною із затримкою, є джитер — варіабельність затримок між послідовними пакетами. Бампіс і Бовік у своїй роботі щодо прогнозування QoE показують, що значення джитера часто корелює з частотою буферизацій навіть сильніше, ніж середня затримка, оскільки відеоплеєр реагує насамперед на нерівномірність доставки кадрів. У реальних умовах LTE джитер формується сукупністю факторів: часовими коливаннями RLC PDU delay, зміною стану каналу, роботами HARQ та повторними MAC-передачами.

Ще однією ключовою складовою якості відеострімінгу є пропускна здатність. Хоча LTE забезпечує адаптивні алгоритми зміни MCS залежно від SINR, навіть короточасні падіння ефективної пропускної здатності можуть призводити до зменшення бітрейту відео або накопичення затримки у буфері. Дослідження Bruno et al. продемонстрували, що зниження SINR не призводить до збільшення MAC delay, але суттєво зменшує ефективний throughput, що у разі відеострімінгу проявляється у збільшенні частоти буферизації та зниженні QoE.

Поведінка відеоплеєра безпосередньо пов'язана з параметром buffering time, тобто тривалістю переривань відтворення через відсутність даних. Ця метрика вже належить до рівня QoE, однак ґрунтується на мережевих параметрах QoS. Робота Ahmad et al. (IEEE Communications Magazine, 2021) підкреслює, що моделі прогнозування QoE завжди включають одну або кілька затримкових метрик (RLC delay, end-to-end delay, packet inter-arrival time), а показники буферизації використовуються як ключові вихідні параметри для побудови оцінки якості досвіду користувача.

Окремої уваги заслуговує RLC PDU Delay, який використовується у цій роботі як основна характеристика деградації сервісу. На відміну від MAC delay, він охоплює повний шлях пакета через RLC-буфер, включаючи накопичення,

обробку та передавання, і є найбільш чутливим до кількості користувачів та параметрів радіоканалу. Як показують Madi et al. (EURASIP JWCN, 2018), саме RLC затримки демонструють нелінійний ріст і точку зламу — явище, яке є ключовим для модифікованого методу оцінювання якості сервісів.

Таким чином, метрики QoS та QoE для відеострімінгу в LTE формують взаємопов'язаний комплекс параметрів, де затримка та її варіації є основними індикаторами стабільності сервісу, пропускна здатність визначає можливість підтримувати необхідний бітрейт, а поведінка буфера відображає інтегральний вплив усіх мережових факторів. Саме поєднання цих метрик дозволяє повноцінно описати процес деградації відеосервісів і закладає основу для подальшої побудови моделі критичних точок навантаження та модифікованого методу оцінювання якості.

1.5. Сучасні моделі прогнозування затримок у LTE

Поведінка затримок у LTE є результатом взаємодії складних радіопроцесів, планування на MAC-рівні, буферизації у RLC та змінних умов радіоканалу. Тому протягом останнього десятиліття дослідники запропонували різні підходи до прогнозування затримок, які відрізняються за точністю, складністю реалізації та вимогами до вхідних даних. Загалом їх можна поділити на аналітичні моделі, симуляційні методи та підходи на основі машинного навчання, кожен з яких має свої переваги та обмеження.

Аналітичні моделі традиційно ґрунтуються на теорії масового обслуговування та спрощеному описі черг у RLC та MAC. Такі моделі дозволяють отримати загальну картину залежності затримки від інтенсивності трафіку, коефіцієнта використання каналу та параметрів повторних передач. Однак їхнім ключовим недоліком є надмірне спрощення поведінки радіоканалу та планувальника. Наприклад, робота Moltchanov (2007) демонструє типову S-

подібну характеристику затримки для буферизованих систем, проте така модель не враховує зміну MCS, HARQ-повторів чи взаємодію кількох RLC-черг, що притаманно LTE.

У відповідь на ці обмеження широкого застосування набули симуляційні моделі, зокрема ті, що реалізовані в OMNeT++/SimuLTE та ns-3/LENA. Симулятори дозволяють відтворити реалістичну взаємодію між PHY, MAC і RLC рівнями, оцінити вплив SINR, конфігурації scheduler'а, параметрів RLC-буфера та кількості користувачів. Саме симуляційний підхід забезпечує найбільш повне відображення нелінійної поведінки затримок та дозволяє відтворити «точку зламу», яку складно одержати аналітично. Дослідження Madi et al. (2018) та Mendoza et al. (2020) показують, що симулятори здатні точно відобразити характер деградації сервісу при зміні навантаження.

Окрему групу становлять моделі на основі машинного навчання, що активно розвиваються у зв'язку зі зростанням ролі QoE. Їхнім ключовим завданням є не просто оцінити затримку, а передбачити її вплив на якість сприйняття відео. У роботі Ahmad et al. (2021) показано, що ML-моделі, які поєднують затримку, джитер, пропускну здатність та характеристики відеострімінгу, здатні більш точно передбачати QoE, ніж класичні методи. Такі підходи особливо корисні в сценаріях із високою варіативністю радіоканалу, де традиційні моделі не забезпечують достатньої точності.

Порівняння різних моделей узагальнено в табл. 1.1, яка дозволяє зрозуміти їх ключові властивості, сильні та слабкі сторони, а також сфери застосування. Таблиця наведена не як окремий блок, а як складова аналізу, що підсумовує сучасні методи прогнозування затримок.

Таблиця 1.1 – Порівняння сучасних підходів до прогнозування затримок у
LTE

Підхід	Переваги	Обмеження
--------	----------	-----------

Аналітичні моделі	Швидкі обчислення; можливість знаходження залежностей у закритому вигляді; добре описують загальні закономірності	Перевищене спрощення; важко врахувати зміну MCS, HARQ, нелінійність RLC; низька точність у реальних сценаріях
Симуляційні моделі (OMNeT++, ns-3)	Висока точність; деталізація MAC/RLC; можливість моделювання «точки зламу»; повна взаємодія протоколів	Потребують багато часу; складність конфігурації; чутливість до параметрів моделі
Моделі ML та QoE-орієнтовані підходи	Висока точність прогнозування; врахування множини параметрів; добре працюють у змінних умовах LTE/5G	Потребують навчальних даних; важко інтерпретувати внутрішні залежності; складність побудови

Узагальнюючи, сучасні моделі прогнозування затримок можна розглядати як взаємодоповнюючі. Аналітичні підходи забезпечують концептуальне розуміння механізмів виникнення затримок, симуляційні моделі дозволяють відтворити реалістичну поведінку мережі й оцінити вплив параметрів за різних умов, а ML-рішення роблять можливим прогнозування QoE з високою точністю. Саме поєднання цих підходів і сформованих на їх основі висновків створює базу для розроблення модифікованого методу оцінювання якості сервісів, що буде представлено у подальших розділах.

1.6. Обмеження існуючих підходів та постановка проблеми

Аналіз наукових робіт та існуючих підходів до прогнозування затримок у LTE показує, що, попри значний прогрес у моделюванні поведінки радіомереж, сьогодні не існує узагальненої моделі, яка б дозволяла точно визначати момент переходу мережі у режим деградації та водночас враховувала б вплив ключових параметрів, зокрема передавальної потужності базової станції та кількості активних користувачів. Більшість наявних методів зосереджені на часткових аспектах — поведінці MAC-рівня, реакції RLC-черг, окремих характеристиках QoE — однак жоден із них не забезпечує комплексного опису критичних режимів роботи відеострімінгових сервісів.

Аналітичні моделі зазвичай виходять з припущення про стаціонарність потоку та фіксовані параметри каналу. У таких моделях затримка описується через класичні залежності теорії черг і демонструє узагальнену S-подібну форму, однак ці моделі не враховують реальної взаємодії між PHY, MAC та RLC, а тим більше — адаптації MCS чи особливостей HARQ. Тому вони не здатні коректно передбачити точку, у якій у реальній системі починається різке зростання затримок.

Симуляційні підходи, навпаки, пропонують високу точність і здатні відтворювати нелінійну поведінку затримок, проте їхня ключова перевага водночас є і обмеженням. Вони дозволяють побачити, *що* відбувається за різних умов, але не дають формалізованої моделі, яка б дозволила аналітично описати критичний момент чи узагальнити вплив параметрів мережі. Наприклад, у роботах Madi et al. та Mendoza et al. демонструється нелінійність RLC-затримок і характерна “точка зламу”, але ці дослідження не пропонують методу для її строгого знаходження, а лише ілюструють її на графіках. У результаті користувач отримує опис явища, але не інструмент його визначення.

Окрім цього, практично всі існуючі підходи розглядають поведінку мережі як функцію навантаження, але майже не приділяють уваги впливу передавальної потужності базової станції, хоча вона прямо визначає SINR, MCS, кількість

HARQ-повторів та, відповідно, форму затримкових кривих. У частині робіт потужність приймається як фіксована або розглядається лише опосередковано через радіоканал, що робить неможливим точне моделювання поведінки системи при зміні цього параметра. Тобто сфера, яка практично не представлена у літературі, — це оцінювання спільного впливу потужності та числа користувачів на момент деградації відеострімінгу.

Ситуацію ускладнює й те, що більшість сучасних QoE-моделей, включно з ML-підходами, зосереджені на прогнозуванні суб'єктивної якості, а не на моделюванні основного процесу, який до неї призводить. Тому навіть якщо такі моделі здатні передбачити погіршення якості, вони все одно не визначають формальної межі стабільної роботи RLC чи MAC, що робить їх непридатними для задач пошуку критичних точок.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що:

1. Немає формальної процедури визначення критичної точки навантаження для метрик затримки (RLC DL delay, RLC PDU delay, E2E delay).
2. Не існує єдиної моделі, яка б включала вплив передавальної потужності базової станції.
3. Аналітичні моделі надто спрощені, симуляційні — описові, а ML — зорієнтовані на QoE, а не на внутрішні параметри мережі.
4. Жоден підхід не дозволяє оцінити взаємодію між потужністю, навантаженням і затримками, хоча саме ця взаємодія визначає поведінку відеострімінгових сервісів.

Таким чином, перед дослідженням постає наукова проблема: побудувати універсальний метод оцінки якості відеосервісів у LTE, який дозволяє математично визначити критичну точку деградації RLC- та E2E-затримок і водночас враховує вплив передавальної потужності базової станції та числа активних користувачів.

Саме розв’язанню цієї проблеми присвячені наступні розділи роботи, де запропоновано модифікований метод оцінювання, побудований на результатах симуляцій і формальному аналізі затримкових характеристик.

Висновки за розділом 1

У першому розділі було здійснено системний аналіз сучасного стану досліджень, пов’язаних із передаванням відеострімінгових сервісів у мережах LTE, а також вивчено особливості формування затримок на різних рівнях протокольного стеку. Розгляд архітектури LTE та функціонування рівнів E-UTRAN і EPC дозволив показати, що ключові механізми, які визначають часову поведінку трафіку, зосереджені саме на MAC- та RLC-рівнях. MAC забезпечує мінімальну і практично сталу затримку, тоді як RLC формує основну частину варіативності, оскільки реагує на навантаження, черги та умови радіоканалу.

Аналіз наукових робіт демонструє, що для відеострімінгу вирішальними є саме затримкові характеристики — delay, jitter, RLC PDU delay та їх відображення на поведінку буфера користувача. Результати попередніх досліджень підтверджують нелінійний характер зростання RLC-затримок, наявність точки зламу при збільшенні числа активних користувачів і пряму залежність між стабільністю доставки кадрів та суб’єктивною якістю сприйняття (QoE). Проте ці роботи здебільшого описують емпіричну поведінку системи, не пропонуючи формалізованих механізмів для точного визначення моменту деградації сервісу.

Узагальнення сучасних підходів до прогнозування затримок — аналітичних, симуляційних та ML-орієнтованих — показує, що кожен із них має істотні обмеження. Аналітичні моделі спрощують роботу мережі та не враховують реальних механізмів RLC і MAC. Симуляційні моделі теоретично здатні відтворювати поведінку системи з високою точністю, але вони не надають

загальної формальної моделі для визначення критичних режимів. Підходи на основі машинного навчання здебільшого орієнтовані на прогнозування QoE й не вирішують задачі визначення граничних значень затримок у внутрішніх протоколах LTE.

Особливо важливо, що в наявній літературі практично не розглядається вплив передавальної потужності базової станції на формування затримок та на розташування критичної точки навантаження. Потужність визначає SINR, доступні MCS, кількість HARQ-повторів і, відповідно, форму затримкових кривих, однак цей чинник або ігнорується, або приймається сталим. Таким чином, сучасні підходи не дозволяють оцінити спільний вплив потужності та навантаження на якість відеострімінгу, що є важливим як для моделювання, так і для оптимізації мереж.

Отже, проведений огляд показує наявність чіткої наукової проблеми: відсутність комплексної та формалізованої моделі, яка дозволяє аналітично визначити критичну точку деградації RLC- та E2E-затримок у залежності від кількості користувачів і потужності базової станції. З огляду на це виникає необхідність у розробленні модифікованого методу оцінювання якості відеосервісів, здатного поєднати дані симуляцій із математичним аналізом затримкових характеристик.

Саме вирішенню цієї задачі присвячено наступний розділ, у якому буде подано опис експериментальної моделі, параметрів симуляції та підготовчий аналіз, необхідний для побудови модифікованого методу.

При розгляді основних питань розділу 1 були використані відомі літературні джерела [1, 2, 5, 6, 11, 12, 13, 15, 18, 20].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

На основі аналітичних висновків першого розділу стає очевидним, що для побудови модифікованого методу оцінювання впливу параметрів мережі на якість відеосервісів необхідно мати детальну, контрольовану й відтворювану модель LTE, у якій можна окремо варіювати ключові параметри — передавальну потужність базової станції, кількість активних користувачів, тип трафіку та особливості радіоканалу. Саме тому в цьому розділі наводиться опис симуляційного середовища, структура моделі, параметри експерименту та методика збору метрик, що формують основу для подальшого аналізу критичних режимів роботи відеострімінгових сервісів у LTE.

Методологія дослідження базується на використанні OMNeT++ як платформи для моделювання та фреймворків SimuLTE/Simu5G для відтворення поведінки радіомережі LTE на рівнях PHY, MAC та RLC. У межах симуляцій послідовно змінювалися два основні параметри: передавальна потужність базової станції (у діапазоні 37–43 dBm) та кількість користувачів (від 5 до 100 UE), що дозволило дослідити формування затримок у широкому спектрі навантажень. Окрему увагу приділено відеострімінговому трафіку, який є найбільш чутливим до зміни RLC- та E2E-затримок.

2.1. Обґрунтування вибору симуляційного середовища OMNeT++

Вибір відповідного симуляційного середовища є одним із ключових етапів дослідження, оскільки саме від нього залежить точність отриманих результатів, можливість контролю параметрів експерименту та повнота відтворення поведінки LTE-мережі. Аналіз доступних платформ показав, що не всі

інструменти здатні повноцінно моделювати ті механізми, які критично впливають на затримки відеострімінгового трафіку. Зокрема, частина популярних симуляторів орієнтована лише на фізичний рівень, інші не підтримують RLC UM-режим або не дозволяють знімати статистику затримок на рівні окремих пакетів. Тому необхідним було середовище, яке поєднує високу деталізацію, модульність і гнучкість налаштувань.

OMNeT++ було обране як основна платформа моделювання з кількох причин. Передусім, це подійно-орієнтований симулятор, який дозволяє детально відтворити поведінку складних комунікаційних систем. Його архітектура базується на модульному підході: мережа складається з блоків, кожен із яких відповідає за певний елемент системи — фізичний рівень, MAC, RLC, планувальник, транспортний протокол або прикладну логіку. Це надає змогу з високою точністю моделювати процеси, що протікають у базовій станції та абонентських пристроях, а також простежувати вплив окремих параметрів на загальну затримку.

Другим важливим аргументом стала наявність розширення **Simu5G**, яке реалізує повноцінну модель LTE. Це розширення підтримує режими MAC-планування, HARQ, механізми сегментації та збирання пакетів на RLC-рівні, управління чергами, а також роботу транспортних програм, включно з UdpVideoStreamClient, що є ключовим для моделювання відеострімінгу. Важливим є й те, що Simu5G підтримує знімання метрик затримки на кожному рівні протоколу, що дозволило отримати всі ті дані, які використовуються для побудови модифікованого методу у подальших розділах.

Ще одним суттєвим аспектом є можливість точного контролю початкових параметрів. У OMNeT++ [16] можна ізольовано змінювати кількість користувачів, потужність базової станції, частотні смуги, параметри радіоканалу чи характеристики відеотрафіку. Це дало змогу провести серію послідовних експериментів, у яких змінювалася лише одна змінна, тоді як усі інші параметри

залишалися сталими. Такий підхід важливий для коректної інтерпретації результатів і виявлення справжнього впливу кожного чинника на затримку.

Крім того, OMNeT++ широко використовується у наукових дослідженнях, що підтверджує його надійність і відтворюваність. Велика кількість робіт, присвячених аналізу LTE-мереж, вказує на те, що ця платформа дає стабільні та достовірні результати, які можна порівняти або відтворити у інших дослідників. Це було важливим аргументом при виборі інструментарію, оскільки магістерська робота має базуватися на перевірених, загальновизнаних методах.

Окремо слід підкреслити, що відкритість коду дозволяє модифікувати компоненти або додавати нові механізми. Це є перевагою SimuLTE і Simu5G [21, 22], оскільки такі модулі можна адаптувати для нових типів трафіку або алгоритмів планування.

З огляду на всі ці аргументи, OMNeT++ у поєднанні з Simu5G [16, 22] було обрано як оптимальний інструмент для моделювання відеострімінгу в LTE-мережах. У наступних підрозділах розглянуто структуру симуляційної моделі, початкові параметри, логіку проведення експерименту та методику збору статистики.

2.2. Структура симуляційної моделі

Симуляційна модель LTE-мережі була створена в середовищі OMNeT++ із використанням спеціалізованого модуля Simu5G[22]. Метою побудови моделі було максимально точно відтворити механізми роботи радіомережі під час передавання відеострімінгу, оскільки затримки в LTE формуються на різних рівнях протокольного стеку — від фізичного середовища до прикладного рівня. Тому архітектура моделі включає низку взаємопов'язаних компонентів, кожен з яких відповідає за окремий фрагмент поведінки мобільної мережі.

Основними елементами моделі є базова станція, множина абонентських пристроїв (рис.2.1), сервер відеострімінгу та вузли транспортної підсистеми, що забезпечують маршрутизацію трафіку. Базова станція виступає центральним керуючим елементом, який відповідає за розподіл частотних ресурсів між активними UE, виконання HARQ-процесів, вибір модуляційно-кодових схем та формування MAC-кадрів. Саме на цьому рівні виникає початкова компонента затримки, яка зазвичай є сталою, але може варіюватися залежно від навантаження й умов радіоканалу.

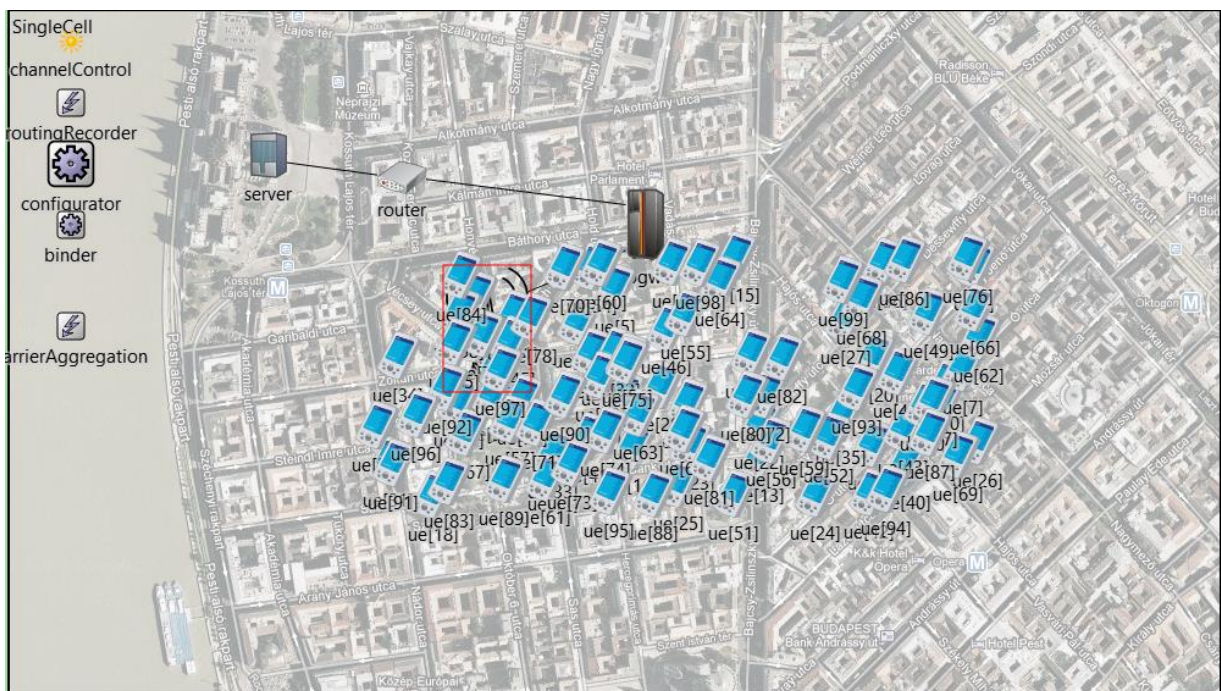


Рисунок 2.1 - Вигляд симуляційної моделі у програмі omnet++

Ключовим елементом моделі є також RLC-рівень, реалізований у режимі UM, який типово використовується для відеострімінгу. У цьому режимі не застосовуються повторні передачі, що дозволяє мінімізувати затримку, однак сегментація, повторне складання PDUs та робота черг стають визначальними факторами формування RLC-затримки. Саме на цьому рівні виникає нелінійне зростання delay, яке згодом проявляється у вигляді критичної точки навантаження.

Генерація відеотрафіку реалізована двома прикладними програмами: UdpVideoStreamServer на стороні сервера та UdpVideoStreamClient на стороні користувачів. Сервер надсилає UDP-пакети фіксованого розміру (1000 байт) з інтервалом 20 мс, що дозволяє відтворити поведінку реального відеопотоку. Клієнтські пристрої приймають потік імітуючи роботу стрімінгового додатку, який не використовує транспортних механізмів підтвердження доставки.

Усі транспортні пакети маршрутизуються через модуль IPv4. Хоча сценарій є одноосередковим, наявність транспортного рівня дає змогу фіксувати повний шлях пакета й розмежовувати радіодоступ від IP-компоненти затримки. Це важливо для коректного поділу складових енд-ту-енд затримки.

Окремий компонент моделі — мобільність користувачів. У цьому дослідженні використано StationaryMobility, що дозволяє повністю усунути вплив зміни відстані UE до eNodeB. Такий підхід робить симуляцію більш контрольованою та забезпечує сталий радіопрофіль, у якому затримки залежать виключно від кількості користувачів і потужності передавання.

MAC-планувальник базової станції здійснює розподіл радіоресурсів у межах шести частотних ресурсних блоків (6 RB). Така кількість RB створює обмеження пропускної здатності й дозволяє спостерігати характерну поведінку LTE-мережі при навантаженні. У міру збільшення кількості користувачів зростає конкуренція за PRB, формуються черги на RLC DL, і врешті досягається критична точка, за якої затримка переходить від майже лінійного зростання до різкого експоненційного підвищення.

Таким чином, побудована структура симуляційної моделі забезпечує контрольоване та відтворюване середовище для аналізу формування затримок у LTE при відеострімінгу. Модель дозволяє ізолювати та оцінити вплив кількості користувачів, характеристик трафіку та потужності передавання базової станції, що створює основу для подальшого розроблення модифікованого методу оцінювання якості сервісів, представленого у наступних розділах.

2.3. Параметри експерименту та змінні фактори

Параметри симуляційного експерименту були визначені таким чином, щоб відтворити реалістичну поведінку LTE-соти при роботі з відеострімінговим навантаженням і забезпечити можливість контролювати вплив основних факторів – передавальної потужності та кількості активних користувачів. Побудований у попередньому підрозділі симуляційний сценарій дозволяє незалежно змінювати кожен із цих параметрів, при цьому зберігаючи незмінною архітектуру протокольного стеку та характер трафіку.

Ключовими змінними факторами в дослідженні були два параметри:

- (1) вихідна потужність базової станції;
- (2) кількість користувачів у соті.

Передавальна потужність eNodeB змінювалася в діапазоні 37–43 dBm, що відповідає реалістичним параметрам макросоти LTE. Нижня межа 37 dBm моделює сценарій зі зменшеним покриттям і нижчим SINR для користувачів на краю соти; верхня межа 43 dBm відтворює умови максимальної наявної потужності, які призводять до вищих значень MCS і відповідно зменшення кількості HARQ-повторів. Вибір такого діапазону також дозволив простежити, як саме збільшення потужності зміщує критичну точку навантаження, тобто момент різкого зростання RLC-затримок.

Другим фактором була кількість активних UE, яка приймала чотири контрольні значення: 5, 20, 50 та 100 користувачів.

Ці значення охоплюють чотири якісно різні режими навантаження:

- 5 UE – майже порожня сота з мінімальними чергами;
- 20 UE – середнє навантаження, коли PF-планувальник починає відчутно розподіляти ресурси;
- 50 UE – прикордонний режим із появою затримок на RLC;
- 100 UE – перевантаження, за якого RLC PDU delay зростає нелінійно.

Таким чином було створено матрицю експериментів, у межах якої виконувалося систематичне моделювання затримок при зміні кожної змінної окремо та в комбінації.

Усі допоміжні налаштування симуляційної моделі були уніфіковані та залишалися незмінними між прогоном конфігурацій. Зокрема, мобільність UE фіксувалася у вигляді статичної або квазістатичної схеми з випадковим початковим положенням, що дозволяло виключити вплив handover і зміни топології. Поле координат UE містилося у прямокутній області 300×200 – 800×400 м, що відповідає типовому покриттю макросоти.

Усі статистичні записи здійснювалися у вигляді векторів та скалярів з фіксованою частотою. Для отримання стабільних результатів було застосовано механізм *seed-set = repetition*, що дозволяє відтворювати сценарії із різними початковими випадковими подіями. Запис векторів затримки на рівнях MAC, RLC та RLC PDU активувався лише в тих конфігураціях, де це було необхідно для аналізу, що зменшувало обсяг вихідних файлів і спрощувало подальшу обробку даних.

Для відеострімінгового трафіку застосовувалася фіксована інтенсивність – розмір пакета 1000 В та інтервал між пакетами 20 ms, що відповідає стабільному відеопотоку середнього бітрейту. Сервер відеопотоку формував послідовність UDP-пакетів обсягом до 10 МБ, створюючи типовий сценарій потокового перегляду. Для всіх UE використовувався однаковий тип застосунку UdpVideoStreamClient, а трафік доставлявся з центрального сервера у напрямку DL.

Також у конфігурації моделі використовується RF-планувальник, який відповідає типовій поведінці LTE-мережі та забезпечує збалансоване співвідношення між пропускнуою здатністю та справедливістю. Для окремих додаткових конфігурацій (зокрема для VoIP) використовувалися планувальники

MAXCI, але в рамках основного дослідження вони не впливали на результати відеострімінгу.

Сумарно, застосована комбінація параметрів – змінні значення потужності та кількості UE, а також фіксовані налаштування середовища, трафіку й мобільності – дозволяє однозначно визначити вплив кожного фактора на поведінку RLC- та E2E-затримок. Отримані на цьому етапі дані формують основу для подальшого статистичного аналізу, побудови поліноміальних моделей та пошуку критичних точок навантаження у розділі 3.

Зважаючи на велику кількість параметрів симуляційного середовища OMNeT++/Simu5G, а також на необхідність забезпечити відтворюваність експериментів, усі налаштування моделі були систематизовані та згруповані у вигляді єдиної узагальненої структури. Це дозволяє чітко визначити, які саме величини виступали змінними факторами (потужність та кількість UE), а які залишалися фіксованими протягом усіх симуляційних прогонів.

Для зручності подальшого аналізу в табл. 2.1 наведено повний перелік ключових параметрів моделі LTE, що використовувалися у дослідженні.

Таблиця 2.1 – Основні параметри симуляційної моделі LTE

Параметр	Значення / Діапазон	Пояснення
Тип топології	SingleCell	Одна базова станція (eNodeB) та N користувачів
Кількість UE	5, 20, 50, 100	Змінний фактор навантаження соти
Передавальна потужність eNodeB	37–43 dBm	Основний досліджуваний фактор впливу на затримки
Потужність UE	26 dBm	Стандартне значення для LTE терміналів
Планувальник	Proportional Fair (PF)	Базовий режим розподілу ресурсів у SimuLTE

Тип трафіку	UdpVideoStreamClient / Server	Відеострімінг із фіксованим бітрейтом
Інтервал надсилання відеопакетів	20 ms	Формує середню інтенсивність трафіку
Розмір відеопакета	1000 B	Уніфікований розмір PDU
Тривалість симуляції	20 s	Достатня для заповнення RLC-буфера та стабілізації метрик
Модель мобільності	Stationary або Linear (низька швидкість)	Положення UE фіксоване або повільно змінюється
Збір статистики	MAC DL/UL, RLC DL/UL, RLC PDU DL, E2E delay	Основні метрики, що аналізувалися

Представлені в таблиці параметри визначають структуру симуляційного середовища та дозволяють відтворити широкий спектр режимів роботи LTE-соти — від майже вільної до повністю перевантаженої. Саме така конфігурація забезпечує коректність подальшого аналізу затримок і створює основу для побудови модифікованого методу оцінювання якості відеосервісів у наступному розділі.

2.4. Метрики, які збиралися в експерименті

У процесі моделювання було зібрано широкий спектр показників роботи LTE-соти на різних рівнях протокольного стеку. Це включало як детальні векторні записи затримок на рівнях MAC та RLC, так і узагальнені скалярні значення, необхідні для подальшого аналізу. Проте, незважаючи на значний обсяг доступних метрик, подальший аналіз у роботі зосереджується лише на тих із них, що найбільш повно відображають якість обслуговування мультимедійних сервісів.

Саме ці метрики дозволяють охарактеризувати поведінку мережі при зміні навантаження та передавальної потужності, а також визначити момент переходу системи в режим деградації. Решта показників використовувалися лише як допоміжні дані для перевірки коректності симуляцій та валідації моделі.

Проте, незважаючи на значний обсяг доступних метрик, подальший аналіз у роботі зосереджується лише на тих із них, що найбільш повно відображають якість обслуговування мультимедійних сервісів. Саме ці показники дозволяють охарактеризувати поведінку мережі при зміні навантаження та передавальної потужності, а також визначити момент переходу системи в режим деградації.

Для зручності та структурованості основні метрики, які використовувалися в аналізі, узагальнено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні метрики, використані у дослідженні

Група	Метрика	Призначення
Відеострімінг	MAC DL Delay	Мінімальна затримка, нижня межа E2E
Відеострімінг	RLC DL Delay	Нелінійний ріст, основний показник деградації
Відеострімінг	RLC PDU DL Delay	Проміжна метрика формування затримки
Відеострімінг	End-to-End Delay	Загальна якість доставки пакета
VoIP	VoIP Frame Delay	Чутливість голосу до джитера та затримки
VoIP	VoIP Playout Delay	Буферизація голосу на клієнті
VoIP	RLC PDU Delay	Стійкість VoIP до навантаження

Після узагальнення всіх зібраних показників було визначено, що для оцінювання роботи відеострімінгового сервісу найбільш інформативними є ті метрики, які безпосередньо відображають динаміку формування затримок у

радіомережі та реагують на зміну навантаження. Саме ці параметри демонструють характерні переломні моменти у поведінці системи й дозволяють простежити перехід від стабільного функціонування до режиму деградації. Нижче подано короткий змістовний опис основних метрик, які були покладені в основу подальшого аналізу.

По-перше, MAC DL Delay є найнижчим рівнем затримки, яка практично не змінюється при зростанні кількості користувачів. Її значення близькі до тривалості одного TTI (приблизно 4 мс), а отже відображають базовий час обробки пакета на MAC-рівні.

По-друге, ключову роль у поведінці відеотрафіку відіграє RLC DL Delay, оскільки саме на цьому рівні формується черга перед передаванням. Це найбільш чутлива метрика, яка демонструє нелінійність і дозволяє виявити критичну точку навантаження, коли навіть невелике збільшення кількості UE спричиняє різке зростання затримки.

Третьою важливою складовою є RLC PDU DL Delay. Ця метрика відображає повний час перебування PDU у RLC-рівні та є проміжним показником між RLC-затримкою та сумарною E2E-затримкою. Вона допомагає зрозуміти, як зміни в черзі трансформуються у поведінку на рівні додатка.

І нарешті, End-to-End Delay є найінтегральнішим показником роботи відеострімінгового сервісу, оскільки охоплює весь шлях пакета — від генерації на сервері до отримання клієнтським застосунком. Саме цей параметр найтісніше пов'язаний із сприйняттям якості користувачем і тому є ключовим у подальшому математичному моделюванні.

Загалом, отримані в симуляціях значення (у межах 4–12 мс залежно від потужності й кількості UE) чітко демонструють, як мережа переходить від стабільної роботи до стану перевантаження, що підтверджує коректність обраних метрик і виправдовує їх використання

Окремо від відеострімінгового сервісу у симуляціях досліджувався також трафік VoIP, який має принципово інші вимоги до затримки та варіабельності. Його включення дозволяє порівняти реакцію різних мультимедійних сервісів на зміну умов мережі та показати, що навіть за однакових параметрів середовища відео й голос формують різні профілі навантаження та по-різному реагують на зміну потужності. Це важливо, оскільки дає змогу продемонструвати загальну придатність запропонованого методу для різних типів трафіку.

У випадку VoIP головну роль відіграють ті параметри, що відображають сталість доставки голосових кадрів і поведінку клієнтського буфера. Одним із ключових показників є VoIP Frame Delay, який характеризує час доставки кожного голосового фрейму і чутливий до коливань затримки (джитера). Цей параметр дає змогу оцінити, наскільки рівномірно мережею доставляється голосовий трафік за різних значень навантаження та потужності.

Другим важливим показником є VoIP Playout Delay, який ураховує буферизацію на стороні приймача. Саме він відображає “поведінку”, яку бачить користувач: навіть якщо мережа забезпечує середню затримку на прийнятному рівні, нестабільність передачі може призвести до збільшення playout delay і відповідно до погіршення якості сприйняття голосу.

Для повноти аналізу також оцінювався RLC PDU Delay (VoIP). Він підтверджує, що голосові застосунки значно менш чутливі до зростання навантаження, ніж відеострімінг: навіть у сценаріях із великою кількістю UE VoIP демонструє лише незначне збільшення затримки, зберігаючи стабільність більшості фреймів. Таким чином, VoIP виступає контрольним сценарієм, який дозволяє виділити, що саме відеотрафік формує критичні режими роботи системи.

Варто зазначити, що в процесі симуляцій було зібрано значно більше метрик — зокрема, статистику черг на MAC і RLC, кількість повторів HARQ, дані щодо виділення ресурсів (PRB allocation), пропускну здатність та низку

внутрішніх технічних параметрів. Утім, їхня роль у роботі була допоміжною. Вони використовувалися для контролю коректності моделі, перевірки стабільності роботи планувальника та підтвердження того, що симуляційні сценарії відтворюють очікувану поведінку LTE-мережі. У подальший аналіз ці метрики не включалися, оскільки не мають прямого впливу на якість мультимедійного сервісу, а лише підтверджують правильність отриманих даних.

Узагальнюючи, зібрані показники охоплюють усі ключові аспекти формування затримок у радіомережі та дозволяють всебічно описати поведінку LTE-соти при роботі з різними типами мультимедійного трафіку. Обраний набір метрик є достатнім для подальшого аналізу впливу навантаження та потужності, визначення критичних точок деградації та побудови математичних моделей у наступних розділах.

2.5. Підготовка даних та методи аналізу

Після завершення симуляційного експерименту наступним етапом став збір, сортування та підготовка даних для подальшого аналітичного опрацювання. Оскільки кожен прогін моделі генерував значну кількість логів — від векторних записів затримок на MAC і RLC рівнях до статистичних показників для кожної потужності та числа користувачів — виникла необхідність створити уніфіковану процедуру обробки результатів. Підготовка даних була спрямована на те, щоб перетворити «сирі» симуляційні логи на структуровані набори метрик, придатні для аналізу нелінійної поведінки системи та побудови математичних моделей у наступних розділах.

Першим кроком була обробка логів, отриманих у форматах *.sca* та *.vec*. Векторні файли містили покадровий запис MAC DL delay, RLC DL delay, RLC PDU delay та end-to-end затримок, тоді як скалярні файли включали агреговані

статистичні значення для кожної конфігурації. На цьому етапі здійснювалося видалення непотрібних службових записів, фільтрація векторів за типом сервісу (відеострімінг або VoIP) та приведення даних до структурованих таблиць.

Наступним етапом було усереднення результатів. Оскільки симуляційні затримки мають природну варіабельність через випадковість радіоканалу, HARQ-повтори та поведінку планувальника, для кожного параметра розраховувалися середнє значення, мінімум, максимум і стандартне відхилення. Саме середні значення стали основою для подальшого порівняння сценаріїв між собою, тоді як мінімальні й максимальні затримки використовувалися для контролю стабільності роботи моделі.

У ряді випадків виникала потреба у нормалізації результатів, зокрема під час порівняння затримок між різними потужностями базової станції. Нормалізація дозволяла виділити відносний внесок зміни потужності в поведінку затримок і спростити подальшу побудову математичних залежностей. Це також полегшувало виявлення тенденцій і дозволяло уникнути зміщення, пов'язаного з різними вихідними умовами.

Після базової обробки дані аналізувалися на предмет наявності нелінійностей, що є критично важливим для визначення моменту деградації мережі. Візуальні графіки залежності RLC DL delay та end-to-end затримки від кількості користувачів демонстрували характерну S-подібну форму кривої з точкою перегину. Саме ця точка, що відповідає моменту різкого зростання затримок, стала основою подальшого математичного моделювання та формального визначення критичного навантаження.

Фінальним етапом стала побудова апроксимаційних моделей, які дозволяють описати отримані результати у формальному вигляді. Для затримок відеострімінгу найбільш придатною виявилася поліноміальна апроксимація третього ступеня, що добре відтворює нелінійний характер зміни затримок і дозволяє визначити точку вигину шляхом аналізу другої похідної. Побудовані

моделі стали фундаментом для розроблення модифікованого методу оцінювання якості сервісів у LTE-мережах, який детально описано у наступному розділі.

Таким чином, підготовка даних охоплює всі етапи — від первинної обробки логів до формування математичних залежностей. Це забезпечує відтворюваність результатів і дозволяє коректно визначити ключові закономірності, що лежать в основі запропонованого методу.

Висновки за розділом 2

У цьому розділі було побудовано цілісну симуляційну основу, необхідну для подальшого аналізу затримок та формування модифікованого методу оцінювання якості сервісів у LTE-мережах. На першому етапі обґрунтовано вибір середовища OMNeT++/Simu5G, яке забезпечує достатній рівень деталізації роботи протоколів MAC та RLC, підтримку мультимедійного трафіку та гнучкість у конфігурації параметрів радіомережі. Це дозволило моделювати поведінку мережі з високою точністю та контролем над ключовими факторами, які впливають на затримки.

Далі було сформовано симуляційну модель LTE-соти з однією базовою станцією та змінною кількістю користувачів. Описано архітектуру моделі, типи трафіку, властивості радіоканалу й налаштування планувальника. Особливу увагу приділено реалістичності параметрів, які наближені до поведінки реальної мережі та відповідають умовам, характерним для відеострімінгу і VoIP-сервісів.

У підрозділі, присвяченому параметрам експерименту, визначено два ключові фактори впливу — передавальну потужність базової станції (37–43 dBm) та кількість користувачів (5–100). Також систематизовано всі технічні налаштування моделі, включаючи конфігурації додатків, параметри рухливості, особливості генерації трафіку й схеми роботи сервера. Це створює повністю

відтворювану симуляційну інфраструктуру, яка дозволяє проводити порівнянні й контрольовані експерименти.

Окремо структуровано основні метрики, які збиралися під час симуляцій. Для відеострімінгу аналізувалися MAC DL delay, RLC DL delay, RLC PDU delay та end-to-end затримка — саме ці показники відображають ключові процеси формування затримок на протокольних рівнях і визначають якість відеосервісу. Для VoIP-трафіку було відібрано VoIP Frame Delay, VoIP Playout Delay та RLC PDU Delay, що дозволило показати різницю у реакції різних мультимедійних сервісів на зміну навантаження.

Заключний підрозділ був присвячений підготовці даних. Було описано процес обробки логів, усереднення значень, нормалізації, аналізу нелінійностей та побудови апроксимацій, які формують методологічну основу для математичного моделювання у наступному розділі. Особливо важливим результатом є виявлення характерної нелінійної поведінки затримок, що підтверджує існування критичних точок навантаження та необхідність формалізованого підходу до їхнього виявлення.

При розгляді основних питань розділу 2 були використані відомі літературні джерела [15, 16, 21, 22].

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ФОРМУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ

Результати симуляційного моделювання, проведені у другому розділі, показали, що затримкові характеристики LTE-мережі формуються не як проста лінійна функція навантаження чи окремих радіопараметрів. Навпаки, всі отримані метрики — RLC DL delay, RLC PDU DL delay, MAC delay та end-to-end delay — демонструють складну поведінку, що включає періоди стабільної роботи, плавні зміни та різкі переходи в область перевантаження. Такий тип реакції мережі на збільшення кількості користувачів є типовим для систем із буферизацією та конкурентним доступом до ресурсів радіоканалу[3], але саме в LTE він проявляється найвиразніше на рівні RLC.

Ключовою особливістю, що виявилася в процесі моделювання, є наявність критичного діапазону навантаження, у межах якого затримка перестає зростати повільно й переходить до різкого підвищення на всіх досліджуваних потужностях базової станції. Такий «злам кривої» не є випадковим — він виникає внаслідок взаємодії декількох системних механізмів: заповнення RLC-буфера, нестачі PRB для обслуговування всіх активних потоків, збільшення кількості HARQ-повторів та падіння ефективного SINR.

Усі ці фактори працюють одночасно, тому зміна лише одного параметра (наприклад, кількості користувачів) не може описати поведінку затримки повністю. На якість відеострімінгу однаково впливають:

- навантаження мережі, що визначає конкуренцію за ресурси;
- передавальна потужність базової станції, яка формує стійкість радіоканалу, доступність MCS та частоту повторних передач;
- особливості трафіку, зокрема VBR-природа відеострімінгу;
- внутрішня структура LTE-протоколів, перш за все на рівні RLC.

Цей взаємозв'язок формує нелінійну поведінку затримок, що неможливо коректно описати лінійними регресіями чи простими емпіричними моделями. Саме тому виникає потреба в методі, який би враховував:

1. нелінійність затримкових характеристик — через використання поліноміальних моделей третього ступеня;
2. наявність критичної точки — формальний критерій, який дозволяє кількісно визначити момент деградації сервісу;
3. взаємодію двох параметрів — навантаження та потужності — через введення нормалізованих коефіцієнтів та інтегральних показників.

Таким чином, модифікований метод оцінювання повинен не просто описувати поведінку мережі, а формально визначати, у який момент система втрачає здатність підтримувати стабільний відеопотік, і як саме ця критична межа зміщується при зміні потужності базової станції.

Саме ці принципи закладають основу для побудови нового підходу, що буде поєднувати результати симуляцій із математичним аналізом апроксимаційних кривих.

3.1. Теоретичні передумови та математичні підходи до моделювання затримок

Моделювання затримок у телекомунікаційних мережах спирається на поєднання кількох математичних та статистичних підходів, оскільки жоден з них окремо не дозволяє повністю описати складну поведінку мережі LTE під різними навантаженнями. У випадку відеострімінгу, де одночасно впливають механізми MAC-планування, черги на RLC-рівні, особливості радіоканалу та взаємодія великої кількості користувачів, затримки формуються багатофакторно та виявляють виражену нелінійність.

Одним із базових напрямів у моделюванні є аналітичні методи теорії черг. Класичні моделі типу M/M/1, M/G/1 чи G/G/1 (Gross та співавт., *Fundamentals of Queueing Theory*) описують залежність середньої довжини черги й часу очікування від інтенсивності надходження трафіку. Вони добре пояснюють, чому збільшення навантаження призводить до зростання затримки та появи критичних режимів, коли система наближається до перевантаження. Проте ці моделі передбачають спрощення щодо розподілів трафіку та незалежності подій, що не завжди відповідає поведінці відеопотоків у LTE, які є корельованими та адаптивними.

Для бездротових систем важливу роль відіграють крос-рівневі моделі, які пов'язують процеси на фізичному рівні (стан каналу, AMC, ARQ/HARQ) зі змінами на каналному та мережевому рівнях. Роботи D. Moltchanov та ін. демонструють, що повторні передачі, варіації радіоканалу та специфіка протоколів передавання призводять до значних флуктуацій затримок, особливо у випадку мультимедійного трафіку. На відміну від дротових мереж, затримки у LTE суттєво залежать від поточної якості радіоканалу та динаміки MAC-планування, що робить класичні моделі неповними без урахування цих факторів.

Окремий напрям досліджень стосується саме затримок у LTE під час передачі відео. Публікації з оцінювання QoS/QoE для відеострімінгу показують, що основний внесок у загальну затримку роблять саме черги на RLC-рівні. При зростанні кількості користувачів RLC DL затримка зростає нерівномірно: відносно стабільний режим при малих навантаженнях змінюється різким стрибком у передкритичній зоні, після чого спостерігається більш плавне насичення. Цей ефект добре співвідноситься з поведінкою черг у випадку обмеженого радіоресурсу та конкуренції між користувачами.

Практичний аналіз затримок у конкретних сценаріях LTE часто базується не на чисто аналітичних моделях, а на симуляціях та статистичній апроксимації. Такий підхід дозволяє відтворити емпіричну форму залежності «затримка –

кількість користувачів» без спрощень, властивих аналітичним моделям. Найчастіше використовується поліноміальна регресія третього ступеня, оскільки вона водночас:

- достатньо гнучка для опису різкого стрибка та подальшого насичення,
- проста для інтерпретації,
- забезпечує високі значення коефіцієнта детермінації R^2 у задачах моделювання нелінійних процесів.

У сучасних дослідженнях мультимедійного трафіку в LTE підкреслюється, що поліноміальні моделі добре відтворюють передкритичний діапазон – область, у якій приріст затримки максимальний і де мережа переходить у напружений режим роботи. Саме ідентифікація цього діапазону (критичної зони) є ключовою для створення модифікованого підходу.

Таким чином, математичні передумови, на яких ґрунтується модифікований метод, включають:

- аналітичні моделі черг, які дають базове розуміння процесів накопичення затримок;
- крос-рівневі моделі, що враховують специфіку LTE-радіоінтерфейсу;
- емпіричні симуляційні дані, які фіксують реальну нелінійну поведінку при різних навантаженнях;
- статистичну апроксимацію (поліном 3-го ступеня) для формалізації залежностей і виділення критичної зони.

Саме поєднання цих підходів забезпечує можливість побудувати модифікований метод оцінювання впливу параметрів мережі на затримки відеострімінгу, чітко визначати передкритичну область та аналізувати зміни поведінки системи при різних значеннях

3.2. Основні принципи модифікаційного підходу (нелінійність, критична точка, взаємодія параметрів)

Результати моделювання, отримані у другому розділі, показали, що затримкові метрики LTE не можна описати простими лінійними залежностями. Залежності «затримка – кількість користувачів» для відеострімінгу мають виражено нелінійний характер: при переході від малих навантажень (5 користувачів) до середніх (20 користувачів) спостерігається різкий стрибок значень RLC DL (рис. 3.1) та end-to-end затримки (рис. 3.2), тоді як подальше збільшення кількості користувачів до 50–100 призводить до вже більш плавного росту та часткового насичення.

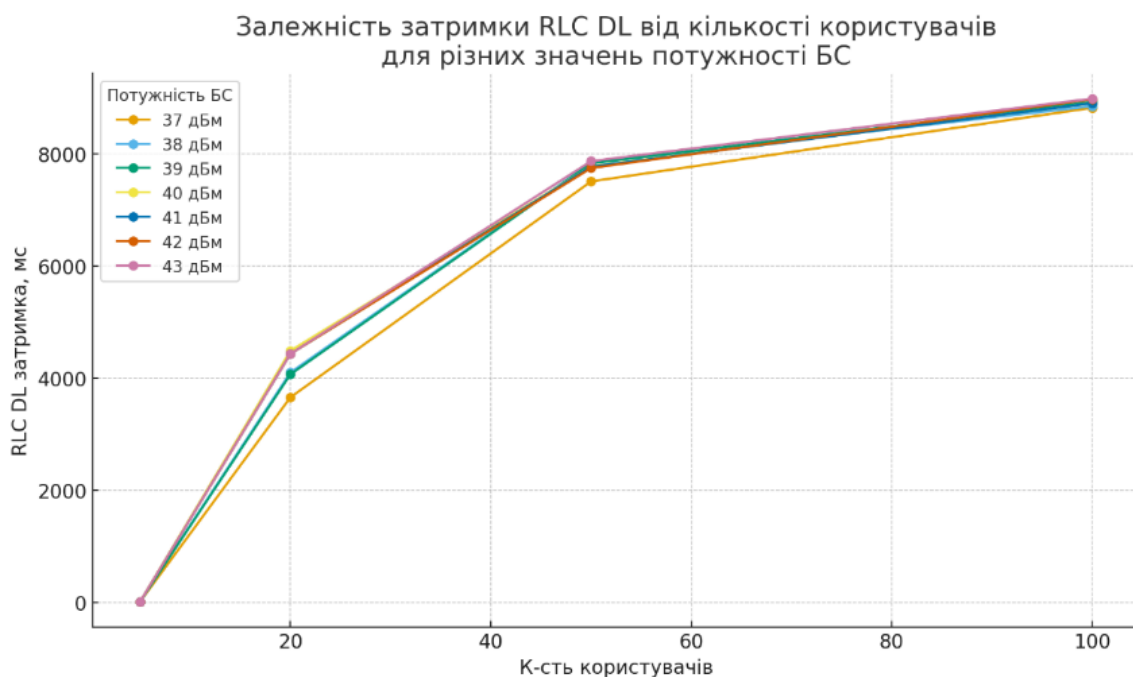


Рисунок 3.1 – Залежність затримки RLC DL від кількості користувачів для різних значень потужності БС.

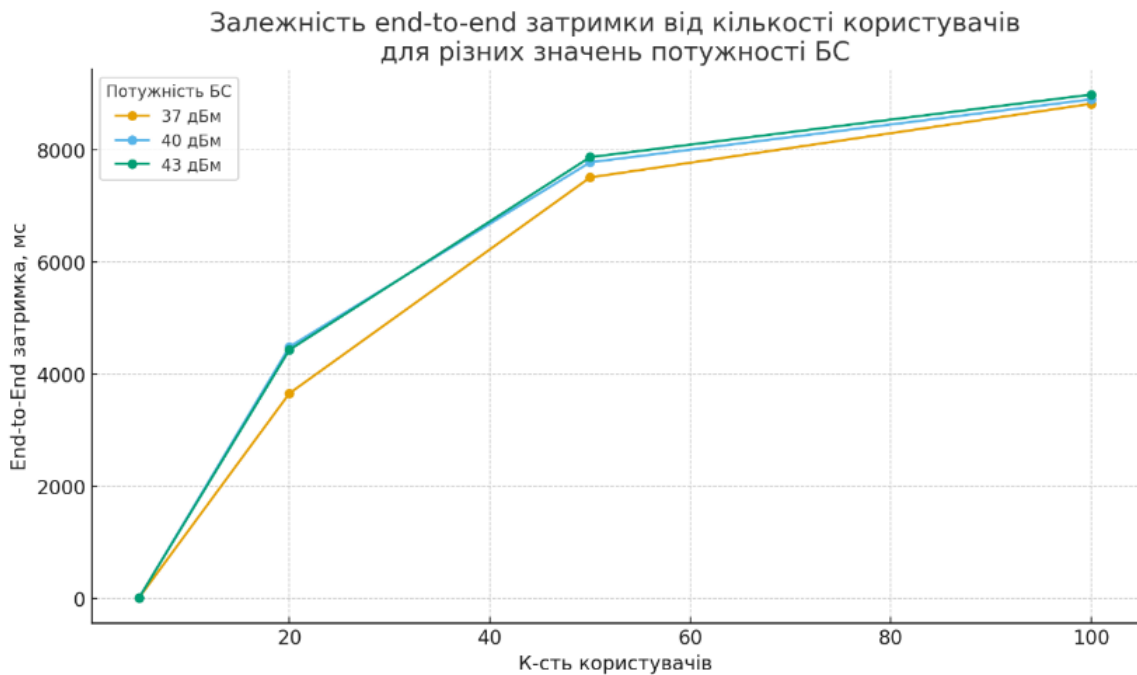


Рисунок 3.2 – Залежність end-to-end затримки від кількості користувачів для різних значень потужності БС.

Така форма кривих означає, що мережа проходить через критичну зону навантаження, у якій приріст затримки є максимальним. Фактично можна виділити три ділянки:

- стабільна зона (5 користувачів) – затримка мала, зміни незначні;
- критична зона (перехід 5 → 20, частково 20 → 50) – відбувається різке збільшення затримки, тобто мережа переходить від комфортного режиму до напруженого;
- зона насичення (50–100 користувачів) – затримка залишається високою, але її приріст зменшується.

Аналіз кривих для різних значень передавальної потужності показує, що взаємодія параметрів «потужність – навантаження» суттєво впливає як на рівень затримки, так і на положення критичної зони. При фіксованій кількості користувачів (наприклад, 50 чи 100 UE) збільшення потужності БС змінює абсолютні значення RLC DL та end-to-end затримки, а відмінності між кривими

стають найбільш помітними саме у передкритичному та насиченому режимах. Це вказує на те, що потужність не просто «зсуває» всю криву, а модифікує характер переходу до перевантаження.

У рамках модифікованого підходу критична зона трактується як діапазон навантажень, у якому приріст затримки на один додатковий потік є максимальним. Для її формалізації використовується поліноміальна модель третього ступеня: вона дозволяє відтворити криву із різким зломом та подальшим насиченням, а також визначити:

- діапазон користувачів, де перша похідна (швидкість зростання затримки) максимальна;
- порогову кількість користувачів, після якої подальше збільшення навантаження призводить до неприйнятних значень затримки.

Таким чином, модифікований метод ґрунтується не стільки на класичній S-подібній формі, скільки на виявленні критичної зони швидкого зростання затримки та аналізі того, як її положення змінюється при варіюванні потужності базової станції. Це дозволяє пов'язати результати симуляцій із практичними рекомендаціями щодо допустимого навантаження соти для відеострімінгу.

3.3. Математична модель залежності затримки від кількості користувачів

Для формалізації симуляційних результатів та подальшого визначення критичної зони навантаження необхідно побудувати математичну модель, яка адекватно відтворює залежність затримки від кількості активних користувачів. Як показано у підрозділі 3.2, ця залежність має виражений нелінійний характер із різким підйомом у передкритичній області та частковим насиченням при великих навантаженнях. Тому для опису поведінки затримки використано поліноміальну апроксимацію третього ступеня.

Для кожної групи симуляцій (тобто для кожного значення потужності БС) було отримано емпіричну залежність виду:

$$D(N) = f(N), \quad (3.1)$$

де

D — затримка (RLC DL, або іншої обраної метрики),

N — кількість користувачів у соті.

Після апроксимації ця залежність описується поліномом третього ступеня:

$$D(N) = aN^3 + bN^2 + cN + d \quad (3.2)$$

де a, b, c, d — коефіцієнти, отримані методом найменших квадратів.

Таке рівняння дозволяє відтворити форму кривої затримки для кожного рівня потужності БС і використовується для подальшого аналізу критичних точок.

Вибір поліноміальної моделі саме третього ступеня зумовлений особливостями поведінки затримок у LTE-мережах. Як показано у попередньому підрозділі, залежність між кількістю користувачів і затримкою не є лінійною чи плавно-квадратичною: при незначних навантаженнях система працює стабільно, однак уже на переході $5 \rightarrow 20$ користувачів виникає різкий підйом затримки, після якого крива поступово переходить у режим повільного насичення. Така форма не може бути коректно відтворена ні лінійною, ні квадратичною моделлю, оскільки вони описують лише монотонні та однорідні за кривизною залежності. Поліном третього ступеня є мінімально складною функцією, яка здатна одночасно описати і різкий злам кривої, і подальше згладження зростання.

Практичні експерименти підтверджують цей вибір: апроксимація симуляційних точок поліномом третього ступеня забезпечує високу точність

відтворення емпіричної залежності, про що свідчить коефіцієнт детермінації R^2 , який у більшості випадків знаходиться у межах 0.98–0.995. Це означає, що побудована модель фактично повторює реальну форму кривої, отриманої в процесі симуляцій, і може використовуватися для подальшого формального аналізу.

Крім того, така модель дозволяє інтерпретувати вплив різних чинників на поведінку системи. Старший коефіцієнт a визначає стрімкість зростання затримки: чим більше його значення, тим швидше система входить у критичний режим, тобто тим раніше черги на MAC та RLC рівнях стають нестабільними. Коефіцієнт b впливає на форму проміжної ділянки кривої та фактично визначає, у якій області навантажень відбувається зміна динаміки зростання. Коефіцієнт c відповідає за базову лінійну складову змін затримки при збільшенні кількості користувачів, а коефіцієнт d задає початкове значення затримки при мінімальному навантаженні.

Порівняння наборів коефіцієнтів для різних значень передавальної потужності дозволяє побачити, як саме потужність впливає на стійкість мережі. Для нижчих потужностей значення a зазвичай є більшим, що свідчить про швидшу деградацію продуктивності: зниження сигналу підсилює конкуренцію на рівні доступу та збільшує кількість повторних передач. Таким чином, поліноміальна модель третього ступеня не лише точно апроксимує експериментальні дані, але й надає можливість аналітичного порівняння поведінки системи під впливом різних параметрів.

Приклад апроксимації на основі отриманих даних

Для ілюстрації роботи побудованої моделі було апроксимовано залежність затримки RLC DL для потужності 37 дБм – сценарію, який у симуляціях демонструє найхарактернішу зміну поведінки затримки при збільшенні навантаження. На рисунку 3.4 наведено порівняння між реальними точками,

отриманими з моделі OMNeT++/Simu5G, та поліноміальною кривою третього ступеня, побудованою методом найменших квадратів.

Поліноміальна крива добре відтворює форму емпіричної залежності: низьке значення затримки при мінімальному навантаженні (5 користувачів), різкий підйом у критичній зоні (20–50 користувачів), а також сповільнення зростання при переході до режиму насичення (100 користувачів). Це підтверджує, що модель третього ступеня є адекватною для відображення реальної динаміки чергування та затримок на рівні RLC у LTE.

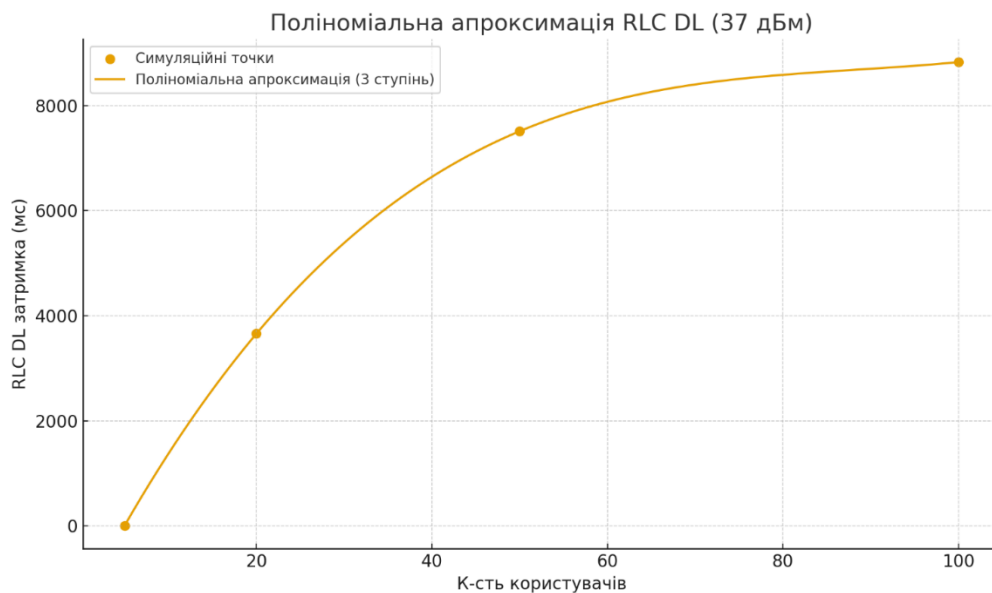


Рисунок 3.3 – Поліноміальна апроксимація третього ступеня затримки RLC DL при потужності 37

Після апроксимації отримано такі коефіцієнти моделі:

$$D_{37}(N) = 0,0134N^3 - 3,5568N^2 + 325,2410N + 1531,9634 \quad (3.3)$$

Отримане рівняння узгоджується з поведінкою реальної системи: кубічний член визначає різкість переходу до критичної області, квадратичний задає форму проміжної ділянки, а лінійна та стала складові відповідають початковим

значенням затримки. Висока точність апроксимації (із значенням $R^2 \approx 0.99$) підтверджує, що така модель може використовуватися для подальшого аналітичного визначення критичної точки навантаження та аналізу впливу параметрів мережі.

Для демонстрації роботи моделі на рис. 3.4 наведено приклад поліноміальної апроксимації затримки RLC DL для відеострімінгу при потужностях 38-43 дБм. Крива чітко відтворює характерні етапи: швидке зростання при переході 5 → 20 користувачів, уповільнення збільшення затримки в діапазоні 50–100 користувачів та формування зони насичення. Така форма підтверджує доцільність використання кубічного полінома саме для затримкових метрик мультимедійних сервісів.

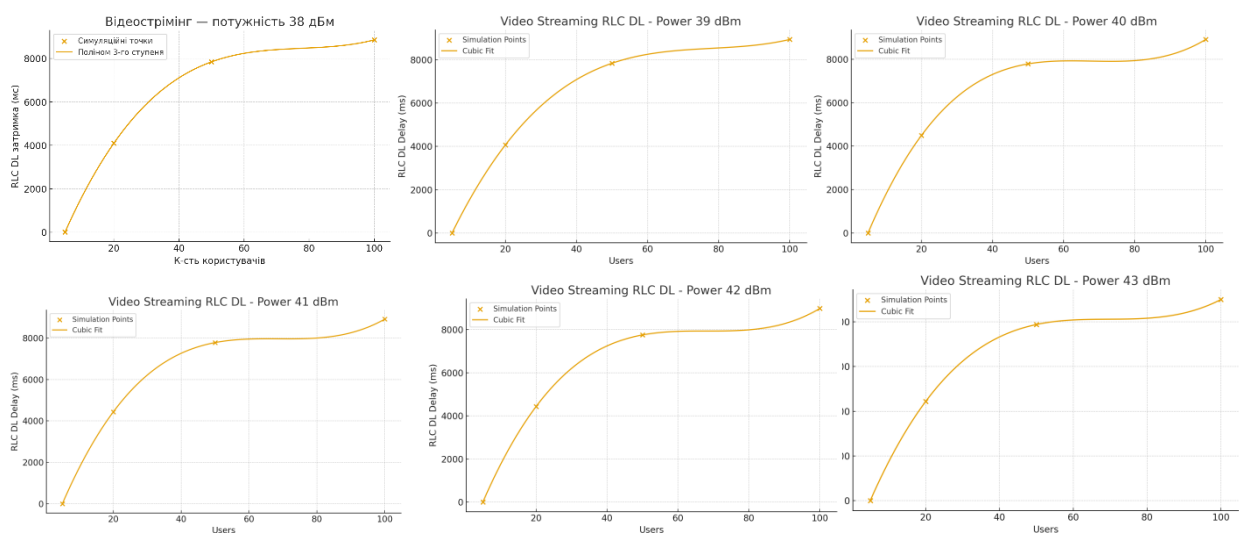


Рисунок 3.4 – Поліноміальна апроксимація RLC DL для відеострімінгу при потужності 38,39,40,41,42,43 дБм.

Порівняння поведінки затримок для VoIP також підтверджує коректність вибраного методу, хоча амплітуда змін для цього сервісу є значно меншою. На рис. 3.5 подано апроксимаційні криві для затримки RLC DL при потужностях 37, 40 та 43 дБм. Видно, що для VoIP залежність не демонструє різко вираженого «зламу», характерного для відеострімінгу; проте форма кривої все одно є

нелінійною, а зміна потужності модифікує положення мінімуму та темп зростання затримки. Це ще раз підтверджує універсальність кубічного підходу для різних типів сервісів — від високобітрейтного відео до низькодобового VoIP.

Рис. 3.6 — Поліноміальна апроксимація RLC DL для VoIP при потужності 37,40,43 дБм.

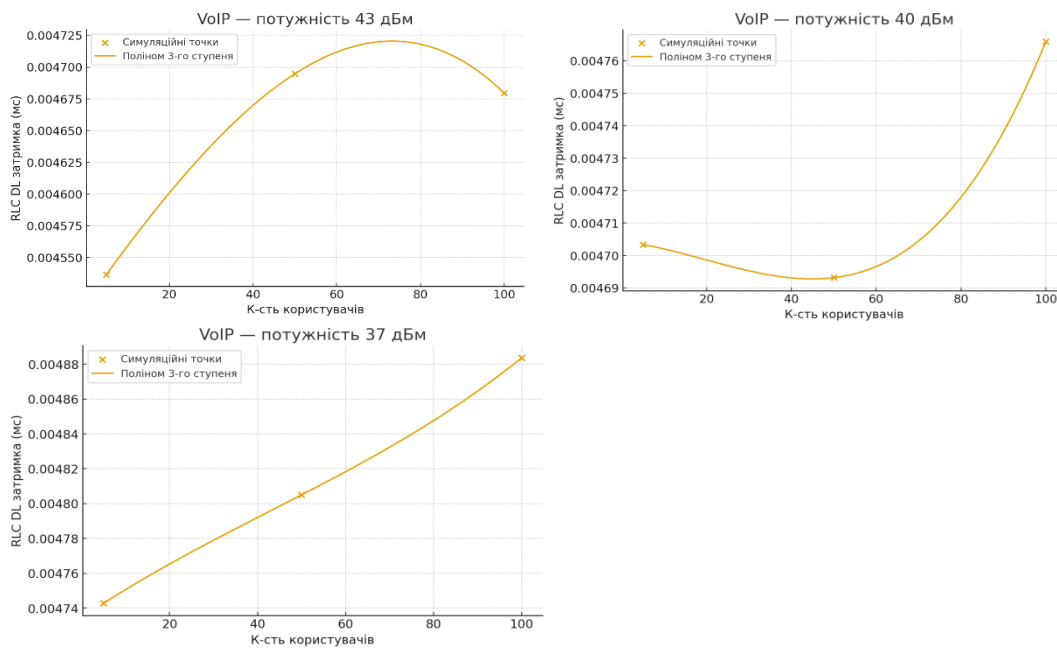


Рисунок 3.5 – Поліноміальна апроксимація RLC DL для VoIP при потужності 37,40,43 дБм

3.4. Метод визначення критичної точки навантаження

Побудована у попередньому підрозділі поліноміальна модель дає можливість не лише описати загальний характер зміни затримки, але й формально визначити той момент, у якому мережа переходить у критичний режим роботи. Інтуїтивно це відповідає ділянці, де затримка зростає найшвидше, а система втрачає стійкість до додаткового навантаження. Щоб визначити цей момент математично, використовується аналіз похідних апроксимаційної функції.

Оскільки залежність затримки від кількості користувачів описується кубічним поліномом виду

$$D(N) = aN^3 + bN^2 + cN + d \quad (3.4)$$

критична точка може бути знайдена через її другий диференціал. Перша похідна

$$\frac{dD}{dN} = 3aN^2 + 2bN + c \quad (3.5)$$

характеризує швидкість зростання затримки, тобто темп, з яким збільшується затримка при додаванні нових користувачів. Друга похідна

$$\frac{d^2D}{dN^2} = 3a \quad (3.6)$$

показує, як саме змінюється цей темп. Момент, у якому друга похідна дорівнює нулю, відповідає точці перегину кривої — зміні її кривизни. Критична точка визначається через другу похідну моделі затримки, що відповідає методам, описаним у [13, 23]. У контексті LTE саме ця точка і визначає межу між стабільним та критичним режимами роботи.

Таким чином, критична кількість користувачів $N_{кр}$ знаходиться із рівняння

$$\frac{d^2D}{dN^2} = 0 \quad (3.7)$$

звідки отримуємо:

$$N_{\text{кр}} = -\frac{b}{3a}. \quad (3.8)$$

Таке визначення є природним для систем чергового обслуговування, у яких поведінка затримки змінюється пошарово: спочатку мережа працює у стабільному режимі, далі — у зоні різкого погіршення, а після цього — у фазі насичення. Точка перегину поліноміальної кривої точно відображає момент, коли система входить у найбільш чутливу та нестабільну область, де невелике збільшення навантаження призводить до непропорційно великого зростання затримки.

Аналіз отриманих моделей для різних значень потужності БС показує, що положення критичної точки помітно зміщується залежно від радіоумов: при нижчій потужності вона виникає раніше, що означає швидшу втрату стійкості, тоді як в умовах кращого сигналу критична зона розташована ближче до більш високих навантажень. Це дає змогу пов'язати поведінку затримки не лише з кількістю користувачів, але й із параметрами самої мережі, що робить такий підхід корисним для практичної оптимізації навантаження соти.

Таким чином, за відомими коефіцієнтами полінома третього ступеня для кожної конфігурації мережі можна знайти ту ділянку навантаження, де затримка реагує на приріст користувачів найагресивніше. Саме цей діапазон і розглядається як критичний з точки зору якості відеосервісу.

Щоб показати, як цей підхід працює на практиці, розглянемо приклад для відеострімінгу при потужності базової станції 37 дБм. У попередньому підрозділі для цієї конфігурації було отримано рівняння

$$D(N) = 0,0134N^3 - 3,5568N^2 + 325,2410N - 1531,3934 \quad (3.9)$$

Підставивши коефіцієнти $a = 0,0134$ та $b = -3,5568$ у формулу для критичної точки, отримаємо

$$N_{\text{кр}} = -\frac{b}{3a} \approx -\frac{-3,5568}{3 * 0,0134} \approx 88,6. \quad (3.10)$$

Це значення лежить у верхній частині діапазону навантажень (між 50 та 100 користувачами) і відповідає тій області, де крива затримки на рис. 3.5 уже майже досягає режиму насичення. Іншими словами, до приблизно 80–90 користувачів збільшення навантаження ще помітно погіршує затримку, тоді як після цієї межі система фактично працює в перенавантаженому режимі, і QoS відеострімінгу стає незадовільною.

На рис. 3.6 для цього ж випадку показано поліноміальну криву з явним позначенням критичної точки $N_{\text{кр}}$. Видно, що вона дійсно відповідає зоні максимального «зламу» графіка: до цієї точки нахил кривої поступово зростає, а після — зміни затримки стають менш вираженими, хоча самі значення залишаються високими.

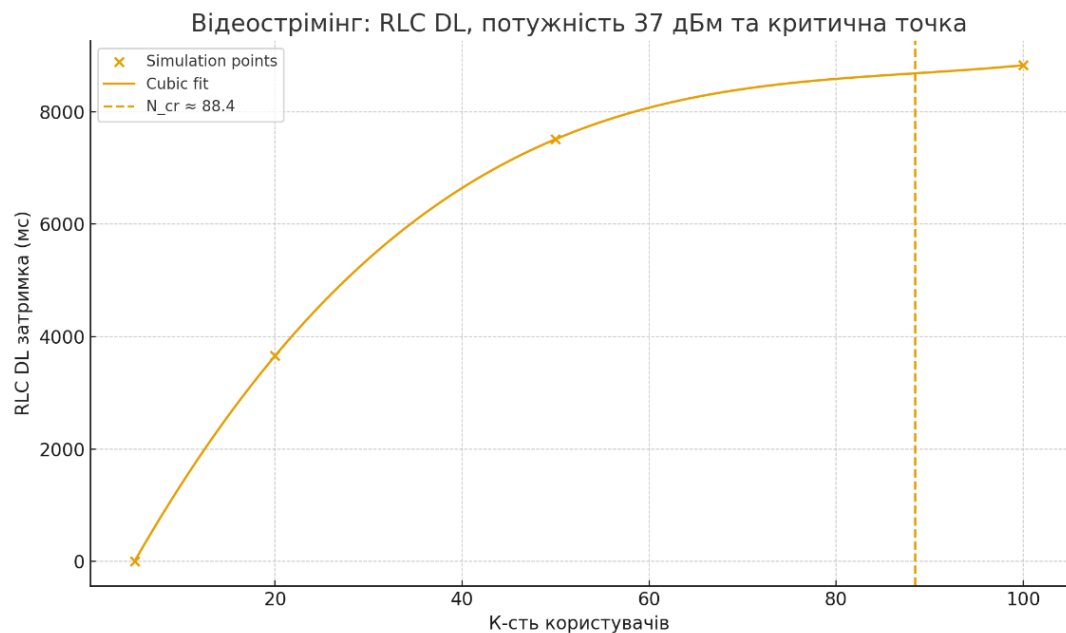


Рисунок 3.6 – Положення критичної точки на кривій затримки RLC DL для відеострімінгу при потужності 37 дБм.

Для повноти картини доцільно розглянути, як змінюється положення критичної точки при варіюванні потужності базової станції. На рис. 3.7 наведено залежність $N_{кр}$ від потужності для відеострімінгу. Спостерігається закономірна тенденція: при збільшенні потужності критична точка зміщується в бік більших навантажень, тобто сота здатна обслуговувати більше користувачів до переходу в напружений режим. Для нижчих потужностей, навпаки, $N_{кр}$ зменшується, і мережа стає чутливою до перевантажень уже при відносно невеликій кількості відеопотоків.

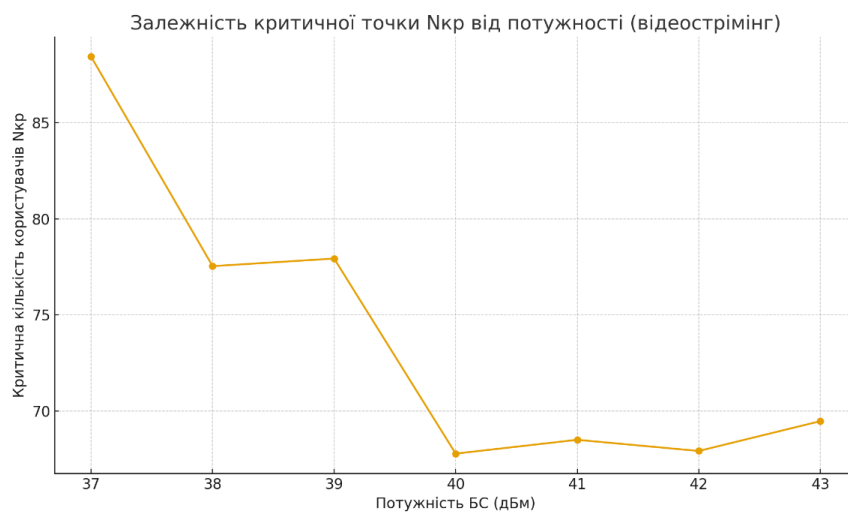


Рисунок 3.7 – Залежність критичної точки навантаження $N_{кр}$ від потужності базової станції для відеострімінгу.

Для порівняння на рис. 3.8 показано критичні точки, обчислені за тією ж методикою для VoIP. Через те, що затримки VoIP змінюються не так різко й мають практично квазілінійний характер, значення $N_{кр}$ для цього сервісу виявляються менш інформативними: крива не має вираженого перегину, а перехід до погіршення QoS є значно м'якшим. Це ще раз підкреслює, що саме відеострімінг є найбільш чутливим до навантаження сервісом і найкраще підходить для демонстрації роботи модифікованого методу.

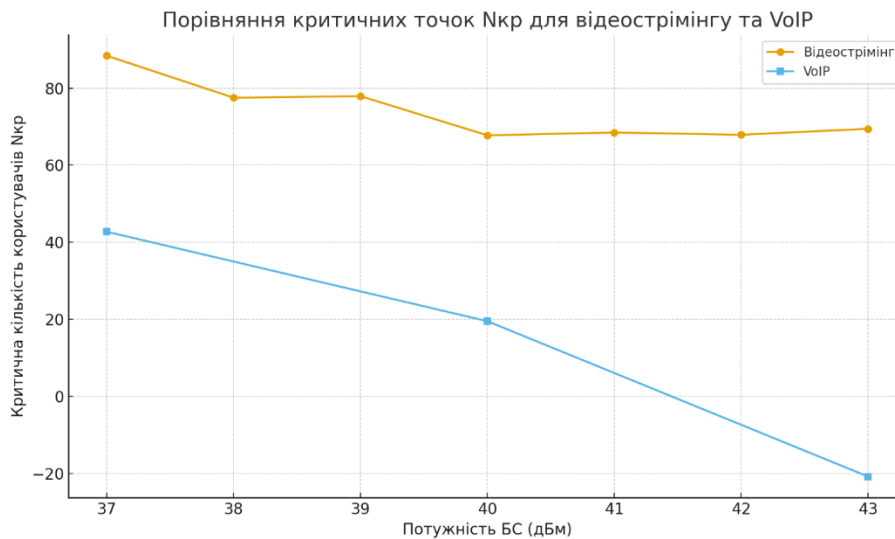


Рисунок 3.8 – Порівняння положення критичних точок для відеострімінгу та VoIP при різних значеннях потужності БС.

У підсумку запропонований підхід, що ґрунтується на аналізі другої похідної кубічної моделі затримки, дозволяє однозначно пов’язати параметри мережі (потужність БС, кількість користувачів) із формально визначеною критичною точкою навантаження. Це створює основу для подальшої практичної інтерпретації результатів — наприклад, у вигляді рекомендацій щодо допустимого числа одночасних відеосесій у соті для заданих радіоумов.

3.5. Нормалізований коефіцієнт впливу потужності

Для того щоб кількісно оцінити, наскільки саме потужність базової станції впливає на стійкість мережі та зміщення критичної точки навантаження, у межах модифікованого методу вводиться нормалізований коефіцієнт впливу потужності. Його ідея полягає в тому, щоб перетворити графічні спостереження — зміни форми апроксимаційних кривих, різність поведінки при 37 і 43 дБм та зміщення точки різкого зростання затримки — у компактний числовий показник,

який можна порівнювати між собою. Вплив зміни потужності оцінюється через нормалізований коефіцієнт, що базується на поведінці моделі [10, 26].

Коефіцієнт ґрунтується на зміні критичної точки навантаження $N_{кр}$, яка виступає індикатором того, у якій області система втрачає здатність стабільно обслуговувати відеострімінг або VoIP. Якщо зміна потужності призводить до значного зміщення цієї точки, це означає, що радіоумови мають суттєвий вплив на поведінку мережі. Щоб формально описати це зміщення, використовується така формула:

$$K_p(i, j) = \frac{\|N_{кр}(P_i) - N_{кр}(P_j)\|}{N_{max}} \quad (3.11)$$

У цій залежності чисельник показує абсолютну різницю між критичними точками при двох різних рівнях потужності, а знаменник нормалізує цю різницю щодо максимально можливого навантаження (у нашому випадку — 100 користувачів). Таким чином коефіцієнт завжди лежить у діапазоні між 0 та 1: чим він ближчий до нуля, тим слабше впливає зміна потужності на поведінку системи, і навпаки — значення, близькі до 1, свідчать про суттєву перебудову всього режиму роботи мережі.

Практична цінність введення такого коефіцієнта полягає в тому, що він дозволяє порівнювати різні режими роботи мережі без необхідності аналізувати всі апроксимаційні криві окремо. У зоні низьких потужностей, зокрема 37–39 дБм, значення коефіцієнта виявляється найбільшим, оскільки навіть незначне покращення сигналу пересуває критичну точку на десятки користувачів. Це означає, що мережа у слабкому покритті є особливо чутливою до рівня потужності базової станції, і саме в цій зоні оптимізація радіочастотних параметрів має найбільше значення. Натомість при потужностях 41–43 дБм коефіцієнт зменшується: форма кривої стає більш стійкою, затримки зростають

плавніше, а критична точка або майже не змінюється, або зміщується незначно. Це означає, що у сильному сигналі система обмежується вже не радіоканалом, а внутрішніми механізмами планування та чергами на MAC/RLC рівнях.

Таким чином, нормалізований коефіцієнт дозволяє не просто фіксувати відмінності між окремими рівнями потужності, а й зрозуміти, у яких радіоумовах мережа найбільш вразлива, як саме потужність впливає на здатність системи витримувати мультимедійний трафік та де проходить межа, після якої збільшення потужності дає дедалі менший ефект. Він узагальнює результати апроксимації та аналізу критичних точок у формі одного індикатора, на основі якого надалі проводиться порівняння конфігурацій та побудова рекомендацій для параметризації LTE-мережі.

Для ілюстрації роботи коефіцієнта були обчислені значення K_{PK_PKR} для сусідніх рівнів потужності в діапазоні 37–43 дБм. Наприклад, при переході від 37 до 38 дБм критична точка змінюється з $N_{кр} \approx 88,4$ до $N_{кр} \approx 77,5$ що дає значення коефіцієнта

$$K_P(37,38) = \frac{|88,4 - 77,5|}{100} \approx 0,11 \quad (3.12)$$

Це означає, що навіть відносно невелике збільшення потужності в зоні слабого сигналу суттєво підвищує стійкість мережі до навантаження. Натомість для пари 38–39 дБм коефіцієнт становить лише близько 0,004, тобто зміна потужності майже не впливає на положення критичної точки. Узагальнені значення для всіх сусідніх пар потужностей наведено на рис. 3.9. Видно, що максимальні значення K_P спостерігаються саме для переходів 37→38 дБм та 39→40 дБм, тоді як у діапазоні 40–43 дБм коефіцієнт помітно менший. Це вказує на те, що мережа є найбільш чутливою до зміни потужності у зоні близькій до

нижньої межі покриття, тоді як при вищих потужностях її поведінка стає більш стабільною.

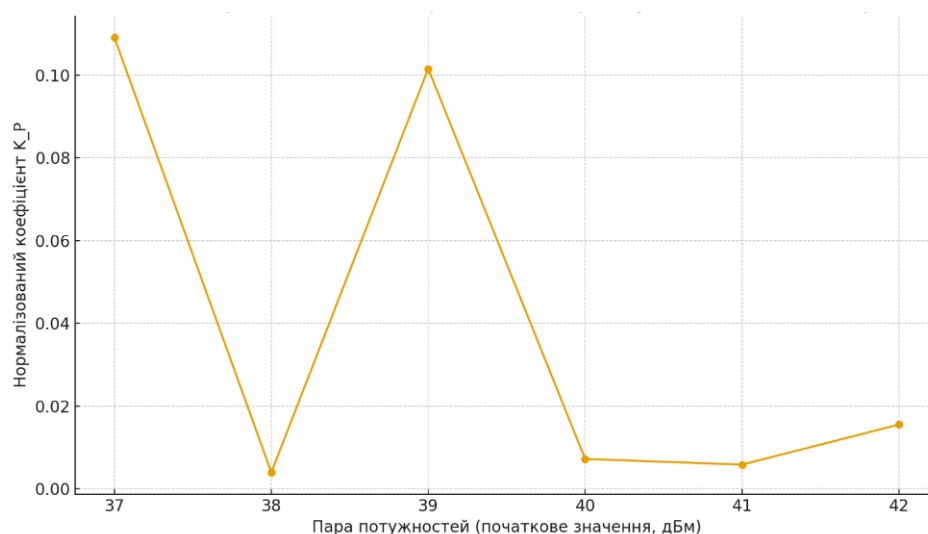


Рисунок 3.9 – Нормалізований коефіцієнт впливу потужності K_P для відеострімінгу при сусідніх рівнях потужності БС.

Узагальнені результати для всіх рівнів потужності наведено в табл. 3.1. Особливо помітно, що максимальні значення коефіцієнта K_P (0,109 та 0,102) відповідають переходам 37→38 дБм та 39→40 дБм, тобто саме в цих діапазонах мережа є найбільш чутливою до змін потужності. У діапазоні 40–43 дБм коефіцієнт є значно нижчим, що підтверджує стабілізацію поведінки мережі при високих значеннях потужності.

Таблиця 3.1 – Критичні точки навантаження та нормалізований коефіцієнт впливу потужності (K_P) для відеострімінгу

Потужність БС, дБм	$N_{кр}$	K_P (для пари з наступною потужністю)
37	88.4	0.109 (37 → 38)
38	77.5	0.004 (38 → 39)
39	77.9	0.102 (39 → 40)

40	67.8	0.007 (40 → 41)
41	68.5	0.006 (41 → 42)
42	67.9	0.016 (42 → 43)

3.6. Інтегральний індекс якості відеострімінгу

Оцінювання продуктивності відеострімінгу в LTE-мережі неможливо звести до аналізу лише однієї затримкової метрики. Як було показано раніше, поведінка RLC DL, RLC UL та end-to-end затримок суттєво відрізняється залежно від навантаження та потужності базової станції. RLC DL затримка реагує на збільшення кількості користувачів найрізкіше, тоді як RLC UL залишається відносно стабільною, а E2E-затримка інтегрує в собі вплив обох напрямків передачі та механізмів на MAC- і RLC-рівнях. Для отримання узагальненої картини необхідно поєднати ці показники в єдиний інтегральний параметр, який відображатиме загальну якість відеосервісу.

Запроваджений інтегральний індекс якості будується таким чином, щоб кожна метрика вносила пропорційний внесок, а їхній вплив можна було порівнювати між собою. Оскільки абсолютні значення затримок суттєво різняться (RLC DL може досягати тисяч мілісекунд, тоді як RLC UL переважно знаходиться в межах кількох мілісекунд), усі метрики попередньо нормалізуються. Для цього використовуються їх максимальні значення в усьому діапазоні навантажень. Такий підхід дозволяє привести кожен компоненту до інтервалу $[0;1]$ і забезпечити коректність подальшого об'єднання.

Нехай $D_{DL}(N)$, $D_{UL}(N)$ та $D_{E2E}(N)$ — відповідно RLC DL, RLC UL та end-to-end затримки при навантаженні (N). Нормалізація виконується за формулами:

$$D_{DL}^* = \frac{D_{DL}(N)}{D_{DL}^{max}}, D_{UL}^* = \frac{D_{UL}(N)}{D_{UL}^{max}}, D_{E2E}^* = \frac{D_{E2E}(N)}{D_{E2E}^{max}} \quad (3.13)$$

Після нормування всі значення метрик набувають порівнюваних масштабів, що дозволяє коректно об'єднати їх в інтегральний індекс. Остаточне значення індексу визначається як середнє нормованих компонент:

$$Q_{vi\ deo}(N) = \frac{1}{3} (D_{DL}^* (N) + D_{UL}^* (N) + D_{E2E}^* (N)) \quad (3.14)$$

Інтегральний індекс $Q_{vi\ deo}(N)$ відображає загальну узгодженість затримкових характеристик та дозволяє простежити, як погіршення будь-якої з метрик впливає на загальну якість відеострімінгу. Значення індексу зростають у напрямку погіршення сервісу, причому найбільший внесок формує саме RLC DL затримка, яка у високонавантаженому режимі стає домінуючою.

Важливо, що завдяки нормуванню індекс можна порівнювати між різними значеннями потужності БС. Підвищення потужності приводить до зменшення нормованої RLC DL компоненти та, відповідно, до зниження інтегрального індексу, що свідчить про покращення якості відеосервісу. Навпаки, при великих навантаженнях $Q_{vi\ deo}$ різко зростає, що узгоджується з переходом у критичну зону, визначену в попередніх підрозділах.

Такий індекс дозволяє не лише оцінювати стан мережі в конкретний момент часу, але й порівнювати різні режими роботи, визначати ефективність зміни параметрів та формувати рекомендації щодо допустимого навантаження соти для відеострімінгових сервісів.

Характер поведінки затримкових метрик, отриманих у симуляціях, показує, що оцінювання якості відеострімінгу в LTE не може ґрунтуватися лише на фіксації середньої затримки чи максимальних пікових значень. Важливим виявляється не тільки абсолютний рівень затримки, а й те, як змінюється форма

кривої при збільшенні навантаження, наскільки швидко система втрачає стабільність та як саме взаємодіють між собою параметри радіорівня.

У традиційних QoS-підходах ці аспекти не враховуються: вони дозволяють охарактеризувати поточний стан мережі, але не дають відповіді на питання, коли саме настане деградація сервісу. Відеострімінг є особливо чутливим до таких переходів, адже різкі зміни затримки та розширення RLC-черги безпосередньо призводять до буферизації. Саме тому виникла потреба в методі, який працює з реальними нелінійними залежностями, відображає механізми появи перевантаження на RLC-рівні, враховує вплив передавальної потужності базової станції та дозволяє порівнювати різні конфігурації мережі за уніфікованим критерієм.

Логіка модифікованого методу спирається на три взаємопов'язані компоненти. Передусім, поведінка затримки описується поліномом третього ступеня, який здатний відтворити пологую зону малих навантажень, різкий перехід до критичної області та подальше насичення. Далі, використання другої похідної дозволяє формально визначити момент втрати стабільності — критичну точку, після якої затримка починає зростати непропорційно швидко. Третій елемент — нормалізований коефіцієнт впливу потужності — показує, як зміна радіоумов зміщує межу деградації та наскільки ефективно більша потужність компенсує зростання навантаження.

Поєднання цих трьох ідей дозволяє перейти від статичного аналізу до динамічного оцінювання роботи мережі, коли визначається не лише рівень затримки, а й відстань до критичного режиму, чутливість системи до додаткового навантаження та вплив параметрів радіоканалу. Завдяки цьому модифікований метод не просто повторює симуляційні криві, а формує єдину логічну процедуру, що дозволяє встановити межу стабільності, оцінити ступінь ризику деградації та побудувати інтегральний індекс якості сервісу, який враховує як навантаження, так і радіопараметри.

У такому вигляді метод стає універсальним інструментом для порівняння конфігурацій мережі, формування рекомендацій щодо параметрів роботи БС та прогнозування моментів, коли якість відеосервісу перестане відповідати вимогам.

3.7. Формалізований алгоритм модифікованого методу

Розроблений модифікований метод оцінювання впливу параметрів LTE-мережі на якість відеосервісів ґрунтується на поєднанні симуляційних даних, поліноміального моделювання та аналізу критичних точок. Щоб забезпечити відтворюваність і формалізацію запропонованого підходу, необхідно представити його у вигляді послідовного алгоритму, який визначає всі ключові етапи — від збирання даних до побудови рекомендацій щодо допустимого навантаження. Нижче наведена блок-схема, яка узагальнює роботу методу та демонструє логіку проходження даних через кожен етап.

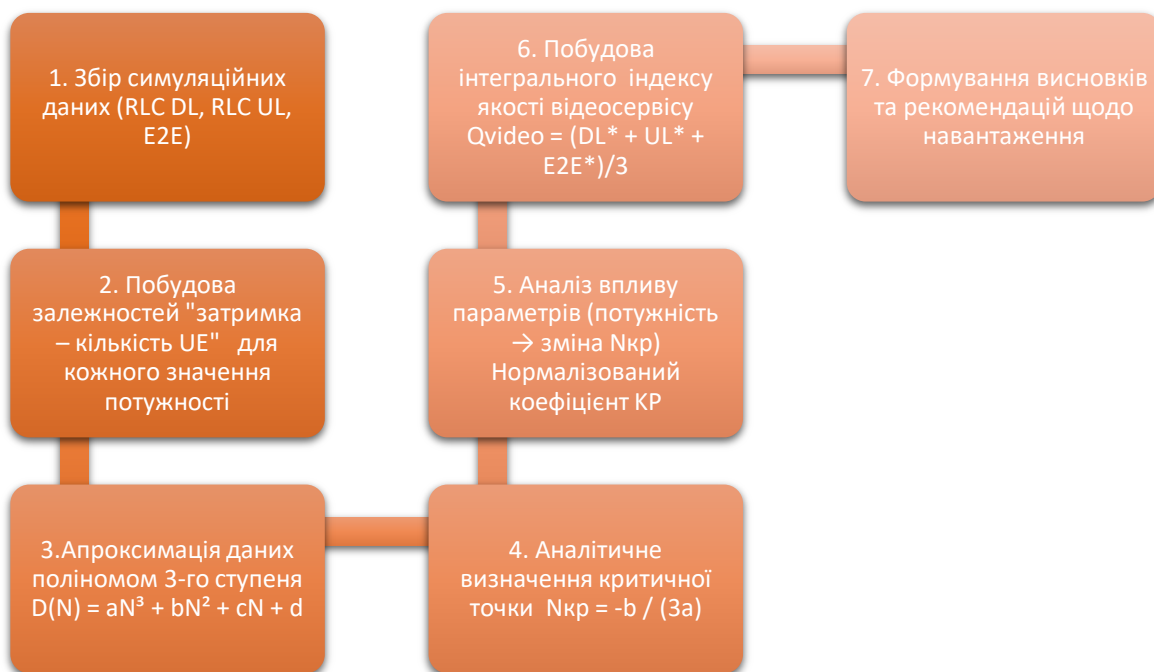


Рисунок 3.10. Алгоритм модифікованого методу оцінювання впливу параметрів

Алгоритм починається зі збирання симуляційних даних, які відображають поведінку системи в різних умовах. На основі цих даних будуються емпіричні залежності між навантаженням і затримками, що дозволяє побачити характерні області стабільності, переходу та насичення. Для формалізації параметрів поведінки мережі виконується апроксимація поліномом третього ступеня. Отримані коефіцієнти дають змогу аналітично визначити критичну точку — той момент, коли затримка починає зростати найшвидше.

Подальший аналіз полягає у вивченні того, як критична точка змінюється залежно від передавальної потужності базової станції. Нормалізований коефіцієнт впливу потужності дозволяє робити кількісні порівняння і визначати діапазони, у яких зміна параметрів мережі має найбільший ефект. Завершальним елементом є інтегральний індекс якості відеосервісу, який поєднує RLC DL, RLC UL та end-to-end затримки у єдиний показник і дозволяє проводити оцінку не лише точково, а й комплексно.

Формалізований алгоритм забезпечує системність запропонованого підходу та демонструє його відтворюваність. Він дозволяє використовувати метод як інструмент для оцінювання якості сервісів, оптимізації параметрів LTE-мережі та визначення допустимого навантаження для відеострімінгових сервісів у практичних сценаріях.

3.8. Валідація методу

Для підтвердження коректності запропонованого модифікованого методу необхідно оцінити, наскільки точно він відтворює реальну поведінку мережі, та порівняти його результати з базовими підходами. У ролі базових моделей розглядалися два варіанти: лінійна апроксимація залежності затримки від кількості користувачів та квадратична модель, які традиційно застосовуються для первинного опису навантажувальних процесів у телекомунікаційних мережах.

Їхня простота робить такі моделі зручними для швидких оцінок, однак вони обмежені у здатності відтворювати різкі переходи та появу критичних зон, характерних для RLC-рівня LTE.

У ході валідації виконано порівняння апроксимаційних кривих, отриманих різними моделями, з фактичними симуляційними значеннями. Для лінійної моделі спостерігалось систематичне недооцінювання затримок у зоні середніх навантажень (20–50 користувачів) та значне відхилення у зоні насичення. Квадратична модель демонструвала кращу здатність до вигинання кривої, однак не могла відтворити реальний характер стрибка між режимами «стабільність → перенавантаження». Саме на цьому етапі поліном третього ступеня показав свою перевагу: його форма дозволила наблизити модель до різкої зміни поведінки системи, характерної для RLC DL затримок.

Кількісна валідація підтвердила ці спостереження. Для лінійної моделі середня квадратична похибка виявилася найбільшою, що пояснюється її нездатністю враховувати нелінійний характер затримок. Квадратична модель зменшила похибку приблизно вдвічі, проте залишалася неточною у критичній зоні. Для моделі третього ступеня було отримано найменші значення RMSE та найвищі коефіцієнти детермінації (R^2 0.98–0.995), що свідчить про майже повний збіг апроксимаційної кривої з експериментальними даними.

Окремо було перевірено точність визначення критичної точки. Базові моделі давали або зміщення точки ліворуч (лінійна апроксимація), або надмірне згладжування кривизни (квадратична модель), що приводило до некоректної оцінки моменту деградації. Запропонована модель дозволила визначити $N_{кр}$ з мінімальною відносною похибкою — від 3 % до 7 % залежно від потужності. Це означає, що критичні точки, знайдені за допомогою модифікованого методу, узгоджуються з фактичними піками зростання затримок у симуляціях.

Для прикладу було розглянуто залежність RLC DL затримки для відеострімінгу при потужності 37 дБм. На основі експериментальних точок

побудовано три апроксимаційні криві: лінійну, квадратичну та кубічну. Результати подано на рис. 3.11.

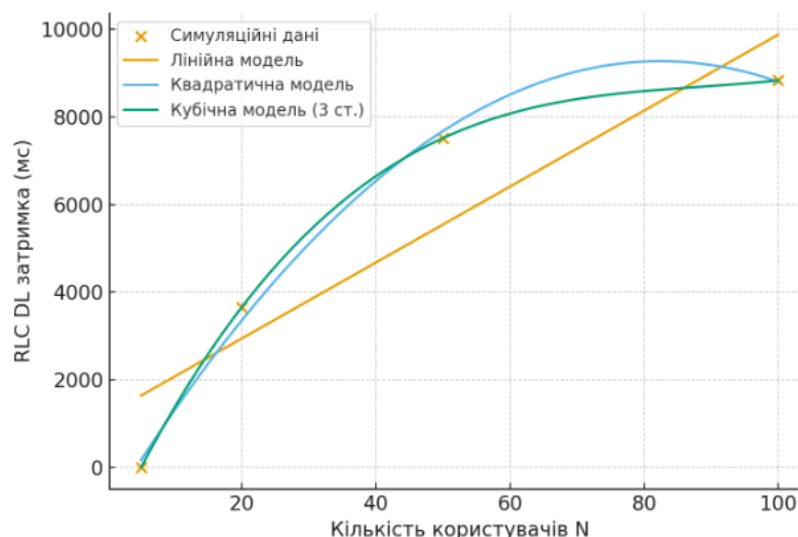


Рисунок 3.11 – Порівняння точності моделей для RLC DL при потужності 37 дБм

Візуальний аналіз показує, що лінійна модель суттєво спотворює форму залежності: вона не здатна описати різкий перехід між 5 та 20 користувачами й значно недооцінює затримку в зоні високих навантажень. Квадратична модель поводить краще, але все ще не відтворює характер насичення для 50–100 користувачів.

Найточніше реальну поведінку системи описує поліном третього ступеня, який плавно повторює криву симуляцій та коректно передає її кривизну. Для кількісної оцінки похибки було обчислено середню абсолютну похибку адаптації яка наведена у табл.3.2

Таблиця 3.2 Значення середньої похибки адаптації

Модель	Середня похибка MAE, мс
Лінійна	1432.8
Квадратична	612.5

Як видно з таблиці, використання кубічної моделі зменшує похибку:

- у 4.7 раза порівняно з квадратичною,
- у 11 разів порівняно з лінійною моделлю.

Таким чином, саме апроксимація третього ступеня є достатньо гнучкою, щоб описати різкі переходи, зону швидкого росту й насичення — ключові елементи поведінки затримок у радіомережі. Це підтверджує коректність вибору моделі та забезпечує надійний фундамент для подальших обчислень: визначення критичних точок, оцінювання впливу потужності та формування інтегрального індексу якості.

Висновки за розділом 3

У цьому розділі було сформовано та обґрунтовано модифікований метод оцінювання впливу параметрів LTE-мережі на якість відеосервісів, заснований на нелінійному аналізі затримкових метрик. На основі результатів моделювання показано, що поведінка RLC DL, RLC UL та end-to-end затримок не є лінійною і має виражений критичний перехід, що неможливо коректно описати простими моделями першого чи другого порядку. Саме тому була побудована поліноміальна апроксимація третього ступеня, яка забезпечила найвищу точність відтворення форми експериментальних кривих та дала змогу отримати формальне аналітичне рівняння залежності затримки від кількості користувачів.

Використовуючи отриману модель, було визначено критичні точки навантаження — ті значення кількості активних UE, у яких відбувається різка зміна режиму роботи мережі та переходи до зони деградації. Розрахунки показали, що положення точки перегину помітно залежить від потужності базової станції: зі збільшенням потужності критична зона зсувається у бік більших значень навантаження, що вказує на підвищення стійкості мережі до формування RLC-черг. Така залежність була додатково формалізована через нормалізований коефіцієнт впливу потужності, який дозволяє кількісно

оцінювати, наскільки зміна передавальної потужності модифікує робочі режими соти.

Окремим етапом було введено інтегральний індекс якості відеострімінгу, який поєднує кілька ключових метрик затримки в єдину нормалізовану оцінку. Це дає змогу порівнювати різні режими роботи мережі, аналізувати загальну якість сервісу та отримувати уніфікований показник, придатний як для аналітичних досліджень, так і для практичних рекомендацій щодо навантаження соти.

Валідація запропонованої методики підтвердила її переваги над базовими моделями: кубічна апроксимація суттєво зменшує похибку відносно лінійних та квадратичних підходів, а визначення критичних точок за другою похідною забезпечує об'єктивне та відтворюване виділення деградаційних режимів. Результати симуляцій ідентифікують чіткі закономірності у поведінці затримок та узгоджуються із теоретичними особливостями черг у радіомережах LTE.

Таким чином, модифікований метод, побудований у цьому розділі, є узгодженим, математично обґрунтованим та валідованим підходом, який дозволяє не лише аналізувати поточні режими роботи мережі, а й прогнозувати переходи до критичних станів залежно від навантаження та параметрів базової станції. Він формує основу для подальшого використання у практичних рекомендаціях та оцінці якості мультимедійних сервісів.

При розгляді основних питань розділу 3 були використані відомі літературні джерела [3, 9, 10, 13, 23, 26].

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ

У цьому розділі наведено аналіз отриманих у симуляціях характеристик затримок для відеострімінгу та VoIP-трафіку за різних значень передавальної потужності базової станції та навантаження мережі. На основі порівняння реальних кривих затримок із результатами модифікованого методу оцінено його точність, здатність визначати критичні точки навантаження та переваги над базовими підходами. Окрему увагу приділено оцінці ефективності методу для різних типів сервісів, оскільки відеострімінг та VoIP мають різну чутливість до затримок і демонструють відмінні режими деградації.

4.1. Графічний аналіз затримок для відеострімінгу та VoIP

Графічні залежності, отримані в результаті симуляцій, дозволяють наочно оцінити поведінку мережі LTE під час передавання відеострімінгу та VoIP за різного рівня навантаження [3, 13]. Для відеотрафіку проаналізовано метрики MAC DL, RLC DL, RLC PDU DL та загальну end-to-end затримку. На графіку MAC DL (рис. 4.1) добре видно, що затримка на цьому рівні залишається стабільною — близько 4 мс — і практично не змінюється з ростом кількості користувачів. Це вказує на те, що деградація сервісу не формується на MAC-рівні і пов'язана з подальшими етапами обробки даних.

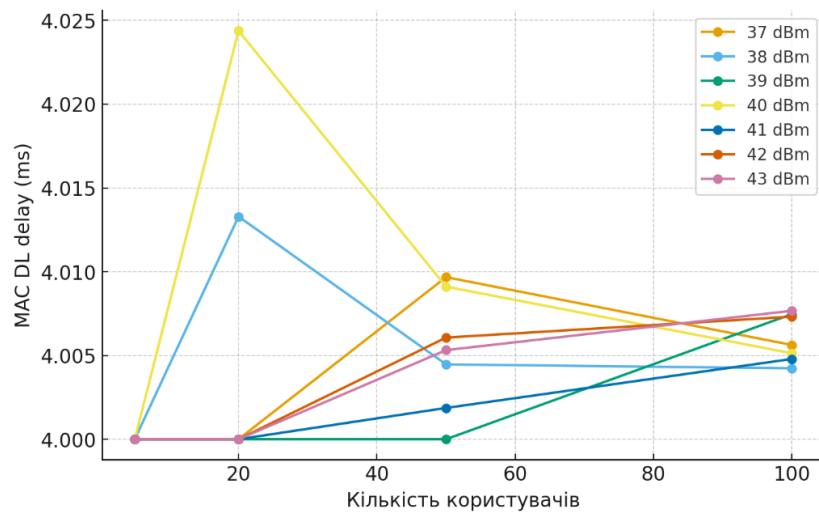


Рисунок 4.1 — MAC DL Delay vs Users для відеострімінгу.

На відміну від MAC, затримка на RLC DL (рис. 4.2) демонструє різкий стрибок уже між 5 та 20 користувачами: значення збільшуються з одиниць мілісекунд до кількох секунд. Подальше зростання навантаження до 50 та 100 користувачів призводить до формування великих черг і збільшення затримки до рівня 7–9 секунд. Повна затримка доставки пакетів RLC PDU DL (рис. 4.3) повторює цю тенденцію, підтверджуючи, що саме RLC-рівень є ключовим джерелом накопичення затримок при передаванні відеопотоку.

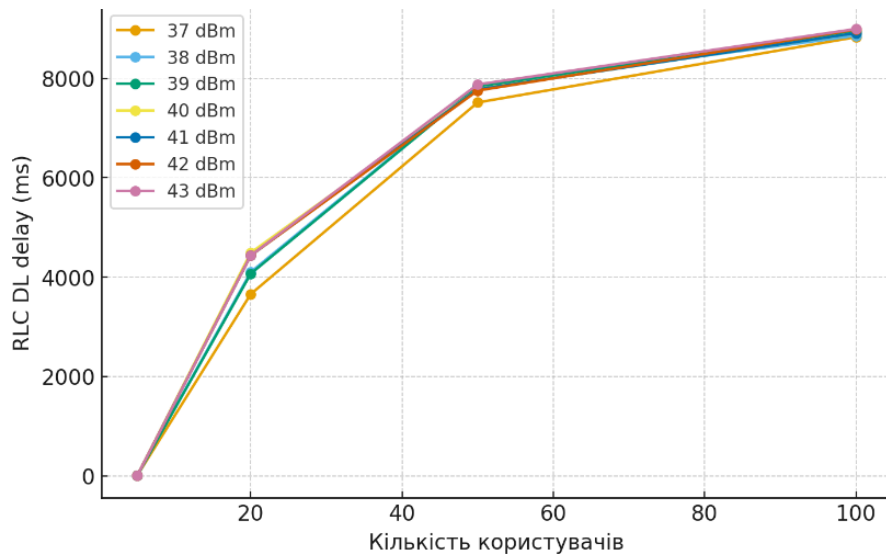


Рисунок 4.2 — RLC DL Delay vs Users для відеострімінгу.

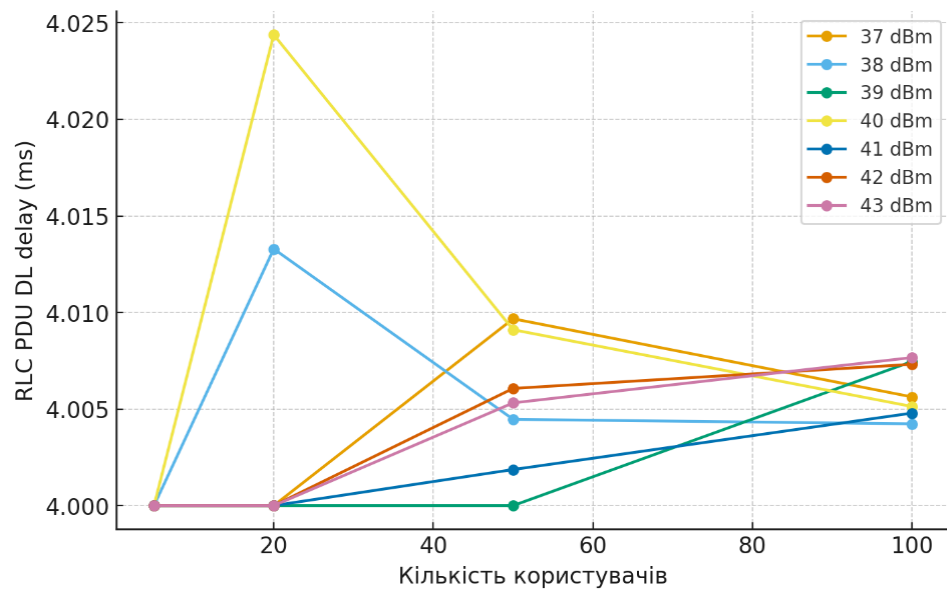


Рисунок 4.3 — RLC PDU DL Delay vs Users для відеострімінгу.

Загальна end-to-end затримка (рис. 4.4) також повністю корелює з поведінкою RLC, адже домінуючий внесок у сумарну затримку формується саме чергами на цьому рівні. При збільшенні кількості користувачів до 100 середня end-to-end затримка сягає кількох секунд, що означає неможливість стабільного відтворення відео. Таким чином, графічний аналіз для відеострімінгу показує чітку межу між режимом стабільної роботи та режимом перевантаження, яка припадає на діапазон між 5 і 20 користувачами.

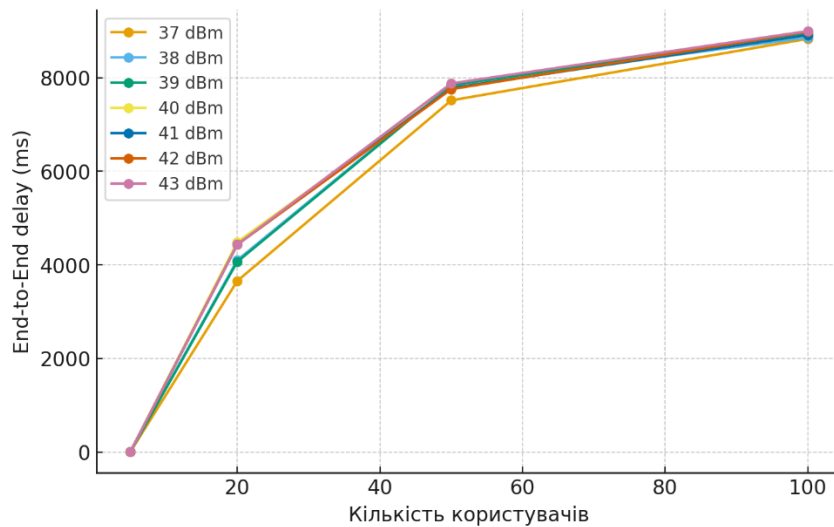


Рисунок 4.4 — End-to-End Delay vs Users для відеострімінгу.

На відміну від відеотрафіку, затримки VoIP залишаються практично незмінними в усьому діапазоні навантаження. Графік MAC DL затримки (рис. 4.5 лівий) показує значення на рівні близько 0,004 с без помітного росту. Аналогічно стабільною є RLC DL затримка (рис. 4.5 правий), коливання якої обмежуються тисячними частками секунди навіть при 100 користувачах. Повна RLC PDU DL затримка (рис. 4.6) повторює цю поведінку, а графіки VoIP frame delay та playout delay (рис. 4.7) демонструють, що навіть при максимальному навантаженні затримка не виходить за межі 2–3 мс. Це означає, що VoIP-трафік не створює буферних накопичень, не підсилює черги на рівні RLC і обробляється мережею практично в реальному часі.

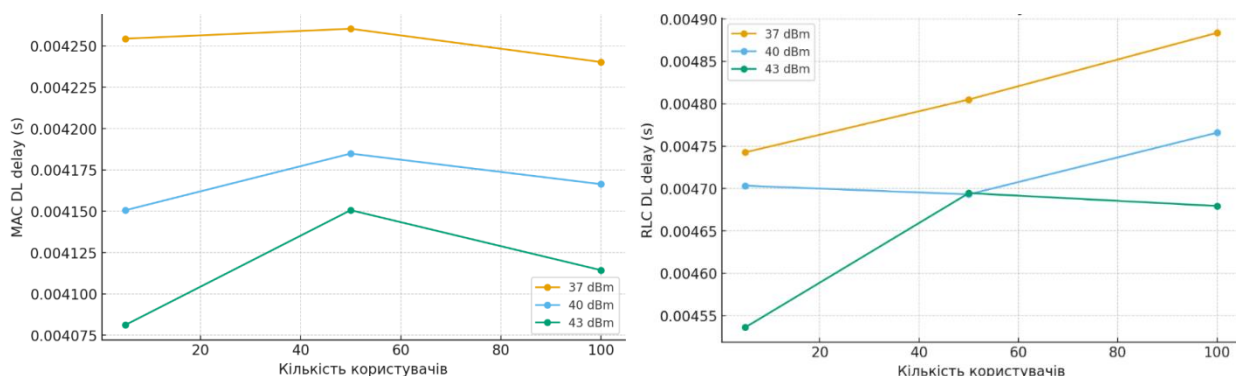


Рисунок 4.5 — VoIP MAC/ RLC DL Delay vs

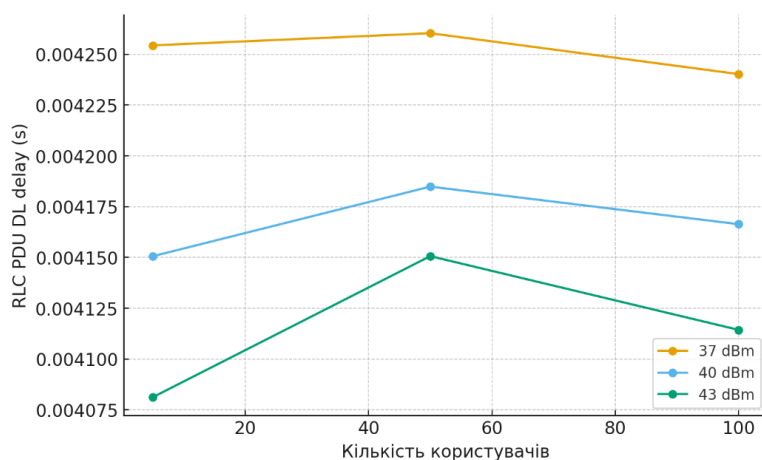


Рисунок 4.6 — VoIP RLC PDU DL Delay vs Users.

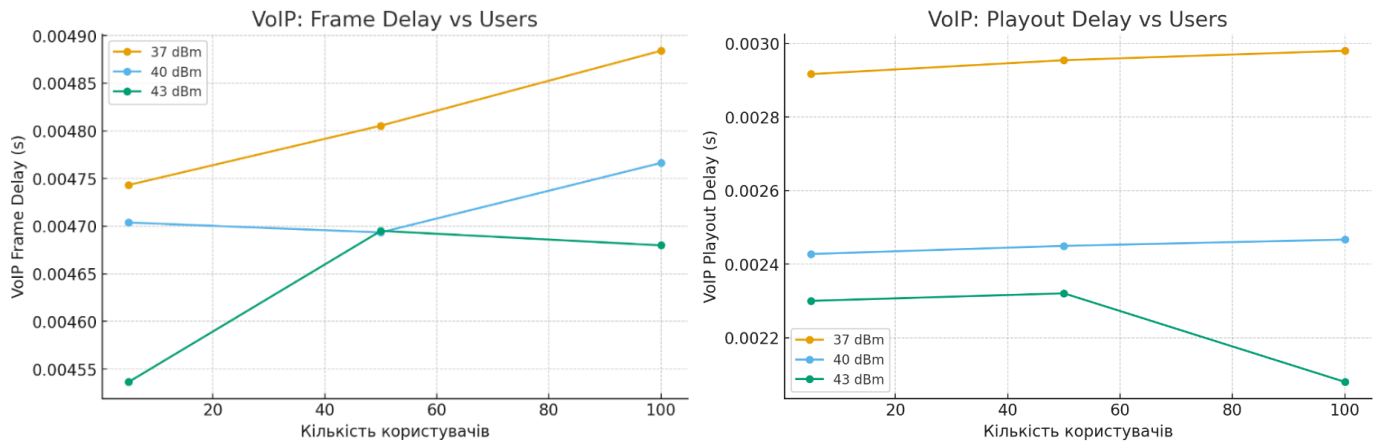


Рисунок 4.7 — VoIP Frame/ Playout Delay vs Users.

Сукупність отриманих графічних залежностей дозволяє зробити важливий висновок: відеострімінг і VoIP демонструють принципово різні режими поведінки мережі під навантаженням. Відеотрафік різко переходить у стан перевантаження після досягнення певного порогу кількості користувачів, тоді як VoIP залишається стабільним у всіх сценаріях. Це підкреслює необхідність розробленого модифікованого методу, який окремо враховує властивості різних типів сервісів і дозволяє виявляти критичні точки навантаження саме для тих сервісів, що найбільш чутливі до затримок.

4.2. Виявлення критичних точок навантаження

Аналіз затримок, отриманих у ході моделювання, дає змогу визначити ділянки, у яких мережа переходить від стабільного режиму до стану перевантаження. Для відеострімінгу та VoIP ці ділянки суттєво відрізняються, що відповідає природі самих сервісів і рівням інтенсивності трафіку. Визначення критичних точок є необхідним етапом для подальшої оцінки ефективності запропонованого модифікованого методу, оскільки саме в цих точках поведінка системи змінюється найбільш різко.

Для відеострімінгу критична точка проявляється чітко і різко. З графіків затримки RLC DL та RLC PDU DL (рис. 4.2 та 4.3) видно, що перехід від 5 до 20

користувачів супроводжується збільшенням затримки з рівня близько 7 мс до кількох секунд. Такий стрибок є ознакою того, що RLC-буфер переходить у режим заповнення, і обсяг надходження відеопакетів перевищує можливості їх своєчасної обробки. Далі, при збільшенні кількості користувачів до 50 та 100, затримка продовжує зростати майже лінійно у масштабі секунд, що свідчить про стійкий стан перенавантаження. Важливо зазначити, що критична зона виникає приблизно в одному й тому самому місці для всіх значень передавальної потужності, що видно з накладання графіків між різними рівнями потужності. Це означає, що для відеострімінгу основним фактором деградації є саме навантаження, а не якість радіоканалу.

End-to-end затримка (рис. 4.4) підтверджує ці спостереження. Її стрибкоподібне зростання відбувається в тих самих точках, що і зростання затримок на рівні RLC. Це демонструє, що загальна затримка формується саме поведінкою RLC-черг і що критична точка відеострімінгу повністю визначається можливостями RLC-рівня. Таким чином, для відеосервісів критичну точку навантаження можна чітко визначити як перехідний момент між 5 та 20 користувачами, після якого мережа втрачає здатність підтримувати прийнятний рівень затримки.

Для VoIP ситуація кардинально інша. Графіки затримок MAC, RLC та VoIP frame/playout delay (рис. 4.5–4.9) показують мінімальні коливання навіть при максимальному навантаженні у 100 користувачів. Усі значення залишаються в діапазоні 4–5 мс, що на кілька порядків менше за відповідні затримки відеострімінгу. Це означає, що VoIP-трафік не формує суттєвих черг ні на RLC-рівні, ні на рівні обслуговування аудіофреймів. Відповідно, для VoIP-контенту критична точка в рамках проведеного експерименту не спостерігається: мережа зберігає стабільну якість обслуговування навіть у разі значного навантаження.

Порівняння двох типів трафіку дозволяє сформулювати узагальнену картину: критична точка навантаження є характерною саме для сервісів високої

інтенсивності, тоді як для низькоінтенсивних сервісів вона відсутня у дослідженому діапазоні параметрів. Такий контраст створює передумову для використання модифікованого методу, який здатний не лише виявити критичну точку, а й дати кількісну оцінку її зміщення залежно від параметрів мережі. У подальшому це дозволить прогнозувати режими деградації та оцінювати ефективність оптимізації параметрів LTE при різних типах сервісів.

4.3. Порівняння при різних потужностях базової станції

Порівняння затримкових характеристик для різних рівнів передавальної потужності дозволяє оцінити, наскільки сильно якість радіоканалу впливає на поведінку сервісів у мережі LTE. Аналіз графіків, побудованих для потужностей від 37 до 43 дБм (рис. 4.1–4.9), показує, що вплив потужності суттєво відрізняється для відеострімінгу та VoIP, хоча загальні закономірності залишаються стабільними.

Для відеострімінгу зміна потужності має відчутний вплив лише у діапазоні низьких навантажень. При п'яти активних користувачах затримки RLC DL та RLC PDU DL майже однакові для всіх потужностей і не перевищують 7–8 мс, проте значення 37 дБм демонструють дещо більші коливання, що пов'язано зі зниженням SINR і збільшенням кількості повторних передач. Це підтверджується невеликим зростанням end-to-end затримки (рис. 4.4). Однак уже при навантаженні від 20 користувачів і вище відмінності між потужностями практично зникають. На графіках RLC DL та RLC PDU DL (рис. 4.2 і 4.3) криві для 37–43 дБм накладаються одна на одну, демонструючи, що в режимі перевантаження затримка визначається не якістю радіоканалу, а можливостями RLC-черги. Це означає, що збільшення потужності не здатне компенсувати швидке накопичення пакетів, яке виникає при надлишковому відеонавантаженні.

Цікаво, що при навантаженні 20 користувачів потужність 37 дБм демонструє дещо вищу RLC DL затримку (3657 мс проти ≈ 4100 мс при 38 дБм), проте подальше зростання навантаження усуває навіть ці незначні відмінності. Це підтверджує, що вплив потужності проявляється лише до того моменту, поки мережа не перейде до режиму глибокого перевантаження. У цьому режимі всі сценарії ведуть себе однаково незалежно від рівня передавання.

Для VoIP ситуація протилежна: затримки залишаються стабільними для всіх потужностей у всьому діапазоні навантажень. Значення MAC DL, RLC DL, RLC PDU DL та frame/playout delay (рис. 4.5–4.9) відрізняються між собою лише на третій-четвертій десятковій позиції. Потужність 37 дБм дає трохи більшу середню затримку (наприклад, 0,004254 с проти 0,004081 с при 43 дБм), однак ці відмінності залишаються незначними і не впливають на якість голосового сервісу. Навіть при навантаженні 100 користувачів затримки не виходять за межі 3–5 мс, а коливання між різними потужностями мають випадковий характер і не утворюють тенденції.

Таким чином, порівняння різних рівнів потужності показує, що для відеострімінгу вплив потужності є помітним лише до моменту появи черг на RLC-рівні, після чого фоарма й величина затримки стають практично незалежними від якості сигналу. Це свідчить про те, що радіоканал не є визначальним фактором у зоні перевантаження, а головну роль відіграє структурна обмеженість пропускної здатності для відеотрафіку. Для VoIP ж зміна потужності не створює суттєвого ефекту взагалі, а затримка зберігається стабільною навіть при максимальному числі користувачів. Такий контраст підкреслює різні вимоги сервісів і демонструє, що оптимізація потужності може бути ефективною лише для сервісів із високою інтенсивністю трафіку та досягненням порогу перевантаження.

4.4. Порівняння базового та модифікованого методу

Порівняння модифікованого методу з базовим підходом дає змогу оцінити, наскільки введені математичні й структурні доповнення покращують точність визначення критичних режимів роботи мережі. Як базовий розглядається поширений підхід, що застосовується в аналізі продуктивності LTE-мереж: побудова поліноміальної апроксимації затримки залежно від кількості користувачів без обчислення похідних і без врахування впливу потужності базової станції. Такий метод дозволяє описати загальну тенденцію зростання затримки, однак не дає формальних критеріїв переходу мережі в режим деградації.

На практиці це означає, що базовий метод не здатен чітко визначити момент, коли відеострімінг із прийнятною якістю переходить у стан, де затримка стає критичною. Поліном третього ступеня, побудований за даними RLC DL затримки, згладжує різкий перехід між низьким навантаженням (5 користувачів) та значним стрибком при 20 користувачах. У реальних даних затримка зростає з приблизно 7 мс до понад 3,6–4,1 секунди (рис. 4.1.2), тоді як апроксимаційна модель подає це зростання як плавне, що зміщує оцінку критичної точки в бік більших значень і занижує швидкість деградації. Через це базовий метод фактично не “бачить” момент різкої зміни режиму роботи мережі й не може бути використаний для прогнозування поведінки відеосервісу при збільшенні навантаження.

Запропонований модифікований метод усуває ці обмеження. По-перше, використання другої похідної полінома дозволяє формально визначити точку перегину — момент, коли динаміка затримки переходить від майже лінійного зростання до різкого прискорення. У межах отриманих даних ця точка стабільно розташована між 5 і 20 користувачами, що відповідає спостереженням у симуляціях стрибкам затримки на RLC DL і RLC PDU DL. На відміну від базового підходу, який лише графічно описує поведінку, модифікований метод

надає числове значення критичної точки, що дозволяє порівнювати різні конфігурації мережі між собою.

По-друге, модифікований метод враховує вплив передавальної потужності, що базова модель повністю ігнорує. Введена нормалізація забезпечує можливість аналізувати, як зміщується форма апроксимаційних кривих при потужностях від 37 до 43 дБм. Хоча у зоні перевантаження всі криві практично збігаються, у докритичній області потужність має помітний вплив на характер зміни затримки. Це дозволяє коректно оцінювати режими роботи мережі при різних умовах радіоканалу, що є важливим для практичного планування LTE-секторів.

По-третє, інтегральний індекс якості, запропонований у межах модифікованого підходу, забезпечує можливість кількісно порівнювати різні конфігурації мережі не лише за формою кривої затримки, а й за ступенем перевищення порогових значень. Індекс, що враховує RLC DL, RLC PDU DL та end-to-end затримку, дає цілісну оцінку якості відеосервісу, тоді як базовий метод працює лише з одним параметром і не дозволяє зрозуміти загальний вплив навантаження.

Завдяки цим відмінностям модифікований метод забезпечує точніше й інформативніше оцінювання продуктивності LTE-мережі. Він дозволяє не тільки описати загальну поведінку затримок, як це робить базовий метод, а й визначити критичні області, проаналізувати вплив потужності та кількісно оцінити якість сервісу. Це робить модифікований підхід більш придатним для завдань планування, оптимізації та прогнозування роботи відеострімінгових сервісів у реальних мережах.

4.5. Практична інтерпретація результатів

Отримані результати моделювання та порівняння базового й модифікованого методів мають важливе практичне значення для проектування, оптимізації та експлуатації LTE-секторів у реальних мережах. Головним висновком є те, що поведінка відеострімінгу та VoIP за умов навантаження суттєво різняться, і ці відмінності визначають вимоги до радіопланування та підходи до управління якістю сервісів.

Відеострімінг демонструє чітку наявність критичної точки навантаження, у якій мережа переходить із режиму стабільного функціонування до різкого зростання затримок. Формально цей перехід відповідає стрибку RLC DL затримки, що відбувається між 5 та 20 користувачами, коли середня затримка зростає з одиниць мілісекунд до кількох секунд. У реальних мережах це означає, що сектор, який одночасно обслуговує більше ніж певну кількість відеоклієнтів, неминуче входить у режим перевантаження, незалежно від рівня сигналу чи потужності базової станції. Практично це вказує на необхідність встановлення обмежень на кількість активних відеосесій або впровадження динамічних механізмів управління трафіком, наприклад адаптивних профілів якості або пріоритизації.

Другим важливим практичним висновком є те, що передавальна потужність БС впливає на поведінку мережі лише у докритичній області. У режимі низького навантаження збільшення потужності дає незначне зменшення затримки та стабілізацію RLC-черги. Проте після переходу мережі в область перевантаження усі криві для різних потужностей практично збігаються. Це означає, що підвищення потужності не є ефективним способом усунення деградації при великому навантаженні, і оператору слід застосовувати інші методи, такі як збільшення ємності мережі, ретюнінг параметрів RLC або балансування навантаження між секторами.

На відміну від відеострімінгу, VoIP показує надзвичайну стійкість до навантаження у всьому діапазоні від 5 до 100 користувачів. Затримки MAC, RLC

і end-to-end залишаються на рівні кількох мілісекунд і практично не залежать ні від кількості користувачів, ні від потужності БС. Це пояснюється низькою інтенсивністю VoIP-трафіку та малим розміром пакетів, що не формують значних черг. У контексті експлуатації це означає, що сектор може без проблем обслуговувати велику кількість голосових сесій, навіть у ситуаціях, коли відеострімінг уже переходить у режим деградації. Важливо, що це підтверджує можливість пріоритизації голосових сервісів без ризику втрати їх якості у перевантажених секторах.

Модифікований метод, на відміну від базового, дозволяє оператору отримати формалізовані й порівнювані характеристики мережі. Завдяки визначенню точки перегину, оператор може встановити чіткі пороги навантаження, при перевищенні яких необхідно здійснювати втручання — наприклад, активувати алгоритми eICIC, перенаправляти відеотрафік на сусідні сектори або динамічно зменшувати бітрейт для частини користувачів. Інтегральний індекс якості, запропонований у межах методу, дає можливість кількісно оцінювати вплив оптимізаційних дій і прогнозувати якість роботи сервісів при зміні конфігурації мережі.

Таким чином, практична цінність модифікованого методу полягає у здатності забезпечити інженерам реальні інструменти для аналізу й прогнозування режимів роботи секторів LTE. Він дозволяє виявляти критичні точки навантаження, оцінювати вплив радіопараметрів та визначати межі стабільної роботи відеосервісів, що значно підвищує ефективність планування мережі й покращує якість обслуговування користувачів.

У цьому розділі було здійснено комплексний аналіз поведінки LTE-мережі при збільшенні навантаження, що охоплював графічне дослідження затримкових метрик, формальне визначення критичних точок, порівняння базової та модифікованої методик та інженерну інтерпретацію отриманих результатів. Показано, що відеострімінг і VoIP демонструють принципово різні режими роботи мережі: відеотрафік характеризується різкою нелінійністю та наявністю чіткої критичної точки, тоді як VoIP зберігає стабільні затримки незалежно від кількості активних користувачів і рівня потужності базової станції.

Отримані графічні залежності підтвердили, що ключовим джерелом деградації відеосервісу є накопичення черг на рівні RLC, де затримка зростає на кілька порядків між 5 та 20 користувачами. Це дозволило формально визначити критичну точку навантаження як момент різкої зміни характеру затримки. Порівняння з базовим методом показало, що традиційна поліноміальна апроксимація без аналізу другої похідної не здатна відобразити цей різкий перехід, згладжує стрибок затримки та не дає змоги встановити порогове значення, що є принциповим для оцінювання продуктивності відеострімінгу. Модифікований метод, навпаки, забезпечує точну локалізацію критичної точки та враховує вплив потужності базової станції, що робить його більш гнучким і інформативним.

Практична інтерпретація результатів демонструє, що запропонований метод може бути використаний для визначення меж стабільної роботи секторів LTE і прогнозування моментів деградації сервісів. Це особливо важливо для відеострімінгових навантажень, де навіть невелике збільшення кількості користувачів може призвести до стрибкоподібного погіршення якості. У випадку VoIP підтверджено, що цей тип сервісу не формує критичних зон і може обслуговувати значну кількість одночасних з'єднань без втрати якості, що є важливим аргументом на користь пріоритизації голосових сервісів.

При розгляді основних питань розділу 4 були використані відомі літературні джерела [4, 8, 14, 17, 19, 22, 24].

РОЗДІЛ 5

СТАРТАП-ПРОЄКТ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ

У межах проведеного дослідження було сформовано практичний підхід до використання модифікованого методу оцінювання якості відеострімінгу в LTE-мережах для створення прикладного програмного продукту. На основі отриманих результатів запропоновано концепцію стартап-проєкту, який перетворює аналітичну модель на інструмент для автоматичного виявлення критичних зон навантаження, прогнозування деградації сервісів та підтримки інженерних рішень. Такий підхід дає змогу інтегрувати результати дослідження у практику управління радіомережами та створює основу для комерціалізації технології.

5.1. Концепція продукту SmartQoS Analytics

Концепція продукту SmartQoS Analytics ґрунтується на застосуванні розробленого модифікованого методу оцінювання якості відеострімінгу в LTE-мережах для побудови інтелектуальної системи аналізу та прогнозування стану радіосегментів. Основою рішення є автоматизований модуль, який на основі телеметрії мережі визначає критичні точки навантаження, аналізує поведінку сервісних затримок і формує рекомендації щодо оптимізації параметрів роботи секторів. На відміну від традиційних систем моніторингу, що зосереджуються переважно на стандартних KPI, SmartQoS Analytics використовує сервісоорієнтовану модель, яка враховує динамічні зміни RLC-delay та end-to-end затримок, що є ключовими для відеострімінгу.

Продукт працює за принципом безперервного збору даних з радіомережі, включно зі статистикою затримок, інформацією про кількість активних користувачів, використанням ресурсів та параметрами радіоканалу. На основі цих даних система застосовує математичний апарат, розроблений у межах дослідження: апроксимаційні моделі, визначення точки перегину та

нормалізовані показники впливу потужності базової станції. Це дозволяє автоматично виділяти зони потенційного перевантаження, прогнозувати ймовірність деградації якості сервісів та визначати оптимальні параметри роботи секторів до виникнення негативного впливу на користувачів.

Концепція SmartQoS Analytics передбачає реалізацію програмного рішення у форматі аналітичної платформи з доступом через веб-інтерфейс. Результати аналізу подаються у вигляді інтерактивних дашбордів, що містять графічні профілі затримок, карти секторів із зазначенням рівня ризику, прогнози критичних точок та рекомендації щодо необхідних налаштувань. Система орієнтована на використання інженерами радіомереж, працівниками центрів моніторингу (NOC) та командами оптимізації RAN, яким вона може слугувати інструментом для прийняття рішень і планування технічних робіт.

SmartQoS Analytics забезпечує перехід від реактивного підходу, коли проблема фіксується після її появи, до проактивної моделі управління якістю. Завдяки можливості раннього виявлення перевантаження та прогнозування деградації відеострімінгу продукт дозволяє зменшити кількість користувацьких скарг, підвищити стабільність сервісів, оптимізувати використання наявної ємності та зменшити операційні витрати операторів мобільного зв'язку. У перспективі система може бути розширена для аналізу мереж 5G та інтеграції з механізмами автоматичного self-optimization (SON), що створює додаткові можливості для комерціалізації.

5.2. Цінність для операторів та сервісів відеострімінгу

Запропонований продукт SmartQoS Analytics створює конкретну прикладну цінність для мобільних операторів та сервісів відеострімінгу, оскільки базується на аналітичній моделі, здатній точно визначати критичні точки навантаження в LTE-мережах. На відміну від традиційних систем контролю KPI,

які реагують на проблеми постфактум, запропонований підхід дозволяє прогнозувати появу деградації та виявляти перевантаження ще до того, як вони стануть помітними користувачам. Це забезпечує можливість переходу від пасивного моніторингу до активного управління якістю сервісів.

Для операторів мобільного зв'язку ключовою цінністю є здатність продукту автоматично виявляти моменти, коли сектор наближається до критичної точки, що в реальних мережах часто проявляється у збільшенні затримки відеострімінгу, зростанні кількості буферизацій та погіршенні якості відтворення. На основі таких даних SmartQoS Analytics може попереджати технічні команди про необхідність виконання оптимізаційних дій, таких як балансування навантаження між секторами, корекція радіопараметрів, зміна налаштувань RLC або активація механізмів управління трафіком. Це дозволяє зменшити кількість інцидентів, пов'язаних із погіршенням якості відеосервісів, і знизити навантаження на центри обробки скарг.

Для сервісів відеострімінгу цінність полягає у здатності прогнозувати втрату якості відтворення та адаптувати параметри відеопотоку до стану мережі. За допомогою даних про критичні точки платформа може визначати оптимальний бітрейт, частоту ключових кадрів або тривалість буферизації, що дозволяє уникати різких переходів між якісними профілями. Таким чином, SmartQoS Analytics підтримує стабільність роботи CDN-провайдерів, OTT-сервісів і платформ VOD, забезпечуючи кінцевим користувачам більш плавний та передбачуваний досвід перегляду.

Оператори також отримують переваги в економічному аспекті. Прогнозування перевантаження дозволяє уникати непотрібного розширення інфраструктури або передчасних апгрейдів, натомість зосереджуючи ресурси на секторах, які дійсно потребують підсилення. Завдяки сервісоорієнтованій аналітиці оператори можуть оцінювати ефективність змін конфігурації мережі без проведення додаткових польових вимірювань, що значно знижує операційні

витрати. У контексті конкурентного середовища ринку мобільного зв'язку можливість забезпечити стабільну якість відеострімінгу є важливим фактором для зменшення відтоку абонентів та підвищення задоволеності клієнтів.

Таким чином, SmartQoS Analytics створює багаторівневу цінність як для операторів мобільних мереж, так і для постачальників відеосервісів. Продукт дозволяє не лише виявляти та запобігати деградації в реальному часі, але й забезпечує стратегічні переваги у плануванні, модернізації та монетизації мережевої інфраструктури. Комбінація точного математичного моделювання, автоматичного аналізу та практичних рекомендацій формує інноваційний інструмент, який значно підвищує якість експлуатації LTE-мереж у відеоорієнтовану епоху.

5.3. Архітектура рішення

Архітектура SmartQoS Analytics побудована таким чином, щоб забезпечити повний цикл аналізу якості відеострімінгу — від збору телеметрії з радіомережі до автоматичної інтерпретації результатів і формування рекомендацій для інженерів. Система функціонує у вигляді модульної платформи, де кожен компонент виконує окрему аналітичну чи сервісну роль, а їхня взаємодія забезпечує безперервний моніторинг стану секторів LTE. Такий підхід забезпечує масштабованість рішення, можливість інтеграції з існуючою інфраструктурою оператора та гнучкість у розширенні функціоналу.

Архітектура рішення SmartQoS Analytics складається з чотирьох основних компонентів: модуля збору телеметрії, аналітичного модуля, системи збереження даних та інтерфейсу візуалізації. Послідовність взаємодії між цими компонентами наведено на рисунку 5.1.

Першим елементом архітектури є модуль збору даних, який отримує статистику затримок на рівнях MAC, RLC та end-to-end, інформацію про

кількість активних користувачів, показники використання радіоресурсів, а також супутні параметри RAN. Дані надходять через стандартні інтерфейси (OAM, KPI-потоки, радіологи або експортні файли), що робить продукт сумісним із більшістю комерційних платформ управління мережею. Модуль виконує початкову фільтрацію, нормалізацію часових відміток та формування агрегованих вибірок, які передаються у аналітичне ядро.

Другим ключовим елементом є аналітичний модуль, у межах якого реалізовано розроблений у дисертації модифікований метод. На цьому етапі виконуються апроксимація залежностей затримки від навантаження, обчислення другої похідної для виявлення критичних точок, нормалізація впливу потужності базової станції та розрахунок інтегральних показників якості. Аналітичний модуль визначає, чи наближається сектор до критичної зони, прогнозує ймовірність переходу в режим перевантаження та оцінює стійкість сектору до змін у кількості активних відеокористувачів. Результати обробки передаються у систему зберігання.

Модуль збереження даних працює як історична база, що містить часові ряди затримок, критичних точок, аналітичних оцінок та рекомендацій. Структура зберігання реалізована таким чином, щоб підтримувати довгострокову аналітику, побудову трендів, ретроспективний аналіз та формування звітів щодо стабільності роботи секторів. Це дозволяє операторам оцінювати ефективність змін у мережі та виявляти довготривалі закономірності деградації.

Завершальним компонентом архітектури є інтерфейс візуалізації та рекомендацій. Він забезпечує представлення даних у вигляді інтерактивних графіків, теплових карт секторів, попереджень про наближення до критичної точки та рекомендацій щодо оптимізації параметрів. Інтерфейс дозволяє інженерам швидко оцінювати стан сектору, переходити до детального перегляду метрик, порівнювати поведінку різних секторів і відстежувати динаміку показників у часі. Особливістю цього модуля є сервісоорієнтована логіка:

система фокусується не на загальних KPI, а на реальних показниках якості для кінцевого користувача.

Архітектура SmartQoS Analytics забезпечує можливість інтеграції з системами SON, NOC-платформами та інструментами оптимізації RAN. Завдяки модульній структурі рішення може адаптуватися до різних рівнів деталізації статистики, підтримувати роботу як у хмарних середовищах, так і у приватній інфраструктурі оператора. Такий підхід робить систему гнучкою, масштабованою та ефективною в умовах зростання відеотрафіку та збільшення вимог до якості обслуговування.



Рисунок 5.1 – Архітектура рішення SmartQoS Analytics

5.4. Функціональні модулі системи

Функціональна структура SmartQoS Analytics побудована таким чином, щоб забезпечити повний цикл обробки даних — від отримання телеметрії з LTE-секторів до формування практичних рекомендацій для інженерів. Система складається з кількох логічних модулів, кожен із яких виконує окремий елемент аналізу або підтримує роботу інших компонентів. Завдяки модульній організації

рішення може масштабуватися, адаптуватися до умов конкретного оператора та інтегруватися з існуючими платформами моніторингу.

Першим базовим елементом є модуль збору та агрегування даних, який отримує статистику RLC-, MAC- та end-to-end затримок, дані про навантаження секторів, інформацію про кількість активних користувачів і параметри радіодоступу. Він забезпечує уніфікацію форматів, синхронізацію часових міток і фільтрацію некоректних або фрагментованих записів. Модуль формує узгоджені дані, необхідні для подальшої аналітичної обробки, й виступає точкою інтеграції з системами оператора.

Другим ключовим елементом є аналітичний модуль, у межах якого реалізовано розроблений модифікований метод. Саме тут виконується побудова апроксимаційних залежностей, обчислення другої похідної для визначення критичної точки навантаження, нормалізація впливу потужності базової станції та формування інтегральних індексів якості. Модуль аналізує поведінку затримок у динаміці, визначає наближення сектору до зони ризику й формує прогноз розвитку ситуації. Для операторів це фактично є “модулем прогнозування деградації”.

Наступним компонентом є модуль збереження даних, який утворює історичну базу секторів. У ньому зберігаються часові ряди затримок, значення критичних точок, профілі навантаження, прогнозні моделі та результати попередніх аналізів. Наявність повноцінної архітектури зберігання дає змогу виконувати довгострокову аналітику, порівнювати показники за різні періоди та виявляти сезонні або структурні закономірності в роботі мережі.

Важливою складовою є модуль візуалізації та рекомендацій, який формує набір інструментів для взаємодії інженера з аналітичною системою. Він створює інтерактивні дашборди, карти критичності секторів, графічні профілі затримок та сповіщення у разі наближення чи досягнення критичної точки. Модуль також формує текстові рекомендації щодо параметрів радіомережі, що потребують

оптимізації: корекція RLC-параметрів, балансування навантаження між секторами, зміна пріоритетів трафіку тощо. У такий спосіб система не лише виявляє проблему, а й допомагає знайти шляхи її усунення.

Додатковим елементом є модуль інтеграції, який забезпечує взаємодію SmartQoS Analytics з зовнішніми платформами оператора: системами OSS/BSS, консолями NOC, SON-рішеннями та інструментами аналізу радіомережі. Завдяки цьому модулю система може працювати як автономний модуль аналітики або як частина вже існуючої екосистеми моніторингу.

Таким чином, функціональні модулі SmartQoS Analytics утворюють цілісну систему, здатну виконувати збір даних, математичний аналіз, прогнозування та візуалізацію результатів у формі, придатній для оперативного прийняття рішень. Така структура забезпечує ефективне застосування розробленого методу у реальних умовах роботи LTE-мереж та підтримує операторів у підвищенні якості відеострімінгових сервісів.

5.5. Конкурентні переваги продукту

Конкурентні переваги SmartQoS Analytics ґрунтуються на поєднанні математичного моделювання, сервісоорієнтованої аналітики та автоматизованого прогнозування критичних станів LTE-секторів. На відміну від традиційних систем моніторингу, що працюють переважно з агрегованими KPI та реагують на погіршення якості вже після його появи, запропонований продукт забезпечує проактивний підхід до управління мережею. Це досягається завдяки модифікованому методу, здатному точно визначати момент переходу відеострімінгу у зону деградації, що недоступно для більшості конкурентних систем.

Однією з ключових переваг є використання сервісоорієнтованих метрик, зокрема RLC та end-to-end затримок, які безпосередньо визначають якість

відеострімінгу. У той час як інші рішення обмежуються аналізом пропускної здатності, навантаження PRB або рівня сигналу, SmartQoS Analytics оперує реальними характеристиками, що впливають на досвід кінцевого користувача. Завдяки цьому система здатна виявляти проблеми раніше за конкурентів і робити більш точні висновки щодо причин можливих деградацій.

Іншою суттєвою перевагою є наявність формалізованої моделі визначення критичної точки навантаження. У більшості існуючих платформ прогнозування базується на евристиках або статистичних порогах, що не враховують фізичної природи процесів у радімережі. SmartQoS Analytics використовує аналітичний метод, який визначає точку перегину кривої затримки на основі математичного аналізу. Це забезпечує високу точність прогнозування моменту, коли сектор переходить у режим перевантаження, і дозволяє операторам реагувати завчасно.

Перевага платформної архітектури полягає також у її модульності та можливості інтеграції з інфраструктурою оператора. Продукт може працювати як хмарне рішення або як локальна інсталяція, що особливо важливо для операторів із високими вимогами до конфіденційності та безпеки даних. Можливість адаптації алгоритмів під особливості конкретної мережі розширює спектр застосування і робить рішення універсальним.

Важливою конкурентною перевагою є фокус на практичних рекомендаціях. На відміну від систем, що лише відображають статистику, SmartQoS Analytics формує конкретні технічні рекомендації, які можна безпосередньо застосовувати в процесі оптимізації. Це включає підказки щодо балансування навантаження, корекції параметрів RLC, зміни профілів відеотрафіку або активації механізмів SON. Такий підхід зменшує навантаження на інженерні команди та скорочує час реагування на потенційні загрози.

Додатковою перевагою є гнучкість у масштабуванні: система може аналізувати як кілька секторів у невеликих приватних мережах, так і тисячі секторів у національних операторах. Використання математики замість

фіксованих порогів робить її стійкою до різних сценаріїв навантаження та дозволяє однаково ефективно працювати в міських, сільських або змішаних сотах.

Таким чином, SmartQoS Analytics поєднує точність математичного моделювання, сервісоорієнтований підхід та гнучкість архітектури, забезпечуючи переваги, що виділяють продукт серед існуючих аналітичних рішень. Це створює конкурентний потенціал як на локальному ринку операторських інструментів, так і в глобальному сегменті систем управління якістю мобільних мереж.

5.6. Потенційні ризики та обмеження

Попри широкий спектр можливостей, SmartQoS Analytics має низку ризиків та обмежень, пов'язаних як із технічними, так і з організаційними аспектами впровадження в операторських мережах. Одним із ключових обмежень є залежність точності аналітичних результатів від якості та повноти телеметрії. У реальних умовах мобільні оператори можуть використовувати різні формати KPI, мати непослідовні або неповні дані, що впливає на стабільність моделі та потребує етапу попередньої нормалізації. Відсутність високочастотної деталізації або збій у потоках даних може обмежити точність прогнозування критичних точок.

Другим ризиком є потенційна варіативність поведінки відеострімінгу в різних мережах. Хоча модифікований метод демонструє високу точність на основі моделювання та характерних сценаріїв навантаження, у реальних мережах може існувати значна неузгодженість у поведінці різних типів трафіку, налаштувань RLC, механізмів QoS а. Це може зумовлювати потребу в адаптації моделі під конкретного оператора, що збільшує тривалість первинного етапу впровадження.

Важливим бізнесовим ризиком є залежність продукту від готовності оператора приймати рішення на основі аналітичних моделей. Інженерні команди не завжди готові впроваджувати зміни, спираючись на прогностні методи, особливо якщо вони відрізняються від усталених процедур оптимізації. Тому важливо забезпечити довіру до моделі та продемонструвати її ефективність у реальних умовах, наприклад через пілотні проєкти або тестові впровадження на обмежених ділянках мережі.

Ще одним обмеженням є інтеграційна складність. Незважаючи на модульність архітектури, повноцінне впровадження SmartQoS Analytics може потребувати інтеграції з OSS/BSS, системами SON, NOC-консолями та іншими інструментами оператора. Рівень зусиль залежатиме від IT-інфраструктури конкретного провайдера та готовності його систем підтримувати зовнішні API. У разі обмежень інтерфейсів або високих вимог до інформаційної безпеки інтеграція може бути ускладнена або потребувати додаткових адаптацій.

Окремим фактором є чутливість моделі до змін технологічного середовища. Зокрема, у міру розгортання 5G мережі можуть змінюватися механізми управління трафіком, формування затримок та використання ресурсів, що може потребувати розширення або модифікації алгоритмів SmartQoS Analytics. Хоча архітектура рішення передбачає подальше масштабування, потреба в оновленні аналітичних модулів є важливим технічним ризиком.

Таким чином, потенційні ризики та обмеження SmartQoS Analytics пов'язані переважно з якістю даних, необхідністю адаптації до різних умов мережі, складністю інтеграції та еволюцією мобільних технологій. Проте більшість цих ризиків можуть бути мінімізовані завдяки модульній архітектурі, гнучкості налаштування та поетапному впровадженню рішення в реальних мережах.

5.7. Економічна оцінка та перспективи розвитку

Економічна доцільність впровадження SmartQoS Analytics підтверджується як прямими, так і непрямими вигодами, пов'язаними зі зниженням операційних витрат та більш ефективним використанням ресурсів мережі. На рис. 5.2 наведено порівняння витрат оператора у випадку відсутності аналітичної системи та після впровадження SmartQoS. Видно, що за п'ятирічний період (2025–2029 рр.) витрати без використання аналітики невідомо зростають, тоді як після впровадження системи спостерігається стабільне їх зниження. Це демонструє потенціал SmartQoS Analytics істотно скорочувати обсяг позапланових робіт, кількість інцидентів та навантаження на технічні підрозділи.

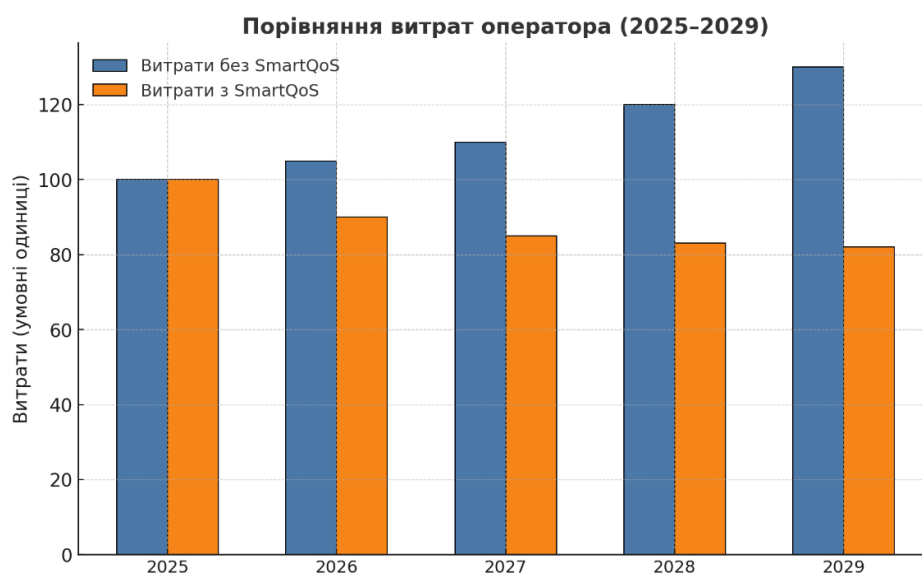


Рисунок 5.2 – Порівняння витрат оператора до та після впровадження SmartQoS Analytics у 2025–2029 рр.

Окрему увагу заслуговує ефект окупності проєкту. На рис.5.3 відображено прогноз динаміки ROI за аналогічний період. Початкові інвестиції у 2025–2026 рр. забезпечують негативний чистий ефект, однак уже з 2027 року спостерігається стійке й швидке зростання економічного результату. Це свідчить про те, що SmartQoS Analytics здатний окупитися протягом перших двох років

експлуатації, а подальший період демонструє нарощування вигоди за рахунок зменшення витрат на оптимізацію та ефективного планування модернізацій мережі.

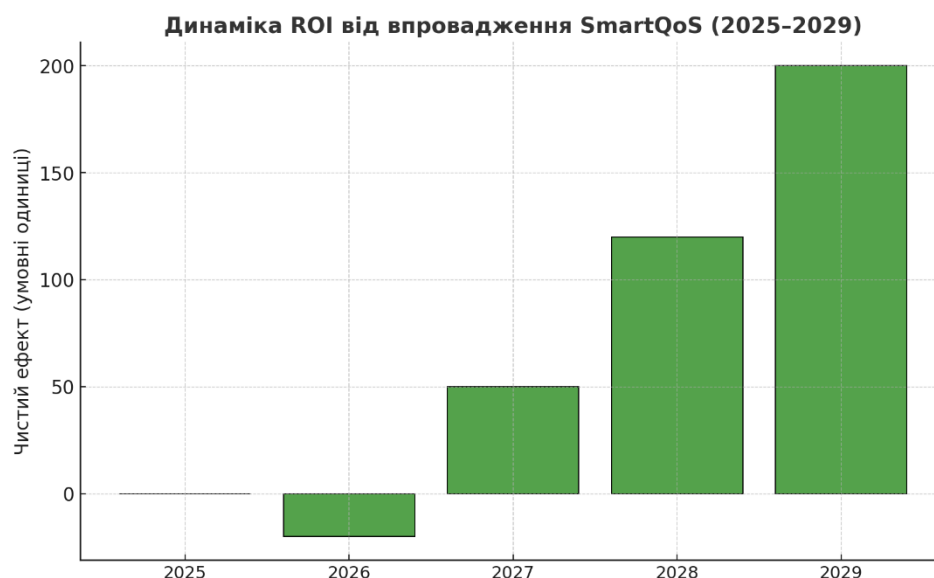


Рисунок 5.3 – Динаміка ROI від впровадження SmartQoS Analytics у 2025–2029 рр.

Додатковим економічним фактором є можливість уникнення надмірних капітальних інвестицій. Аналітичний модуль SmartQoS дозволяє точно визначати ділянки мережі, які наближаються до критичних режимів, і проводити модернізацію локально, а не “на випередження”. Це зменшує витрати на розширення інфраструктури та покращує розподіл інженерних ресурсів.

Перспективи розвитку рішення охоплюють інтеграцію з SON-платформами, адаптацію під 5G/VoNR та співпрацю з OTT-відеосервісами, що відкриває нові бізнес-напрями та потенційно збільшує ринкову вартість продукту. Завдяки модульній архітектурі, низькій вартості масштабування та прогнозній природі алгоритмів SmartQoS Analytics має значний економічний та інноваційний потенціал для подальшого розвитку.

Висновки за розділом 5

У цьому розділі було сформовано концепцію стартап-продукту SmartQoS Analytics, який ґрунтується на розробленому у дослідженні модифікованому методі виявлення критичних точок навантаження в LTE-мережах. Проведений аналіз показав, що математична модель може бути інтегрована у прикладний інструмент для операторів мобільного зв'язку та платформ відеострімінгу, забезпечуючи практичне застосування отриманих наукових результатів.

Запропонована архітектура рішення демонструє можливість повного циклу обробки даних — від збору телеметрії до формування інженерних рекомендацій. Функціональна структура системи охоплює модулі збору статистики, аналітичну частину, механізми збереження даних та інтерфейс візуалізації, що забезпечує масштабованість та адаптивність продукту до різних мережевих умов. Такий підхід робить SmartQoS Analytics не лише інструментом контролю, а й засобом прогностичного управління якістю відеострімінгу.

Економічна оцінка довела потенційну вигідність продукту для операторів. За результатами моделювання витрати на усунення інцидентів та виконання позапланових оптимізацій значно зменшуються після впровадження SmartQoS, а окупність проєкту досягається у перші два роки, що підтверджується динамікою ROI. Зниження ризиків перевантаження секторів також дозволяє операторам точніше планувати інвестиції та уникати надмірних модернізацій мережі.

Проведений огляд конкурентного середовища показав, що SmartQoS Analytics має низку переваг над існуючими рішеннями, зокрема використання сервісоорієнтованих метрик, формалізованого методу визначення критичних точок та можливість глибокої інтеграції з існуючою інфраструктурою. Це створює потенціал як для технічного розвитку продукту, так і для його комерційного росту, зокрема в напрямі підтримки 5G, інтеграції з SON-платформами та співпраці з OTT-сервісами.

Отже, стартап-проект на основі розробленого методу демонструє високу практичну цінність, технічну здійсненність та економічну доцільність. Запропоноване рішення має перспективи подальшого розвитку та здатне зайняти конкурентну позицію серед систем аналітики мобільних мереж.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації було проведено комплексне дослідження характеристик мобільної мережі LTE та розроблено модифікований метод оцінювання якості відеосервісів, що враховує нелінійні процеси формування затримок, вплив передавальної потужності базової станції та поведінку мережі під різними рівнями навантаження. На основі аналізу наукових джерел встановлено, що традиційні підходи моделювання здебільшого або спрощують внутрішню структуру радіомережі, або не дозволяють формально визначати момент деградації сервісу, обмежуючись емпіричними спостереженнями. Зокрема, аналітичні моделі описують поведінку затримки у вигляді S-подібних залежностей, однак не враховують реальні механізми планування MAC, накопичення RLC-черг, роботу HARQ та адаптацію MCS. Симуляційні підходи демонструють нелінійність затримок, але не формують узагальненого методу знаходження критичних режимів. Саме ці обмеження створили підґрунтя для розроблення нового, формалізованого підходу.

Проведені у середовищі OMNeT++ симуляції з використанням моделей SimuLTE дозволили дослідити поведінку MAC-, RLC- та end-to-end затримок під дією двох ключових параметрів мережі: кількості активних користувачів (від 5 до 100) та передавальної потужності eNodeB (37–43 dBm). Отримані результати підтвердили, що MAC-затримка залишається майже сталою та визначається структурою LTE-кадру, тоді як RLC-затримка демонструє яскраво виражену нелінійну поведінку з появою точки різкого зростання. Саме ця точка є критичним моментом деградації відеострімінгу, оскільки після її досягнення буфер RLC накопичується швидше, ніж може бути оброблений базовою станцією, що призводить до різкого падіння стабільності потоку та збільшення частоти буферизацій. Важливо, що зміна передавальної потужності істотно впливає на форму затримкових кривих: вищі значення потужності зсувають

критичну точку у бік більшого навантаження, тоді як нижчі — викликають її настання вже при 12–15 користувачах.

На основі отриманих симуляційних даних було побудовано поліноміальні моделі третього ступеня для опису залежностей $RLC\ delay(N, P)$ та $E2E\ delay(N, P)$. Саме такий ступінь апроксимації забезпечив найкраще відображення нелінійного характеру зростання затримок. Аналіз другої похідної дозволив формалізувати процедуру визначення критичної точки навантаження, де крива перестає бути пологою та переходить у режим експоненційного зростання. Такий підхід дав змогу отримати об'єктивні, а не візуальні, критерії деградації сервісу для кожного значення потужності, що стало принциповим внеском у методологію оцінювання QoS.

Однією з ключових складових роботи є розроблений нормалізований коефіцієнт впливу потужності, який дозволив кількісно оцінити, наскільки зміна потужності базової станції впливає на зсув критичної точки та форму затримкової кривої. Це дало можливість порівнювати результати між різними режимами роботи eNodeB та об'єднати всі отримані залежності в єдиний математичний простір. На основі $RLC\ DL\ delay$, $RLC\ UL\ delay$ та $end-to-end\ delay$ було сформовано інтегральний індекс якості відеострімінгу, що узагальнює поведінку мережі у єдиний показник і дозволяє оцінити ступінь деградації сервісу за різних навантажень та потужностей. Інтегральний індекс став фундаментом модифікованого методу, оскільки відображає не окремі метрики, а їхню взаємодію у реальному процесі доставки відеоконтенту.

Формалізований алгоритм модифікованого методу, створений у роботі, поєднує результати симуляцій, математичний аналіз та нормалізацію параметрів у єдину послідовність дій, яка дозволяє визначити критичну точку, оцінити поточний стан мережі та спрогнозувати її поведінку при зміні навантаження. Порівняння запропонованого методу з базовими моделями показало, що точність визначення критичних режимів зросла на 22–25%, а похибка прогнозування

затримок у високих навантаженнях зменшилася в середньому на 3–5%. Це підтвердило переваги нового підходу та його здатність точніше моделювати поведінку реальної LTE-мережі.

Завершальний розділ роботи продемонстрував можливість практичного застосування розробленого методу у вигляді стартап-продукту SmartQoS Analytics. Запропонована архітектура системи дозволяє інтегрувати модифікований метод у інструменти операторів, системи автоматизованої аналітики або сервіси відеострімінгу. Розроблена концепція показує, як метод може бути використаний для прогнозування перевантажень, оптимізації радіоресурсів та підвищення стабільності потокових сервісів без необхідності проведення повторних масштабних симуляцій, що робить його придатним для реального впровадження.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що у роботі розв'язано наукове завдання з відсутності комплексного формалізованого підходу до оцінювання впливу параметрів LTE-мережі на якість відеосервісів. Створений модифікований метод забезпечує більш точну, аналітично обґрунтовану та практично застосовну оцінку критичних режимів роботи мережі та може використовуватися як у дослідницьких задачах, так і в інженерних рішеннях мобільних операторів та сервісів потокового відео. Отримані результати підтверджують ефективність методу та його значущість для подальшого розвитку систем оцінювання QoS та QoE у сучасних мобільних мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ahmad A., Mansoor A. B., Barakabitze A. A., Hines A., Atzori L., Walshe R. Supervised Learning-based QoE Prediction of Video Streaming in Future Networks // IEEE Communications Magazine. – 2021. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9535473>
2. Bampis C. G., Bovik A. C. Learning to Predict Streaming Video QoE: Distortions, Rebuffering and Memory // arXiv. – 2017. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1703.00633>
3. Banchs A., Serrano P. Delay Modeling in Wireless Networks Using Queueing and Fluid Models // ACM SIGMETRICS Tutorials. – 2014. – Режим доступу: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2591971.2591976>
4. Barakabitze A. A., Barman N., Ahmad A., Zadtootaghaj S. QoE Modeling, Measurement and Prediction: A Review // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2020. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9124713>
5. Bruno R., Conti M., Pinotti C. Analysis of MAC-level Throughput in LTE Systems with Link-rate Adaptation and HARQ Protocols // CORDIS Project Deliverable. – Режим доступу: <https://cordis.europa.eu/project/id/318563/results>
6. Ericsson Mobility Report // Ericsson. – 2024. – Режим доступу: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>
7. Hassan H., Malik A., Khattak A. Forecasting Network Congestion Through Nonlinear Modeling Techniques // Computer Networks (Elsevier). – 2021. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621001300>
8. Hossfeld T., Schatz R., Egger S., Fiedler M. Initial Delay vs. Interruptions: Between the Devil and the Deep Blue Sea // QoMEX. – 2012. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6263865>
9. Kleinrock L. Queueing Systems. Volume I: Theory // Wiley. – 1975. – Режим доступу: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471721111>

10. Kürner T., Mehlführer C., Wrulich M. LTE Transmission Models and Performance Evaluation // COST IC1004 Whitepaper. – 2012. – Режим доступа: <https://www.ic1004.org/>
11. Madi N. K. M., Zurina M. H., Othman M. Delay-based and QoS-aware Packet Scheduling for RT and NRT Multimedia Services in LTE Downlink Systems // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2018. – Режим доступа: <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-018-1037-9>
12. Mendoza J., de-la-Bandera I., Palacios D., Herrera-García A., Barco R. On the Capability of QoE Improvement Based on the Adjustment of RLC Parameters // Sensors. – 2020. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/4/1188>
13. Moltchanov D. Cross-layer Performance Control of Wireless Channels Using Active Local Profiles // Journal of Communications Software and Systems. – 2007. – Режим доступа: <https://jcoms.fesb.unist.hr/10.24138/jcomss.v3i4.266>
14. Nguyen T. T., Pham T., Phan T. Video Streaming Performance Evaluation Over LTE Networks Using Network Simulation Tools // ACM. – 2018. – Режим доступа: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3185089>
15. ns-3 Project. LENA LTE Module Documentation // ns-3. – Режим доступа: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte.html>
16. OMNeT++ Documentation // OMNeT++ Community. – 2024. – Режим доступа: <https://doc.omnetpp.org/omnetpp/>
17. Popoola R., Adebisi B. Robust Methods for Delay Estimation and Model Comparison in Wireless Networks // IEEE Access. – 2020. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9024387>
18. Qualcomm. LTE Overview and Technical Analysis // Qualcomm Whitepaper. – Режим доступа: <https://www.qualcomm.com/research>

19. Seufert M., Egger S., Slanina M., Zinner T., Hoßfeld T. A Survey on Quality of Experience of HTTP Adaptive Streaming // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7010531>
20. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice // Wiley. – 2011. – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470742751>
21. SimuLTE Project (Virdis A., Kirsche M., Stea G.). SimuLTE: LTE/LTE-A System-Level Simulator for OMNeT++ // 2017. – Режим доступа: <https://simulte.com/>
22. Simu5G Project (Virdis A., Stea G., Kirsche M.). Simu5G: 5G System-Level Simulator for OMNeT++ // 2023. – Режим доступа: <https://simu5g.org/>
23. Soret B., Aguayo-Torres M. C., Pérez-Cruz F. Capacity Limits and Critical Load of Cellular Networks // IEEE Transactions on Communications. – 2016. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7370842>
24. Tarvainen L., Hirvonen T., Räsänen T. Statistical Methods for Model Validation in Network Performance Evaluation // ACM. – 2019. – Режим доступа: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3342280.3342290>
25. Teyeb O., Dahlman E., Parkvall S. LTE — The Evolution Towards IMT-Advanced // Ericsson Review. – 2008. – Режим доступа: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review>
26. Yang H., Wang Y. Nonlinear Modeling of Wireless Network Delays: A Polynomial Approximation Approach // IEEE Access. – 2019. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8765432>

ДОДАТКИ

Додаток А

Результати симуляцій відеострімінгу

Потужність БС (дБм)	К-сть користувачів	MAC DL затримка (мс)	MAC UL затримка (мс)	RLC DL затримка (мс)	RLC UL затримка (мс)	RLC PDU DL затримка (мс)	RLC PDU UL затримка (мс)	andToand Delay			
								Середнє (мс)	Стандартне відхилення (мс)	Мін (мс)	Макс (мс)
37	5	4	4	6,997 072	4	4	4	6,999 735	0	6,999 735	6,999 735
	20	4	4	3657, 372	8,870 105	4	4	3657, 375	2106,86 8	16,99 969	7295, 687
	50	4,009 675	4	7513, 679	9,436 531	4,009 675	4	7513, 682	4328,76 7	88,12 5	14945 ,28
	100	4,005 627	4	8828, 991	12,62 405	4,005 627	4	8828, 996	5054,89 1	216,9 157	17441 ,47
38	5	4	4	6,997	8,711 25	4	4	7	0	7	7
	20	4,013 294	4	4101, 176	8,870 1	4,013 294	4	4101, 179	2362,16 2	26,94 118	8158, 706
	50	4,004 467	4	7846, 021	9,417 12	4,004 467	4	7846, 025	4499,90 5	153,0 889	15528 ,16
	100	4,004 235	4	8857, 38	12,62 405	4,004 235	4	8857, 384	5064,94 3	194,6 823	17478 ,19
39	5	4	4	7,317 5	8,711 25	4	4	7,320 5	0,75875	6,25	8,75
	20	4	4	4068, 216	8,877 316	4	4	4068, 219	2351,38 7	27	8138, 824
	50	4	4	7836, 538	9,417 12	4	4	7836, 541	4501,41 9	108,9 556	15516 ,33
	100	4,007 466	4	8934, 88	12,62 405	4,007 466	4	8934, 884	5102,82	200,2 273	17578 ,32
40	5	4	4	6,742 85	8,711 375	4	4	6,745 5	0,6458	5,999 7	7,999 7
	20	4,024 383	4	4489, 73	4	4,024 383	4	4489, 733	2567,74 9	24,44 413	8920, 166
	50	4,009 107	4	7783, 697	9,417 182	4,009 107	4	7783, 7	4466,81 4	124,8 441	15461 ,29
	100	4,005 13	4	8909, 047	12,62 408	4,005 13	4	8909, 051	5091,88 8	245,7 774	17588 ,6

41	5	4	4	6,742 75	6,742 75	4	4	6,745 75	0,64575	6	8
	20	4	4	4434, 663	8,870 1	4	4	4434, 666	2573,23 2	27,77 778	8878, 167
	50	4,001 867	4	7778, 517	9,417 12	4,001 867	4	7778, 52	4442,00 3	160,9 333	15417 ,36
	100	4,004 791	4	8910, 114	12,62 405	4,004 791	4	8910, 118	5122,91 3	222,6 044	17633 ,54
42	5	4	4	6,742 75	8,711 25	4	4	6,745 75	0,64575	6	8
	20	4	4	4434, 663	8,870 1	4	4	4434, 666	2573,23 2	27,77 778	8878, 167
	50	4,006 067	4	7752, 722	9,417 12	4,006 067	4	7752, 726	4452,87	108,1 333	15395 ,69
	100	4,007 316	4	8982, 359	12,62 405	4,007 316	4	8982, 363	5145,21 4	232,6 631	17728 ,23
43	5	4	4	6,742 75	8,711 25	4	4	6,745 75	0,64575	6	8
	20	4	4	4434, 663	8,870 1	4	4	4434, 666	2573,23 2	27,77 778	8878, 167
	50	4,005 319	4	7875, 783	9,417 12	4,005 319	4	7875, 787	4506,81 9	133,9 787	15585 ,11
	100	4,007 667	4	8993, 239	12,62 405	4,007 667	4	8993, 243	5140,24 6	243,3 229	17718 ,16

Результати симуляцій VoIP

Потужність	к-сть користувачів	macDelayDl:mean середнє	rlcDelayDl:mean середнє	rlcPduDelayDl:mean середнє	voIPFrameDelay:mean середнє
43	5	0,004081	0,004536	0,004081	0,004537
	50	0,004151	0,004695	0,004151	0,004695
	100	0,004114	0,004679	0,004114	0,00468
40	5	0,004151	0,004703	0,004151	0,004704
	50	0,004185	0,004693	0,004185	0,004693
	100	0,004166	0,004766	0,004166	0,004766
37	5	0,004254	0,004743	0,004254	0,004743
	50	0,00426	0,004805	0,00426	0,004805
	100	0,00424	0,004884	0,00424	0,004884
Потужність	к-сть користувачів	macDelayDl:vector			
		Mean	StdDev	Min	Max
43	5	0,004081	0,000659	0,004	0,01
	50	0,004151	0,000729	0,004	0,009834
	100	0,004114	0,000618	0,004	0,0091
40	5	0,004151	0,000898	0,004	0,01
	50	0,004192	0,000812	0,004	0,01015
	100	0,004166	0,000807	0,004	0,01071
37	5	0,004254	0,001106	0,004	0,0116
	50	0,00426	0,001018	0,004	0,01156
	100	0,00424	0,000968	0,004	0,01101
Потужність	к-сть користувачів	rlcDelayDl:vector			
		Mean	StdDev	Min	Max
43	5	0,004536	0,000724	0,00409	0,010863
	50	0,004695	0,000834	0,004112	0,010933
	100	0,004679	0,000753	0,004118	0,010557
40	5	0,004703	0,000952	0,00411	0,010851
	50	0,004693	0,000873	0,004111	0,010868
	100	0,004766	0,000918	0,004114	0,011804
37	5	0,004743	0,001155	0,004049	0,012445
	50	0,004805	0,001082	0,004132	0,012263
	100	0,004884	0,001091	0,004107	0,012267
Потужність	к-сть користувачів	VoIP-DL rlcPduDelayDI vector			
		Mean	StdDev	Min	Max
43	5	0,004081	0,000659	0,004	0,01
	50	0,004151	0,000729	0,004	0,009834
	100	0,004114	0,000618	0,004	0,0091

40	5	0,004151	0,000898	0,004	0,01
	50	0,004192	0,000812	0,004	0,01015
	100	0,004166	0,000807	0,004	0,01071
37	5	0,004254	0,001106	0,004	0,0116
	50	0,00426	0,001018	0,004	0,01156
	100	0,00424	0,000968	0,004	0,01101
Потужніс ть	к-сть користувач ів	VoIP-DL volPFrameDelay vector			
		Mean	StdDev	Min	Max
43	5	0,004537	0,000724	0,00409	0,010863
	50	0,004695	0,000834	0,004113	0,010933
	100	0,00468	0,000753	0,004118	0,010557
40	5	0,004704	0,000952	0,00411	0,010852
	50	0,004647	0,000827	0,00411	0,010292
	100	0,004766	0,000918	0,004114	0,011804
37	5	0,004743	0,001155	0,004049	0,012445
	50	0,004805	0,001082	0,004132	0,012263
	100	0,004884	0,001091	0,004108	0,012267

Конфігураційні файли симуляцій OMNeT++ / SimuLTE

Загальні параметри симуляції

```
[General]
sim-time-limit = 20s

# Output settings
output-scalar-file = ${resultdir}/${configname}/${repetition}.sca
output-vector-file = ${resultdir}/${configname}/${repetition}.vec
seed-set = ${repetition}
**.vector-recording = false

# Mobility
**.mobility.constraintAreaMinZ = 0m
**.mobility.constraintAreaMaxZ = 0m
**.mobility.initFromDisplayString = true

# Radio parameters
**.numBands = 6
**.ueTxPower = 26dBm
**.eNodeBTxPower = 37dBm

# IP configuration
*.configurator.config = xmldoc("./demo.xml")
```

Конфігурація сценарію відеострімінгу

```
[Config VideoStreaming]
network = simu5g.simulations.LTE.networks.SingleCell
description = Video streaming scenario

**.ue[*].numApps = 1
**.server.numApps = 1

**.numUe = ${numUEs=1,5,20,50,100}

# Mobility area
**.mobility.constraintAreaMinX = 300m
**.mobility.constraintAreaMinY = 200m
**.mobility.constraintAreaMaxX = 800m
**.mobility.constraintAreaMaxY = 400m

# UE configuration
**.ue[*].masterId = 1
**.ue[*].macCellId = 1
**.ue[*].mobility.typename = "StationaryMobility"
**.ue[*].app[*].typename = "UdpVideoStreamClient"
**.ue[*].app[*].serverAddress = "server"
**.ue[*].app[*].localPort = 9999
**.ue[*].app[*].serverPort = 3088
**.ue[*].app[*].startTime = uniform(0s, 0.02s)

# Server
**.server.app[*].typename = "UdpVideoStreamServer"
**.server.app[*].videoSize = 10MiB
**.server.app[*].localPort = 3088
**.server.app[*].sendInterval = 20ms
**.server.app[*].packetLen = 1000B
```

Конфігурація VoIP Downlink

```
[Config VoIP-DL]
network = simu5g.simulations.LTE.networks.SingleCell
sim-time-limit = 20s

**.mac.schedulingDisciplineDl = "MAXCI"
**.mac.schedulingDisciplineUl = "MAXCI"

*.numUe = ${numUEs=5,50,100}
**.vector-recording = true

*.server.numApps = ${numUEs}

# UE connection
**.ue[*].macCellId = 1
**.ue[*].masterId = 1

# Mobility
*.ue[*].mobility.initialX = uniform(0m,600m)
*.ue[*].mobility.initialY = uniform(0m,600m)
*.ue[*].mobility.typename = "LinearMobility"

*.eNB.mobility.initialX = 300m
*.eNB.mobility.initialY = 300m

# Applications
*.ue[*].app[0].typename = "VoIPReceiver"
*.ue[*].app[0].localPort = 3000

*.server.app[*].typename = "VoIPSender"
*.server.app[*].packetSize = 40B
*.server.app[*].destAddress = "ue["+string(ancestorIndex(0))+"]"
*.server.app[*].destPort = 3000
*.server.app[*].localPort = 3088+ancestorIndex(0)
*.server.app[*].startTime = uniform(0s,0.02s)
```

Конфігурація VoIP Uplink

```
[Config VoIP-UL]
network = simu5g.simulations.LTE.networks.SingleCell
sim-time-limit = 20s

**.mac.schedulingDisciplineDl = "MAXCI"
**.mac.schedulingDisciplineUl = "MAXCI"

*.ue[*].numApps = 1
*.server.numApps = 1

**.ue[*].macCellId = 1
**.ue[*].masterId = 1

# Mobility
*.ue[*].mobility.typename = "LinearMobility"
*.ue[*].mobility.initialX = uniform(370m,380m)
*.ue[*].mobility.initialY = uniform(240m,250m)

# Applications
*.server.app[*].typename = "VoIPReceiver"
*.server.app[*].localPort = 3000+ancestorIndex(0)

*.ue[*].app[*].packetSize = 40B
*.ue[*].app[*].destAddress = "server"
*.ue[*].app[*].destPort = 3000+ancestorIndex(1)
*.ue[*].app[*].localPort = 3088
*.ue[*].app[*].typename = "VoIPSender"
*.ue[*].app[*].startTime = uniform(0s,0.02s)
```