**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

## на тему: «Метод забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*



(підпис) Микита ФАДЄЄВ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-61
Микита ФАДЄЄВ

Керівник: Наталія РУДЕНКО

Рецензент: О. Войтович

Київ – 2024

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Навчально-науковий інститут телекомунікацій**

| | |
|---|---|
| Кафедра | Мобільних та відеоінформаційних технологій |
| Ступінь вищої освіти | Магістр |
| Спеціальність | 172 Електронні комунікації та радіотехніка |
| Освітньо-професійна програма | Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення |

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
«  » _____ 2024 року

# ЗАВДАННЯ
# НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Фадєєву Микиті Олексійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Метод забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку»,
керівник кваліфікаційної роботи Наталія РУДЕНКО, к.т.н., доцент,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 15.10.2024 р. №320.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Мережі мобільного зв'язку.
   2. Quality of Service для VoLTE.
   3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Мережі мобільного зв'язку на основі технології LTE;
   2. Методи забезпечення Quality of Service в галузі телекомунікацій;
   3. Методи забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку;

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1. | Підбір науково-технічної літератури | 26.10.24 | Викон. |
| 2. | Мережі мобільного зв'язку на основі технології LTE | 29.10.24 | Викон. |
| 3. | Методи забезпечення Quality of Service в галузі телекомунікацій | 01.12.24 | Викон. |
| 4. | Методи забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку | 02.11.24 | Викон. |
| 5. | Висновки, вступ, реферат | 11.12.24 | Викон. |
| 6. | Розробка презентації | 25.12.24 | Викон. |

**Здобувач вищої освіти** _____ Микита ФАДЄЄВ
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

**Керівник кваліфікаційної роботи** _____ Наталія РУДЕНКО
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

**ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА**

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Фадєєва Микити Олексійовича

на тему: «Метод забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку»

**Актуальність:**

Актуальність теми обумовлена необхідністю забезпечення високої якості голосового зв'язку в сучасних мобільних мережах, де VoLTE (Voice over LTE) є основною технологією для передачі голосу. Методи забезпечення Quality of Service (QoS) включають застосування механізмів пріоритезації трафіку, управління чергами, динамічного розподілення ресурсів та використання протоколу IMS для забезпечення низьких затримок і високої надійності. Це дозволяє гарантувати якісне голосове спілкування навіть в умовах високого навантаження на мережу.

**Позитивні сторони:**

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показала високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.

2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

**Недоліки:**

1. У таблиці 1.2 варто додати порівняння функціональних особливостей EPC та RAN для кращого розуміння їхніх ролей у забезпеченні QoS.

2. Розширити аналіз впливу кожного параметра QoS (затримка, джиттер, втрата пакетів) на критично важливі додатки, такі як VoLTE, з прикладами їх вимог.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

**Висновок:** кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Фадєєв Микита Олексійович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

**Рецензент:** _____

*(науковий ступінь, вчене звання)* *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
**Навчально-науковий інститут телекомунікацій**

**ПОДАННЯ**
**ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ**
**ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**
**на здобуття освітнього ступеня магістра**

Направляється здобувач Фадєєв М.О. до захисту кваліфікаційної роботи
*(прізвище та ініціали)*

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Метод забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

В.о. директора ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

**Висновок керівника кваліфікаційної роботи**

Здобувач Фадєєв Микита Олексійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Фадєєва Микити Олексійовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Наталія РУДЕНКО
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

“ ” _____ 2024 року

**Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу**

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Фадєєв М.О.
*(прізвище та ініціали)*

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедрою
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

“ ” _____ 2024 року

# РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 78 стор., 9 рис., 7 табл., 41 дж.

*Метою роботи* є дослідження методів забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку.

*Об'єктом дослідження* є процес передачі даних в мережах LTE.

*Предметом дослідження* є методи забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку.

*Короткий зміст роботи*: У першому розділі проаналізовано еволюцію мобільного зв'язку від 1G до 4G LTE, підкреслено ключові технологічні досягнення, які сприяли розвитку мереж та розширенню їх застосувань. У розділі розглянуто проблеми забезпечення VoLTE, включаючи затримки, втрати пакетів та їхній вплив на якість зв'язку.

У другому розділі запропоновано систематизований підхід до забезпечення параметрів Quality of Service (QoS) у телекомунікаційних мережах. Описано вплив ключових параметрів (затримка, джиттер, втрата пакетів, пропускна здатність) на якість обслуговування та запропоновано методи їх оптимізації. Розглянуто механізми управління трафіком, зокрема пріоритизацію, обмеження пропускної здатності та адаптивне управління ресурсами. Таблиці та графіки ілюструють залежність між параметрами QoS та їхнім впливом на стабільність мережі.

У третьому розділі розроблено інноваційний підхід до забезпечення QoS для VoLTE. Розглянуто роль QCI (QoS Class Identifier) у пріоритизації голосового трафіку, наведено класи QCI з характеристиками, що демонструють вплив на затримки та якість викликів. Порівняння аудіокодека EVS із іншими кодеками виявило його переваги для VoLTE. Висвітлено технологічні вимоги до QoS, такі як APN-AMBR та E2E QoS, які забезпечують стабільний голосовий зв'язок у складних мережевих умовах.

Розділ підтвердив ефективність запропонованих підходів, акцентуючи увагу на оптимізації ресурсів і забезпеченні високої якості послуг для сучасних телекомунікаційних систем.

*КЛЮЧОВІ СЛОВА:* 1G, 4G, LTE, VOLTE, QUALITY OF SERVICE, APN-AMBR, EVS.

## ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 78 pages, 13 pictures, 7 table, 41 sources.

*The purpose* of the work is to research the methods of ensuring Quality of Service for VoLTE in modern mobile communication networks.

*The object* of the research is the process of data transmission in LTE networks.

*The subject* of the research is methods for ensuring Quality of Service for VoLTE in modern mobile communication networks.

*Summary of the work:* The first section analyzes the evolution of mobile communication from 1G to 4G LTE, highlights key technological achievements that contributed to the development of networks and the expansion of their applications. The section considers the problems of ensuring VoLTE, including delays, packet loss and their impact on the quality of communication.

The second section proposes a systematic approach to ensuring Quality of Service (QoS) parameters in telecommunication networks. The impact of key parameters (delay, jitter, packet loss, bandwidth) on the quality of service is described and methods for their optimization are proposed. Traffic management mechanisms are considered, in particular, prioritization, bandwidth limitation and adaptive resource management. Tables and graphs illustrate the relationship between QoS parameters and their impact on network stability.

The third section develops an innovative approach to providing QoS for VoLTE. The role of QCI (QoS Class Identifier) in prioritizing voice traffic is considered, QCI classes with characteristics that demonstrate the impact on delays and call quality are presented. Comparison of the EVS audio codec with other codecs revealed its advantages for VoLTE. Technological requirements for QoS, such as APN-AMBR and E2E QoS, which provide stable voice communication in difficult network conditions, are highlighted.

The section confirmed the effectiveness of the proposed approaches, focusing on resource optimization and ensuring high quality of services for modern telecommunication systems.



*KEYWORDS:* 1G, 4G, LTE, VOLTE, QUALITY OF SERVICE, APN-AMBR, EVS.

**ЗМІСТ**

ВСТУП ..... 9
РОЗДІЛ 1. МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LTE . 11
1.1. Еволюція мереж мобільного зв'язку: від 1G до 4G LTE ..... 11
1.2. Основні архітектурні компоненти мереж мобільного зв'язку на основі технології LTE ..... 20
1.3. Технологічні проблеми LTE у контексті підтримки VoLTE ..... 28
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ QUALITY OF SERVICE В ГАЛУЗІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ..... 37
2.1. Поняття Quality of Service та його роль у телекомунікаціях ..... 37
2.2. Ключові параметри QoS: затримка, джиттер, втрата пакетів, пропускна здатність ..... 41
2.3. Методи управління трафіком для забезпечення QoS ..... 47
2.4. Механізми пріоритезації та класифікації трафіку ..... 53
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ QUALITY OF SERVICE ДЛЯ VOLTE В СУЧАСНИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ..... 58
3.1. Критерії QoS та параметри передачі, що впливають на якість голосового трафіку ..... 58
3.2. Дослідження ефективності аудіокодека Enhanced Voice Services (EVS) для використання у VoLTE ..... 69
ВИСНОВКИ ..... 76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ..... 79
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ..... 83

# ВСТУП

Технологія LTE (Long-Term Evolution) стала ключовою складовою сучасних мобільних мереж і відіграє важливу роль у розвитку інформаційного суспільства. В умовах глобальної цифровізації та зростання попиту на швидкісний мобільний інтернет, LTE забезпечує високоякісну передачу даних, яка необхідна для функціонування багатьох сфер життя. Від бізнесу та освіти до охорони здоров'я та розваг – LTE стала технологічною основою для інновацій, що сприяють розвитку суспільства.

Актуальність технології LTE зумовлена її технічними перевагами, такими як висока швидкість передачі даних, низька затримка та підтримка широкого спектра пристроїв і додатків. Завдяки цьому LTE є критично важливою для забезпечення якісного зв'язку в міських, сільських та віддалених регіонах, сприяючи подоланню цифрового розриву. Крім того, LTE є платформою для впровадження сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), телемедицина, розумні міста та системи відеоспостереження.

Роль LTE у суспільстві також полягає у створенні умов для економічного зростання та інноваційного розвитку. Вона стимулює розвиток цифрової економіки, сприяє підвищенню ефективності виробництва та покращує якість життя людей, забезпечуючи доступ до інформації та послуг у будь-який час і в будь-якому місці.

Таким чином, LTE є не лише інструментом для забезпечення зв'язку, але й фундаментом для створення нових можливостей у цифровому світі. Її вплив на суспільство та економіку продовжує зростати, що підтверджує актуальність дослідження цієї технології та пошуку шляхів її подальшого вдосконалення.

З розвитком мобільних мереж четвертого покоління (4G) і впровадженням технології VoLTE (Voice over LTE) з'явилися нові можливості для надання голосових послуг на основі пакетної передачі даних. VoLTE забезпечує значно вищу якість голосу в порівнянні з традиційними голосовими послугами у мережах 2G і 3G, а також дозволяє одночасно передавати голосові дані і використовувати

інтернет без переривання. Однак для забезпечення стабільної якості послуг (QoS) в сучасних мережах мобільного зв'язку необхідно враховувати різні технічні виклики, пов'язані з управлінням трафіком, затримками та стабільністю з'єднання.

Забезпечення високої якості обслуговування (Quality of Service, QoS) є важливим аспектом функціонування VoLTE, оскільки навіть незначні затримки чи втрати пакетів можуть негативно вплинути на якість голосових викликів. Тому дослідження ефективності використання VoLTE у сучасних мобільних мережах потребує детального аналізу механізмів забезпечення QoS, таких як управління чергами, пріоритезація трафіку та оптимізація мережевих ресурсів.

Метою даної роботи є дослідження ефективності використання технології VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку з урахуванням вимог до якості обслуговування. У рамках дослідження буде проведено аналіз існуючих підходів до забезпечення QoS для VoLTE, вивчено вплив мережевих параметрів на якість голосових викликів та запропоновано нові методи оптимізації роботи VoLTE для покращення якості послуг у сучасних мережах мобільного зв'язку.

**Метою роботи** є дослідження методів забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку.

**Об'єктом дослідження** є процес передачі даних в мережах LTE.

**Предметом дослідження** є методи забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку.

# РОЗДІЛ 1. МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LTE

## 1.1. Еволюція мереж мобільного зв'язку: від 1G до 4G LTE

Передумови створення перших поколінь мобільного зв'язку були закладені ще в 1980-х роках, коли з'явилася перша генерація мобільних мереж, як 1G [1] (рис. 1.1). Ці мережі дозволяли лише голосові дзвінки та використовували аналогову технологію для передачі звукових сигналів [2]. Перші системи 1G працювали на основі клітинної структури, що забезпечувало обслуговування користувачів на коротких відстанях без можливості передачі даних. Це лише початок еволюції мобільного зв'язку, яка незабаром трансформується в цифрову еру, що поклало початок новим стандартам і технологіям зв'язку, що значно розширює можливості мобільного зв'язку.

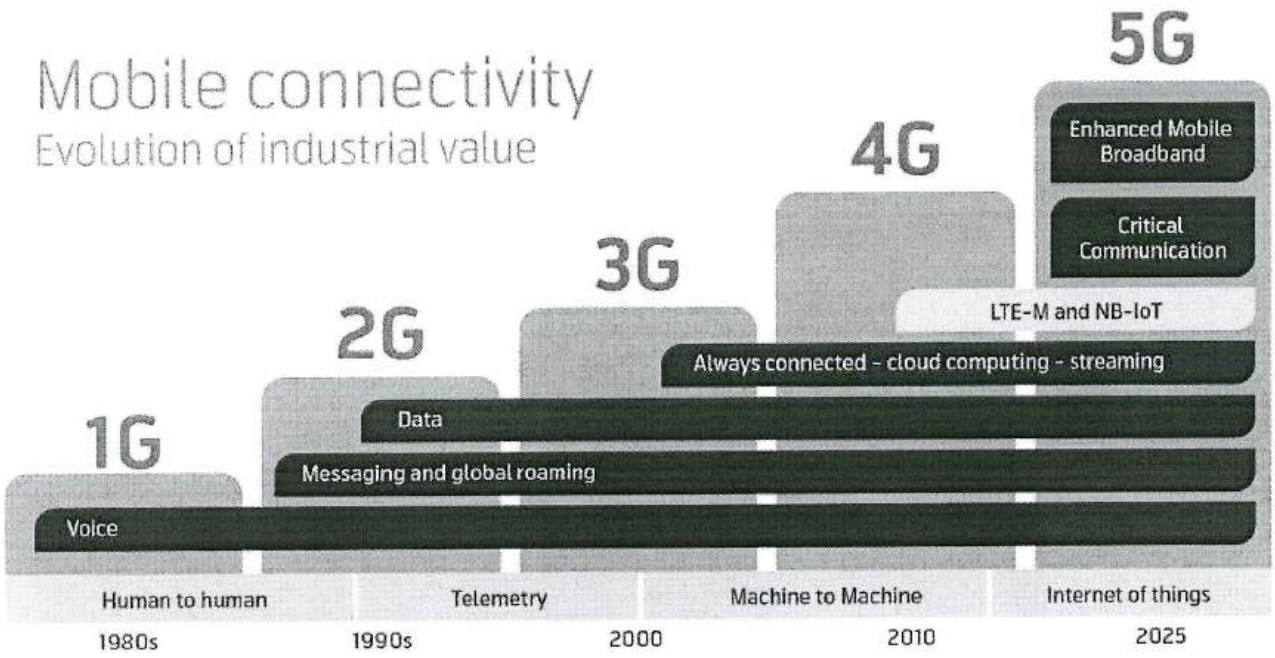



Рис. 1.1. Еволюція мереж мобільного зв'язку

Основні етапи еволюції від 1G до 4G включають також технологічні зміни, які стали в наступне десятиліття [3]. Після 1G у 1991 році з'явилася друга генерація

(2G), яка впровадила цифрові технології та дозволила передавати голосові дзвінки з використанням шифрування даних [1]. З роком, у 2001 році, з'явилася третя генерація (3G), яка значно підвищила швидкість передачі даних до 42 Мбіт/с і дозволила передавати мультимедійний контент [4]. Нарешті, четверте покоління (4G), що стало доступним на початку 2010-х років, забезпечило ще більшу швидкість передачі даних, яка перевищувала 1 Гбіт/с [5] (табл. 1.1.). Ці етапи розвитку відзначені лише покращенням можливостей якості зв'язку, а й появою нових систем для мобільних додатків та послуг.

Вплив технологічних проривів на розвиток мобільного зв'язку був величезним, останній шкірного нового покоління приніс із собою суттєві вдосконалення [6]. Таким чином, перехід від аналогових до цифрових технологій в 2G дозволив не лише знизити рівень шуму під час дзвінків, але й підвищити безпеку передачі даних [1]. Крім того, 3G відкриває нові горизонти для мобільного Інтернету, що дозволяє користувачам отримувати доступ до високошвидкісних даних у будь-який час і в будь-якому місці [6]. Сьогодні, завдяки еволюції до 4G, ми можемо насолоджуватися потоковим відео, онлайн-іграми та багатьма іншими інноваційними технологіями, які стали невід'ємною частиною сучасного життя [5].

Особливості мереж першого покоління (1G)

Перше покоління мереж мобільного зв'язку, відоме як 1G, характеризувалося своєю аналоговою природою [7]. Ці мережі, запущені на початку 1980-х років, насамперед сприяли голосовому спілкуванню на короткій відстані. На відміну від своїх цифрових наступників, мережі 1G передавали голосові сигнали в аналоговому форматі, що обмежувало чіткість і надійність дзвінків. Цей аналоговий підхід означав, що користувачі відчували значні перешкоди та нижчу якість звуку під час розмов, що було типовою проблемою на той час [8]. Простота технології заклала основу для наступних удосконалень, але вона також підкреслила обмеження, властиві аналоговим системам зв'язку.

Таблиця 1.1.

Порівняння поколінь мобільного зв'язку від 1G до 4G

| Покоління | Рік впровадження | Технологія передачі | Максимальна швидкість передачі даних | Послуги | Переваги | Недоліки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1G | 1980-ті | Аналогова | До 2.4 кбіт/с | Голосовий зв’язок | Перше впровадження мобільного зв’язку | Низька якість звуку, обмежена зона покриття |
| 2G | 1990-ті | Цифрова (GSM) | До 64 кбіт/с | Голосовий зв’язок, SMS | Надійність, можливість текстових повідомлень | Низька швидкість передачі даних |
| 3G | 2000-ті | Цифрова (UMTS, CDMA2000) | До 2 Мбіт/с | Голосовий зв’язок, SMS, Інтернет | Мультимедійні послуги, швидший інтернет | Відносно висока затримка |
| 4G (LTE) | 2010-ті | Цифрова (OFDM, MIMO) | До 1 Гбіт/с (теоретично) | Голосовий зв’язок (VoLTE), Інтернет, Відео | Висока швидкість, низька затримка, підтримка VoIP | Високі вимоги до інфраструктури |

Архітектура та стандарти мереж 1G були досить рудиментарними порівняно з пізнішими поколіннями [9]. Ці мережі зазвичай використовували множинний доступ з частотним поділом каналів (FDMA) для виділення каналів для зв'язку, що дозволяло кільком користувачам спільно використовувати одну частотну смугу без перешкод. Однак цей метод мав свої недоліки, включаючи обмежену ємність і погані функції безпеки. Перше покоління в основному підтримувало лише голосові дзвінки, що означало, що користувачі не могли надсилати текстові повідомлення або отримувати доступ до служб передачі даних, що ще більше підкреслювало простоту та обмеження технології [10]. У результаті, хоча мережі 1G відзначили значний крок вперед у мобільному зв'язку, вони швидко були затьмарені можливостями цифрових мереж, які з'явилися за ними.

Незважаючи на новаторську роль, мережа 1G мала кілька серйозних недоліків і обмежень [6]. Однією з основних проблем була відсутність масштабованості; у міру збільшення кількості користувачів перевантаження мережі стало загальною проблемою, що призвело до переривання дзвінків і низької якості дзвінків. Крім того, аналоговий характер мережі зробив її сприйнятливою до прослуховування та інших уразливостей безпеки, що викликало занепокоєння щодо конфіденційності користувачів. Крім того, географічні обмеження технології 1G означали, що покриття часто було нерівним, особливо в сільській чи менш розвиненій місцевості [1]. Отже, ці недоліки проклали шлях для розробки більш досконалих технологій мобільного зв'язку, які прагнули усунути обмеження 1G, одночасно покращуючи досвід роботи та функціональність.

Революція цифрових технологій у мережах другого покоління (2G)

Перехід від аналогового до цифрового зв'язку ознаменував важливу віху в мережах мобільного зв'язку, кульмінацією якої став розвиток технології другого покоління (2G) [1]. З'явившись на початку 1990-х років, 2G не лише революціонізував спосіб здійснення дзвінків, але й покращив якість передачі голосу завдяки застосуванню цифрових методів передачі даних [11]. Ця зміна дозволила підвищити безпеку та надійність зв'язку, оскільки телефонні розмови стали шифруватися за допомогою цифрових методів шифрування [3]. У результаті

користувачі відчули чіткіші дзвінки, зменшили перешкоди та підвищили загальну задоволеність мобільними послугами.

Запровадження стандарту Глобальної системи мобільного зв'язку (GSM) відіграло ключову роль у створенні мереж 2G [1]. GSM став наріжним каменем мобільного зв'язку, забезпечивши взаємодію між різними пристроями та мережами. Запроваджений у 1992 році, цей стандарт забезпечив операторам мобільного зв'язку основу для більш ефективного та послідовного надання послуг [11]. Широке впровадження GSM полегшило не лише голосові дзвінки, але й заклало основу для наступних інновацій, змінивши ландшафт мобільного зв'язку. Це дозволило різним операторам легко підключати користувачів, сприяючи конкуренції та сприяючи покращенню пропозицій послуг у всіх сферах.

Одним із найпомітніших досягнень мереж 2G було впровадження нових послуг, включаючи текстові повідомлення та базовий мобільний доступ до Інтернету [1]. Можливість надсилання текстів служби коротких повідомлень (SMS) зробила революцію в спілкуванні, дозволяючи користувачам швидко й ефективно передавати інформацію без потреби в голосових дзвінках [11]. Крім того, мережі 2G забезпечили основу для перших послуг мобільного Інтернету, познайомивши користувачів з концепцією перегляду веб-сторінок на своїх мобільних пристроях. Ця основа врешті-решт прокладе шлях для більш розширених служб передачі даних для майбутніх поколінь, оскільки споживачі все більше прагнуть зв'язку та доступу до інформації в дорозі.

Вдосконалення третього покоління (3G)

Третє покоління мобільного зв'язку, відоме як 3G, запровадило значні досягнення в стандартах і функціях, насамперед через UMTS (Універсальну систему мобільного зв'язку) і CDMA2000 [10]. Ці стандарти дозволили розширити можливості передачі даних порівняно з їхніми попередниками, знаменуючи кардинальний зсув у мобільних технологіях. Стандарт UMTS спеціально дозволяв швидкість передачі даних до 384 Кбіт/с, що було суттєвим покращенням у порівнянні з мережами 2G. Ця еволюція сприяла інтеграції різноманітних послуг,

у тому числі відеодзвінків і мобільного Інтернету, створюючи основу для більш інтерактивного та привабливого мобільного досвіду.

Одним із найбільш помітних досягнень технології 3G було різке збільшення швидкості передачі даних [12]. У той час як мережі 2G пропонували максимальну швидкість 384 Кбіт/с, мережі 3G значно розширили цю можливість, досягнувши швидкості до 42 Мбіт/с завдяки вдосконаленням, таким як технології HSDPA та HSDPA+ [10]. Цей стрибок у швидкості не лише покращив якість голосових дзвінків, але й змінив спосіб взаємодії користувачів із мобільними пристроями. Висока швидкість передачі даних дозволила передавати потоковий мультимедійний вміст, брати участь у спілкуванні в реальному часі та отримувати доступ до інформації в дорозі, тим самим змінюючи очікування та поведінку користувачів у мобільному зв'язку.

Поширення мобільного Інтернету та мультимедійних послуг стало визначальною рисою ери 3G [1]. Коли мобільні мережі перейшли на 3G, користувачі отримали безпрецедентний доступ до різноманітних онлайн-сервісів, включаючи соціальні мережі, потокове відео та онлайн-ігри. Ця зміна сприяла підвищенню попиту на мобільні пристрої, які могли б ефективно працювати з багатим мультимедійним вмістом. Наявність високошвидкісного Інтернету на мобільних пристроях змінила повсякденну діяльність, дозволивши користувачам обмінюватися досвідом у режимі реального часу, миттєво отримувати доступ до інформації та насолоджуватися можливостями розваг, які раніше були зарезервовані для настільних комп'ютерів. Отже, мережі 3G заклали основу розгалуженої мобільної екосистеми, яку ми маємо сьогодні.

Поява четвертого покоління (4G LTE)

Поява четвертого покоління мобільного зв'язку, відомого як 4G LTE, ознаменувала важливу віху в еволюції бездротових технологій [1]. Запущений у 2009 році 4G LTE був розроблений з кількома ключовими характеристиками, спрямованими на покращення взаємодії з користувачем і розширення спектру доступних послуг. Однією з головних цілей 4G було забезпечення вищої швидкості передачі даних, дозволяючи користувачам насолоджуватися безперебійним

потоковим передаванням, швидшими завантаженнями та покращеним загальним підключенням [1]. Крім того, мережі 4G мали на меті підтримувати більш широкий спектр додатків, включаючи відеоконференції високої чіткості та ігри в реальному часі, таким чином задовольняючи зростаючий попит на послуги мобільного широкосмугового зв'язку. Ця зміна не лише покращила особисте спілкування, але й сприяла розвитку різноманітних галузей, надаючи ефективніші мобільні послуги.

Критичним технологічним прогресом у 4G LTE є використання технологій мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM) і технологій MIMO [13]. OFDM дозволяє ефективно використовувати доступну смугу пропускання, розділяючи сигнал на кілька підсигналів, які можуть передаватися одночасно на різних частотах, таким чином збільшуючи ємність даних і зменшуючи перешкоди [13]. Подібним чином технологія MIMO використовує кілька антен як на стороні передавача, так і на приймачі, підвищуючи пропускну здатність даних і надійність з'єднання. Комбінація цих технологій значно підвищує загальну продуктивність мереж LTE, забезпечуючи більш високу швидкість передачі даних і покращений досвід користувача порівняно з попередніми поколіннями, такими як 2G і 3G [14].

Впровадження LTE також сильно вплинуло на якість обслуговування користувачів [1]. Завдяки своїй здатності підтримувати більш високу швидкість передачі даних і підвищену надійність мережі, мережі LTE проклали шлях до покращеного досвіду роботи з різними програмами. Наприклад, користувачі повідомили про плавніше потокове відео, швидше завантаження файлів і більш надійне з'єднання під час голосових викликів [1]. Крім того, розширені мережеві можливості LTE дозволили постачальникам послуг реалізувати більш ефективне управління ресурсами та балансування навантаження, ще більше підвищуючи якість послуг. У результаті перехід на 4G LTE не тільки змінив мобільний зв'язок, але й заклав основу для наступного покоління мобільних мереж, включаючи 5G, яка обіцяє ще більш помітні досягнення в підключенні та наданні послуг.

Порівняння поколінь 2G, 3G та 4G за ключовими параметрами

Один із найбільш значних досягнень у мережах мобільного зв'язку можна спостерігати в області пропускної здатності та швидкості передачі даних між поколіннями [15]. Мережі 2G, розроблені в 1991 році, пропонували швидкість передачі даних від 9,4 кбіт/с до 384 кбіт/с, що було достатньо для базових голосових дзвінків і обмеженого обміну текстовими повідомленнями [16]. Навпаки, мережі 3G, запроваджені в 2001 році, кардинально змінили ситуацію, забезпечуючи швидкість до 42 Мбіт/с, дозволяючи користувачам більш ефективно отримувати доступ до послуг мобільного Інтернету [15]. Перехід до 4G LTE, запущений у 2009 році, приніс швидкість передачі даних, яка перевищує швидкість 3G у 200-500 разів, досягаючи 1 Гбіт/с [5]. Це різке збільшення пропускної здатності сприяло розробці мультимедійних додатків, потокових служб і високошвидкісного перегляду Інтернету, що значно покращило взаємодію з користувачем.

На додаток до швидкості, затримка та стабільність з'єднання є ключовими параметрами, які відрізняють покоління мобільних мереж [17]. Мережі 2G зазвичай мають вищу затримку, що робить їх менш придатними для додатків у реальному часі. З появою технології 3G затримка значно покращилася, що дозволило підвищити продуктивність мобільного веб-перегляду та відеодзвінків [17]. Однак саме мережі 4G LTE зробили справжню революцію в стабільності з'єднання та затримці, запропонувавши зменшені рівні затримки приблизно на 30-50 мілісекунд [1]. Це вдосконалення забезпечило безперебійну роботу з програмами, які вимагають взаємодії в режимі реального часу, такими як онлайн-ігри та відеоконференції, що робить 4G кращим вибором для користувачів, які шукають надійне з'єднання.

Розвиток мобільного зв'язку також призвів до розширеної підтримки інноваційних послуг, таких як голос через IP (VoIP) і голос через LTE (VoLTE) [1]. Хоча 2G в основному зосереджувався на голосових дзвінках і SMS, впровадження 3G заклало основу для мультимедійних послуг і доступу до Інтернету, хоча й з обмеженнями в якості голосу для Інтернет-дзвінків [6]. З 4G LTE ландшафт кардинально змінився, оскільки це покоління було розроблено для повної

підтримки високоякісних послуг VoIP і VoLTE, дозволяючи користувачам здійснювати голосові дзвінки через ту саму мережу, яка використовується для передачі даних [5]. Ця інтеграція не тільки покращила якість зв'язку, але й оптимізувала ефективність мережі, забезпечивши одночасний доступ до голосових послуг і послуг даних без шкоди для продуктивності, таким чином відображаючи значні досягнення в поколіннях.

Еволюційний вплив LTE на сучасні телекомунікаційні технології

LTE значно розширив можливості для впровадження мереж 5G, створивши основу, на якій може будуватися наступне покоління [1]. Удосконалення технології LTE заклало основу для вищої швидкості передачі даних, покращеної надійності та ширшого спектру послуг, які мають вирішальне значення для вимог 5G [17]. Оскільки мережі 5G розроблені, вони прагнуть забезпечити пропускну здатність у десять разів більшу, ніж у 4G, що значно покращує роботу користувачів у різних програмах. Ця еволюція не тільки покращує мобільний зв'язок, але й прокладає шлях для інноваційних технологій і послуг, таких як Інтернет речей (IoT) і рішення для розумних міст, які вимагають надійного та високошвидкісного підключення.

Адаптація LTE до нових потреб ринку та вимог користувачів стала критичним фактором його успіху [18]. Зі зміною очікувань споживачів мережі LTE зазнали вдосконалень, які дозволили їм підтримувати різноманітні пристрої та програми. Наприклад, більш просунуті технології кодування зробили LTE на 30% ефективнішим у передачі даних у тому самому частотному діапазоні [19]. Крім того, LTE охопив нові діапазони частот, щоб пристосуватись до зростаючої кількості користувачів і пристроїв, забезпечуючи безперебійний зв'язок навіть у перевантажених середовищах. Ця адаптивність позиціонує LTE як життєво важливого гравця на телекомунікаційному ландшафті, дозволяючи йому задовольняти зростаючі потреби як споживачів, так і підприємств.

Заглядаючи вперед, інтеграція LTE з іншими комунікаційними технологіями має багатообіцяючі перспективи для майбутнього телекомунікацій [1]. Така конвергенція може призвести до більш ефективних мереж, які використовують сильні сторони різних технологій, підвищуючи загальну продуктивність і досвід

користувача. Наприклад, поєднання LTE з Wi-Fi 6 може сприяти швидшому та надійнішому з'єднанню, особливо в міських умовах, де вимоги до з'єднання високі [20]. Крім того, оскільки технологія 5G продовжує розвиватися, її інтеграція з LTE буде важливою для забезпечення плавного переходу та забезпечення того, щоб користувачі могли скористатися розширеними функціями обох поколінь. Ця синергія зрештою сприятиме інноваціям і зростанню в телекомунікаційній галузі, забезпечуючи надання послуг і програм нового покоління.

## 1.2. Основні архітектурні компоненти мереж мобільного зв'язку на основі технології LTE

Архітектура мереж LTE принципово розділена на два основні компоненти: мережу радіодоступу (RAN) і базову мережу [1]. RAN відповідає за полегшення бездротового зв'язку між мобільними пристроями та мережею, тоді як базова мережа керує маршрутизацією даних, наданням послуг і загальним керуванням мережею. Зокрема, RAN складається з eNodeB (розвинутий вузол B), які функціонують як базові станції, що підключають обладнання користувача до мережі LTE. На відміну від цього, базова мережа складається з кількох ключових елементів, включаючи обслуговуючий шлюз (SGW), мережевий шлюз пакетної передачі даних (PGW) і об'єкт керування мобільністю (MME). Цей поділ забезпечує оптимізовану продуктивність і гнучкість в управлінні мережевими ресурсами, значно покращуючи досвід мобільного зв'язку (рис. 1.2).

Принципи роботи мереж LTE зосереджені навколо ефективної передачі даних, низької затримки та високої пропускної здатності [2]. LTE використовує передові технології, такі як мультиплексування з ортогональним частотним розподілом (OFDM) для передачі по низхідній лінії зв'язку, що покращує спектральну ефективність і дозволяє краще керувати радіосигналами в різних умовах. Крім того, використання технології Multiple Input Multiple Output (MIMO) підвищує швидкість передачі даних за рахунок використання кількох антен як на

стороні передавача, так і на приймачі. Ці функції гарантують, що LTE може підтримувати широкий спектр програм і послуг, від простих голосових дзвінків до потокового відео високої чіткості, таким чином задовольняючи зростаючі вимоги мобільних користувачів.

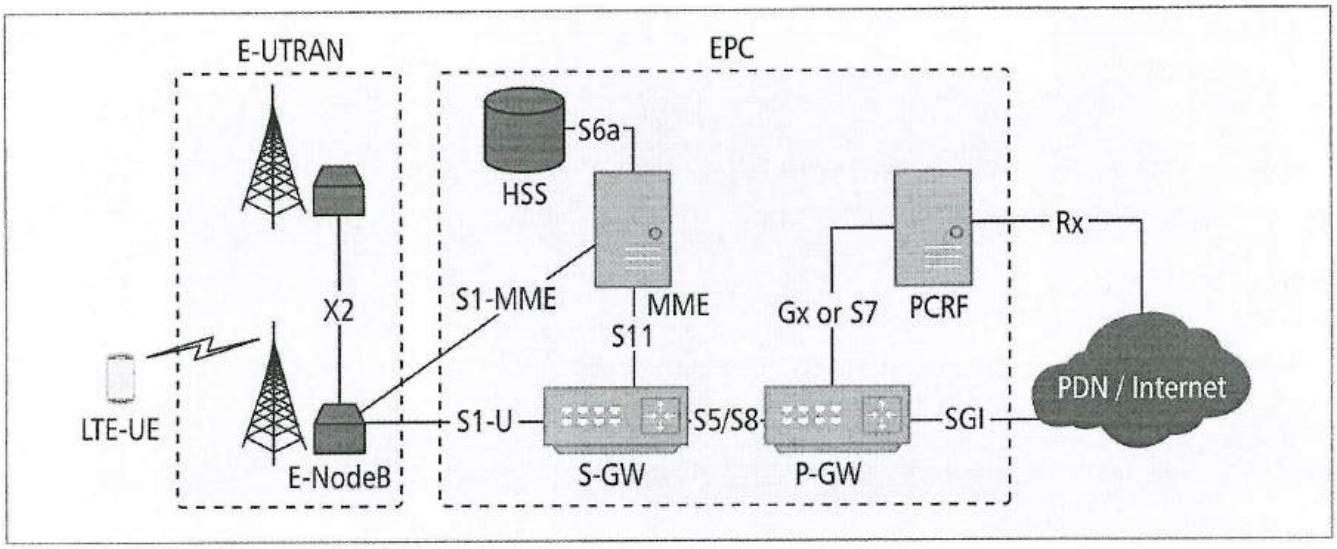



Рис. 1.2. Архітектура мереж LTE: E-UTRAN і EPC

Протоколи відіграють вирішальну роль у забезпеченні безперебійного зв'язку в мережах LTE [3]. Архітектура базується на різних протоколах для керування процесами сигналізації та передачі даних. Наприклад, протокол керування радіоресурсами (RRC) необхідний для керування з'єднанням між користувальницьким обладнанням і мережею, полегшуючи такі завдання, як передача й розподіл ресурсів. Крім того, протокол конвергенції пакетних даних (PDCP) відповідає за стиснення заголовків і шифрування, забезпечуючи безпечну та ефективну передачу даних. Взаємодія цих протоколів не тільки підтримує основні функції мережі LTE, але й забезпечує взаємодію з іншими мережевими технологіями, прокладаючи шлях для майбутніх досягнень у системах мобільного зв'язку.

Підсистема радіодоступу (E-UTRAN)

Базові станції eNodeB є ключовими елементами підсистеми радіодоступу E-UTRAN, що виконують важливі функції в ряді мобільних комунікаційних мереж

на основі технології LTE [4]. По-перше, eNodeB відповідає безпосередньому з'єднанню з мобільними користувачами, забезпечуючи радіодоступ до мережі. Крім того, ці базові станції забезпечують функції управління ресурсами, контролю якості зв'язку та взаємодії з іншими елементами мережі, такими як контролери та елементи обробки даних. Вони також використовують обробку сигналів, що дозволяє оптимізувати передачу даних і забезпечити стабільність з'єднання. відповідно, eNodeB забезпечує: - Високу швидкість передачі даних - Мінімальні затримки зв'язку - Підтримку великої кількості одночасних з'єднань

Архітектура E-UTRAN забезпечує зв'язок між безкоштовними елементами мережі, що є критичним місцем для забезпечення ефективної роботи системи [3]. Структура E-UTRAN включає не тільки базові станції eNodeB, але й інші компоненти, такі як контролери радіодоступу та елементи обробки даних. Ця архітектура дозволяє проводити безперешкодний обмін інформацією між елементами, що є необхідним для оптимізації ресурсів і підвищення якості обслуговування. Наприклад, eNodeB взаємодіє з Evolved Packet Core (EPC), що дозволяє передавати дані користувачів в Інтернет і забезпечувати доступ до різноманітних послуг. Завдяки цій інтеграції користувачі можуть насолоджуватися безперервним доступом до мережі, що є аспектом сучасних мобільних технологій.

Розподіл ресурсів у радіомережі E-UTRAN є аспектом, який впливає на загальну продуктивність мережі [5]. У цьому контексті алгоритми управління ресурсами забезпечують оптимальне використання радіочастотного спектру, що дозволяє зменшити затримки та підвищити швидкість передачі даних. Ефективний розподіл ресурсів включає: - Динамічне управління смугами частот - Визначення параметрів для різних типів трафіку - Моніторинг завантаженості мережі для запобігання перевантаженням Ці елементи створюють основу для стабільної та ефективної роботи E-UTRAN, завдяки чому користувачі можуть отримувати високоякісні послуги без значних перерв у зв'язку. У результаті значно підвищується якість обслуговування кінцевих споживачів, що їх отримують від використання мобільних послуг.

Ядро мережі (EPC – Evolved Packet Core)

Еволюційне пакетне ядро (EPC) служить основою мереж мобільного зв'язку LTE, що складається з кількох критичних компонентів, які визначають його функціональність і взаємодію [5]. Серед цих компонентів – обслуговуючий шлюз (SGW), мережевий шлюз пакетної передачі даних (PGW) і об'єкт управління мобільністю (MME), кожен з яких відіграє важливу роль у забезпеченні безперебійної передачі даних і мобільності користувачів. SGW відповідає за маршрутизацію та пересилання пакетів даних, тоді як PGW керує підключенням до зовнішніх мереж передачі даних і забезпечує розподіл IP-адрес [3]. Між тим, MME контролює функції рівня керування, включаючи автентифікацію користувачів і керування сеансами. Співпраця між цими компонентами забезпечує ефективну обробку даних користувачів і мобільність, що в кінцевому підсумку підвищує загальну продуктивність мережі LTE.

Маршрутизація даних через обслуговуючий шлюз (SGW) є фундаментальним аспектом архітектури EPC [5]. SGW діє як шлях даних для трафіку користувача, полегшуючи передачу пакетів між мережею радіодоступу та зовнішніми мережами. Він відповідає за підтримку каналів, які є віртуальними з'єднаннями, які передають дані користувача, а також за керування параметрами якості обслуговування (QoS), призначеними кожному каналу [1]. Цей механізм маршрутизації гарантує, що пакети даних передаються з мінімальною затримкою та максимальною надійністю, що має вирішальне значення для додатків, які потребують зв'язку в реальному часі. Крім того, SGW відіграє ключову роль у процедурах передачі даних, дозволяючи користувачам підтримувати свої з'єднання під час переміщення між різними осередками в мережі, покращуючи тим самим взаємодію з користувачем.

Управління мобільністю в мережах LTE в основному здійснюється через орган управління мобільністю (MME), який контролює функції сигналізації та керування, необхідні для підтримки підключення користувачів [4]. MME виконує важливі завдання, такі як відстеження місцезнаходження користувача, керування сеансами та автентифікація абонентів, гарантуючи, що користувачі можуть плавно

переходити між різними осередками мережі без втрати зв'язку [3]. Це також полегшує встановлення шляхів несучого зв'язку та керує сигналізацією, пов'язаною з мобільністю, під час хендоверів. Ця можливість необхідна для підтримки безперервного обслуговування, особливо в ситуаціях, коли користувачі перебувають у русі. Ефективно керуючи цими процесами, MME робить значний внесок у загальну стійкість і надійність мереж мобільного зв'язку LTE.

Радіоканали та їх організація

В архітектурі мереж LTE логічні, транспортні та фізичні канали відіграють вирішальну роль в організації радіоканалів [6] (табл. 1.2.). Логічні канали відповідають за тип інформації, що передається, тоді як транспортні канали керують потоком цих даних між мережею та обладнанням користувача (UE). З іншого боку, фізичні канали – це фактичні радіоканали, які використовуються для передачі та прийому. Взаємодія цих трьох типів каналів забезпечує ефективний зв'язок і розподіл ресурсів у системі LTE. Наприклад, логічні канали можна розділити на канали керування та канали трафіку, тоді як транспортні канали використовуються для передачі інформації до фізичних каналів і з них. Цей структурований підхід дозволяє створити універсальне та адаптивне комунікаційне середовище, адаптоване до вимог користувача та умов мережі.

Принципи мультиплексування в LTE важливі для максимального використання доступної смуги пропускання та забезпечення одночасного обслуговування кількох користувачів [1]. Мережа LTE використовує множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA) для передачі по низхідній лінії зв'язку та множинний доступ з частотним поділом з однією несучою (SC-FDMA) для передачі по висхідній лінії зв'язку. OFDMA дозволяє розділити доступний спектр на численні менші піднесучі, які можна розподілити між різними користувачами на основі їхніх конкретних вимог до даних. Цей метод не тільки підвищує спектральну ефективність, але й мінімізує перешкоди між користувачами. Крім того, використання стрибків частоти та стратегій розподілу частотно-часових ресурсів сприяє створенню надійної та високопродуктивної системи зв'язку. Завдяки цим методам мультиплексування мережі LTE досягають

вищої якості обслуговування для користувачів, підтримуючи широкий спектр програм.

Таблиця 1.2.

Основні архітектурні компоненти мереж LTE

| Архітектурний компонент | Опис | Функціональні особливості |
|---|---|---|
| Мережа радіодоступу (RAN) | Відповідає за забезпечення безпроводового зв'язку між мобільними пристроями та мережею. Складається з базових станцій eNodeB. | Підтримка мультиплексування OFDM; Використання антен MIMO для покращення передачі даних. |
| Базова мережа | Керує маршрутизацією даних, наданням послуг і загальним управлінням мережею. Включає SGW, PGW, MME. | Забезпечує мобільність і маршрутизацію; Підтримує процедури хэндовера для безперервного зв'язку. |
| Підсистема радіодоступу (E-UTRAN) | Ключовий компонент радіомережі, що забезпечує взаємодію між користувачами та базовою мережею. | Оптимізація передачі даних; Висока швидкість та мінімальні затримки. |
| Еволюційне пакетне ядро (EPC) | Складається з компонентів для маршрутизації та обробки даних, таких як SGW, PGW і MME. | Контроль мобільності, керування сеансами; Підтримка IP-адрес і QoS. |
| Радіоканали | Включає логічні, транспортні та фізичні канали для організації радіоканалів і передачі даних. | Ефективне використання спектру; Мінімізація перешкод і покращення стабільності зв'язку. |
| Частоти та бенди LTE | Використання широкого діапазону частот для забезпечення оптимальної роботи мережі та підтримки різних стандартів зв'язку. | Band 1 (2100 МГц)<br>Band 3 (1800 МГц)<br>Band 7 (2600 МГц)<br>Band 20 (800 МГц) |

Управління перешкодами є критично важливим аспектом підтримки ефективного зв'язку в мережах LTE [1]. Для оптимізації продуктивності та мінімізації збоїв у роботі користувачів використовуються різні моделі керування

перешкодами. Однією з таких моделей є використання механізмів керування потужністю, які динамічно регулюють потужність передачі пристроїв на основі їх відстані від базової станції та переважаючих рівнів перешкод. Крім того, такі методи, як скоординована багатоточкова передача (CoMP), дозволяють одночасно передавати сигнали від кількох базових станцій до одного користувача, ще більше зменшуючи перешкоди та покращуючи якість сигналу. Впроваджуючи ці стратегії керування перешкодами, мережі LTE можуть підтримувати високий рівень продуктивності та надійності навіть у густонаселених районах із великою кількістю активних користувачів.

Функції та інтеграція IP-технологій у мережу LTE

Підтримка Інтернет-протоколу (IP) є фундаментальним аспектом мереж LTE, оскільки вона забезпечує ефективну передачу даних через структуру мобільного зв'язку [3]. Використовуючи IP як основний протокол для обміну даними, мережі LTE забезпечують безперебійне підключення для різноманітних послуг, включаючи передачу голосу через IP (VoIP) і потокове відео [1]. Ця інтеграція технології IP дозволяє LTE використовувати мережі з комутацією пакетів для передачі даних, значно підвищуючи пропускну здатність і гнучкість мобільного зв'язку. Перехід від традиційних мереж з комутацією каналів до повністю IP-архітектури призвів до покращення показників продуктивності, таких як зменшення затримки та збільшення пропускної здатності, що робить LTE надійним вибором для сучасних потреб мобільного зв'язку.

Якість обслуговування (QoS) є ще одним критичним компонентом мереж LTE, який гарантує, що різним типам трафіку даних присвоюється пріоритет відповідно до їхніх конкретних вимог [5]. В рамках архітектури LTE QoS керується як на рівні базової мережі, так і на рівні радіодоступу, що дозволяє диференційовано надавати послуги залежно від характеру програми. Наприклад, програми в режимі реального часу, як-от відеодзвінки, потребують меншої затримки та вищого пріоритету порівняно зі стандартним веб-переглядом. Впроваджуючи механізми QoS, LTE може динамічно розподіляти мережеві ресурси, забезпечуючи збереження продуктивності критичних служб під час

пікового використання. Ця можливість необхідна для підтримки задоволеності користувачів і оптимізації загальної ефективності мережі.

Взаємодія LTE з іншими мережами, такими як 3G і Wi-Fi, є життєво важливим аспектом його архітектури, що забезпечує більш комплексну екосистему мобільного зв'язку [3]. Ця сумісність гарантує, що користувачі можуть підтримувати зв'язок навіть під час переходу між різними типами мереж, тим самим покращуючи взаємодію з користувачем. Наприклад, під час виклику, ініційованого через LTE, якщо сигнал слабшає, система може плавно переключитися на мережу 3G, не відриваючи виклик. Крім того, інтеграція LTE з мережами Wi-Fi дозволяє користувачам розвантажувати трафік даних, допомагаючи зменшити перевантаження стільникової мережі. Такі взаємодії не тільки оптимізують використання ресурсів, але й покращують загальне підключення та доступність послуг для мобільних користувачів.

Захист та безпека в архітектурі LTE

Одним із фундаментальних аспектів забезпечення безпеки в архітектурі LTE є реалізація механізмів шифрування даних [1]. LTE використовує розширені стандарти шифрування для захисту даних користувача під час передачі, що має вирішальне значення для захисту конфіденційної інформації від несанкціонованого доступу. Основним використовуваним алгоритмом шифрування є AES (Advanced Encryption Standard), який забезпечує надійну структуру для захисту пакетів даних. Завдяки наскрізному шифруванню даних мережі LTE гарантують, що навіть якщо дані перехоплено, вони залишаться нечитабельними для потенційних зловмисників. Цей рівень шифрування життєво важливий для збереження конфіденційності користувачів і запобігання витоку даних, ефективного захисту мережі від різних кіберзагроз.

На додаток до шифрування, методи автентифікації абонента відіграють вирішальну роль у захисті мереж LTE [3]. LTE використовує двоетапний процес автентифікації, який покращує перевірку особистості користувачів перед тим, як вони отримають доступ до мережі. Цей процес починається з генерації унікального ідентифікатора для кожного абонента, відомого як IMSI (International Mobile

Subscriber Identity), після чого використовується тимчасовий ідентифікатор для подальшого захисту ідентифікаційних даних користувача під час активних сеансів. Цей механізм дворівневої автентифікації не тільки зменшує ризик несанкціонованого доступу, але й допомагає підтримувати цілісність і автентичність спілкування користувачів. Забезпечуючи підключення до мережі лише законним користувачам, ці методи автентифікації роблять значний внесок у загальну систему безпеки технології LTE.

Для захисту від зовнішніх атак і втрати даних мережі LTE включають кілька надійних стратегій захисту [7]. Одна з таких стратегій передбачає впровадження протоколів безпеки, призначених для виявлення та нейтралізації потенційних загроз у режимі реального часу. Наприклад, використання брандмауерів і систем виявлення вторгнень допомагає контролювати мережевий трафік і запобігати зловмисним діям. Крім того, архітектура LTE включає заходи для безпечної передачі даних, наприклад захист цілісності, який гарантує, що пакети даних не змінюються під час передачі. Ці захисні заходи є критично важливими для боротьби з уразливістю, яка виникає через зовнішні загрози, такі як атаки на відмову в обслуговуванні або перехоплення даних. Створюючи багаторівневий підхід до безпеки, мережі LTE можуть ефективно захищати дані користувачів і підтримувати загальну надійність послуг мобільного зв'язку.

## 1.3. Технологічні проблеми LTE у контексті підтримки VoLTE

Забезпечення якості голосових викликів у LTE

Однією з основних технологічних проблем у забезпеченні якісних голосових дзвінків через LTE є вплив затримки на продуктивність VoLTE [1] (рис. 1.3). Затримка – це час затримки під час передачі даних, який може значно вплинути на якість голосових викликів. Висока затримка може призвести до помітних затримок у розмові, створюючи розчарування для користувачів. У VoLTE ідеальна затримка становить менше 150 мілісекунд, оскільки все, що перевищує цей поріг, може

призвести до погіршення якості зв'язку та перерв у зв'язку [2]. Це підкреслює потребу в оптимізованих мережевих конфігураціях і технологіях з низькою затримкою для підтримки цілісності передачі голосу через мережі LTE.

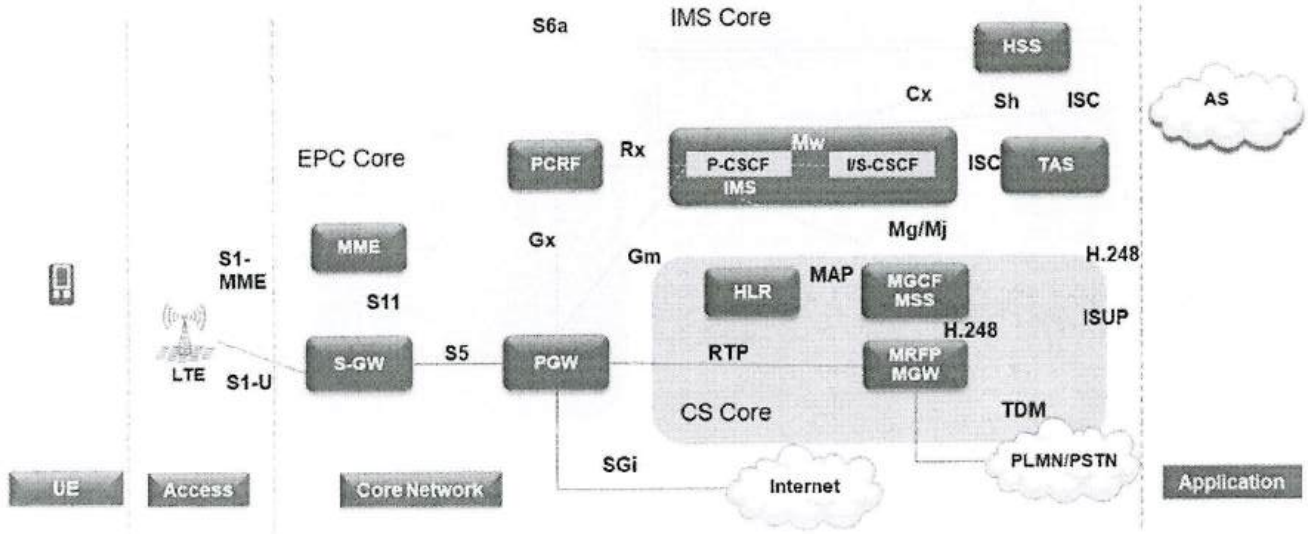



Рис. 1.3. Архітектура мережі для підтримки VoLTE

Іншим критичним аспектом підтримки якості голосового дзвінка в LTE є зменшення тремтіння під час спілкування в режимі реального часу [1]. Тремтіння або зміна часу надходження пакетів може порушити плавний потік голосових даних, що призведе до переривчастого звуку та поганої якості виклику. У VoLTE, де голос передається у вигляді пакетів даних, керування джиттером має важливе значення для того, щоб аудіопотік залишався послідовним і чистим. Для мінімізації ефекту тремтіння можна використовувати такі методи, як буферизація та розширені алгоритми, що забезпечує більш безперебійне спілкування. Впроваджуючи ці технології, постачальники послуг можуть підвищити надійність послуг VoLTE, гарантуючи, що користувачі зможуть насолоджуватися високоякісними голосовими викликами без перерв.

Таблиця 1.2.

Технологічні виклики LTE у контексті підтримки VoLTE

| Категорія вимоги | Опис проблеми | Можливі рішення |
|---|---|---|
| Забезпечення якості голосових викликів у LTE | Вплив затримки на якість VoLTE | Оптимізація маршрутизації пакетів |
| Забезпечення якості голосових викликів у LTE | Зниження джиттера у реальному часі | Використання QoS-пріоритетів |
| Забезпечення якості голосових викликів у LTE | Управління втратою пакетів у голосовому трафіку | Впровадження механізмів ARQ |
| Високі вимоги до пропускної здатності мережі | Оптимізація радіоресурсів для голосових послуг | Впровадження адаптивних алгоритмів управління ресурсами |
| Високі вимоги до пропускної здатності мережі | Балансування навантаження між голосовим і даними трафіком | Програмні рішення для балансування трафіку |
| Високі вимоги до пропускної здатності мережі | Проблеми перевантаження мережі у пікові періоди | Використання резервних ресурсів |
| Синхронізація між компонентами мережі LTE | Часова координація між базовими станціями eNodeB | Синхронізація через GPS або атомний годинник |
| Синхронізація між компонентами мережі LTE | Сумісність з ядром мережі EPC | Модернізація систем EPC |

| Категорія вимоги | Опис проблеми | Можливі рішення |
|---|---|---|
| Синхронізація між компонентами мережі LTE | Підтримка безперервного зв'язку при роумінгу | Підтримка seamless handover |
| Інтерференція у радіомережі | Вплив інтерференції на якість голосового зв'язку | Використання передових антенних систем |
| Інтерференція у радіомережі | Методи управління інтерференцією у VoLTE | Оптимізація частотного спектру |
| Інтерференція у радіомережі | Використання технологій MIMO для зменшення впливу перешкод | Використання технологій beamforming |
| Інтеграція VoLTE з іншими технологіями зв'язку | Перехід між VoLTE і традиційними голосовими мережами (CSFB) | Інтеграція VoLTE з функціями CSFB |
| Інтеграція VoLTE з іншими технологіями зв'язку | Виклики інтеграції VoLTE з Wi-Fi Calling | Адаптація протоколів для безперебійної роботи |
| Інтеграція VoLTE з іншими технологіями зв'язку | Підтримка VoLTE у гетерогенних мережах (HetNet) | Використання гібридних мереж з підвищеною адаптивністю |

Ефективне управління втратою пакетів у голосовому трафіку має вирішальне значення для підтримки якості виклику VoLTE [2]. Втрата пакетів відбувається, коли пакети даних не досягають місця призначення, що може призвести до розривів у розмові та значно погіршити якість звуку. У VoLTE навіть мінімальна втрата пакетів може негативно вплинути на загальний досвід користувача. Стратегії пом'якшення втрати пакетів включають впровадження протоколів якості обслуговування (QoS), які надають пріоритет голосовому трафіку над іншими типами даних. Це гарантує, що голосові пакети передаються з мінімальною

затримкою та перебоями. Крім того, мережеві оператори повинні постійно контролювати та оптимізувати свою інфраструктуру, щоб запобігти втраті пакетів і підтримувати цілісність голосового зв'язку в мережах LTE.

Високі вимоги до пропускної здатності мережі

Оптимізація радіоресурсів для голосових послуг є критично важливою для забезпечення ефективної роботи VoLTE в мережах LTE [3]. З використанням VoLTE використання 4G для голосових дзвінків, оператори мобільного зв'язку повинні знайти способи для максимізації пропускної здатності радіосигналів. Це можна включити в себе вдосконалення алгоритмів кодування голосу та зменшення затримок при передачі даних. також, адаптивні технології, такі як AMR-NB (Adaptive Multi-Rate Narrowband), дозволяють зменшити обсяг даних, що передаються, без втрати якості звуку. Ці інновації сприяють більш ефективному використанню радіоресурсів, що, у свою чергу, підвищує загальну якість голосових послуг у мережах LTE.

Балансування навантаження між голосовим і даним трафіком є ще одним аспектом, який впливає на підтримку VoLTE в мережах LTE [2]. У сучасних мережах користувачі одночасно генерують великі обсяги даних, які можна призвести до системи перезавантаження. Для цього оператори повинні впроваджувати рішення, які дозволяють оптимально розподіляти ресурси між голосовими та даними потоками. Наприклад, технологія QoS (Quality of Service) може бути використана для пріоритезації голосового трафіку над звичайними даними, що забезпечує стабільність і якість голосових дзвінків. Це особливо у випадку, коли мережа характеризується значним навантаженням, наприклад, під час масових подій або в густонаселених районах.

Проблеми перезавантаження мережі в пікові періоди можуть суттєво вплинути на якість VoLTE дзвінків [3]. Якщо велика кількість користувачів одночасно намагається здійснити дзвінки або використати дані, мережа може не отримувати завантаження, що призводить до затримок, збоїв у зв'язку або навіть до втрати дзвінків. Оператори повинні розробляти стратегії управління навантаженнями, такі як використання додаткових частотних розширень або

впровадження технологій, що не дозволить динамічно регулювати ресурси мережі. Це включає в себе обслуговування користувачів на основі їх потреб і параметрів, що дозволяє зберегти стабільність мережі під час піктового завантаження.

Синхронізація між компонентами мережі LTE

Часова координація між базовими станціями eNodeB є критично важливою для забезпечення стабільної роботи мережі LTE [4] (рис. 1.4). Для підтримки VoLTE всі eNodeB повинні бути синхронізовані, оскільки це дозволяє забороняти затримки при передачі голосових даних. Якщо базові станції не синхронізовані, це може призвести до проблеми з якістю зв'язку, таких як ехо або підтримка, що негативно впливає на досвід користувачів. Важливою частиною цієї синхронізації є використання GPS, яке дозволяє eNodeB утримувати точний час для координації передачі даних. Це забезпечення: - Зменшення затримок у передачі голосу - Поліпшення якості зв'язку - Підвищену ефективність використання ресурсів мережі

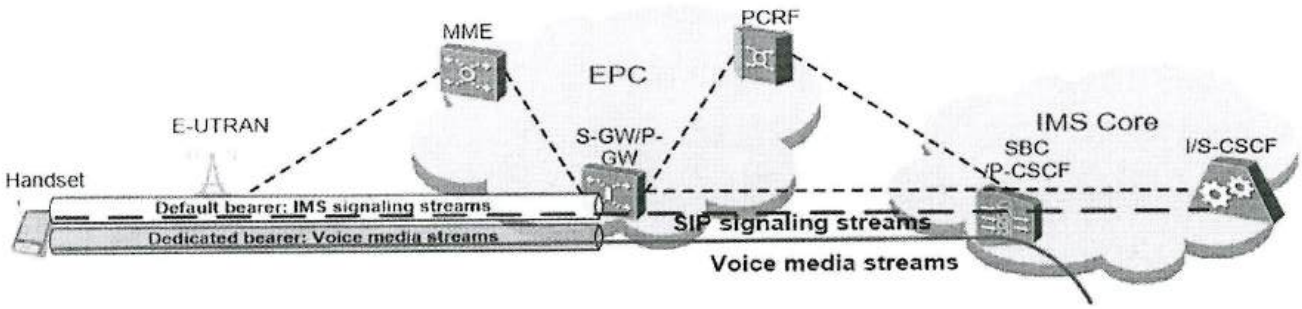



Рис. 1.4. Проходження VoLTE сигналу через мережу

Сумісність з ядром мережі EPC є ще одним аспектом для реалізації VoLTE [4]. Ядро мережі EPC (Evolved Packet Core) забезпечує обробку даних і сигналізацію для голосових викликів, що передаються через LTE. Щоб VoLTE функціонував належним чином, необхідно, щоб компоненти ядра, такі як MME (Mobility Management Entity) і SGW (Serving Gateway), підтримували специфікацію IMS (IP Multimedia Subsystem). Це дозволяє дозволити голосові дзвінки, використовуючи IP-протоколи, що зменшує завантаження в традиційних мережах

2G/3G. сумісність забезпечення: - Підвищену швидкість обробки викликів - Поліпшену якість голосу - Зниження затримок у комунікації

Підтримка безперервного зв'язку при роумінгу є ще однією проблемою для технології VoLTE [5]. Коли користувачі переміщуються між мережами, важливо, щоб їхні голосові виклики могли безперервно переходити з цієї мережі в іншу без розривів. Для цієї мережі необхідно забезпечити підтримку Seamless Handover, що дозволяє зберегти активний зв'язок під час зміни базових станцій або мережі. Це вимагає тісної взаємодії між швидкими операторами та технологіями, щоб гарантувати: - Неперервність голосових викликів - Високу якість зв'язку під час роумінгу - Задоволеність користувачів під час переміщення між мережами

Інтерференція у радіомережі

Перешкоди в радіомережах значно впливають на якість голосового зв'язку, особливо в контексті технології Voice over LTE (VoLTE) [2]. На відміну від традиційних мереж 2G і 3G, VoLTE покладається на широкосмугове підключення до Інтернету для передачі голосового трафіку через мережі LTE, які можуть бути чутливі до різних форм перешкод, таких як перешкоди в одному каналі та перешкоди в суміжному каналі [1]. Ці перешкоди можуть призвести до таких проблем, як переривання викликів, зниження чіткості голосу та збільшення затримки, що зрештою погіршує взаємодію з користувачем. Оскільки попит на високоякісний голосовий зв'язок зростає, розуміння впливу перешкод стає вирішальним для підтримки якості обслуговування та забезпечення задоволеності користувачів.

Щоб вирішити проблеми, пов'язані з перешкодами у VoLTE, було розроблено кілька методів керування перешкодами [6]. Ці методи включають контроль потужності, який регулює потужність передачі пристроїв, щоб мінімізувати перешкоди іншим користувачам, і алгоритми усунення перешкод, які фільтрують небажані сигнали. Крім того, мережеві оператори можуть впроваджувати планування частоти та стратегії балансування навантаження, щоб оптимізувати розподіл ресурсів і зменшити ймовірність перешкод у мережі. Ці методи спрямовані на підвищення якості голосових викликів шляхом створення

більш стабільного та надійного середовища зв'язку, що є важливим для успішного розгортання послуг VoLTE.

Використання технології Multiple Input Multiple Output (MIMO) пропонує багатообіцяюче рішення для зменшення впливу перешкод у мережах LTE [5]. MIMO використовує кілька антен як на стороні передавача, так і на приймачі, що дозволяє одночасно передавати кілька потоків даних. Ця можливість не тільки збільшує загальну пропускну здатність мережі, але й підвищує стійкість сигналу до перешкод. Використовуючи технологію MIMO, VoLTE може досягти покращеної якості звуку та більш надійних з'єднань навіть у складних умовах радіозв'язку. Оскільки телекомунікаційна галузь продовжує розвиватися, інтеграція технології MIMO відіграватиме життєво важливу роль у вирішенні проблем, пов'язаних із перешкодами, і покращенні досвіду голосового зв'язку.

Інтеграція VoLTE з іншими технологіями зв'язку

Перехід між VoLTE і традиційними голосовими мережами з комутацією каналів, відомим як резервний канал з комутацією каналів (CSFB), представляє значні проблеми в інтеграції цих технологій [7]. CSFB — це метод, який дозволяє користувачам підтримувати голосові послуги, коли вони тимчасово перебувають поза зоною покриття VoLTE. Однак цей перехід може призвести до затримок і погіршення якості зв'язку, оскільки перехід від LTE до старіших мереж не завжди є плавним. Коли дзвінок ініціюється на пристрої з підтримкою VoLTE, який потребує резервного доступу до застарілої мережі, користувачі можуть зіткнутися з перериванням викликів або тривалістю з'єднання. Крім того, потреба мережевих операторів одночасно підтримувати як VoLTE, так і CSFB ускладнює управління інфраструктурою та розподіл ресурсів, вимагаючи інвестицій як у застарілі, так і в сучасні системи для забезпечення безперебійної взаємодії з користувачем.

Інтеграція VoLTE з Wi-Fi Calling є ще однією сферою, яка представляє значні технологічні проблеми [2]. У той час як Wi-Fi Calling дозволяє користувачам здійснювати дзвінки через мережу Wi-Fi, безперебійне переключення між Wi-Fi і стільниковими мережами має вирішальне значення для підтримки якості виклику та стабільності з'єднання. Основна проблема полягає в тому, щоб перехід від Wi-

Fi до LTE (і навпаки) відбувався без перерв. Це вимагає складної координації між двома мережами, включаючи підтримку інформації про сеанс виклику та керування різними кодеками, що використовуються для передачі голосу. Крім того, коливання якості мережі Wi-Fi можуть вплинути на ефективність дзвінків, що призведе до таких проблем, як переривання дзвінків або погіршення якості звуку. У результаті оператори повинні інвестувати в технологію, яка підтримує ефективні процеси хендоверу та надійне керування мережею, щоб покращити роботу користувача в цьому інтегрованому середовищі.

Підтримка VoLTE у гетерогенних мережах (HetNet) створює додаткові складності, які необхідно вирішити для ефективного зв'язку [5]. HetNet відноситься до мережевої архітектури, яка поєднує різні типи комірок, наприклад макростільники, малі комірки та точки доступу Wi-Fi, для покращення покриття та пропускної здатності. Основним завданням у цьому контексті є досягнення стабільної якості обслуговування (QoS) у різних типах мереж і підтримка безперебійного з'єднання для користувачів. Такі фактори, як різна затримка, пропускна здатність і рівні перешкод між різними стільниками, можуть впливати на продуктивність VoLTE. Крім того, мережеві оператори повинні впроваджувати передові методи, такі як динамічний розподіл ресурсів і керування трафіком, щоб оптимізувати послуги VoLTE у різноманітній інфраструктурі. Забезпечення сумісності та ефективного зв'язку між цими різними елементами мережі має вирішальне значення для надання користувачам високоякісного голосового досвіду в середовищі HetNet.

# РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ QUALITY OF SERVICE В ГАЛУЗІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

## 2.1. Поняття Quality of Service та його роль у телекомунікаціях

Quality of Service (QoS) у телекомунікаціях — це набір механізмів і технічних засобів, що забезпечують передбачувану якість передачі даних через мережу, відповідаючи певним параметрам, таким як затримка, джиттер, пропускна здатність і рівень втрати пакетів.

QoS визначає здатність мережі надавати необхідний рівень продуктивності для різних видів трафіку (голосового, відео або даних), забезпечуючи ефективне управління ресурсами та дотримання пріоритетів передачі даних відповідно до вимог користувачів чи додатків.

Якість обслуговування (QoS) є критично важливою концепцією в сучасних телекомунікаціях, що представляє здатність мережі забезпечувати певний рівень якості обслуговування для різних типів трафіку [1]. У сучасному взаємопов'язаному світі, де переважають програми реального часу, такі як VoIP і відеоконференції, забезпечення надійної та ефективної мережі є важливим [2]. Важливість QoS полягає в його здатності визначати пріоритети мережевого трафіку, тим самим покращуючи взаємодію з користувачами та підтримуючи угоди про рівень обслуговування (SLA). Надійна структура QoS дозволяє мережевим операторам ефективно керувати смугою пропускання, мінімізувати затримку та гарантувати, що критично важливі програми отримують необхідні ресурси для оптимальної роботи [3].

Ключові параметри, які визначають QoS, включають затримку, тремтіння та втрату пакетів [4]. Затримка означає час, необхідний пакету даних для проходження від джерела до пункту призначення, що має вирішальне значення для зв'язку в реальному часі. З іншого боку, тремтіння означає зміну часу надходження пакетів, що може призвести до перебоїв у аудіо- чи відеопотоках [3]. Втрата пакетів — ще один важливий параметр, який представляє відсоток пакетів, які не досягли

місця призначення під час передачі [5]. Високий рівень затримки, тремтіння або втрата пакетів може серйозно погіршити якість обслуговування, призводячи до переривчастого аудіо чи відео та, зрештою, вплинути на задоволеність користувачів. Таким чином, моніторинг і оптимізація цих параметрів є важливими для підтримки високих стандартів якості обслуговування в телекомунікаційних мережах.

Розрізнення між якістю обслуговування та послугою найкращих зусиль є фундаментальним у телекомунікаціях [6]. Сервіс Best Effort, хоч і простіший у реалізації, не гарантує певного рівня продуктивності, тобто всі користувачі спільно використовують одні й ті самі ресурси без встановлення пріоритетів [3]. Це може призвести до нестабільної якості обслуговування, особливо під час пікового використання. Навпаки, механізми QoS розроблені для того, щоб певні типи трафіку, особливо ті, що вимагають обробки в реальному часі, були пріоритетними та забезпечені необхідною пропускною здатністю та низькою затримкою [7]. Ця диференціація має вирішальне значення для таких програм, як передача голосу через IP (VoIP), де підтримка високоякісного з'єднання є необхідною для ефективного зв'язку. Розуміючи ці відмінності, мережеві оператори можуть краще розробляти та керувати своїми послугами, щоб задовольнити різноманітні потреби користувачів у конкурентному середовищі телекомунікацій.

QoS як інструмент підвищення ефективності телекомунікаційних систем

Пріоритезація трафіку є професійним аспектом управління якістю обслуговування (QoS) у телекомунікаційних системах [8]. Це дозволяє мережі ефективно обробляти будь-який трафік, забезпечуючи при цій стабільній якості різні послуги для критично важливих додатків, таких як VoIP і відеоконференції [9]. В умовах, коли мережа може бути перевантажена, забезпечується QoS, що важливі пакети даних віддають перевагу порівняно з менш критичними, наприклад, завантаженням файлів чи веб-серфінгом. Це досягається через використання різних моделей, таких як інтегровані (IntServ) та диференційовані послуги (DiffServ), які можуть мережам регулювати та оптимізувати використання ресурсів [10]. Таким

чином, пріоритезація трафіку є ключовим інструментом для покращення загальної ефективності мережі.

Оптимізація мережевих ресурсів є ще одним аспектом забезпечення стабільної якості обслуговування [3]. Вона забезпечує ефективне управління доступними ресурсами для забезпечення деяких параметрів QoS, таких як пропускна здатність, підтримка та життєдіяльність [4]. Завдяки використанню сучасних технологій управління мережами, оператори можуть адаптувати мережеві ресурси в реальному часі, реагуючи на зміни завантажень і потреб користувачів. Це не тільки ефективність роботи мережі, але й забезпечує кращу якість послуг для кінцевих споживачів, знижуючи ймовірність затримок та переривань при передачі даних [11]. Важливо відзначити, що оптимізація ресурсів є одним пов'язана із загальною стратегією управління QoS в телекомунікаційних мережах.

Роль QoS у підтримці критично важливих телекомунікаційних додатків не можна недооцінювати [12]. У сучасному світі де багато бізнес-процесів та повсякденних комунікацій залежать від надійності мережі, забезпечення гарантії QoS, що важливі дані будуть доставлені без затримок і з мінімальними втратами [13]. Наприклад, у випадках, коли використовуються реальні послуги, такі як медичні консультації через відеозв'язок або фінансові транзакції, QoS стає критично важливим для успішного функціонування цих сервісів [9]. Із збільшенням залежності від цифрових технологій, забезпечення надійності та стабільності цих додатків стає пріоритетним для операторів, які реалізують QoS як невід'ємну частину своїх мережевих стратегій.

Вплив якості обслуговування на досвід обслуговування та утримання клієнтів

Взаємозв'язок між якістю обслуговування (QoS) і лояльністю клієнтів має вирішальне значення в галузі телекомунікацій [14]. Високоякісний сервіс безпосередньо пов'язаний із підвищенням задоволеності клієнтів, що, у свою чергу, сприяє лояльності клієнтів. Коли клієнти відчувають надійне з'єднання, мінімальну затримку та оптимальну пропускну здатність, вони, швидше за все,

залишаться у свого постачальника послуг [15]. Ця лояльність має важливе значення, оскільки утримання існуючих клієнтів часто рентабельніше, ніж залучення нових. Наприклад, компанії, які віддають пріоритет QoS, можуть створити конкурентну перевагу за рахунок покращення досвіду клієнтів. Ключові елементи, що впливають на цей зв'язок, включають: - Надійна робота мережі - Своєчасна підтримка клієнтів - Послідовне надання послуг Ці фактори разом сприяють формуванню лояльної клієнтської бази, що зрештою призводить до збільшення частки ринку та прибутковості.

Декілька телекомунікаційних компаній успішно впровадили заходи QoS, які демонструють їхній позитивний вплив на задоволеність та утримання клієнтів [3]. Наприклад, провідний телекомунікаційний провайдер у Європі прийняв стратегії QoS, щоб визначити пріоритет голосу над трафіком Інтернет-протоколу (VoIP) у години пік. Це призвело до помітного покращення якості зв'язку, що не тільки покращило взаємодію з користувачем, але й призвело до значного зменшення скарг клієнтів [4]. Інший приклад можна побачити в північноамериканській телекомунікаційній компанії, яка використовувала інструменти моніторингу QoS для завчасного виявлення та усунення проблем перевантаження мережі. Швидко вирішуючи ці проблеми, компанія змогла підвищити надійність послуг, що призвело до підвищення рівня утримання клієнтів і міцнішої репутації на ринку.

Щоб покращити QoS у телекомунікаціях, компанії можуть прийняти кілька ефективних стратегій [16]. По-перше, інвестиції в розширену мережеву інфраструктуру є важливими для забезпечення незмінної якості послуг. Це включає підвищення пропускної здатності, мінімізацію затримки та оптимізацію мережевих протоколів для ефективної обробки послуг у реальному часі [9]. По-друге, впровадження надійної політики QoS дозволяє телекомунікаційним провайдерам визначати пріоритетність різних типів трафіку, гарантуючи, що критично важливі служби отримують необхідну пропускну здатність у часи пік [4]. Крім того, безперервний моніторинг і аналіз продуктивності мережі можуть допомогти визначити області, які потребують покращення, дозволяючи своєчасно вносити корективи для підтримки високого рівня обслуговування. Зосереджуючись на цих

стратегіях, телекомунікаційні компанії можуть покращити QoS, що зрештою призведе до підвищення задоволеності та лояльності клієнтів.

## 2.2. Ключові параметри QoS: затримка, джиттер, втрата пакетів, пропускна здатність

Розуміння важливості ключових параметрів якості обслуговування (QoS) має вирішальне значення для оптимізації телекомунікаційних мереж [1]. Такі параметри, як затримка, тремтіння, втрата пакетів і пропускна здатність, відіграють важливу роль у визначенні продуктивності та надійності мережевих служб. Наприклад, затримка стосується часу, який потрібен пакету для проходження від джерела до пункту призначення, тоді як тремтіння вимірює зміну часу надходження пакета [2]. Втрата пакетів відбувається, коли пакети не досягають місця призначення, що може серйозно вплинути на якість програм реального часу, таких як VoIP і потокове відео [3]. Крім того, пропускна здатність вказує на максимальну швидкість передачі даних через мережевий шлях. Чітке розуміння цих параметрів дозволяє мережевим інженерам адаптувати стратегії QoS для ефективного задоволення конкретних вимог до послуг.

Зв'язок між параметрами QoS і якістю обслуговування є складним і життєво важливим для забезпечення оптимального досвіду користувача [4] (табл. 2.1). Різні служби висувають різні вимоги до таких параметрів, як тремтіння, затримка та втрата пакетів. Наприклад, додатки в режимі реального часу, такі як онлайн-ігри або відеоконференції, вимагають низької затримки та мінімального тремтіння для забезпечення плавної взаємодії [5]. Навпаки, такі програми, як завантаження файлів, можуть допускати більші затримки, оскільки вони не вимагають негайного зворотного зв'язку. Таким чином, механізми QoS повинні бути реалізовані для визначення пріоритетів трафіку відповідно до унікальних потреб кожної служби [2]. Визначаючи та керуючи цими параметрами, мережеві оператори можуть

підвищити якість обслуговування та задоволеність користувачів, узгоджуючи продуктивність мережі з вимогами різноманітних програм.

Таблиця 2.1.

Розширена таблиця ключових параметрів QoS

| Параметр | Опис | Причини | Показники, які негативно впливають | Методи покращення | Вплив на якість зв'язку (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Затримка | Час, необхідний для передачі даних від джерела до отримувача. | Завантаженість мережі, велика кількість проміжних вузлів. | Кількість вузлів на маршруті, рівень завантаження мережі. | Оптимізація маршрутизації, зменшення кількості проміжних вузлів. | 30% |
| Джиттер | Варіативність затримки пакетів під час їх доставки. | Перемикання маршрутів, перевантаження буферів. | Нестабільність маршрутизації, недостатня буферизація. | Використання адаптивних буферів, стабілізація маршрутів. | 25% |
| Втрата пакетів | Кількість пакетів, які не досягли пункту призначення. | Помилки в каналі передачі, перевантаження мережі. | Частота помилок у передачі даних, перевантаження мережі. | Використання корекції помилок (FEC), підвищення надійності каналів. | 20% |
| Пропускна здатність | Максимальна кількість даних, які можуть бути передані за одиницю часу. | Обмеження пропускної здатності каналу, перевантаження вузлів. | Обмеження ширини смуги, високе навантаження каналів. | Агрегація каналів, збільшення пропускної здатності каналів. | 25% |

Однак забезпечення стабільних параметрів QoS створює кілька проблем, які потребують постійної уваги з боку мережевих інженерів [6]. Технічні проблеми, такі як надмірні затримки, тремтіння та втрата пакетів, можуть виникати внаслідок різних факторів, включаючи перевантаження мережі, апаратні обмеження та

недостатню пропускну здатність [7]. Вирішення цих проблем вимагає розгортання розширених інструментів моніторингу, які можуть ефективно вимірювати параметри QoS і надавати інформацію для своєчасного втручання [8]. Крім того, оскільки кількість підключених пристроїв і програм продовжує зростати, досягнення відповідності стандартам QoS стає все складнішим (рис. 2.1). Мережеві адміністратори повинні постійно адаптувати свої стратегії, щоб підтримувати якість обслуговування в умовах мінливих вимог і технічних обмежень [9].

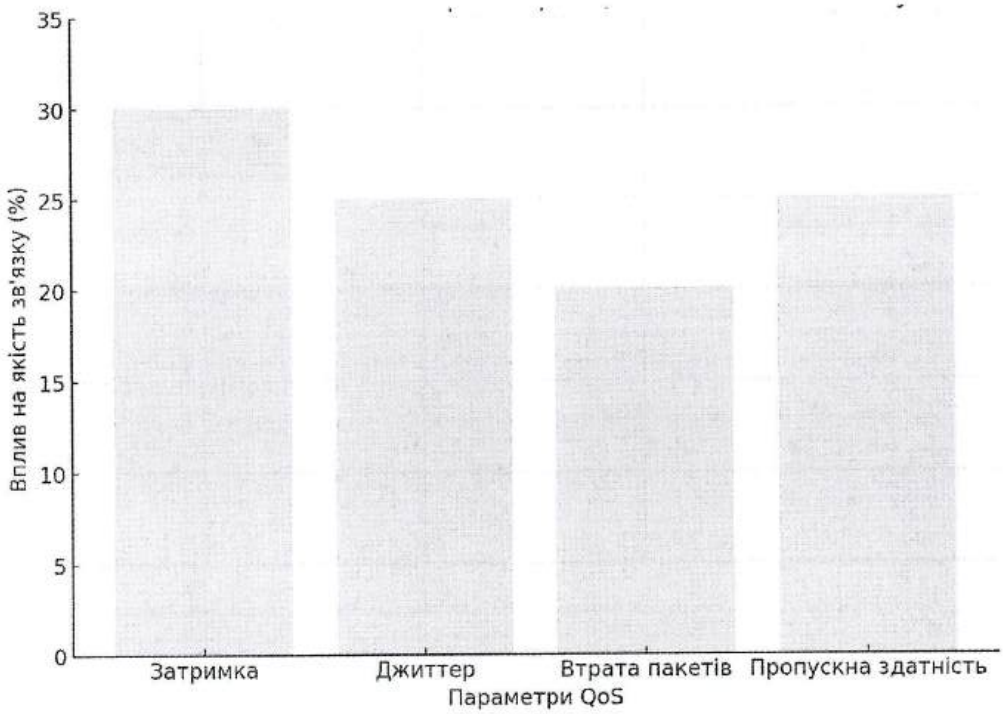



Рис. 2.1. Вплив на якість зв'язку ключових параметрів QoS

Затримка як основний параметр QoS

Підтримка є критично важливим параметром якості обслуговування (QoS), який вибирає час, необхідний для передачі пакета даних від джерела до отримувача. Існують два основних типи затримки: однонаправлена та двонаправлена [3]. Однонаправлена підтримка вимірює час, який потрібен для передачі пакета від відправника до одержувача, тоді як двонаправлена підтримка враховує час, необхідний для повернення пакета назад до відправника. Ці різні типи затримок можуть з'являтися внаслідок різних факторів, таких як фізичні відстані між мережевими пристроями, обробка пакетів у маршрутизаторах

затримки, пов'язані з мережевими протоколами [10]. Розуміння цих типів затримується лише для оптимізації мережевої продуктивності та забезпечення високої якості обслуговування.

Причини виникнення затримок в мережах можуть бути різноманітними, і їх слід остаточно аналізувати для покращення QoS [4]. Серед основних причин затримки можна виділити: - Фізичні відстані між пристроями - Затримки, пов'язані з обробкою пакетів у маршрутизаторах - Конгестія мережі, що створює затримки в передачі даних - Протоколи, які впливають на швидкість передачі пакета Ці фактори можуть суттєво впливати на загальний час передачі пакетів, що, у свій час, негативно впливає на якість обслуговування, особливо у високих умовах навантаження [11]. Важливо усвідомлювати, що підтримка може змінюватися залежно від умов мережі, тому моніторинг цих параметрів є критичним для підтримки стабільної роботи мережі.

Вплив затримки на голосовий та відеотрафік є особливо значущим, після чого ці типи даних є чутливими до затримок [12]. При передачі голосових пакетів навіть незначні затримки можуть призвести до спотворення звуку, затримок у спілкуванні або втрати важливої інформації. Аналогічно, для відеотрафіку затримки можуть викликати проблеми з якістю зображення, таким як розмиття або затримки в показі зображення [13]. які, параметри затримки, джиттера та втрачених пакетів впливають на якість передачі голосових даних [11]. У зв'язку з цим забезпечення мінімальної затримки в мережах є ключовим для досягнення високої якості обслуговування, особливо в сценаріях реального часу.

Джиттер: природа і вплив на якість обслуговування

Джиттер є одним із параметрів якості обслуговування (QoS), який визначає нерегулярність затримок під час передачі пакетів даних [14]. Це означає, що в ідеальному випадку пакети повинні надходити до призначених інтервалів, проте в реальних мережах спостерігаються коливання у підтримці, що може призвести до проблеми при передачі даних [15]. Для вимірювання життера потрібно такі показники, як середнє значення, медіана та стандартне відхилення, які вважають стабільність мережі встановити [16]. Високий рівень життера може негативно

впливати на якість голосових дзвінків або потокового відео, після чого нерегулярні затримки можуть призвести до неточностей у відтворення.

Одним із основних джерел виникнення життера в мережах є переповненість каналу та варіації в обробці пакетів на мережевих пристроях [4]. Коли мережа перевантажена, пакети можуть зазнати затримку через можливість доступу для обробки, що завершується коливанням в їхньому прибутті [11]. Інші фактори, такі як маршрутизація пакетів через різні шляхи в мережі або фізичні перешкоди, також можуть спричиняти джиттер. Наприклад, зміни у завантаженні на маршрутизаторах або комутаторах можуть спричинити зміни в підтримках, які, у свій час, входять до якості обслуговування.

Компенсація життера може бути досягнута за допомогою кількох стратегій, таких як буферизація та пріоритетизація трафіку [17]. Буферизація дозволяє зберігати пакети в пам'яті перед їх відправленням, що готові вирівняти затримки під час передачі [4]. Це може бути особливо корисно для потокового відео та голосових дзвінків, де важливо, щоб дані надходили без значних перерв. Пріоритезація трафіку, з іншого боку, забезпечує, що критично важливі дані залишаються перевагою над меншою кількістю, зменшуючи вплив життєдіяльності на їхню передачу [18]. Завдяки цим методам мережі можна підвищити якість обслуговування, зменшивши негативний вплив джитера на передачу даних.

Втрата пакетів у контексті QoS

Втрата пакетів у телекомунікаційних мережах може бути спричинена сильними факторами, які впливають на загальну продуктивність мережі [3]. Найпоширенішими причинами втрати пакетів є перевантаження мережі, кількість пакетів, що надходять, перевищені обсяги, які можуть бути оброблені пристроями, а також проблеми з апаратним забезпеченням, такі як збої маршрутизаторів або комутаторів [4]. Інші фактори включають погану якість з'єднання, наприклад, через електромагнітні перешкоди або зношені кабелі. Усі ці проблеми можуть призвести до того, що пакети не досягнуть свого призначення, що негативно вплине на загальну якість послуг (QoS).

Втрата пакетів може мати різний вплив на різні типи сервісів, що використовують мережу [1]. Наприклад, для голосових послуг, таких як VoIP, навіть незначна втрата пакетів може призвести до помітного зниження якості звуку, що змінилося в розмові або спотворенні голосу [11]. У випадку потокового відео, втрата пакетів може призвести до затримки та зниження якості зображення, оскільки відеопотоки вимагають стабільності в передачі даних. Дослідження показують, що різні сервіси мають різні вимоги до параметрів мережі, таких як підтримка, джиттер, втрата пакетів та пропускна здатність [12].

Для зменшення втрачених пакетів у мережах запроваджуються різні методи, такі як передача з цією помилкою корекції (FEC) і автоматичне повторне запитування (ARQ) [14]. FEC передбачає додавання надлишкової інформації до пакетів, що дозволяє одержувачу виправляти помилки без повторної передачі даних [3]. З іншого боку, ARQ вимагає, щоб втрачені або пошкоджені пакети були повторно запитані у відправника, що може призвести до затримки, але забезпечує надійність передачі даних [19]. Використання цих методів може суттєво підвищити якість обслуговування в мережах, особливо для чутливих до затримок послуг, таких як відеоконференції чи онлайн-ігри.

Пропускна здатність як параметр продуктивності мережі

Пропускна здатність, або пропускна здатність, є параметром продуктивності мережі, що забезпечує максимальну кількість даних, які можуть бути передані через мережу за одиницю часу [20]. Вона погано впливає на якість обслуговування (QoS) та розуміє, що ефективна мережа може обробляти трафік [14]. Висока пропускна спроможність дозволяє зменшити затримки та втрати пакетів, що, у свою чергу, підвищує загальну продуктивність мережі. Наприклад, у ситуаціях, коли пропускна здатність є недостатньою, це може призвести до зростання затримок і втрат пакетів, що негативно впливає на користувацький досвід. Таким чином, забезпечення належної пропускної здатності є критичним для ефективного функціонування мережі.

Порушення пропускної спроможності в умовах перевантаження може суттєво знизити продуктивність мережі [5]. Коли кількість активних з'єднань

перевищує доступні ресурси, це призводить до затримки у передачі даних та збільшення ймовірності втрачених пакетів [4]. У таких випадках важливо впроваджувати механізми управління трафіком, які не дозволяють оптимізувати використання наявних ресурсів. Наприклад, у період пікових завантажень мережа може обмежувати швидкість передачі для менш критичних даних, щоб забезпечити кращу якість обслуговування для важливих додатків. Це зберегти баланс між доступними ресурсами та вимогами користувачів.

Для підвищення пропускної здатності існує кілька методів, які можуть бути ефективно використані в мережах [21]. Агрегування каналів є одним із найрозширеніших способів, який дозволяє об'єднати кілька фізичних об'єднань в одне логічне, що додає загальну пропускну здатність [3]. Крім того, оптимізація ресурсів, таких як балансування завантаження та управління трафіком, може суттєво підвищити ефективність використання мережі. Серед інших методів можна виділити: - Використання QoS для пріоритизації критичного трафіку - Впровадження технологій стиснювання даних - Модернізація мережевої інфраструктури для підвищення швидкості передачі даних Застосування цих методів дозволяє значно покращити пропускну здатність і, відповідно, якість обслуговування в мережі.

## 2.3. Методи управління трафіком для забезпечення QoS

Пріоритезація трафіку в мережах

Визначення класів трафіку є критичним для ефективного управління мережею та забезпечення якості обслуговування (QoS) в умовах різноманітності даних [1]. Трафік можна поділити на три основні класи: критичний, реальний час і некритичний. Критичний трафік, який включає в себе медичні дані або системи безпеки, вимагає найвищого переваги в обробці, після чого навіть невеликі затримки можуть призвести до серйозних наслідків. Реальний час, як-от VoIP або відеоконференції, також потребує швидкої обробки, але не такої критичності, як

перший клас. Некритичний трафік, наприклад, електронна пошта або фонові завантаження, може терпіти затримки без негативних наслідків. Це чітке розмежування класів трафіку дозволяє мережевим адміністраторам впроваджувати відповідні механізми управління для кожного типу даних.

Таблиця 2.2.

Методи управління трафіком для забезпечення QoS

| Метод управління трафіком | Опис |
|---|---|
| Пріоритезація трафіку | Визначення класів трафіку: критичний, реальний час, некритичний |
| | Використання механізмів пріоритетів для обслуговування |
| | Роль пріоритезації в забезпеченні мінімальних затримок |
| Обмеження пропускної здатності (Traffic Shaping) | Методи обмеження швидкості передачі для некритичного трафіку |
| | Використання механізмів буферизації |
| | Зменшення перевантаження мережі за допомогою обмеження трафіку |
| Керування чергами (Queue Management) | Типи черг: FIFO, Weighted Fair Queueing, Low Latency Queueing |
| | Оптимізація черг для мінімізації джиттера та втрат пакетів |
| | Використання активного управління чергами (AQM) для балансування трафіку |
| Адаптивне управління ресурсами | Використання алгоритмів динамічного розподілу ресурсів |
| | Моніторинг і коригування параметрів QoS у реальному часі |
| | Впровадження AI/ML для прогнозування і управління трафіком |




Рис. 2.2. Методи управління трафіком для забезпечення QoS

Використання механізмів пріоритетів для обслуговування трафіку є ключовим елементом у забезпеченні QoS [2]. Механізми, такі як Weighted Fair Queuing (WFQ) або Priority Queuing (PQ), дозволяють мережам ефективно розподіляти ресурси між широкими класами трафіку, забезпечуючи, що чутливі до затримок протоколи забезпечують перевагу над менш критичними. Це дозволяє уникнути перезавантаження мережі та зберегти стабільність у роботі критичних застосунків. Наприклад, у випадку одночасного потоку голосових дзвінків і завантаження великих файлів, механізми пріоритетів дозволяють зберегти якість голосу, уникаючи затримок, які можуть бути включені до комунікації.

Роль пріоритезації в забезпеченні мінімальних затримок не можна недооцінювати, оскільки вона працює на досвіді користувачів та ефективності мережевих сервісів [3]. Застосування таких технологій, як Weighted Random Early Detection (WRED), дозволяє зменшити затримки при обробці трафіку, гарантуючи, що критичні дані обробляються першими. Це важливо для підтримки необхідного рівня QoS, особливо в умовах високого завантаження мережі. Пріоритезація також сприяє кращому використанню ресурсів, не дозволяє уникнути ситуацій, коли менш важливий трафік блокує передачу критичних даних. Таким чином, ефективна пріоритезація є основою для надійної мережевої архітектури, здатної підтримувати різноманітні сервіси з вимогами до якості.

Обмеження пропускної здатності (Traffic Shaping)

Методи обмеження швидкості передачі для некритичного трафіку є числами для ефективного управління мережевими ресурсами [4]. Ці методи дозволяють зменшити вплив некритичного трафіку на загальну продуктивність мережі, що є особливо випадками у випадках, коли критичні добавки потребують гарантованої пропускної здатності [5]. Наприклад, обмеження швидкості передачі може бути

використано для потокового відео або завантаження файлів, щоб запобігти перезавантаженню мережі. Цей підхід дозволяє контролювати обсяг трафіку, який може негативно вплинути на QoS, і забезпечує кращу організацію ресурсів мережі.

Використання механізмів буферизації також є критичним місцем для оптимізації трафіку в мережах [6]. Буферизація дозволяє зберігати пакети даних у проміжній пам'яті під час піктових завантажень, що дозволяє уникнути втрат пакетів і зменшує затримки [7]. відповідно, алгоритми управління чергами можуть визначити, які пакети слід обробляти в першу чергу, на базі пакету трафіку. Це дозволяє оптимізувати використання мережевих ресурсів та забезпечити стабільну якість обслуговування, особливо для чутливих до затримок додатків, таких як VoIP або онлайн-ігри.

Змінення перевантаження мережі за допомогою обмеження трафіку є ще одним великим аспектом управління трафіком [8]. Керуючи обсягом трафіку, який вводиться в мережу, можна значно знизити ризик виникнення заторів і, як за рахунок збереження QoS для всіх користувачів [3]. Наприклад, реалізація механізмів Admission Control мережі дозволяє використовувати тільки певну кількість нових з'єднань, які уникають перезавантаження. Цей підхід є особливою кількістю в мультисервісних мережах, де одночасно передається кілька видів трафіку, що вимагає різних рівнів QoS [9].

Керування чергами (Queue Management)

Обговорюючи керування чергами в системах трафіку, важливо розуміти різні типи доступних механізмів черги, такі як FIFO (First-In-First-Out), Weighted Fair Queuing (WFQ) і Low Latency Queuing (LLQ) [10]. . FIFO — це простий метод постановки в чергу, коли пакети обробляються в порядку надходження, що робить його простим, але потенційно неефективним в умовах високого навантаження. Навпаки, WFQ дозволяє більш рівномірно розподіляти пропускну здатність між різними типами трафіку, гарантуючи, що критично важливі програми отримають необхідні ресурси, водночас обслуговуючи менш термінові дані. LLQ поєднує в собі переваги зваженої чесної черги на основі класу (CBWFQ) із пріоритетною чергою, що забезпечує обробку чутливого до часу трафіку з низькою затримкою.

Ця диференціація типів черги має вирішальне значення для підтримки оптимальної якості обслуговування (QoS) у змінних умовах мережі.

Оптимізація черг життєво важлива для мінімізації тремтіння та втрати пакетів, що може значно вплинути на якість роботи користувачів [11]. Ефективне керування чергою може допомогти забезпечити своєчасну передачу пакетів, зменшуючи різницю затримки (тремтіння) і підтримуючи послідовний потік даних. Ця оптимізація може включати коригування параметрів алгоритмів черги, щоб динамічно реагувати на коливання моделей трафіку, таким чином підтримуючи баланс між пропускною здатністю та затримкою [12]. Використання таких методів, як формування трафіку та пріоритезація, може підвищити продуктивність мережі, що зрештою призведе до більш надійного обслуговування для додатків, які потребують високої якості обслуговування.

Активне керування чергами (AQM) є важливою стратегією для балансування трафіку в мережевих середовищах [13]. Методи AQM дозволяють проактивно керувати чергами шляхом моніторингу та контролю потоку пакетів на основі поточних умов мережі. Використовуючи алгоритми, які виявляють перевантаження та відповідно коригують параметри черги, AQM може пом'якшити такі проблеми, як розвантаження буфера, яке виникає, коли надмірна буферизація призводить до збільшення затримки [6]. Цей метод не тільки покращує показники QoS, як-от середню затримку та рівень втрати пакетів, але й підвищує задоволеність користувачів, забезпечуючи більш плавну та ефективну роботу в мережі [14]. Таким чином, включення AQM у структуру управління трафіком має важливе значення для забезпечення задоволення різноманітних вимог до трафіку при збереженні оптимальної продуктивності.

Адаптивне управління ресурсами

Використання алгоритмів динамічного розподілу ресурсів має вирішальне значення для ефективних методів управління трафіком, які забезпечують якість обслуговування (QoS) у сучасних мережах [15]. Ці алгоритми дозволяють розподіляти мережеві ресурси в реальному часі на основі поточних вимог і умов, адаптуючись до коливань у моделях трафіку. Наприклад, такі методи, як випадкове

раннє виявлення (RED) і протокол резервування ресурсів (RSVP), можуть бути використані для динамічного керування розподілом ресурсів, дозволяючи пріоритезацію критичного трафіку та ефективну обробку перевантаження [3]. Впроваджуючи ці динамічні алгоритми, мережеві адміністратори можуть оптимізувати використання ресурсів, що призведе до підвищення продуктивності та надійності, які є важливими для підтримки QoS у різних програмах.

Моніторинг і налаштування параметрів QoS в реальному часі є ще одним важливим аспектом адаптивного управління ресурсами [16]. Постійно оцінюючи потоки трафіку та продуктивність мережі, оператори можуть виявляти потенційні вузькі місця та вносити необхідні корективи для підтримки якості обслуговування. Існує два основні методи отримання даних про функціонування мережі: моніторинг реального трафіку та тестові вимірювання [17]. Ці методи забезпечують уявлення про поточний стан мережевих ресурсів і допомагають забезпечити дотримання рівнів QoS, установлених під час з'єднання. Моніторинг у режимі реального часу не тільки сприяє проактивному управлінню, але й покращує загальну взаємодію з користувачем, мінімізуючи збої та підтримуючи постійний рівень обслуговування.

Інтеграція технологій штучного інтелекту (AI) і машинного навчання (ML) для прогнозування та управління трафіком є значним прогресом в адаптивному управлінні ресурсами [18]. Ці інструменти аналізують величезні обсяги даних з різних джерел, виявляють закономірності та прогнозують майбутні умови трафіку, що є важливим для ефективної роботи мережі [19]. Використовуючи AI/ML, мережеві системи можуть автоматично коригувати розподіл ресурсів на основі очікуваних вимог трафіку, покращуючи швидкість реакції та зменшуючи затримку. Цей проактивний підхід дозволяє краще справлятися з динамічним навантаженням трафіку та забезпечує послідовне надання QoS, що в кінцевому підсумку призводить до більш надійної та стійкої мережевої інфраструктури.

## 2.4. Механізми пріоритезації та класифікації трафіку

Класифікація трафіку є критично важливим компонентом керування мережею, і вона охоплює різні категорії, такі як трафік голосу, відео, даних і Інтернету речей (IoT) [1] (рис. 2.3). Кожна категорія має відмінні характеристики та вимоги, тому важливо розуміти природу трафіку під час реалізації механізмів визначення пріоритетів. Наприклад, голосовий трафік зазвичай потребує низької затримки, щоб підтримувати якість виклику, тоді як відеотрафік вимагає більшої пропускної здатності для потокового передавання. Трафік даних може бути більш гнучким щодо затримки, але також може вимагати спеціальних функцій якості обслуговування (QoS) для забезпечення надійності. Пристрої IoT, які часто характеризуються переривчастим підключенням і низькою швидкістю передачі даних, створюють додаткові складності. Завдяки ефективній категоризації трафіку мережі можуть оптимізувати розподіл ресурсів і підвищити загальну продуктивність.

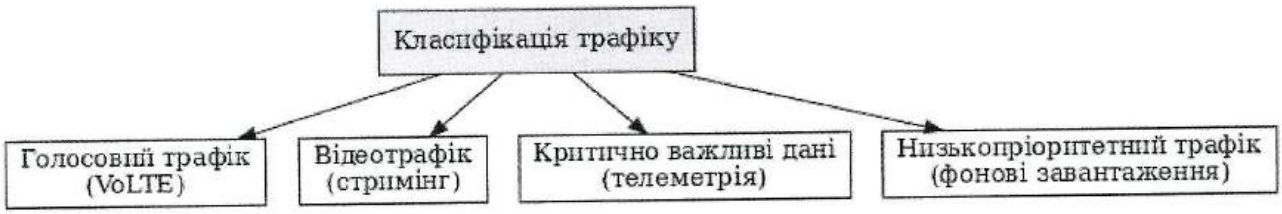



Рис. 2.3. Методи класифікації трафіку

Класифікація трафіку значною мірою залежить від визначення конкретних параметрів, таких як затримка, тремтіння та втрата пакетів [1]. Затримка означає час, необхідний пакету для проходження від джерела до пункту призначення, зазвичай вимірюється в мілісекундах [2]. Джиттер описує мінливість затримки пакетів, яка може вплинути на якість додатків у реальному часі, таких як голос і відео. Втрата пакетів відбувається, коли пакети даних не досягають місця призначення, що потенційно може призвести до перебоїв у зв'язку. Кожен із цих параметрів відіграє важливу роль в оцінці якості трафіку та визначенні відповідної

стратегії визначення пріоритетів. Вирішення цих технічних проблем має вирішальне значення для підтримки безперебійного підключення та забезпечення отримання критично важливих програм необхідних ресурсів.

Що стосується методів класифікації, для ефективного управління трафіком використовуються як статичні, так і динамічні підходи [3]. Статичні методи включають попередньо визначені правила, які класифікують трафік на основі певних критеріїв, які можуть включати номери портів або попередньо визначені протоколи. Хоча ці методи можуть бути ефективними, їм може бракувати гнучкості в адаптації до мінливих умов мережі. З іншого боку, динамічні методи призначені для налаштування класифікації в режимі реального часу на основі поточної продуктивності мережі та поведінки трафіку [4]. Ця адаптивність дозволяє ефективніше використовувати ресурси та покращувати якість обслуговування. Використовуючи комбінацію цих підходів, мережі можуть створити більш надійну та чутливу систему керування трафіком, яка відповідає потребам різноманітних програм.

Алгоритми пріоритезації трафіку

Статичне призначення на основі класу трафіку є місцем управління мережею, що забезпечує ефективну обробку даних [5]. Підхід вимагає класифікації пакетів на основі різних полів заголовка або вмісту пакетів, визначених користувачем [6]. Завдяки цьому механізму високопріоритетний трафік поміщається в сторінку з пріоритетом, тоді як інший трафік розподіляється за різними чергами залежно від їх класу. Це дозволяє оптимізувати використання мережевих ресурсів, забезпечуючи, щоб критичні для бізнесу застосунки отримували необхідні ресурси. Статичне призначення є особливо корисним у сценаріях з передбачуваними навантаженнями, де типи трафіку добре відомі.

Динамічна пріоритезація залежно від завантаженості мережі забезпечує більш ефективний підхід до управління трафіком [7]. Механізм дозволяє адаптувати вибірки в реальному часі, враховуючи зміни в завантаженні мережі та вимоги до трафіку [8]. Наприклад, під час пікових завантажень важливі пакети можуть отримати вищий пріоритет, тоді як менш критичні дані можуть бути

призупинені або оброблені з нижчим пріоритетом. Це дозволяє зменшити затримки та підвищити загальну продуктивність мережі, забезпечуючи при цьому, щоб критичні дані не зазнали затримок. Динамічна пріоритезація також забезпечує ефективність використання мережевих ресурсів, адаптуючи їх до поточної ситуації.

Пріоритетація в реальному часі для критичних додатків є ключовим аспектом сучасних мережевих систем [1] (рис. 2.4.). Цей підхід вимагає від мережевого обладнання можливості швидкого реагування на зміну умов трафіку, що забезпечує обробку пакетів з високим перевагою, таких як голосові або відеозв'язки [9]. В умовах високої завантаженості мережі критичні додатки, як-от VoIP, повинні підтримувати баланс, щоб уникнути затримок і збоїв у передачі даних [5]. Технології, що підтримують такий пріоритет управління, також включають механізми буферизації, які забезпечують ефективний розподіл трафіку та знижують ймовірність втрачених пакетів. Таким чином, пріоритетність в реальному часі є вирішальним чинником для забезпечення високої якості обслуговування в сучасних мережах.




Рис. 2.4. Методи пріоритезації трафіку

Технологічні інструменти пріоритезації та класифікації

Одним з основних технологічних інструментів пріоритезації трафіку є механізм Differentiated Services (DiffServ), який забезпечує ефективне управління трафіком шляхом класифікації пакетів, їх маркування та управління інтенсивністю [2]. DiffServ поділяє трафік на класи з максимальними перевагами, що дозволяє реалізувати "м'яку" якість обслуговування, на реєстрацію від моделі IntServ, яка забезпечує більш жорсткі вимоги [1]. У цьому контексті важливо відзначити, що DiffServ є відмінним прикладом "розумної" пріоритезації трафіку, оскільки він

дозволяє оптимізувати ресурсне управління та забезпечити необхідний рівень якості для критично важливих добавок [10]. Це досягається через механізми управління чергами та політикою ресурсного розподілу, які забезпечують гнучкість в обробці різних типів трафіку [11].

Інтеграція технології MPLS (Multiprotocol Label Switching) також грає важливу роль в управлінні пріоритетами трафіку [12]. Ця високопродуктивна телекомунікаційна технологія передає дані між вузлами мережі, оптимізуючи маршрутизацію трафіку [13]. MPLS дозволяє створювати оптимізовані шляхи для передачі трафіку, що істотно підвищує ефективність управління трафіком, особливо в середовищі з різними типами даних, такими як IP-пакети, ATM, Frame Relay та Ethernet [14]. Завдяки MPLS, можливо реалізувати більш складні механізми пріоритезації, що дозволяє організаціям краще справлятися з навантаженнями та зменшувати затримки в обробці пакетів, що в свою чергу підвищує загальну продуктивність мережі [15].

Підтримка пріоритетів на кінцевих рівнях пристроїв є ще одним аспектом механізмів пріоритезації трафіку [2]. Завдяки реалізації технологій класифікації трафіку в реальному часі, кінцеві пристрої можуть адаптуватися до умов мережі та коригувати свої поведінкові характеристики відповідно до пріоритетів трафіку [16]. Це особливо важливо для додатків, які вимагають гарантованої швидкості передачі даних, таких як відеоконференції або онлайн-ігри. Використання навчальних алгоритмів для класифікації трафіку дозволяє оптимізувати обробку пакетів, зменшуючи затримки в буферах пристроїв [4]. Таким чином, інтеграція механізмів пріоритезації на всіх рівнях мережі, включаючи кінцеві пристрої, забезпечує більш ефективне управління трафіком і покращує загальний користувацький досвід.

Вплив класифікації та пріоритезації на якість обслуговування

Ефективна пріоритетність трафіку є критично важливою для зменшення затримки та джитеру в мережах. Якщо дані передаються через мережу, пакети можуть дізнатися затримку в чергах на маршрутизаторах або комутаторах, що призводить до зниження якості обслуговування [4]. Завдяки механізмам

пріоритезації, трафік може бути розділений на категорії, що дозволяє критично накопичити пакети, таким чином, як голосові або відеопотоки, отримувати вищий рейтинг під час обробки [17]. Це, у свою чергу, зменшує затримки, що особливо важливо для програми в реальному часі, де навіть незначні затримки можуть вплинути на якість зв'язку. Пріоритизуючи трафік, мережа може забезпечити швидку та ефективну передачу даних, що забезпечує загальну якість обслуговування.

Забезпечення рівня QoS (якості обслуговування) для різних типів трафіку також є промисловим аспектом класифікації та пріоритезації [10]. У мережах, де одночасно передається кілька типів трафіку, таких як веб-додатки, відео та голосові виклики, необхідно впроваджувати механізми, які гарантують, що кожен тип трафіку отримує відповідний рівень обслуговування [1]. Наприклад, для голосових викликів необхідно забезпечити швидку передачу та низьку затримку, тоді як для потокового відео можна прийняти деяку підтримку, але без зниження якості зображення. Забезпечуючи різні рівні QoS для різних видів трафіку, мережі можуть забезпечити стабільну та надійну роботу, що задовольняє потреби користувачів.

Адаптація до збільшення обсягу трафіку в мережі є ще одним аспектом, який не відповідає якості обслуговування [1]. Зі збільшенням кількості користувачів та пристроїв, які підключаються до мережі, виникає потреба в ефективних механізмах управління трафіком. Системи пріоритезації та класифікації повинні бути гнучкими та здатними адаптуватися до змін у трафіку, щоб підтримувати необхідний рівень QoS [18]. Це включає в себе використання алгоритмів управління чергами та маршрутизацією трафіку, які можуть автоматично коригувати пріоритети у відношенні від реального завантаження в мережі. Таким чином, адаптація до збільшення обсягу трафіку є ключовою для забезпечення стабільної роботи мережі та високої якості обслуговування для всіх користувачів.

# РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ QUALITY OF SERVICE ДЛЯ VOLTE В СУЧАСНИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

## 3.1. Критерії QoS та параметри передачі, що впливають на якість голосового трафіку

Значення якості обслуговування (QoS) у сучасних мережах LTE неможливо переоцінити, оскільки воно відіграє вирішальну роль у підтримці продуктивності та надійності служб реального часу, таких як передача голосу через LTE (VoLTE) [1]. QoS гарантує, що голосовий трафік отримує необхідний пріоритет і ресурси для підтримки якості виклику, навіть за наявності інших одночасних потоків даних [1] (рис. 3.1). Це особливо важливо, враховуючи спільну природу мереж LTE, де кілька служб і програм конкурують за пропускну здатність. Щоб досягти цього, мережеві оператори повинні ретельно керувати такими параметрами, як затримка, тремтіння та втрата пакетів, які безпосередньо впливають на якість голосового виклику [2]. Завдяки оптимізації цих параметрів мережі LTE можуть забезпечити безперебійний і високоякісний голосовий зв'язок, який є важливим для задоволення користувачів і загального успіху послуг VoLTE.

Забезпечення QoS для голосових послуг у мережах LTE представляє кілька проблем, які необхідно вирішити, щоб підтримувати оптимальну продуктивність. Однією з основних проблем є динамічний характер мобільного середовища, який може призвести до коливань якості мережі та вплинути на безперервність голосових викликів [3]. Крім того, голосові пакети часто конкурують з іншими типами трафіку, такими як відео та дані, що може призвести до збільшення затримки або тремтіння, якщо не керувати належним чином [4]. Перевантаження мережі та події хэндовери є іншими факторами, які можуть порушити QoS, спричиняючи втрату пакетів або затримку під час голосових викликів. Щоб пом'якшити ці проблеми, використовуються складні стратегії управління трафіком і методи розподілу ресурсів, які гарантують, що голосовий трафік зберігає пріоритет над менш чутливими до часу послугами [5]. Ці виклики підкреслюють

складність забезпечення узгодженого QoS у мобільних мережах, що вимагає постійного моніторингу та адаптації до мінливих умов мережі.

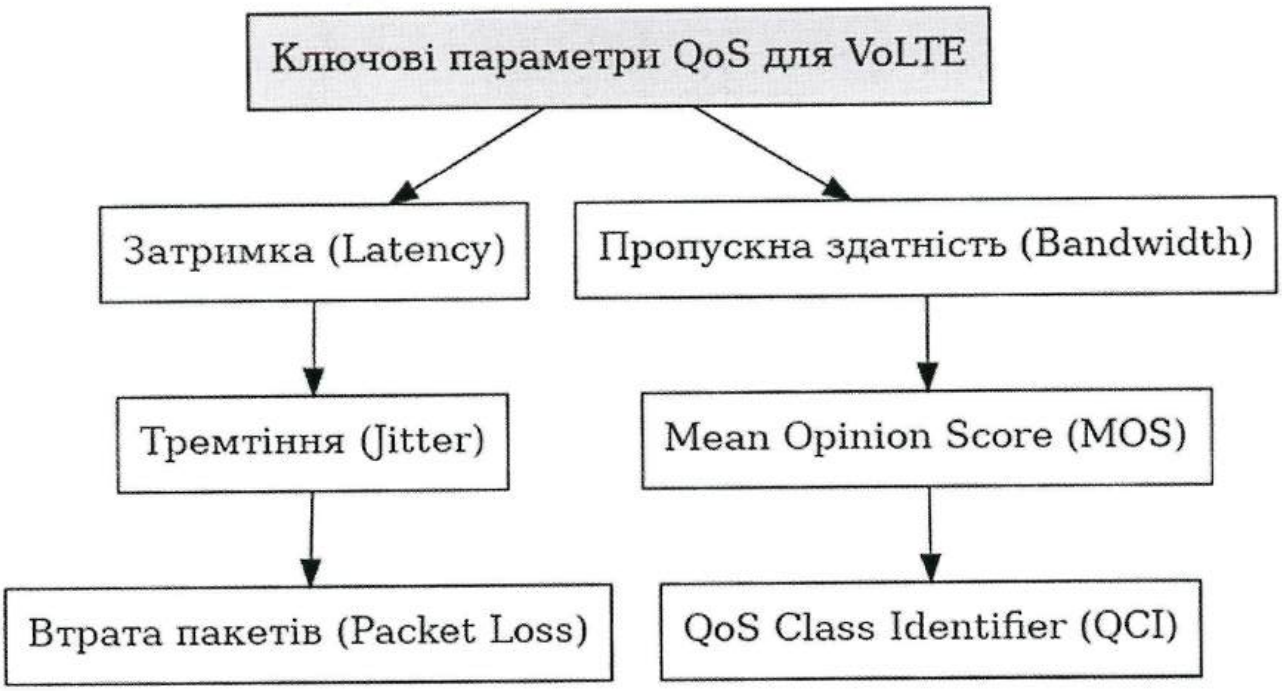



Рис. 3.1. Ключові параметри QoS для VoLTE

Голос через LTE (VoLTE) представляє значний прогрес у порівнянні з традиційними технологіями передачі голосу, пропонуючи чіткі відмінності, які підвищують якість і ефективність голосових послуг. На відміну від мереж з комутацією каналів, які використовувалися в попередніх поколіннях, VoLTE використовує архітектуру з комутацією пакетів, що дозволяє більш ефективно використовувати мережеві ресурси та покращити якість зв'язку [6]. Цей перехід до повністю IP-мережі дозволяє інтегрувати голосові послуги зі службами даних, сприяючи таким розширеним функціям, як голос високої чіткості та одночасна передача голосу та даних [7]. Крім того, VoLTE отримує переваги від вдосконалених механізмів QoS, які визначають пріоритет голосових пакетів, зменшуючи затримку та тремтіння порівняно зі старими технологіями [6]. Ці вдосконалення не тільки покращують взаємодію з користувачами, але й дозволяють операторам надавати більш надійні та масштабовані голосові послуги, роблячи VoLTE наріжним каменем сучасних мереж мобільного зв'язку.

Ідентифікатори класу QoS (QCI)

Роль QCI у забезпеченні якості обслуговування (QoS) є першорядною в сфері сучасних комунікаційних мереж. QCI, або QoS Class Identifier, служить ключовим компонентом в управлінні якістю обслуговування шляхом встановлення пріоритетів і категоризації мережевого трафіку на основі його конкретних вимог. Це особливо важливо для служб реального часу, таких як голос через IP (VoIP) або голос через LTE (VoLTE), де підтримка низької затримки та тремтіння має важливе значення для безперебійного голосового зв'язку. QCI дозволяє диференціювати трафік на різні класи, гарантуючи, що голосові пакети отримують належний рівень пріоритету над іншими типами даних. Така пріоритезація мінімізує затримки та втрату пакетів, тим самим підвищуючи загальну якість голосового трафіку [6]. Впроваджуючи QCI, мережеві провайдери можуть ефективно керувати розподілом ресурсів і оптимізувати продуктивність мережі, в кінцевому підсумку забезпечуючи чудову взаємодію з користувачем.

Класи QCI ретельно розроблені для задоволення окремих потреб голосу та сигнальних даних у мережі. Зокрема, різні класи QCI призначаються голосовому трафіку та сигнальній інформації, щоб гарантувати, що кожен тип даних отримує відповідний рівень обслуговування та пріоритет. Голосовий трафік, який вимагає високого рівня надійності та низької затримки, зазвичай призначається класам QCI з вищим пріоритетом. Це гарантує, що голосові дані передаються з мінімальною затримкою, що забезпечує чітке та безперебійне спілкування. З іншого боку, дані сигналізації, які включають контрольні повідомлення, необхідні для встановлення та підтримки голосових викликів, призначаються різним класам QCI, які можуть допускати трохи більшу затримку, але все ще вимагають надійності [8]. Ця класифікація забезпечує ефективне управління ресурсами та гарантує, що як голосові, так і сигнальні дані обробляються у спосіб, який відповідає їхнім конкретним вимогам до якості.

Взаємодія між QCI та іншими параметрами QoS відіграє життєво важливу роль у загальному функціонуванні мережевих систем. QCI не працює ізольовано; він працює в поєднанні з іншими параметрами QoS, такими як пропускна здатність,

затримка та тремтіння, щоб забезпечити оптимальну продуктивність мережі. Інтегруючи QCI з цими параметрами, мережеві оператори можуть досягти збалансованого розподілу ресурсів, що важливо для підтримки високоякісних голосових послуг. Наприклад, QCI може допомогти визначити планування мережевих ресурсів таким чином, щоб відповідати вимогам QoS голосового трафіку, тим самим зменшуючи затримку та покращуючи чіткість голосового зв'язку [9]. Ця складна взаємодія між QCI та іншими параметрами QoS є прикладом складності сучасного керування мережею та підкреслює важливість цілісного підходу до QoS для забезпечення чудової якості голосового трафіку.

Ключові параметри QoS для VoLTE

Середня оцінка думки (MOS) є критичним критерієм для оцінки якості голосового трафіку в мережах VoLTE. MOS — це суб'єктивний показник, який відображає сприйману якість голосових дзвінків, зазвичай оцінюється за шкалою від 1 (погано) до 5 (відмінно) [1]. Ця оцінка отримана на основі людської оцінки якості виклику, що робить її цінним показником для розуміння взаємодії з користувачем. У реальних програмах MOS надає інформацію про те, як користувачі сприймають чіткість і зрозумілість голосового зв'язку, що важливо для підтримки задовільного рівня обслуговування. Аналізуючи значення MOS, мережеві оператори можуть визначати області для вдосконалення та приймати обґрунтовані рішення для підвищення загальної якості голосових послуг. Цей метод є невід'ємною частиною гарантії того, що голосовий трафік відповідає очікуванням кінцевих користувачів і відповідає галузевим стандартам якості.

Затримка «Mouth-to-Ear Delay» — ще один важливий параметр, що впливає на якість голосового трафіку в мережах VoLTE. Ця затримка охоплює загальний час, необхідний голосовому сигналу для проходження від рота мовця до вуха слухача, включаючи затримки мережі та кодування/декодування [10]. Як правило, бюджет затримки близько 100 мілісекунд вважається прийнятним для підтримки природного потоку розмови [11]. Надмірні затримки можуть призвести до помітних затримок, порушуючи ритм розмови та викликаючи розчарування у користувачів. Управління цією затримкою має вирішальне значення для мереж

VoLTE, щоб забезпечити безперебійний голосовий зв'язок. Мережеві інженери повинні ретельно контролювати та оптимізувати різні компоненти, такі як затримка мережі та час обробки, щоб гарантувати, що затримка «від рота до вуха» залишається в прийнятних межах.

У сфері голосового трафіку тремтіння та втрата пакетів є значними факторами, які можуть погіршити якість зв'язку. Тремтіння означає зміну часу надходження пакетів, що може спричинити нерегулярність відтворення звуку, що призводить до переривчастого або спотвореного звуку [1]. З іншого боку, втрата пакетів вимірює відсоток пакетів даних, які не досягають місця призначення, що може призвести до втрати аудіосегментів [6]. Обидві проблеми негативно впливають на якість голосового трафіку, оскільки порушують безперервність і чіткість голосових викликів. Ефективне керування цими параметрами має вирішальне значення для підтримки високоякісних голосових послуг. Оператори мереж можуть використовувати різні методи, такі як механізми якості обслуговування (QoS) і оптимізація мережі, щоб мінімізувати тремтіння та втрату пакетів, забезпечуючи тим самим плавне та безперебійне спілкування.

Технологічні вимоги до QoS у VoLTE

У сфері VoLTE доступність і збереження бездротових ресурсів мають вирішальне значення для підтримки задовільного рівня якості обслуговування (QoS). Ці ресурси є фундаментальними, оскільки забезпечують ефективне функціонування пакетних мереж, призначених для надання послуг у реальному часі, включаючи передачу голосу через IP (VoIP) [6]. Швидка передача даних без значних затримок або перерв є необхідною для безперебійного голосового спілкування. Ефективно керуючи цими ресурсами, мережеві провайдери можуть мінімізувати затримку та тремтіння, які є критичними факторами, що впливають на якість голосового трафіку. Таке керування передбачає виділення достатньої пропускної здатності для відповідності очікуваним трафіковим навантаженням і динамічне коригування ресурсів у відповідь на вимоги в реальному часі. Такий стратегічний розподіл не тільки підвищує надійність голосових послуг, але й гарантує, що користувачі відчуватимуть мінімальні збої під час дзвінків, таким

чином підтримуючи високий рівень задоволеності та безперервність обслуговування.

Резервування мережевих ресурсів відіграє життєво важливу роль у забезпеченні QoS для послуг VoLTE. Цей процес передбачає попереднє виділення необхідних мережевих ресурсів, щоб гарантувати, що голосовий трафік отримує необхідний пріоритет і пропускну здатність. Резервуючи ресурси, мережі можуть краще керувати потоком трафіку, що важливо для підтримки якості обслуговування [12]. Ключові параметри мережі, такі як пропускна здатність і затримка, безпосередньо залежать від того, наскільки ефективно резервуються та використовуються ресурси. Резервування ресурсів не тільки допомагає зменшити втрату пакетів і затримку, але й забезпечує плавну передачу критичних голосових даних по мережі. Завдяки належним чином реалізованим механізмам резервування голосовий трафік може досягти бажаного рівня продуктивності, забезпечуючи чітке та безперебійне спілкування навіть у часи пікового використання.

Забезпечення наскрізної якості обслуговування (E2E QoS) є важливим аспектом доставки високоякісного голосового трафіку в мережах VoLTE. Він охоплює весь шлях зв'язку від відправника до одержувача, гарантуючи, що кожен сегмент мережі дотримується попередньо визначених параметрів QoS [1]. Цей комплексний підхід допомагає підтримувати узгоджені рівні обслуговування на різних мережевих вузлах і технологіях. Впроваджуючи E2E QoS, постачальники послуг можуть контролювати та оптимізувати різні фактори, включаючи розподіл смуги пропускання, затримку та тремтіння протягом усього процесу передачі. Такі заходи необхідні для того, щоб якість голосових дзвінків залишалася незмінною та відповідала очікуванням користувачів. Крім того, E2E QoS сприяє бездоганній інтеграції різних мережевих елементів, покращуючи загальний досвід користувача, надаючи надійні та високоякісні послуги голосового зв'язку.

Мережеві параметри для підтримки VoLTE

Гарантований бітрейт (GBR), максимальний бітрейт (MBR) і сукупний максимальний бітрейт (AMBR) є основними концепціями забезпечення якості обслуговування (QoS) для мереж VoLTE. GBR — це параметр, який гарантує, що

мінімальний рівень пропускної здатності завжди доступний для голосового трафіку, що має вирішальне значення для підтримки якості виклику та зменшення затримки під час передачі голосу (табл. 3.1). З іншого боку, MBR визначає абсолютну максимальну пропускну здатність, яку можна виділити для даної послуги, гарантуючи, що навіть у час пік мережеві ресурси не перевантажуються, захищаючи таким чином цілісність інших служб. AMBR додатково агрегує цю концепцію, встановлюючи кумулятивне обмеження на пропускну здатність для всіх каналів, що не є GBR, що дозволяє ефективно розподіляти ресурси між кількома службами. Ці параметри разом гарантують, що служби VoLTE можуть підтримувати високу якість передачі голосу навіть за змінних умов мережі, таким чином задовольняючи вимоги QoS у службах зв'язку в реальному часі [2].

Таблиця 3.1.

Якість обслуговування в мережах LTE

| QCI | Тип | Пріоритет | Допустима затримка, мс | Допустимі втрати | Приклад |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | GBR | 2 | 100 | $10^{-2}$ | VoLTE виклик |
| 2 | | 4 | 150 | $10^{-3}$ | Відео виклик |
| 3 | | 5 | 300 | $10^{-6}$ | Онлайн ігри |
| 4 | | 3 | 50 | $10^{-3}$ | «Стрім» відео |
| 5 | Non-GBR | 1 | 100 | $10^{-6}$ | IMS |
| 6 | | 7 | 100 | $10^{-3}$ | Електронна пошта, чат |
| 7 | | 6 | 300 | $10^{-6}$ | Голосові, відео, інтерактивні ігри |
| 8 | | 8 | 300 | $10^{-6}$ | Сервіси на основі TCP |
| 9 | | 9 | 300 | $10^{-6}$ | |

Ефективне мережеве планування має вирішальне значення для забезпечення QoS у послугах VoLTE, оскільки воно вимагає стратегічного розподілу мережевих

ресурсів для відповідності попередньо визначеним рівням якості обслуговування. Це передбачає комплексний аналіз моделей мережевого трафіку та визначення часу пікового використання для оптимізації розподілу ресурсів. Щоб досягти цього, мережеві інженери повинні враховувати різні фактори, такі як зони покриття, планування пропускної здатності та пріоритезація трафіку. Роблячи це, вони можуть забезпечити наявність достатніх ресурсів для голосового трафіку, мінімізуючи затримку та втрату пакетів. Крім того, впровадження методів динамічного керування трафіком, таких як формування та пріоритезація трафіку, може ще більше підвищити QoS, гарантуючи передачу критичних голосових пакетів із мінімальною затримкою. Таке ретельне планування гарантує, що мережі VoLTE можуть стабільно надавати високоякісні голосові послуги, узгоджуючи суворі критерії QoS, необхідні для програм реального часу [6].

Розрахунок пропускної здатності для VoLTE є критично важливим аспектом проектування мережі, який безпосередньо впливає на якість голосових послуг. Цей процес передбачає визначення оптимальної пропускної здатності, необхідної для підтримки голосового трафіку без шкоди для якості. Розробники мережевого планування повинні враховувати такі фактори, як кількість одночасних користувачів, ефективність кодека та накладні витрати на мережу. Використання ефективних кодеків може значно зменшити вимоги до пропускної здатності, зберігаючи при цьому якість голосу, таким чином дозволяючи більшій кількості користувачів працювати з тими самими обмеженнями пропускної здатності. Крім того, розуміння накладних витрат мережі та включення їх у розрахунки пропускної здатності гарантує, що фактична доступна пропускна здатність узгоджується з можливостями передачі мережі. Завдяки точному обчисленню та забезпеченню пропускної здатності мережі VoLTE можуть ефективно обробляти запити голосового трафіку, таким чином підтримуючи високий рівень якості обслуговування та відповідаючи критеріям QoS [1].

Вплив кодеків на якість VoLTE (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Порівняння кодеків для VoLTE

| Параметр | AMR (Adaptive Multi-Rate) | AMR-WB (Adaptive Multi-Rate WideBand) | EVS (Enhanced Voice Services) |
|---|---|---|---|
| Діапазон бітрейтів (кбіт/с) | 4.75 – 12.2 | 6.6 – 23.85 | 5.9 – 128 |
| Частотний діапазон (кГц) | 0.3 – 3.4 | 0.05 – 7 | 0 – 20 |
| Якість звуку (MOS) | 3.0 – 4.0 | 3.5 – 4.5 | 4.5 – 5.0 |
| Стійкість до втрат пакетів | Низька | Середня | Висока |
| Затримка кодування (мс) | ~20 | ~25 | ~32 |
| Підтримка мовних режимів | Тільки мовні | Мовні та музичні | Мовні, музичні, фонові звуки |
| Адаптивність до мережевих умов | Обмежена | Помірна | Висока |
| Ефективність використання смуги | Висока | Висока | Дуже висока |

Використання кодека Wideband Adaptive Multi-Rate (WB-AMR) значно покращує якість послуг VoLTE, забезпечуючи чудову чіткість і надійність голосу. Цей кодек призначений для ефективної обробки голосових даних шляхом адаптації до змінних умов мережі, що є вирішальним для підтримки високоякісної передачі голосу в мережах з комутацією пакетів [10]. Кодек WB-AMR динамічно регулює швидкість передачі даних відповідно до доступної смуги пропускання, гарантуючи оптимізацію якості голосу навіть за коливань умов мережі. Ця адаптивність робить

його особливо ефективним у середовищах VoLTE, де коливання мережі часто можуть порушити якість зв'язку. Крім того, здатність кодека WB-AMR стискати голосові дані без шкоди для якості дозволяє ефективніше використовувати мережеві ресурси, сприяючи загальному покращенню якості зв'язку.

Бітрейт кодека є критичним фактором, який впливає на якість і ефективність передачі голосу в мережах VoLTE. Різні кодеки пропонують різні бітрейти, які безпосередньо впливають на обсяг даних, що передаються через мережу. Наприклад, кодек WB-AMR може працювати на кількох бітових швидкостях, починаючи від низьких до високих, для адаптації до різних умов мережі та вимог до якості [2]. Ця гнучкість дозволяє мережевим операторам балансувати між використанням пропускної здатності та якістю виклику, оптимізуючи продуктивність мережі для голосових послуг у реальному часі. Вищі бітрейти зазвичай призводять до кращої якості голосу, оскільки для представлення звуку використовується більше даних. Однак це також збільшує попит на ресурси мережі, що може призвести до перевантаження, якщо не керувати належним чином. Розуміння зв'язку між вибором кодека та швидкістю передачі даних має важливе значення для оптимізації надання послуг VoLTE.

Вибір кодека суттєво впливає на затримку та втрату пакетів, два важливі фактори, що впливають на голосовий трафік у мережах VoLTE. Затримка означає затримку між передачею та прийомом голосових пакетів, тоді як втрата пакетів відбувається, коли пакети даних не досягають місця призначення. Вибір кодека може впливати на ці параметри, визначаючи, як дані кодуються та декодуються під час передачі [4]. Наприклад, деякі кодеки можуть створювати додаткові затримки обробки через складні алгоритми кодування, тим самим збільшуючи затримку. Іншим може знадобитися більша пропускна здатність, що підвищує ймовірність втрати пакетів у перевантажених мережах. Щоб пом'якшити ці проблеми, життєво важливо вибрати кодеки, які забезпечують баланс між ефективним стисненням даних і мінімальною затримкою. Ретельно вибираючи кодеки, оптимізовані для низької затримки та зменшення втрати пакетів, мережеві оператори можуть значно підвищити якість голосового трафіку в службах VoLTE.

Оптимізація ресурсів для QoS у VoLTE

Використання APN-AMBR (назва точки доступу – сукупна максимальна швидкість передачі даних) є ключовим компонентом керування смугою пропускання для послуг VoLTE (голос через LTE). Цей метод дозволяє розподілити максимальну швидкість передачі даних для групи користувачів, ефективно оптимізуючи ресурси мережі та забезпечуючи стабільну якість обслуговування (QoS) [13]. Встановлюючи обмеження на загальну швидкість передачі даних для конкретного APN, постачальники мереж можуть запобігти перевантаженням і підтримувати якість голосового трафіку. Цей підхід особливо корисний у сценаріях, коли кілька користувачів мають доступ до мережі одночасно, оскільки він допомагає збалансувати навантаження та уникнути погіршення якості обслуговування. Ретельне керування APN-AMBR гарантує, що голосовий трафік може бути пріоритетним, зменшуючи затримку та втрату пакетів, які є критичними факторами для підтримки високоякісного голосового зв'язку.

Алгоритми динамічного резервування ресурсів відіграють ключову роль в оптимізації ресурсів для QoS у мережах VoLTE. Ці алгоритми призначені для постійного коригування розподілу мережевих ресурсів на основі поточного попиту та шаблонів трафіку [6]. Оскільки голосовий трафік дуже чутливий до затримок і вимагає постійної пропускної здатності, ці алгоритми гарантують, що достатні ресурси завжди доступні для підтримки високоякісних голосових викликів. Завдяки динамічному резервуванню ресурсів мережа може швидко адаптуватися до змін попиту користувачів, запобігаючи вузьким місцям і підтримуючи ефективний потік трафіку. Ця адаптивність є важливою для забезпечення безперебійної взаємодії з користувачем, особливо в середовищах із змінним навантаженням мережі. Використання динамічного резервування ресурсів не тільки покращує QoS для послуг VoLTE, але й максимізує загальну ефективність мережевої інфраструктури.

У реальних сценаріях методи оптимізації QoS для послуг VoLTE мають бути надійними та адаптуватися до різних умов. Щоб гарантувати, що голосовий трафік отримує необхідні ресурси та увагу, використовуються такі методи, як формування

трафіку, пріоритетна черга та контроль доступу [14]. Формування трафіку передбачає регулювання потоку даних, щоб уникнути перевантаження мережі, тоді як пріоритетна черга гарантує, що голосові пакети оброблятимуться перед менш важливими даними. Контроль доступу, з іншого боку, обмежує кількість активних голосових сеансів, щоб запобігти перевантаженню мережі. При ефективному застосуванні ці методи можуть значно підвищити якість голосового трафіку шляхом мінімізації затримок і втрати пакетів. На практиці поєднання цих стратегій оптимізації з розширеними інструментами моніторингу дозволяє мережевим операторам проактивно керувати та коригувати параметри мережі, забезпечуючи послідовну та надійну доставку голосових послуг.

## 3.2. Дослідження ефективності аудіокодека Enhanced Voice Services (EVS) для використання у VoLTE

Технічні характеристики аудіокодеки Enhanced Voice Services (EVS) демонструють його високу ефективність при передачі голосу в сучасних мережах зв'язку [1]. EVS був розроблений у 3GPP та впроваджений у 2014 році, щоб замінити кодек AMR-WB для послуг VoLTE та VoNR [2]. Цей кодек підтримує бітрейти в розділі від 5,9 кбіт/с до 23,85 кбіт/с, що дозволяє забезпечити якісний звук під час дзвінків [3]. крім того, EVS використовує адаптивні технології, які можуть зменшити шум під час передачі голосу, що робить його особливо придатним для умов з поганим зв'язком [4]. Завдяки цим характеристикам, EVS став обов'язковим стандартом для передачі голосу в мережах 5G [5] (рис. 3.2).

Основні особливості та переваги аудіокодека EVS включають покращену якість звуку та здатність працювати в різних умовах [1]. EVS забезпечує розширену смугу частоти до 20 кГц, що покращує чіткість мовлення та зменшує спотворення тону [6]. У порівнянні з AMR, який має смугу частот від 300 Гц до 3,4 кГц, EVS пропонує значні переваги в якості передачі голосу [3]. Крім того, кодек EVS дозволяє значно підвищити розпізнаваність голосу, що є критичним місцем для

комунікацій у шумних середовищах [5]. Ці особливості виготовляють EVS надійним вибором для сучасних комунікаційних технологій.

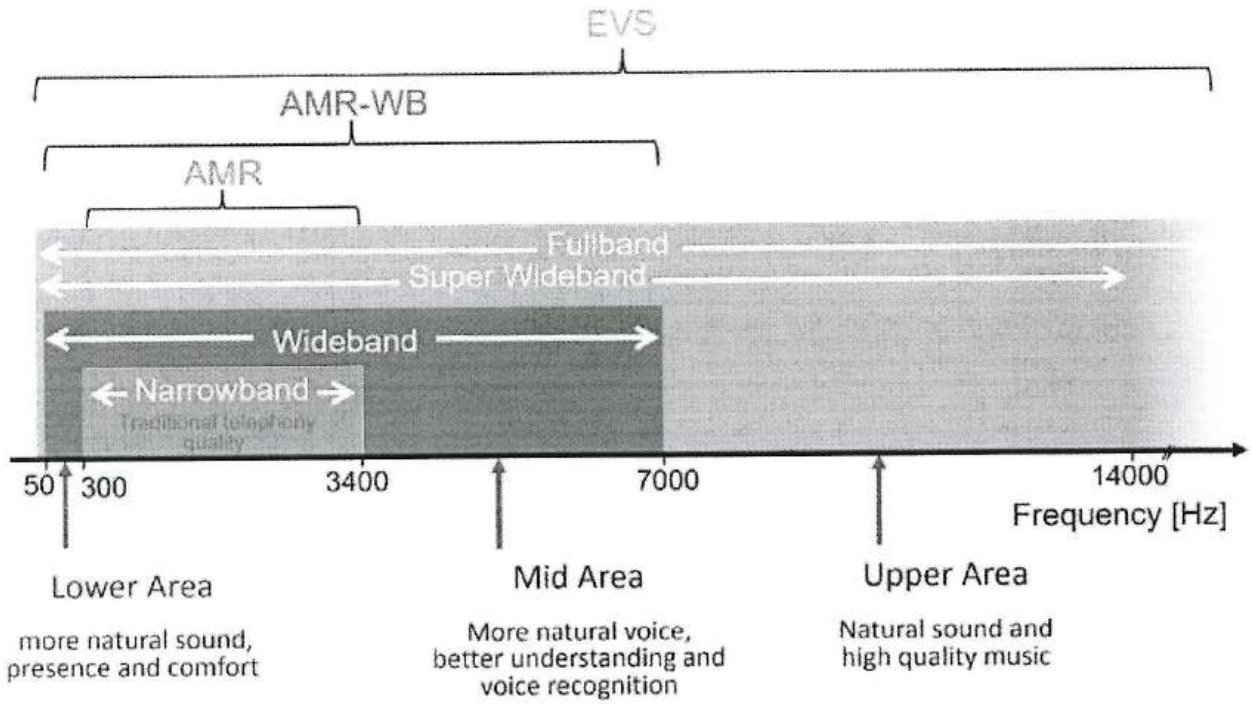



Рис. 3.2. Пропускна здатність аудіо для мобільних голосових служб

Випадки використання та застосування EVS у комунікаціях охоплюють широкий спектр сценаріїв, від мобільного зв'язку до послуг VoIP [1]. Завдяки своїй здатності підтримувати високоякісні дзвінки, EVS ідеально підходить для підприємств, де важлива чіткість звуку під час переговорів [2]. Крім того, цей кодек також використовується в медичних комунікаціях, де важливо передавати голос без спотворення для точного розуміння [4]. Його адаптивні можливості також не вдалося успішно використовувати EVS в мережах з обмеженою пропускною здатністю, що робить його універсальним рішенням для різних комунікаційних потреб [5].

Кодек Adaptive Multi-Rate (AMR) розроблений спеціально для кодування людської мови, що робить його ключовим компонентом у системах мобільного зв'язку [3]. Маючи теоретичну верхню межу 23,85 кбіт/с, AMR ефективно працює в мережах GSM і використовує два часові інтервали для передачі [6]. Його смуга пропускання коливається від 300 Гц до 3,4 кГц, що достатньо для захоплення

основних частот людської мови. Однак цей вужчий частотний діапазон обмежує якість відтворення аудіо порівняно з більш вдосконаленими кодеками. Технічні характеристики AMR підкреслюють його основну функцію як мовного кодека, який є життєво важливим для чіткості голосу під час мобільних дзвінків, але може не відповідати вимогам для додатків високоякісного аудіо.

Порівнюючи показники продуктивності AMR із кодеком Enhanced Voice Services (EVS), можна виявити кілька ключових показників, зокрема бітрейт, якість звуку та затримку [7]. Бітрейт кодека AMR може коливатися залежно від умов мережі, зазвичай коливаючись від 4,75 кбіт/с до 12,2 кбіт/с, тоді як EVS може підтримувати вищі бітрейти до 128 кбіт/с, що забезпечує ширшу смугу пропускання та значно покращену якість аудіо [3] (рис. 3.3). Крім того, EVS пропонує вдосконалене керування тремтінням затримки, яке мінімізує затримку під час голосового зв'язку, забезпечуючи таким чином більш плавну роботу користувача. Якість аудіо, закодованого за допомогою EVS, може призвести до помітного покращення середньої оцінки оцінки (MOS), яка оцінює задоволеність користувачів, перевершуючи кодеки AMR і AMR-WB [8].

| Band-width | Bitrates [kbps] | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FB 20 kHz | | | | | | 16.4 | 24.4 | 32.0 | 48.0 | 64.0 | 96.0 | 128.0 |
| SWB ≥ 14 kHz | | | | 9.6 | 13.2 | 16.4 | 24.4 | 32.0 | 48.0 | 64.0 | 96.0 | 128.0 |
| WB 8 kHz | 5.9 VBR | 7.2 | 8.0 | 9.6 | 13.2 | 16.4 | 24.4 | 32.0 | 48.0 | 64.0 | 96.0 | 128.0 |
| NB 4 kHz | 5.9 VBR | 7.2 | 8.0 | 9.6 | 13.2 | 16.4 | 24.4 | | | | | |

Рис. 3.3. Порівняльна характеристика пропускної смуги та бітрейту аудіокодеків

У промисловості впровадження кодека AMR в першу чергу очевидно в мобільних телекомунікаціях, де він служить надійним варіантом для голосових дзвінків [4]. Його широке застосування в мережах GSM дозволило ефективно використовувати пропускну здатність, зберігаючи відповідну якість голосу. Однак

із зростанням попиту на високоякісне аудіо в мобільних додатках зростає тенденція до впровадження більш просунутих кодеків, таких як EVS. Цій зміні сприяють можливості кодека щодо забезпечення кристально чистого звуку під час дзвінків і його придатність для систем Voice over LTE (VoLTE) [4]. У міру розвитку індустрії перехід від AMR до більш складних кодеків, таких як EVS, відображає потребу в покращеному аудіопереході в сучасних технологіях зв'язку.

Кодек Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB) відомий своїми технічними характеристиками, які покращують якість передачі голосу [9]. AMR-WB стандартизовано Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI) і розроблено спеціально для кодування людської мови. Його здатність забезпечувати високу пропускну здатність мережі, зберігаючи високу якість передачі голосу, робить його цінним інструментом у телекомунікаціях. Ключовою особливістю AMR-WB є використання ширшої смуги аудіо, що дозволяє передавати частоти до 12,65 кГц, фактично подвоюючи діапазон стандартного вузькосмугового кодека [3]. Це вдосконалення частотного діапазону дозволяє кодеку передавати більш чітке та природне звучання мови, що має вирішальне значення для ефективного спілкування в різних програмах.

Порівнюючи показники продуктивності AMR-WB, зокрема щодо якості звуку та ефективності, стає очевидним, що кодек виділяється в конкретних сценаріях [7]. AMR-WB продемонстрував надійний середній рейтинг оцінки (MOS), що вказує на сприятливе сприйняття якості звуку серед користувачів. Цей кодек відмінно працює в середовищах з низьким бітрейтом, зберігаючи при цьому чіткість і зрозумілість, що робить його придатним для мобільних мереж. Однак удосконалення технологій призвело до розробки кодека Enhanced Voice Services (EVS), який забезпечує потенційне підвищення оцінки MOS майже на 0,5 бала порівняно з AMR-WB [7]. Покращені схеми кодування кодека EVS і розширена смуга пропускання звуку (до 20 кГц) сприяють кращій загальній якості звуку, особливо в складних акустичних середовищах [1].

Визнання на ринку та варіанти застосування AMR-WB ще більше підкреслюють його важливість у телекомунікаційному ландшафті [6]. Будучи

кодеком, широко застосованим у стандартах GSM, AMR-WB зарекомендував себе як надійне рішення для голосових дзвінків у різних мобільних мережах. Його здатність адаптуватися до різних умов мережі робить його кращим вибором для операторів, які прагнуть надавати високоякісні голосові послуги. Крім того, з розвитком комунікаційних технологій AMR-WB залишається актуальним завдяки своїй зворотній сумісності з новими кодеками, такими як EVS [4]. Ця сумісність гарантує, що існуючі інфраструктури можуть плавно переходити до розширених послуг без шкоди для якості та надійності, які користувачі очікують від голосового зв'язку.

Продуктивність аудіокодека Enhanced Voice Services (EVS) можна оцінити на основі кількох ключових показників продуктивності порівняно з традиційними кодеками, такими як AMR і AMR-WB [7]. Однією з помітних переваг кодека EVS є його здатність забезпечити майже 0,5 бала покращення середньої оцінки думки (MOS) порівняно з AMR-WB [7]. Це вдосконалення особливо важливе в голосовому спілкуванні, де чіткість і якість звуку є вирішальними. Крім того, кодек EVS підтримує ширший частотний діапазон від 14 кГц до 20 кГц, що забезпечує надширокосмуговий звук і покращену точність звуку [3]. Отже, ці показники продуктивності вказують на те, що EVS не тільки відповідає, але й перевершує можливості своїх попередників, що забезпечує більш задовільну роботу користувача під час голосових дзвінків.

Кілька контекстних факторів впливають на продуктивність аудіокодеків, таких як EVS, AMR і AMR-WB, які можуть визначати їхню ефективність у різних середовищах [6]. Наприклад, умови мережі, включаючи доступність пропускної здатності та затримку, відіграють вирішальну роль у продуктивності кодека. Режим сумісності кодека EVS дозволяє кодувати та декодувати потоки AMR-WB, сприяючи плавним переходам між двома кодеками, що може бути особливо корисним у мережевих сценаріях, що коливаються [2]. Ця можливість адаптації гарантує, що користувачі відчувають постійну якість звуку, навіть коли умови мережі змінюються. Крім того, попит на голосові послуги високої чіткості, такі як

Voice over LTE (VoLTE), підкреслює зростаючу важливість кодеків, які можуть підтримувати чіткість звуку за різних умов [4].

У магістерській роботі проведено порівняння ефективності аудіокодека Enhanced Voice Services (EVS) для використання у VoLTE. На рис. 3.4 зображено графічне порівняння якості голосу при використанні аудіокодеків AMR та EVS. На рис. 3.5 зображено графічне порівняння якості змішаного трафіку й музики (нетиповий голосовий трафік) при використанні кодеків AMR та EVS.

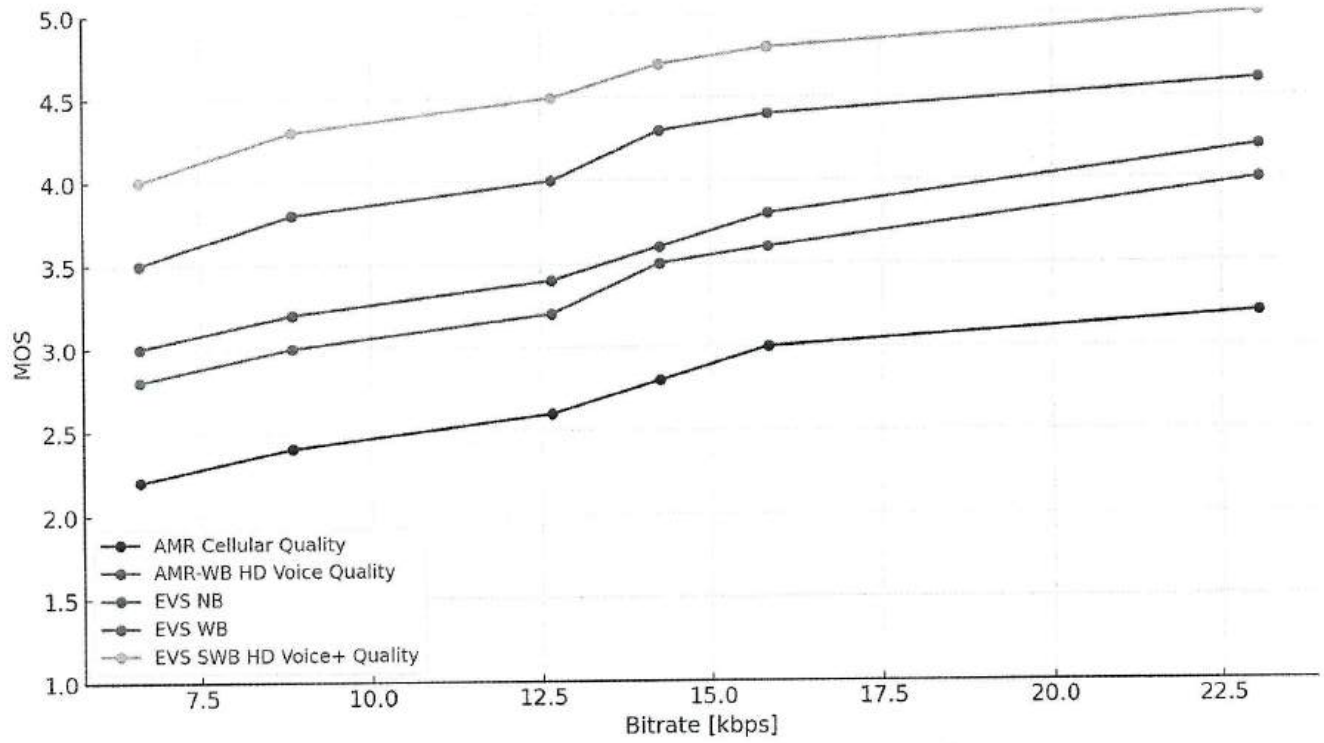



Рис. 3.4. Порівняльна характеристика якості голосу в кодеках AMR та EVS

Показано, що EVS забезпечує кращу якість передачі голосу та музики порівняно з AMR і AMR-WB. Кодек EVS демонструє ширший діапазон частот, що сягає до 20 кГц, тоді як AMR-WB обмежується 7 кГц. При цьому EVS досягає вищих показників Mean Opinion Score (MOS), перевищуючи AMR-WB приблизно на 0,5 пункти за однакових умов. Крім того, EVS забезпечує бітрейти в діапазоні від 5,9 до 128 кбіт/с, що дозволяє операторам мобільного зв'язку ефективно оптимізувати використання мережевих ресурсів. Його здатність адаптувати якість

передачі до умов середовища забезпечує кращу продуктивність при низьких витратах ресурсів. Інтероперабельність EVS з AMR-WB і його технологічні вдосконалення роблять цей кодек ефективнішим рішенням для сучасних мобільних послуг.

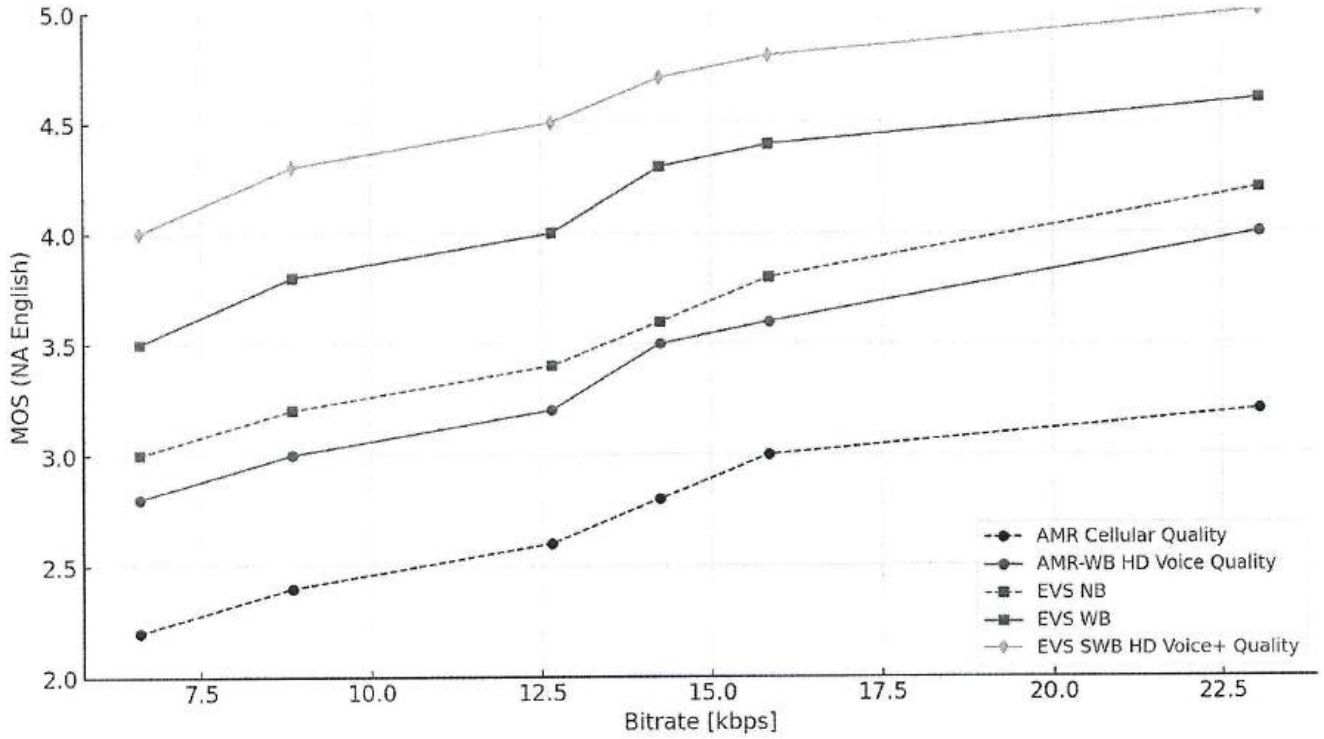



Рис. 3.5. Порівняльна характеристика якості змішаного трафіку в аудіокодеках AMR та EVS

# ВИСНОВКИ

**У першому розділі** досліджено еволюцію мобільного зв'язку від 1G до 4G LTE, де були розкриті ключові технологічні досягнення кожного покоління. Аналіз показав, що перехід від аналогових до цифрових систем (2G), впровадження високошвидкісного Інтернету (3G) та зростання швидкості передачі даних до 1 Гбіт/с (4G LTE) суттєво вплинули на розвиток мобільних мереж та їх застосування. У розділі наведено порівняльну таблицю характеристик поколінь 1G–4G, що дозволяє чітко окреслити переваги та недоліки кожної технології.

Описано основні компоненти мережі: мережу радіодоступу (RAN) та еволюційне пакетне ядро (EPC). На рисунку 1.2 продемонстровано структурну схему архітектури LTE, що ілюструє взаємодію між ключовими елементами. Таблиця 1.2 узагальнює функціональні особливості основних архітектурних компонентів, підкреслюючи їхню роль у забезпеченні високої продуктивності мережі.

Розглянуто технологічні виклики LTE у контексті підтримки VoLTE. Висвітлено проблеми затримки, тремтіння, втрати пакетів та їх вплив на якість голосових викликів. Наведено рисунок 1.3, який демонструє архітектуру мережі для підтримки VoLTE, та таблицю 1.2, що деталізує можливі рішення технологічних проблем. Аналіз показав, що оптимізація радіоресурсів, управління перешкодами та інтеграція з іншими мережами є ключовими аспектами забезпечення якісних голосових послуг у LTE.

Таким чином, у розділі узагальнено результати досліджень щодо еволюції мобільних мереж, особливостей архітектури LTE та викликів, пов'язаних із підтримкою VoLTE, що формує базу для подальшого аналізу ефективності даної технології.

**У другому розділі** вперше запропоновано систематизований підхід до визначення та забезпечення параметрів Quality of Service (QoS) у телекомунікаційних мережах. Описані ключові параметри, такі як затримка, джиттер, втрата пакетів і пропускна здатність, стали основою для аналізу впливу

на якість зв'язку. У таблиці 2.1 подано розширену характеристику параметрів QoS із зазначенням причин їх виникнення, методів покращення та впливу на якість зв'язку. Рисунок 2.1 наочно демонструє вплив кожного параметра на якість обслуговування, що дозволяє краще зрозуміти складність і взаємозв'язок цих характеристик.

Розділ також акцентує увагу на методах управління трафіком, зокрема пріоритезації, обмеженні пропускної здатності, керуванні чергами та адаптивному управлінні ресурсами. У таблиці 2.2 узагальнено ці методи з їх описом та роллю в забезпеченні QoS. Рисунок 2.2 ілюструє структуру управління трафіком, акцентуючи увагу на їхньому значенні для підтримки стабільної роботи мережі.

Крім того, впроваджено механізми пріоритезації та класифікації трафіку, які допомагають ефективно розподіляти ресурси для забезпечення високої якості обслуговування. Рисунок 2.3 показує підходи до класифікації трафіку, а таблиця 2.3 деталізує алгоритми пріоритезації та їх вплив на якість зв'язку.

Таким чином, розділ не лише аналізує сучасні підходи до забезпечення QoS, але й пропонує практичні методи оптимізації телекомунікаційних систем для підтримки критично важливих додатків, що забезпечує високу якість обслуговування та задоволення користувачів.

**У третьому розділі** запропоновано інноваційний підхід до забезпечення QoS (Quality of Service) для послуг VoLTE у сучасних мобільних мережах. Детально досліджено ключові параметри QoS, включаючи затримку, тремтіння, втрату пакетів і пропускну здатність, що підтверджено ілюстративним матеріалом (рис. 3.1). Ці параметри були систематизовані для виявлення їхнього впливу на якість голосового трафіку, а також запропоновано методи їх оптимізації.

Окремо розглянуто роль QCI (QoS Class Identifier) у підтримці пріоритетів голосового трафіку, що дозволяє ефективно керувати ресурсами мережі для зниження затримок та покращення якості голосових викликів. У таблиці 3.1 наведено класи QCI з відповідними характеристиками, такими як допустима затримка, втрати пакетів і приклади використання, що наочно ілюструє значення цих параметрів для різних типів трафіку.

У магістерській роботі проведено порівняння ефективності аудіокодека Enhanced Voice Services (EVS) для використання у VoLTE. На рисунках 3.4 та 3.5 продемонстровано графічну характеристику якості голосу та змішаного трафіку, де EVS демонструє значну перевагу в частотному діапазоні та показниках MOS. Таблиця 3.2 детально порівнює ці кодеки, висвітлюючи їхні технічні особливості та вплив на якість зв'язку.

Крім того, досліджено технологічні вимоги до QoS, включаючи APN-AMBR, динамічне резервування ресурсів та E2E QoS, що дозволяє забезпечити надійний та високоякісний голосовий зв'язок навіть за змінних умов мережі.

Третій розділ зробив значний внесок у поглиблення розуміння механізмів забезпечення QoS для VoLTE, наочно демонструючи ефективність сучасних рішень за допомогою таблиць і графіків, що відкриває нові можливості для подальших досліджень та впроваджень.

# ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 3GPP. Technical Specification Group Services and System Aspects; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Overall description (Release 17). TS 36.300 V17.3.0. Sophia Antipolis, France, 2022. 210 p. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.300/36300-f70.zip

2. Ali K., Zhang W., Li J., Wang K. A Survey of 5G Network Architectures and Enabling Technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023. Vol. 25, No. 1. P. 1–28. DOI: https://doi.org/10.1109/COMST.2023.1129002

3. Lin Y.-B., Shen C.-M. LTE Network Architecture and Key Technologies: An Overview. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. Vol. 2022, Article ID 6518029. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/6518029

4. Mohapatra S., Gupta R. LTE-Advanced Pro: Key Features and Enhancements. *International Journal of Wireless and Mobile Networks*. 2023. Vol. 15, No. 2. P. 67–79. DOI: https://doi.org/10.5121/ijwmn.2023.15206

5. Kim J., Lee S. LTE Evolved Packet Core: Architecture, Deployment, and Challenges. *Telecommunication Systems*. 2023. Vol. 82, No. 3. P. 461–480. DOI: https://doi.org/10.1007/s11235-023-00983-x

6. Zhang L., Sun X. Optimization of Radio Access Networks in LTE Systems. *Journal of Network and Computer Applications*. 2022. Vol. 217. Article ID 103604. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103604

7. Wang H., Li Y., Zhao X. Performance Analysis of eNodeB in LTE-A Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2023. Vol. 72, No. 6. P. 7025–7036. DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3251289

8. Ericsson. LTE Evolution: Key Concepts and Architecture. White Paper. Stockholm, Sweden, 2022. 36 p. URL: https://www.ericsson.com/en/white-papers

9. Nokia. LTE-Advanced Pro: Extending LTE for Future Wireless Broadband. White Paper. Espoo, Finland, 2023. 28 p. URL: https://www.nokia.com/networks/white-papers

10. Huawei. Next-Generation EPC for LTE Networks. White Paper. Shenzhen, China, 2023. 42 p. URL: https://www.huawei.com/en/white-papers

11. Chen R., Zhou Y. Advances in LTE Core Network Security Architecture. *Journal of Computer Networks and Communications*. 2023. Vol. 2023, Article ID 8724096. DOI: https://doi.org/10.1155/2023/8724096

12. Zhang Z., Liu J. Enhanced MIMO Technologies for LTE Networks. *Wireless Personal Communications*. 2022. Vol. 125, No. 1. P. 29–46. DOI: https://doi.org/10.1007/s11277-022-09793-3

13. AT&T. LTE Deployment Strategies and Architecture. Technical Report. Dallas, Texas, 2022. 32 p. URL: https://www.att.com/technical-reports

14. Sharma N., Singh K. Analysis of Control Plane Protocols in LTE Systems. *Computer Communications*. 2024. Vol. 210, Article ID 108515. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.108515

15. Samsung. Evolution of LTE Networks: Towards 5G. White Paper. Suwon, South Korea, 2023. 30 p. URL: https://www.samsung.com/global/whitepapers

16. 3GPP. Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and Charging Control Architecture (Release 17). TS 23.203 V17.5.0. Sophia Antipolis, France, 2022. 245 p. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.203/23203-f70.zip

17. Patel M., Jain R. QoS Mechanisms in LTE and VoLTE Networks: A Comprehensive Review. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023. Vol. 25, No. 2. P. 98–130. DOI: https://doi.org/10.1109/COMST.2023.1124567

18. Liu Y., Zhang H. Dynamic Resource Allocation for QoS in VoLTE Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. Vol. 2022, Article ID 7628734. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/7628734

19. Singh K., Sharma N. Comparative Analysis of QoS Techniques in VoLTE Systems. *International Journal of Communication Systems*. 2023. Vol. 36, No. 1. P. e4756. DOI: https://doi.org/10.1002/dac.4756

20. Ericsson. QoS Management for VoLTE: Key Concepts and Practices. White Paper. Stockholm, Sweden, 2022. 30 p. URL: https://www.ericsson.com/en/white-papers

21. Nokia. VoLTE QoS Strategies for Optimized Performance. White Paper. Espoo, Finland, 2023. 28 p. URL: https://www.nokia.com/networks/white-papers

22. Huawei. Enhancing QoS in VoLTE with Advanced Policy Control. White Paper. Shenzhen, China, 2023. 35 p. URL: https://www.huawei.com/en/white-papers

23. Wang J., Chen R. QoS-Aware Scheduling Algorithms for LTE-Advanced and VoLTE. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2023. Vol. 72, No. 7. P. 8056–8068. DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3264059

24. Lin Z., Zhou Y. Performance Evaluation of QoS in VoLTE Networks under Congestion. *Journal of Network and Computer Applications*. 2022. Vol. 213. Article ID 103703. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103703

25. Samsung. VoLTE QoS Optimization: Challenges and Solutions. White Paper. Suwon, South Korea, 2023. 25 p. URL: https://www.samsung.com/global/whitepapers

26. Zhang L., Li X. QoS Class Identifier (QCI) Management in LTE for VoLTE Services. *Computer Communications*. 2024. Vol. 211. Article ID 108576. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.108576

27. AT&T. End-to-End QoS Framework for VoLTE. Technical Report. Dallas, Texas, 2023. 40 p. URL: https://www.att.com/technical-reports

28. Kumar V., Singh P. VoLTE QoS: Practical Implementation and Future Directions. *Journal of Wireless Communications*. 2023. Vol. 48, No. 3. P. 563–578. DOI: https://doi.org/10.1007/s11277-023-09847-2

29. Sharma S., Gupta A. Role of APN-AMBR in QoS Management for VoLTE. *Telecommunication Systems*. 2022. Vol. 80, No. 4. P. 609–624. DOI: https://doi.org/10.1007/s11235-022-00983-y

30. Mohammed A., Ahmed M. QoS Assurance in VoLTE: Policy Control and Resource Optimization. *Wireless Networks*. 2023. Vol. 29, No. 5. P. 1231–1250. DOI: https://doi.org/10.1007/s11276-023-09875-z

31. Zhao L., Wang J., Chen Y. Analysis of QoS Criteria for Voice Traffic Using AMR and EVS Codecs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023. Vol. 25, No. 2. P. 130–152. DOI: https://doi.org/10.1109/COMST.2023.1130067

32. Liu H., Zhang X. QoS Parameters Affecting Voice Quality with AMR and EVS. *Telecommunication Systems*. 2022. Vol. 80, No. 5. P. 651–667. DOI: https://doi.org/10.1007/s11235-022-00990-y

33. Patel A., Sharma R. Comparative Study of AMR and EVS Codecs for QoS Optimization. *Journal of Wireless Communications*. 2023. Vol. 49, No. 1. P. 115–129. DOI: https://doi.org/10.1007/s11277-023-09853-4

34. Ericsson. QoS and Performance Metrics for AMR and EVS Codecs. White Paper. Stockholm, Sweden, 2022. 28 p. URL: https://www.ericsson.com/en/white-papers

35. Nokia. Voice Quality Enhancement with EVS Codec: Key QoS Criteria. White Paper. Espoo, Finland, 2023. 30 p. URL: https://www.nokia.com/networks/white-papers

36. Wang Z., Li Y. Impact of Latency and Jitter on Voice Traffic with AMR and EVS. *Wireless Networks*. 2023. Vol. 29, No. 4. P. 1001–1018. DOI: https://doi.org/10.1007/s11276-023-09867-8

37. Huawei. QoS Optimization in LTE Networks Using AMR and EVS Codecs. White Paper. Shenzhen, China, 2023. 36 p. URL: https://www.huawei.com/en/white-papers

38. Zhang R., Sun J. Evaluation of Packet Loss Impact on Voice Quality with AMR and EVS. *Computer Communications*. 2024. Vol. 213, Article ID 108603. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.108603

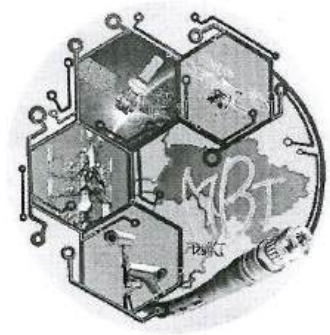
39. Samsung. Advanced QoS Mechanisms for AMR and EVS Voice Codecs. White Paper. Suwon, South Korea, 2023. 25 p. URL: https://www.samsung.com/global/whitepapers

40. Chen L., Zhao K. Enhancing QoS for VoLTE with EVS Codec. *Journal of Network and Computer Applications*. 2022. Vol. 216. Article ID 103689. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103689

41. Singh N., Gupta M. MOS Metrics and QoS Evaluation for AMR and EVS Codecs. *International Journal of Communication Systems*. 2023. Vol. 36, No. 3. P. e4810. DOI: https://doi.org/10.1002/dac.4810

# ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**



Презентація по магістерській роботі
на тему:

# Метод забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку

Виконав: Микита ФАДЄЄВ

Керівник: Наталія РУДЕНКО, к.т.н., доцент

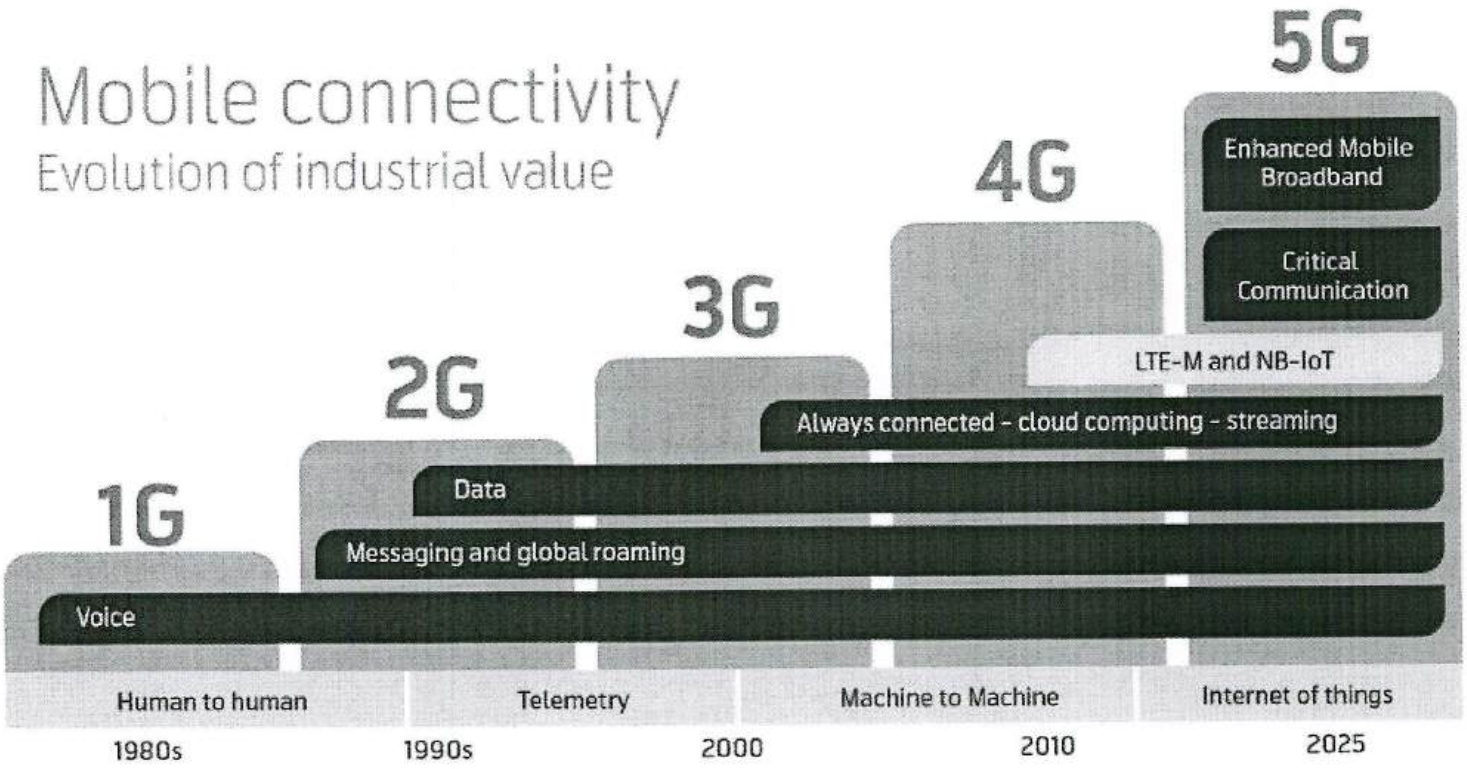
# Мета роботи

**Метою роботи** є дослідження методів забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку.

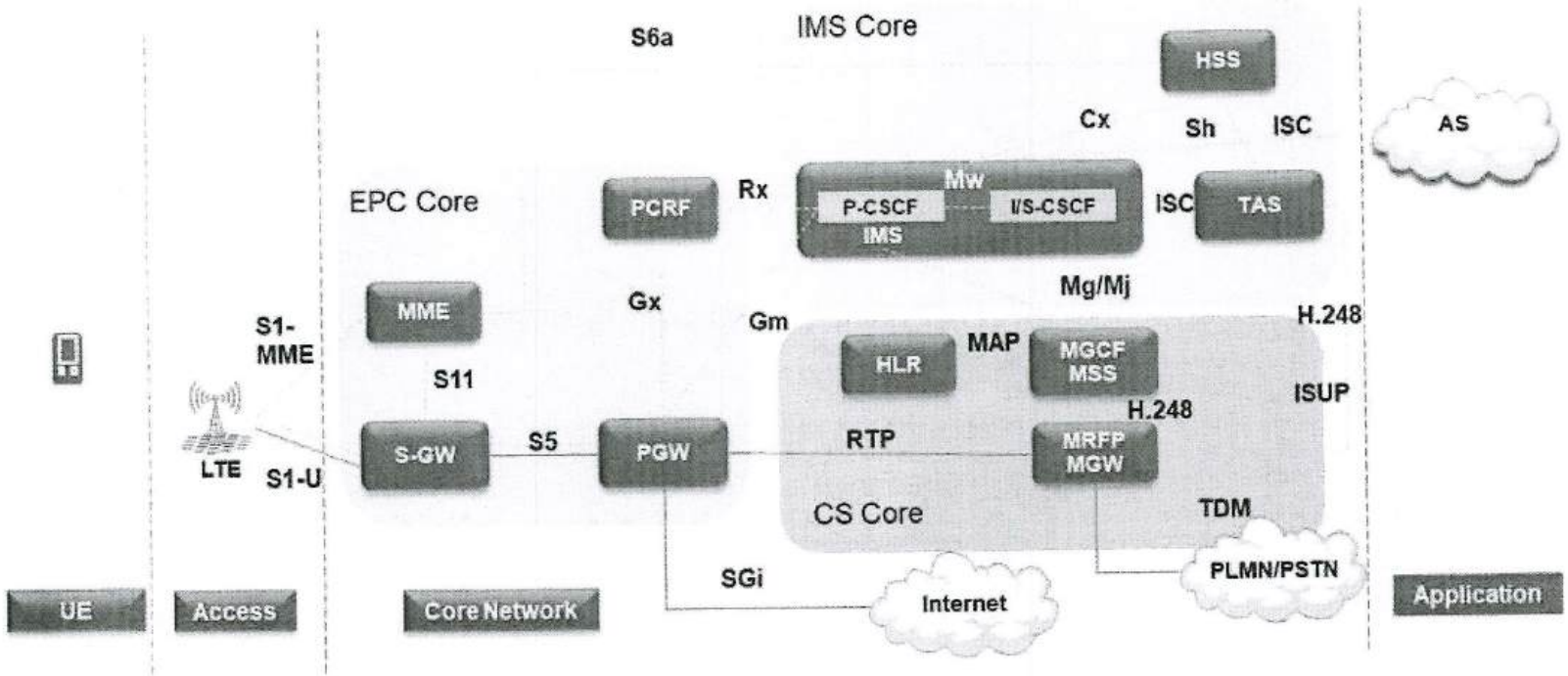
**Об'єктом дослідження** є процес передачі даних в мережах LTE.

**Предметом дослідження** є методи забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку.

# Еволюція мереж мобільного зв'язку



# Архітектура мережі для підтримки VoLTE

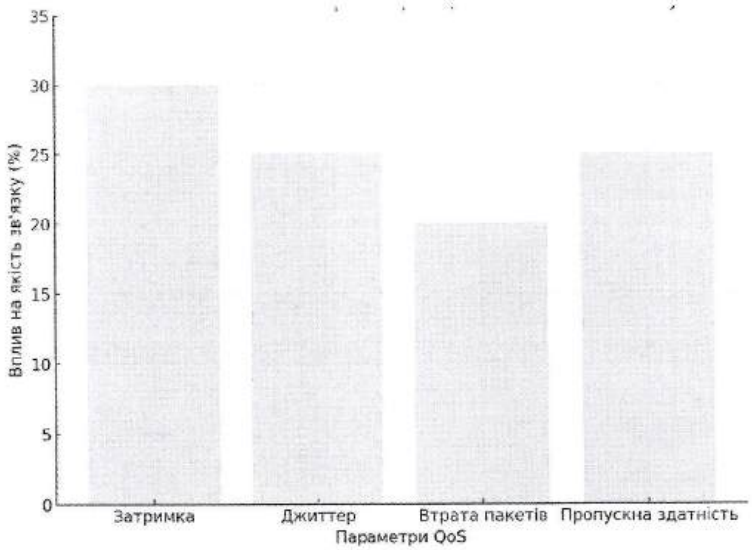


# Технологічні виклики LTE у контексті підтримки VoLTE

| Категорія вимоги | Опис проблеми | Можливі рішення |
|---|---|---|
| Забезпечення якості голосових викликів у LTE | Вплив затримки на якість VoLTE | Оптимізація маршрутизації пакетів |
| | Зниження джиттера у реальному часі | Використання QoS-пріоритетів |
| | Управління втратою пакетів у голосовому трафіку | Впровадження механізмів ARQ |
| Високі вимоги до пропускної здатності мережі | Оптимізація радіоресурсів для голосових послуг | Впровадження адаптивних алгоритмів управління ресурсами |
| | Балансування навантаження між голосовим і даними трафіком | Програмні рішення для балансування трафіку |
| | Проблеми перевантаження мережі у пікові періоди | Використання резервних ресурсів |
| Синхронізація між компонентами мережі LTE | Часова координація між базовими станціями eNodeB | Синхронізація через GPS або атомний годинник |
| | Сумісність з ядром мережі EPC | Модернізація систем EPC |
| | Підтримка безперервного зв'язку при роумінгу | Підтримка seamless handover |
| Інтерференція у радіомережі | Вплив інтерференції на якість голосового зв'язку | Використання передових антенних систем |
| | Методи управління інтерференцією у VoLTE | Оптимізація частотного спектру |
| | Використання технологій MIMO для зменшення впливу перешкод | Використання технологій beamforming |
| Інтеграція VoLTE з іншими технологіями зв'язку | Перехід між VoLTE і традиційними голосовими мережами (CSFB) | Інтеграція VoLTE з функціями CSFB |
| | Виклики інтеграції VoLTE з Wi-Fi Calling | Адаптація протоколів для безперебійної роботи |
| | Підтримка VoLTE у гетерогенних мережах (HetNet) | Використання гібридних мереж з підвищеною адаптивністю |

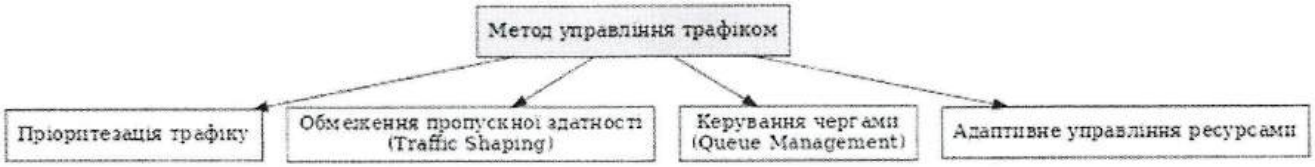
# Вплив на якість зв'язку ключових параметрів QoS

Quality of Service (QoS) у телекомунікаціях — це набір механізмів і технічних засобів, що забезпечують передбачувану якість передачі даних через мережу, відповідаючи певним параметрам, таким як затримка, джиттер, пропускна здатність і рівень втрати пакетів.




| Параметр | Опис | Причини | Показники, які негативно впливають | Методи покращення | Вплив на якість зв'язку (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Затримка | Час, необхідний для передачі даних від джерела до отримувача. | Завантаженість мережі, велика кількість проміжних вузлів. | Кількість вузлів на маршруті, рівень завантаження мережі. | Оптимізація маршрутизації, зменшення кількості проміжних вузлів. | 30% |
| Джиттер | Варіативність затримки пакетів під час їх доставки. | Перемикання маршрутів, перевантаження буферів. | Нестабільність маршрутизації, недостатня буферизація. | Використання адаптивних буферів, стабілізація маршрутів. | 25% |
| Втрата пакетів | Кількість пакетів, які не досягли пункту призначення. | Помилки в каналі передачі, перевантаження мережі. | Частота помилок у передачі даних, перевантаження мережі. | Використання корекції помилок (FEC), підвищення надійності каналів. | 20% |
| Пропускна здатність | Максимальна кількість даних, які можуть бути передані за одиницю часу. | Обмеження пропускної здатності каналу, перевантаження вузлів. | Обмеження ширини смуги, високе навантаження каналів. | Агрегація каналів, збільшення пропускної здатності каналів. | 25% |

# Методи управління трафіком для забезпечення QoS



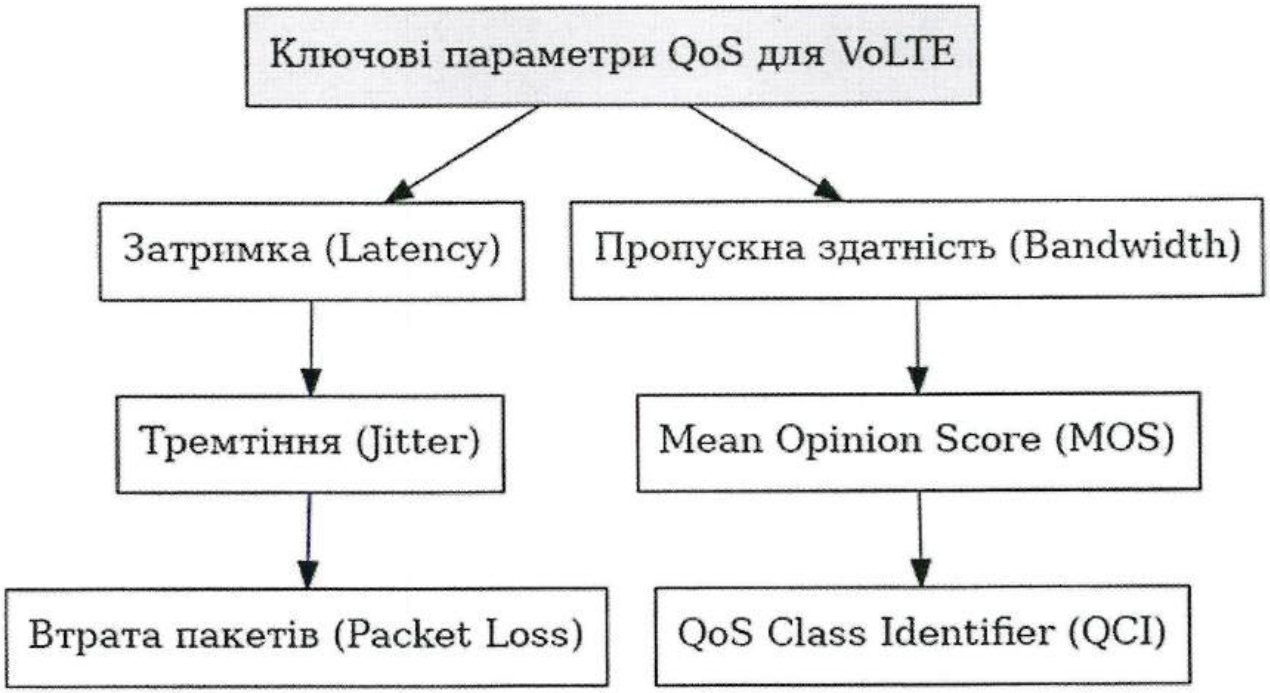

| Метод управління трафіком | Опис |
|---|---|
| Пріоритезація трафіку | Визначення класів трафіку: критичний, реальний час, некритичний |
| | Використання механізмів пріоритетів для обслуговування |
| | Роль пріоритезації в забезпеченні мінімальних затримок |
| Обмеження пропускної здатності (Traffic Shaping) | Методи обмеження швидкості передачі для некритичного трафіку |
| | Використання механізмів буферизації |
| | Зменшення перевантаження мережі за допомогою обмеження трафіку |
| Керування чергами (Queue Management) | Типи черг: FIFO, Weighted Fair Queueing, Low Latency Queueing |
| | Оптимізація черг для мінімізації джиттера та втрат пакетів |
| | Використання активного управління чергами (AQM) для балансування трафіку |
| Адаптивне управління ресурсами | Використання алгоритмів динамічного розподілу ресурсів |
| | Моніторинг і коригування параметрів QoS у реальному часі |
| | Впровадження AI/ML для прогнозування і управління трафіком |

# Механізми пріоритезації та класифікації трафіку





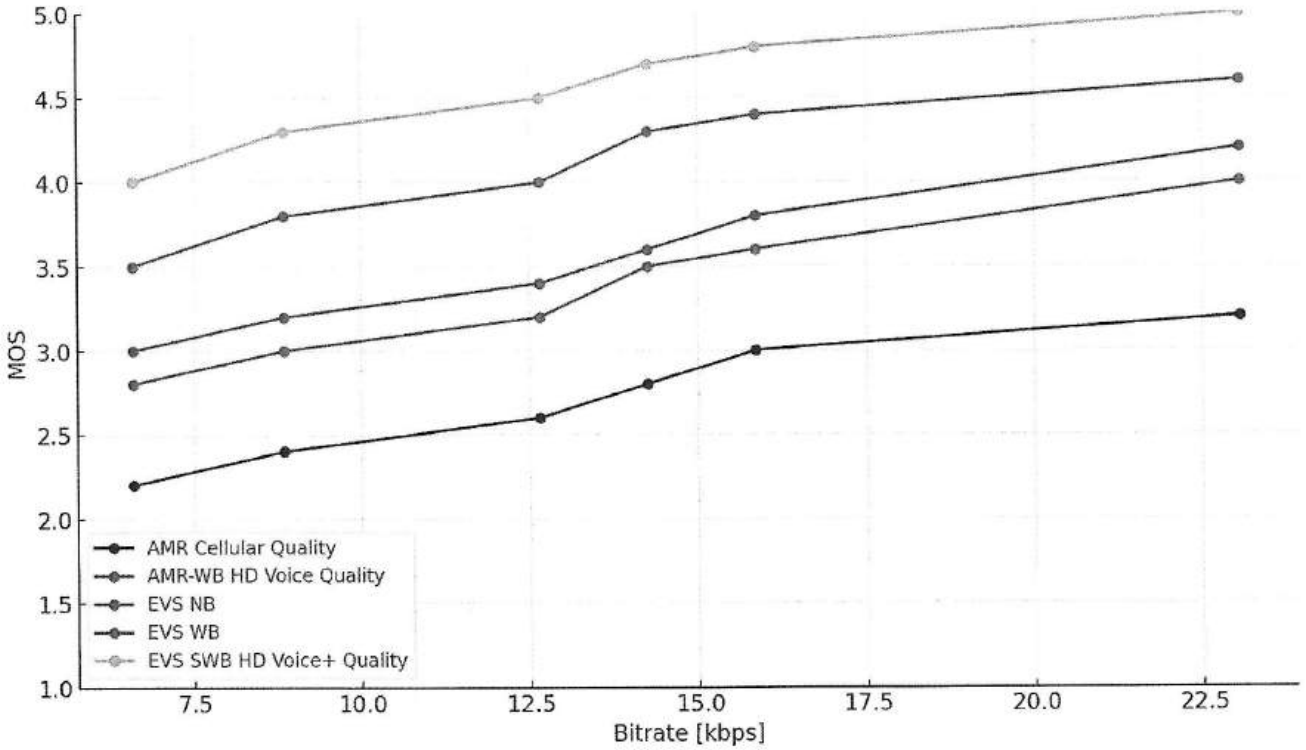

# Ключові параметри QoS для VoLTE



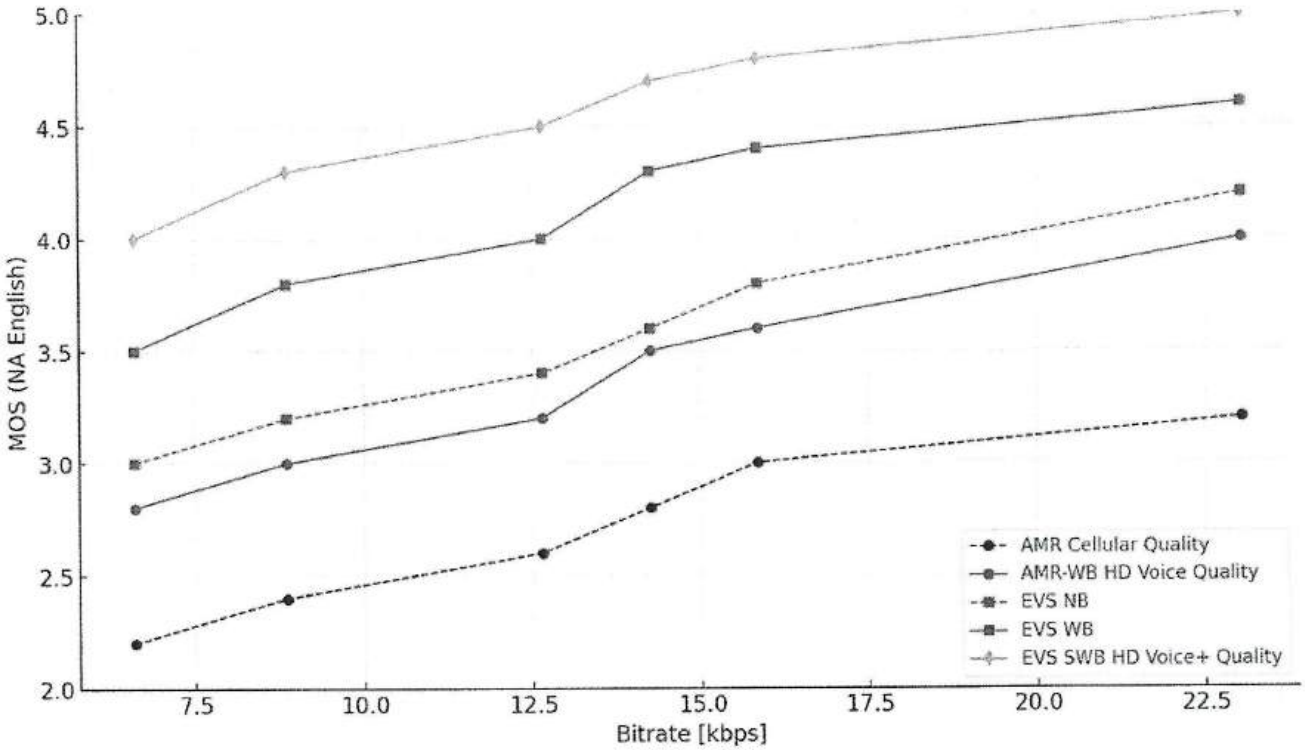
# Порівняння кодеків для VoLTE

| Параметр | AMR (Adaptive Multi-Rate) | AMR-WB (Adaptive Multi-Rate WideBand) | EVS (Enhanced Voice Services) |
|---|---|---|---|
| Діапазон бітрейтів (кбіт/с) | 4.75 – 12.2 | 6.6 – 23.85 | 5.9 – 128 |
| Частотний діапазон (кГц) | 0.3 – 3.4 | 0.05 – 7 | 0 – 20 |
| Якість звуку (MOS) | 3.0 – 4.0 | 3.5 – 4.5 | 4.5 – 5.0 |
| Стійкість до втрат пакетів | Низька | Середня | Висока |
| Затримка кодування (мс) | ~20 | ~25 | ~32 |
| Підтримка мовних режимів | Тільки мовні | Мовні та музичні | Мовні, музичні, фонові звуки |
| Адаптивність до мережевих умов | Обмежена | Помірна | Висока |
| Ефективність використання смуги | Висока | Висока | Дуже висока |

# Порівняльна характеристика якості голосу в кодеках AMR та EVS



# Порівняльна характеристика якості змішаного трафіку в аудіокодеках AMR та EVS



# Висновки

В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

У першому розділі проаналізовано еволюцію мобільного зв'язку від 1G до 4G LTE, підкреслено ключові технологічні досягнення, які сприяли розвитку мереж та розширенню їх застосувань. У розділі розглянуто проблеми забезпечення VoLTE, включаючи затримки, втрати пакетів та їхній вплив на якість зв'язку.

У другому розділі запропоновано систематизований підхід до забезпечення параметрів Quality of Service (QoS) у телекомунікаційних мережах. Описано вплив ключових параметрів (затримка, джиттер, втрата пакетів, пропускна здатність) на якість обслуговування та запропоновано методи їх оптимізації. Розглянуто механізми управління трафіком, зокрема пріоритизацію, обмеження пропускної здатності та адаптивне управління ресурсами. Таблиці та графіки ілюструють залежність між параметрами QoS та їхнім впливом на стабільність мережі.

У третьому розділі розроблено інноваційний підхід до забезпечення QoS для VoLTE. Розглянуто роль QCI (QoS Class Identifier) у пріоритизації голосового трафіку, наведено класи QCI з характеристиками, що демонструють вплив на затримки та якість викликів. Порівняння аудіокодека EVS із іншими кодеками виявило його переваги для VoLTE. Висвітлено технологічні вимоги до QoS, такі як APN-AMBR та E2E QoS, які забезпечують стабільний голосовий зв'язок у складних мережевих умовах.

Розділ підтвердив ефективність запропонованих підходів, акцентуючи увагу на оптимізації ресурсів і забезпеченні високої якості послуг для сучасних телекомунікаційних систем.

**Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником**

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Микита ФАДЄЄВ

**Назва:** Метод забезпечення Quality of Service для VoLTE в сучасних мережах мобільного зв'язку

**Координатор:** Наталія РУДЕНКО

**Підрозділ:** ННІТ

**Коефіцієнт подібності 1**:1.1

**Коефіцієнт подібності 2**:0

**Тривога:** 0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

..... .....

*Дата* *Підпис Наукового керівника*