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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Метод інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління 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) Катерина ПАНКЕВИЧ
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконала: здобувачка вищої освіти
групи АРДМ-61
Катерина ПАНКЕВИЧ

Керівник: Любов БЕРКМАН

Рецензент: Ірина Зацерківська

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

Панкевич Катерині Сергіївні

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Метод інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку»,
керівник кваліфікаційної роботи Любов БЕРКМАН, д.т.н., професор,
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. 4G, 5G-мережі.
   2. IP-технології.
   3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Роль IP технологій у мобільних мережах;
   2. Методи інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку;
   3. Дослідження ефективності інтеграції IP технологій в 4G та 5G мережі.

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.	Роль IP технологій у мобільних мережах	29.10.24	Викон.
3.	Методи інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку	01.12.24	Викон.
4.	Дослідження ефективності інтеграції IP технологій в 4G та 5G мережі	02.11.24	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	11.12.24	Викон.
6.	Розробка презентації	25.12.24	Викон.

Здобувачка вищої освіти _____ Катерина ПАНКЕВИЧ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Любов БЕРКМАН
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувачки вищої освіти Панкевич Катерини Сергіївни

на тему: «Метод інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку»

Актуальність:

Актуальність теми обумовлена зростанням попиту на високошвидкісну передачу даних, підтримку широкого спектра сервісів і підключень в умовах розширення функціональності мереж четвертого (4G) та п'ятого (5G) покоління. Інтеграція IP технологій забезпечує ефективну маршрутизацію, управління трафіком і гнучке масштабування мережевих ресурсів. Методи включають впровадження протоколів IPv6 для підвищення адресного простору, використання SDN і NFV для централізованого управління, а також впровадження MEC для зменшення затримок. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу мереж і високий рівень обслуговування в умовах зростаючого навантаження.

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. Уточнити, як саме IP-архітектура вплинула на конкретні аспекти QoS у мобільних мережах 4G (наприклад, поліпшення часу встановлення з'єднання або зменшення втрат пакетів).

2. Зазначити потенційні виклики інтеграції SDN і NFV у мобільні мережі, наприклад, ризики безпеки або проблеми сумісності з існуючими системами.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувачка Панкевич Катерина Сергіївна заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Рецензент: д.т.н., доц. (підпис) Ірина ЗАЯРНИЙ

(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 здобувачка Панкевич К.С. 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 інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

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

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувачка Панкевич Катерина Сергіївна 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 Панкевич Катерини Сергіївни на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Любов БЕРКМАН
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

“ ” _____ 2024 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувачка Панкевич К.С.
(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., 11 рис., 8 табл., 35 дж.

Мета роботи – дослідження методів інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних та забезпечення якості обслуговування (QoS) у мобільних мережах.

Предмет дослідження – методи інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку.

Короткий зміст роботи: У першому розділі проведено аналіз ролі IP-технологій у мобільних мережах 4G, з акцентом на еволюцію архітектури та її вплив на продуктивність. Визначено, що перехід до IP-орієнтованих мереж забезпечив підвищення швидкості передачі даних і QoS. Інтеграція IPv4 та IPv6 у 4G сприяла масштабованості, підтримці IoT та впровадженню сервісів, таких як VoLTE. Розглянуто Service-Based Architecture (SBA) у 5G, яка використовує IP-протоколи для гнучкого управління трафіком і забезпечення диференційованого QoS, що критично для низьколатентних додатків, таких як телемедицина та автономні системи.

У другому розділі запропоновано методи інтеграції IP-технологій у мобільні мережі 4G і 5G. Висвітлено переваги SDN і NFV для динамічної маршрутизації, гнучкості та ефективного управління ресурсами. Продемонстровано, що SDN забезпечує централізоване управління трафіком і підтримку QoS, тоді як NFV дозволяє швидко масштабувати мережеві функції, знижуючи витрати й покращуючи продуктивність.

У третьому розділі запропоновано архітектуру інтеграції IoT у 5G-мережі, яка базується на IP-протоколах. Запропоновано ефективне використання компонентів RAN, MEC і 5G Core для уніфікованої адресації, ефективної маршрутизації та підтримки мережевих зрізів. Експериментальні дослідження підтвердили відповідність архітектури вимогам до QoS у різних IoT-сценаріях, таких як Smart Agriculture і Smart City. Проаналізовано технології VoLTE та VoNR, які демонструють значне покращення якості голосового зв'язку, мінімальні затримки та стабільність з'єднання в IP-мережах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: 4G, 5G-МЕРЕЖІ, IP-ТЕХНОЛОГІЇ, IPV4 ТА IPV6, VOLTE, VONR, SDN І NFV, RAN, MEC І 5G CORE, QOS.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 78 pages, 11 pictures, 8 table, 35 sources.

The purpose of *the work is to study the methods of integrating IP technologies in the fourth and fifth generation of mobile communications networks.*

The object of *the research is the process of data transmission and ensuring quality of service (QoS) in mobile networks.*

The subject of *the research is methods of integrating IP technologies in the fourth and fifth generation of mobile communications networks.*

Summary of the work: The first section analyzes the role of IP technologies in 4G mobile networks, with an emphasis on the evolution of the architecture and its impact on performance. It is determined that the transition to IP-oriented networks has provided an increase in data transfer speed and QoS. The integration of IPv4 and IPv6 in 4G has contributed to scalability, support for IoT, and the implementation of services such as VoLTE. The Service-Based Architecture (SBA) in 5G is considered, which uses IP protocols for flexible traffic management and providing differentiated QoS, which is critical for low-latency applications such as telemedicine and autonomous systems.

The second section proposes methods for integrating IP technologies into 4G and 5G mobile networks. The advantages of SDN and NFV for dynamic routing, flexibility, and efficient resource management are highlighted. It is demonstrated that SDN provides centralized traffic management and QoS support, while NFV allows for rapid scaling of network functions, reducing costs and improving performance.

The third section proposes an architecture for IoT integration in a 5G network based on IP protocols. The effective use of RAN, MEC, and 5G Core components for unified addressing, efficient routing, and support of network slices is proposed. Experimental studies have confirmed the compliance of the architecture with QoS requirements in various IoT scenarios, such as Smart Agriculture and Smart City. VoLTE and VoNR technologies are analyzed, which demonstrate significant improvements in voice quality, minimal latency, and connection stability in IP networks.

KEYWORDS: 4G, 5G NETWORKS, IR TECHNOLOGIES, IPV4 AND IPV6, VOLTE, VONR, SDN AND NFV, RAN, MEC AND 5G CORE, QOS.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1. РОЛЬ IP ТЕХНОЛОГІЙ У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 11
1.1. Роль IP технологій у мобільних мережах 4G 11
1.2. Роль IP технологій у мобільних мережах 5G 22
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ІНТЕГРАЦІЇ IP ТЕХНОЛОГІЙ В МЕРЕЖІ ЧЕТВЕРТОГО ТА П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 35
2.1. Методи інтеграції IP технологій у мережах 4G та 5G 35
2.2. Переваги SDN у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та інтеграції IP 38
2.3. Переваги NFV у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та інтеграції IP 47
2.4. Переваги IPv6 у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та зокрема IP 53
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ IP ТЕХНОЛОГІЙ В 4G ТА 5G МЕРЕЖІ 59
3.1. Інтеграція пристроїв Інтернету речей (IoT) у мобільні мережі на основі IP-протоколів 59
3.2. Реалізація передачі голосових даних через IP-мережі за допомогою VoLTE та VoNR 70
ВИСНОВКИ 76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 79
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 83

ВСТУП

Технології п'ятого покоління мобільного зв'язку (5G) стали ключовою складовою сучасного інформаційного суспільства, забезпечуючи новий рівень продуктивності, швидкості та надійності зв'язку. Їх поява відповідає глобальним викликам цифровізації та створює основу для інтеграції інноваційних рішень у різних галузях — від промисловості до повсякденного життя. Унікальні можливості 5G, зокрема мінімальні затримки, висока пропускна здатність і масштабована підтримка мільярдів пристроїв, дозволяють реалізовувати сценарії, які раніше вважалися неможливими.

Суспільство вже відчуває позитивний вплив цих технологій, що стимулюють розвиток Інтернету речей, автоматизованих транспортних систем, дистанційної медицини та розумних міст. Висока швидкість передачі даних і підтримка критично важливих сервісів у режимі реального часу відкривають нові горизонти для економічного зростання та соціального прогресу.

Інтеграція 5G у повсякденне життя змінює не лише спосіб спілкування, але й трансформує базові інфраструктури. Завдяки цим технологіям суспільство отримує доступ до ефективних інструментів управління ресурсами, поліпшення екологічного моніторингу та підвищення якості освітніх і медичних послуг. 5G стає фундаментом для майбутніх технологічних інновацій, формуючи нову еру взаємозв'язку, яка значно покращує якість життя.

Інтеграція IP-технологій у мережі мобільного зв'язку четвертого (4G) та п'ятого покоління (5G) є важливим кроком у розвитку сучасних телекомунікаційних систем. Перехід від традиційних технологій комутації каналів до пакетної передачі даних дозволяє забезпечити високу ефективність використання ресурсів, гнучкість управління трафіком та надання широкого спектру послуг, включаючи голосові, відео- та мультимедійні сервіси. IP-технології є основою для побудови сучасних мобільних мереж, де трафік передається у вигляді пакетів даних через Інтернет-протоколи, що підвищує гнучкість і масштабованість мереж.

Завдяки впровадженню IP-технологій у мережах 4G та 5G з'являється можливість підвищити продуктивність мереж, підтримувати ширший діапазон додатків та сервісів, а також забезпечувати безперервний зв'язок у різних умовах. Особливу увагу вимагають методи інтеграції IP-технологій у 5G-мережі, де використовуються інноваційні підходи до управління трафіком, забезпечення якості обслуговування (QoS) та підтримки мільярдів підключених пристроїв в умовах Інтернету речей (IoT).

Метою цієї роботи є дослідження методів інтеграції IP-технологій у мережі мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління. У рамках дослідження будуть розглянуті сучасні підходи до інтеграції IP-технологій, проаналізовано їхній вплив на продуктивність мереж, якість обслуговування і стійкість до збоїв, а також запропоновано нові рішення для ефективної інтеграції IP-технологій в умовах сучасних мобільних мереж.

Мета роботи – дослідження методів інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних та забезпечення якості обслуговування (QoS) у мобільних мережах.

Предмет дослідження – методи інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку.

РОЗДІЛ 1. РОЛЬ IP ТЕХНОЛОГІЙ У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Роль IP технологій у мобільних мережах 4G

Еволюція мобільних мереж почалася з перших поколінь, які включали як аналогові, так і цифрові технології. Спочатку мобільні мережі першого покоління (1G) покладалися на передачу аналогового сигналу, дозволяючи базовий голосовий зв'язок, але не мали жодних послуг передачі даних [1]. З розвитком технологій перехід до другого покоління (2G) запровадив цифровий зв'язок, який значно покращив якість зв'язку та дозволив використовувати обмежені послуги передачі даних, такі як SMS та базовий мобільний Інтернет [2]. Ці ранні етапи заклали основу для подальшого розвитку мобільних мереж, які характеризуються підвищенням ефективності та можливостей, що зрештою призвело до більш досконалих систем, які ми використовуємо сьогодні (рис. 1.1).

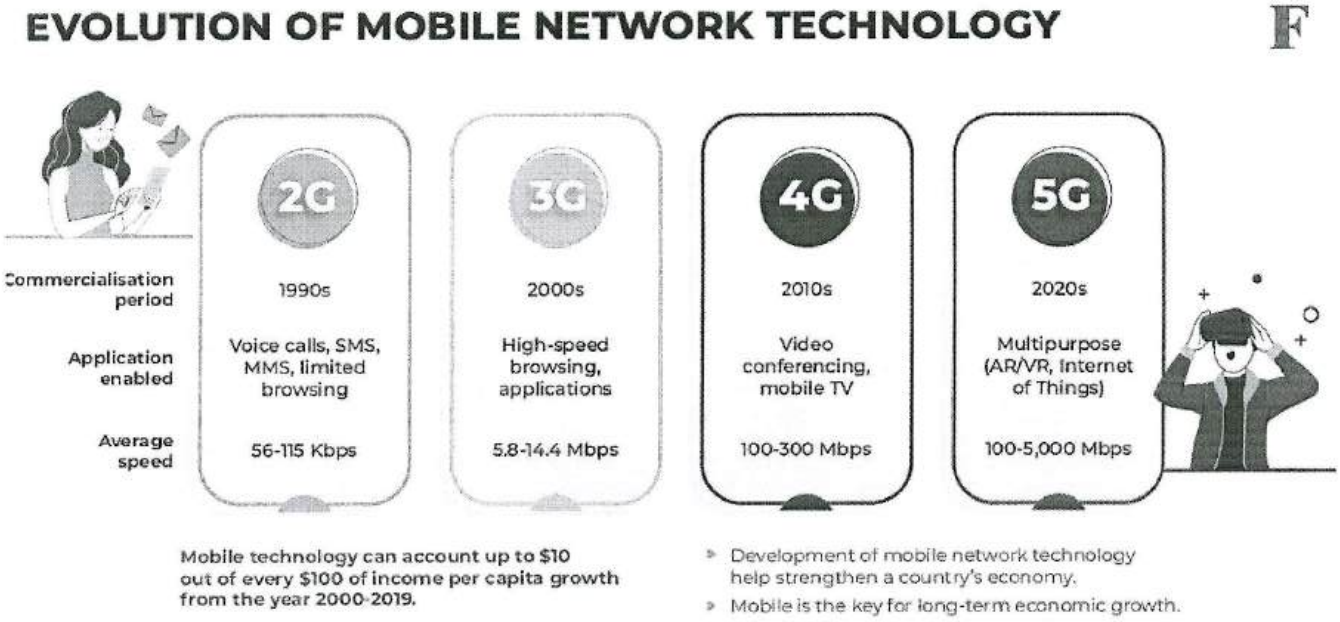


Рис. 1.1. Еволюція мобільних мереж

Перехід до мереж третього покоління (3G) став ключовим зрушенням, оскільки мобільний зв'язок перейшов до передачі даних з комутацією пакетів [3]. Цей прогрес дозволив підвищити швидкість передачі даних, дозволивши

користувачам ефективніше отримувати доступ до Інтернету та використовувати мобільні програми, які вимагають більшої пропускної здатності [4]. Запровадження технології пакетної передачі даних призвело до значного збільшення швидкості, коли користувачі отримали швидкість передачі даних до 384 кбіт/с [5]. Це покращення підключення не тільки покращило загальний досвід роботи з користувачем, але й заклало основу для розробки складніших програм і послуг, включаючи потокове передавання мобільного відео та розширені можливості веб-перегляду [6].

Розгортання мереж четвертого покоління (4G) призвело до створення повністю орієнтованої на IP архітектури, що знову революціонізувало мобільний зв'язок [2]. На відміну від своїх попередників, мережі 4G призначені для високошвидкісної передачі даних, досягаючи мінімальної швидкості близько 100 Мбіт/с і максимальної швидкості до 1 Гбіт/с [7]. Реалізація архітектури All-IP дозволяє бездоганно інтегрувати різні служби, такі як голос, відео та дані, в одній мережі [7]. Це не тільки покращує роботу користувача, забезпечуючи вищу швидкість і меншу затримку, але також збільшує пропускну здатність мережі для розміщення зростаючої кількості мобільних пристроїв і програм у цифровому середовищі [8]. Завдяки цим досягненням мережі 4G заклали основу для майбутнього переходу до мереж п'ятого покоління (5G), обіцяючи ще більші покращення мобільного зв'язку.

Архітектура 4G-мереж

Основними компонентами LTE-мережі є Evolved Packet Core (EPC) та радіомережа eNodeB [9]. EPC виконує функцію основи мережі, що відповідає за управління використовуваним обладнанням (UE) та налаштування каналу [10]. eNodeB, у свій час, є базовою станцією LTE, що забезпечує безпосередній доступ користувачів до мережі. Ці компоненти працюють разом для забезпечення високошвидкісного підвищення обміну даними та якості обслуговування. Система LTE дозволяє передавати дані зі швидкістю понад 100 Мбіт/с, що робить її успішним етапом у розвитку мобільних технологій [11]. Оскільки ці технології

продовжують еволюціонувати, важливо розуміти їхню роль у забезпеченні зв'язку між користувачами та мережею (табл. 1.1.).

Таблиця 1.1.

Еволюція мобільних мереж

Покоління	Роки впровадження	Основна технологія	Максимальна швидкість передачі даних	Затримка (Latency)	Ключові характеристики
1G	1980-1990	Аналоговий зв'язок	2.4 кбіт/с	600-1000 мс	Тільки голосовий зв'язок
2G	1990-2000	Цифровий зв'язок (GSM, CDMA)	64 кбіт/с	300-600 мс	Голос + SMS
3G	2000-2010	Пакетна передача даних (UMTS, HSPA)	42 Мбіт/с	100-300 мс	Голос, SMS, Інтернет (пакетні дані)
4G	2010-2020	Уніфікована IP-мережа (LTE)	1 Гбіт/с	20-40 мс	Швидкісний Інтернет, VoLTE, потокове відео
5G	2020-сьогодення	Мікросервісна архітектура (NR)	10 Гбіт/с	1-10 мс	IoT, AI, AR/VR, автономні системи

Принципи роботи EPC базуються на розподілі функцій між ключовими елементами ключа, такими як Mobility Management Entity (MME), Serving Gateway (SGW) та Packet Data Network Gateway (PGW) [12]. MME відповідає за управління сигналами та забезпечення безпеки мережі, обробляючи весь сигналізаційний трафік між використовуваним обладнанням та основною мережею [13]. SGW виконує функції маршрутизації даних, а PGW забезпечує підключення до зовнішніх IP-мереж. Ця структура дозволяє адаптуватися до зростання трафіку Інтернет-речей (IoT) і забезпечує нові можливості для взаємодії між компонентами мережі.

Взаємодія компонентів LTE-мережі здійснюється через IP-протоколи, що забезпечує ефективний обмін даними між безкоштовними елементами системи [14]. Використання IP-технології дозволяє досягти високої швидкості передачі даних і зменшити затримки в мережі [15]. Це, у свою чергу, забезпечує якість обслуговування та забезпечує більш ефективне використання ресурсів мережі. Завдяки цим принципам, 4G-мережі здатні підтримувати нові типи трафіку та задовольняти сучасні користувачі, які потребують швидкого та надійного з'єднання в умовах зростання запиту на мобільний Інтернет.

Роль IP-протоколу у 4G

Роль IP-протоколів у мобільних мережах 4G є ключовою для забезпечення уніфікованої маршрутизації даних як через IPv4, так і через IPv6 [16]. Оскільки попит на підключення до Інтернету та мобільні дані продовжує зростати, перехід від IPv4 до IPv6 стає все більш важливим. IPv6 надає унікальні адреси для кожного пристрою в мережі, забезпечуючи велику кількість підключень і ефективнішу маршрутизацію пакетів даних. Цей перехід підтримує плавну інтеграцію великої кількості пристроїв, що є важливим для покращення взаємодії з користувачами та сприяння поширенню Інтернету речей (IoT). Впроваджуючи обидва протоколи, мережі 4G можуть підтримувати сумісність із застарілими системами, одночасно використовуючи розширені функції IPv6, що в кінцевому підсумку призводить до підвищення продуктивності та надійності мережі (табл. 1.2.).

Таблиця 1.2.

Функції основних компонентів EPC у 4G-мережах з акцентом на IP-архітектуру

Компонент	Основна функція	Додаткові функції	Протоколи та потоки даних
MME (Mobility Management Entity)	Управління мобільністю користувачів, обробка сигналізації та аутентифікація абонентів.	Підтримка перемикання між базовими станціями (handover), управління підключеннями до мережі.	S1-MME для сигналізації (SCTP), підтримка IPv4/IPv6.
SGW (Serving Gateway)	Маршрутизація та передача даних між радіомережами LTE та ядром мережі.	Буферизація даних під час handover, взаємодія з MME і PGW для передачі трафіку.	GTP-U для передачі даних між eNodeB і SGW (UDP, IPv4/IPv6).
PGW (Packet Gateway)	Інтеграція LTE з іншими IP-мережами, маршрутизація трафіку до зовнішніх мереж, включаючи Інтернет.	Забезпечення політики доступу та тарифікації, підтримка IPv4/IPv6 протоколів.	GTP-U для передачі даних до Інтернету, підтримка NAT, TCP/UDP (IPv4/IPv6).

Іншим важливим аспектом IP-протоколів у мережах 4G є інтеграція голосових послуг через технологію Voice over LTE (VoLTE) [17]. VoLTE дозволяє передавати голосові виклики через мережу LTE, а не покладатися на традиційні

мережі 2G або 3G. Ця зміна не тільки покращує якість зв'язку, але й дозволяє одночасно передавати голос і дані, що було неможливо в попередніх поколіннях. Користувачі відчувають чіткіше звучання та меншу затримку під час дзвінків, що робить VoLTE переконливим прогресом у мобільному спілкуванні. Крім того, міграція голосового трафіку в мережі 4G сприяє загальній ефективності мережі та оптимізує використання доступної смуги пропускання [10]. Як наслідок, VoLTE представляє критичну подію в еволюції мобільного зв'язку.

Крім маршрутизації та голосових послуг, IP-протоколи також відіграють вирішальну роль в оптимізації обміну мультимедійними даними в мережах 4G [18]. Впровадження технологій на основі IP дозволяє ефективно передавати відео, аудіо та інші форми мультимедійного вмісту, задовольняючи зростаючий попит користувачів на мультимедійний досвід. Ця оптимізація досягається за допомогою вдосконалених методів стиснення даних і адаптивних потокових протоколів, які забезпечують плавну передачу мультимедійного вмісту без перерв. Використовуючи протоколи IP, мережі 4G можуть підтримувати відеодзвінки високої чіткості, потокові послуги та ігрові додатки в реальному часі, значно підвищуючи задоволеність користувачів і залученість у мобільному середовищі, де все більше пріоритетними є мультимедійні можливості.

Переваги використання IP у 4G

Однією з головних переваг використання IP у мережах 4G є спрощення архітектури мережі завдяки прийняттю уніфікованих протоколів [5]. Завдяки інтеграції IPv4 і IPv6 мережі 4G можуть сприяти безперебійній маршрутизації даних і управлінню, таким чином зменшуючи складність у проектуванні мережі. Ця уніфікація дозволяє створити більш узгоджену та зрозумілу мережеву інфраструктуру, що може призвести до підвищення ефективності роботи. Спрощена архітектура не тільки мінімізує кількість необхідних вузлів, але й оптимізує процеси, пов'язані з передачею даних, що призводить до зниження витрат, пов'язаних як з розробкою, так і з поточною роботою мережевих компонентів (табл. 1.3.).

Таблиця 1.3.

Переваги та підвищення продуктивності використання IP у 4G

Категорія	Опис переваг	Результат підвищення продуктивності
Масштабованість	Підтримка мільярдів пристроїв завдяки використанню IPv6 і динамічної маршрутизації.	Зростання ефективності роботи мережі навіть в умовах високого навантаження.
Продуктивність	Високошвидкісний доступ до Інтернету (до 100 Мбіт/с), зменшення затримок (до 10 мс) і підвищення пропускної здатності.	Забезпечення стабільного з'єднання для користувачів у реальному часі.
Інтеграція сервісів	Інтеграція голосових послуг через VoLTE, потокове відео, підтримка IoT.	Розширення спектру доступних сервісів для абонентів.
Забезпечення якості обслуговування (QoS)	Можливість пріоритизації трафіку для забезпечення стабільної якості для критичних сервісів.	Мінімізація затримок для мультимедійних сервісів та онлайн-ігор.
Безпека	Реалізація сучасних протоколів шифрування (IPsec), аутентифікації та захисту даних.	Підвищення довіри до мережі через надійний захист даних.

Крім того, використання технології IP у мережах 4G підвищує гнучкість операцій масштабування [19]. Оскільки попит на мобільні дані продовжує зростати, здатність адаптувати та розширювати мережеві ресурси стає вирішальною. Архітектури на основі IP дозволяють легше інтегрувати нові технології та послуги, забезпечуючи операторам зв'язку гнучкість, необхідну для реагування на зміни ринкових умов. Ця гнучкість особливо важлива в контексті зростання трафіку сигналізації, оскільки мережі можна динамічно налаштовувати для задоволення зростаючих вимог користувачів без значних порушень якості обслуговування. Отже, ця адаптивність підтримує не тільки поточні операційні потреби, але й майбутнє зростання та інновації в мобільних послугах.

Нарешті, реалізація віртуалізації в мережах 4G на основі IP значно знижує витрати на інфраструктуру [20]. Використовуючи віртуалізовані ресурси, телекомунікаційні компанії можуть мінімізувати потребу у фізичному обладнанні, тим самим зменшуючи капітальні витрати, пов'язані з розширенням інфраструктури. Цей зсув дозволяє ефективніше керувати ресурсами та розподіляти їх, оскільки віртуалізовані середовища можна легко збільшити або зменшити відповідно до вимог. Крім того, економія коштів, пов'язана зі зниженням вимог до апаратного забезпечення, може бути повторно інвестована в розширення можливостей мережі та розробку нових послуг, що зрештою сприятиме створенню більш надійної та конкурентоспроможної телекомунікаційної екосистеми.

Продуктивність мереж 4G

Однією з ключових характеристик мережі 4G є зростання швидкості передачі даних до 1 Гбіт/с у нижньому каналі [21]. Це досягнення стало можливим завдяки впровадженню нових технологій та широкого пропуску, які дозволили передавати величезні обсяги даних за короткий проміжок часу [22]. Завдяки високій швидкості користувачі можуть без проблем переглядати відео в реальному часі, завантажувати великі файли та користуватися ресурсами, які раніше вимагали тривалих годин очікування [23]. Це значно покращує досвід користувачів, оскільки вони можуть підтримувати доступ до контенту без затримок, що, у свою чергу, забезпечує загальну ефективність мережі.

Забезпечення низьких затримок, які можуть досягти всього 20 мс, є ще важливою перевагою мережі 4G [24]. Це значення затримки є критичним для реальних додатків, таких як ігри та відеоконференції, де кожна мілісекунда має значення. Низька підтримка покращує взаємодію між користувачами та системою, забезпечуючи швидку реакцію на запити [1]. У результаті мережі 4G відкривають нові можливості для розвитку інноваційних послуг, які потребують миттєвої передачі даних, таким чином, формуючи нові ринки та підвищуючи конкурентоспроможність операторів.

Вплив IP-протоколів на стабільність з'єднання в реальному часі також є суттєвим аспектом продуктивності мережі 4G [25]. Використання пакетної комутації за допомогою IP-технологій забезпечує постійну передачу даних, що дозволяє знизити ймовірність втрачених пакетів і затримок [26]. Це, у свою чергу, надійність об'єднання, що є критичним числом для користувачів, які залежать від стабільного доступу до мережі для роботи та розваг. Завдяки інтеграції IP-протоколів мережі 4G також стають більш гнучкими та адаптивними до змінених умов, що дозволяє забезпечити високий рівень обслуговування для всіх користувачів.

Інтеграція додаткових сервісів

Голосові послуги через VoLTE (Voice over LTE) представляють собою значний крок вперед за якістю та надійністю зв'язку в мережах 4G [27]. Завдяки VoLTE користувачі можуть використовувати та використовувати дзвінки навіть тоді, коли мобільні дані вимкнено на їхніх пристроях [27]. Ця технологія дозволяє використовувати частотний спектр більш ефективно, без голосових дзвінків, що передаються через 4G, замість традиційних мереж 2G або 3G [28]. Як результат, VoLTE забезпечує кращу якість звуку, короткий час з'єднання та можливість одночасного використання голосових і даних послуг, що робить зв'язок більш надійним і продуктивним для користувачів.

Інтернет речей (IoT) має величезний потенціал для підвищення ефективності роботи пристроїв у мережах 4G [19]. Ця технологія дозволяє підключати численні пристрої до мережі, що забезпечує автоматизоване збирання та обробку даних [29].

Впровадження IoT в мережі 4G дозволяє забезпечити надійний обмін даними між пристроями, що в свою чергу забезпечує загальну продуктивність системи [30]. Також важливо відзначити, що мережі 4G можуть підтримувати більше користувачів і пристроїв одночасно, що зменшує кількість проблем, пов'язаних із завантаженням у мережу [31].

Підтримка відеоконференцій через IP-мережі є ще однією важливою перевагою 4G технологій [32]. Зростання швидкості передачі даних до 1 Гбіт/с у низхідному каналі дозволяє проводити відеозв'язок високої якості без затримок [27]. Це стає можливим завдяки зниженню затримок до 20 мс, що є критичним для реального часу зв'язку [27]. Використання IP-протоколів також підвищує стабільність з'єднання, однак варто врахувати, що ці протоколи можуть підвищити вразливість мережі [33]. Таким чином, технологія 4G надійні та ефективні інструменти для проведення відеоконференцій, що, у свою чергу, є аспектом сучасного бізнесу та особистого спілкування.

Вплив IP на безпеку 4G

Одним із критичних аспектів забезпечення безпеки в мережах 4G є впровадження надійних механізмів шифрування трафіку в рамках ядра Evolved Packet Core (EPC) [33]. Ці механізми призначені для захисту даних, що передаються через мережу, за допомогою передових стандартів шифрування, які захищають від несанкціонованого доступу та порушень даних. Завдяки шифруванню трафіку зберігається цілісність і конфіденційність даних користувачів, що є життєво важливим у сучасному цифровому середовищі, де кіберзагрози стають все більш витонченими. Крім того, процеси шифрування допомагають зменшити ризики, пов'язані з підслуховуванням і атаками типу «людина посередині», тим самим підвищуючи загальну безпеку мобільних мереж 4G (рис. 1.2).

Автентифікація абонентів за допомогою методів на основі IP відіграє вирішальну роль у захисті мереж 4G [33]. Цей процес гарантує, що лише законні користувачі отримають доступ до мережевих служб, що важливо для запобігання несанкціонованому використанню та потенційному шахрайству. Методи автентифікації на основі IP, такі як використання SIM-карт у поєднанні з

безпечними протоколами автентифікації, забезпечують додатковий рівень безпеки. Ці методи не тільки перевіряють особу користувачів, але й допомагають підтримувати цілісність каналів зв'язку. Оскільки мобільні мережі продовжують розвиватися, довіра до автентифікації на основі IP стає все більш важливою, оскільки вона узгоджується з переходом до більш складних мережевих середовищ, таких як 5G.

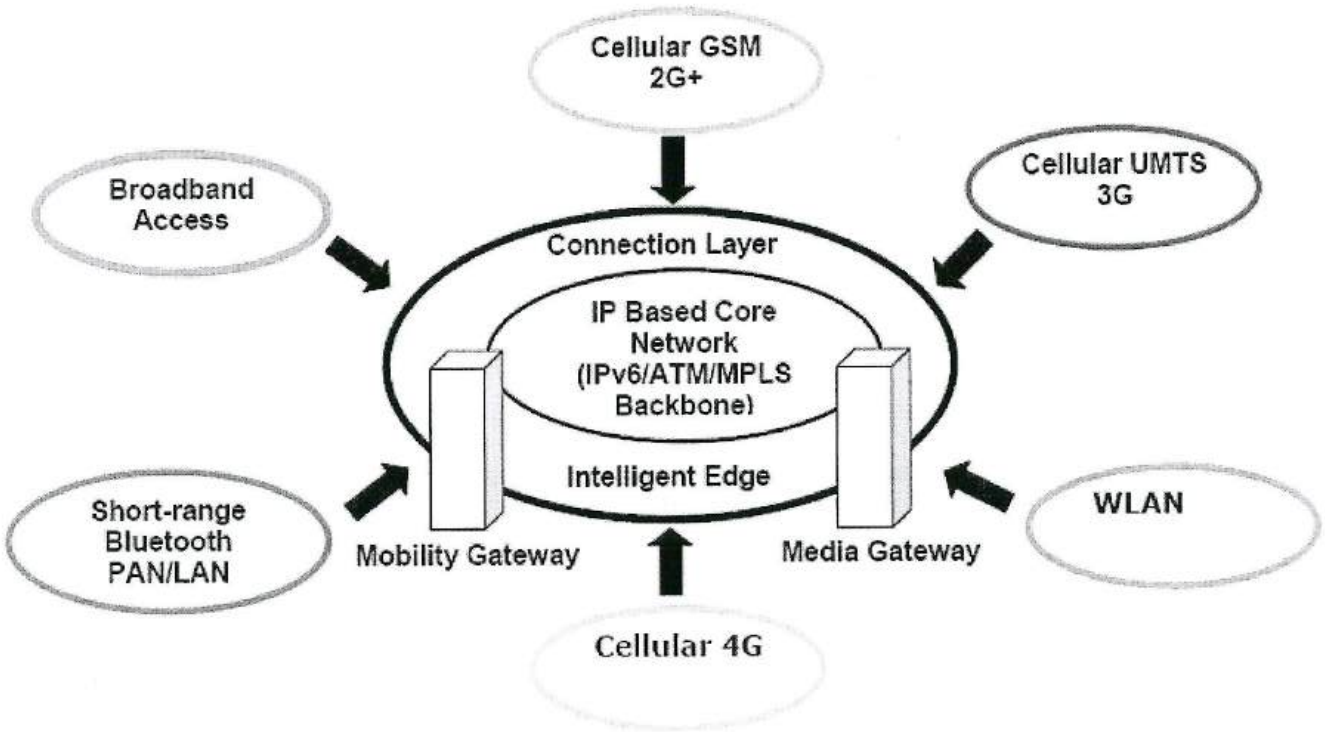


Рис. 1.2. Архітектура IP для мереж 4G

Захист від атак розподіленої відмови в обслуговуванні (DDoS) є ще одним важливим компонентом безпеки IP-мережі в середовищах LTE [33]. DDoS-атаки можуть серйозно порушити роботу мережевих служб, перевантаживши сервери надмірним трафіком, що призведе до погіршення якості обслуговування або повного збою. Щоб протистояти цим загрозам, мережі 4G реалізують різні стратегії, включаючи аналіз трафіку та системи виявлення аномалій, які можуть ідентифікувати незвичні шаблони трафіку, що вказують на DDoS-атаку. Крім того, використання технологій брандмауера та обмеження швидкості може ефективно керувати вхідним трафіком і пом'якшити вплив таких атак. Покращуючи

механізми захисту від DDoS, оператори мереж можуть забезпечити більш надійний і безпечний досвід користувачів у мобільних мережах 4G.

Однією із значних проблем, з якими стикаються мобільні мережі 4G, є сумісність старих пристроїв з інфраструктурою IP [34]. У міру переходу від попередніх поколінь до мереж на основі IP багатьом застарілим пристроям важко ефективно спілкуватися в цій новій структурі. Зокрема, старіші пристрої, які покладаються на технології комутації каналів, можуть не мати доступу до послуг високошвидкісної передачі даних, які пропонують мережі 4G. Ця проблема сумісності може призвести до фрагментації взаємодії з користувачем, оскільки не всі користувачі можуть повною мірою скористатися розширеними функціями, які може запропонувати 4G. Отже, оператори мереж повинні розглянути стратегії інтеграції цих старих пристроїв або заохочення користувачів до оновлення, що може бути складним і дорогим завданням.

1.2. Роль IP технологій у мобільних мережах 5G

Перехід від архітектури Evolved Packet Core (EPC) мереж 4G до Service-Based Architecture (SBA) у 5G представляє значну еволюцію в дизайні мобільних мереж [1]. Парадигма SBA забезпечує більш гнучку та масштабовану мережеву інфраструктуру, дозволяючи розгортати мережеві функції як служби, які можуть взаємодіяти одна з одною через стандартні інтерфейси. Цей зсув не тільки підвищує ефективність надання послуг, але й сприяє інтеграції нових технологій і послуг у міру їх появи [2]. З впровадженням SBA мережа 5G може використовувати розширені можливості, такі як нарізка мережі, що дозволяє операторам створювати кілька віртуальних мереж в одній фізичній інфраструктурі, задовольняючи різноманітні випадки використання та вимоги (табл. 1.4).

У мережах 5G взаємодія між мережевими функціями все частіше здійснюється через мікросервіси з використанням таких протоколів, як HTTP/2 і REST API [3]. Цей підхід забезпечує легкий зв'язок між службами, підвищуючи

швидкість і надійність обміну даними. Прийняття архітектури мікросервісів дозволяє здійснювати незалежне масштабування мережевих функцій, що є важливим для задоволення потреб різних додатків, від пристроїв IoT до потокового відео високої чіткості [4]. Крім того, така модульна конструкція сприяє швидшому розгортанню нових функцій, оскільки оновлення можна робити для окремих служб, не порушуючи роботу всієї мережі, таким чином зберігаючи безперервність роботи та покращуючи взаємодію з користувачем (рис. 1.3).

Таблиця 1.4.

Функції основних компонентів Service-Based Architecture (SBA) у 5G-мережах

Компонент	Основна функція	Протоколи та IP-архітектура
AMF (Access and Mobility Management Function)	Управління доступом і мобільністю користувачів, аутентифікація абонентів.	Взаємодія з RAN через NGAP (SCTP, IPv4/IPv6).
SMF (Session Management Function)	Управління сеансами передачі даних, налаштування IP-адрес.	Передача даних між AMF і UPF через HTTP/2, підтримка IPv6.
UPF (User Plane Function)	Передача користувацького трафіку через мережу, маршрутизація IP-пакетів.	Транспортування трафіку через GTP-U (UDP, IPv4/IPv6).
PCF (Policy Control Function)	Управління політиками QoS для різних типів трафіку.	Використання REST API для конфігурації політик, підтримка IPv6.
NSSF (Network Slice Selection Function)	Вибір мережевих зрізів (slices) для оптимізації використання ресурсів.	HTTP/2 для передачі сигналізації, підтримка гнучких IP-адрес.

Децентралізація та модульність, властиві мережам 5G, пропонують численні переваги порівняно з попередніми поколіннями [5]. Розподіл мережевих функцій

між кількома вузлами, а не централізація їх, 5G може зменшити перевантаження мережі та підвищити загальну продуктивність. Ця децентралізована структура не тільки покращує час відгуку, але й підвищує надійність, забезпечуючи альтернативні шляхи для передачі даних, тим самим мінімізуючи ризик збоїв в обслуговуванні [6]. Крім того, модульна конструкція дозволяє операторам легше адаптуватися до мінливих вимог і технологій, гарантуючи, що їхні мережі залишатимуться надійними та перспективними в майбутньому, коли в екосистему впроваджуватимуться нові програми та пристрої. Ця еволюція знаменує собою значний крок до створення більш гнучких і ефективних мобільних мереж, здатних підтримувати зростаючі потреби в підключенні цифрової ери.

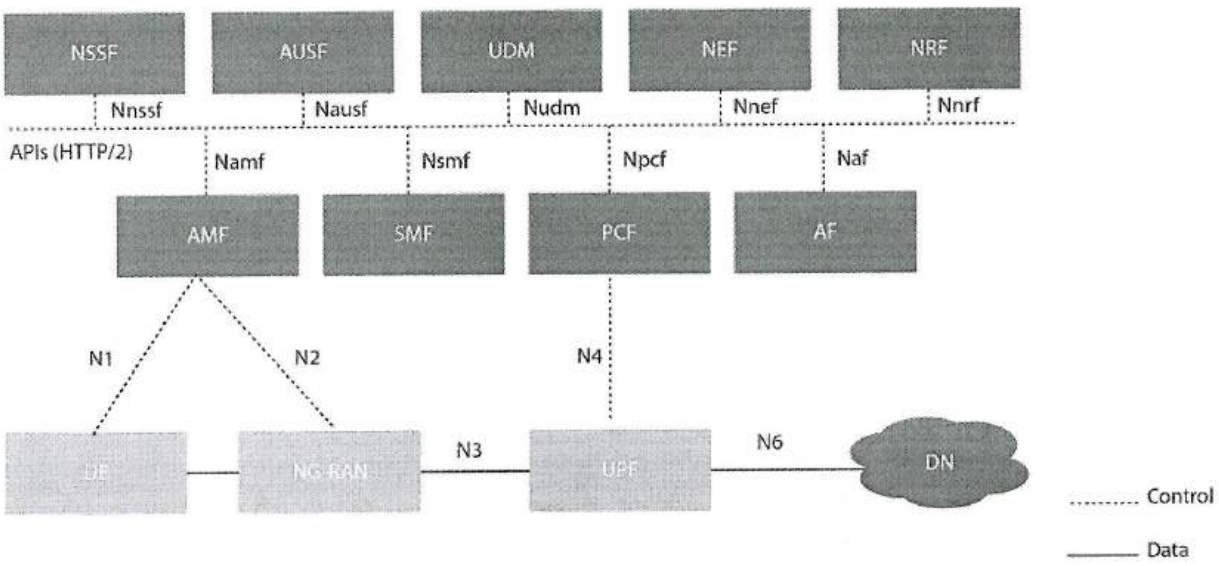


Рис. 1.3. Service-Based Architecture (SBA) у 5G

Основні характеристики 5G

Однією з основних характеристик 5G є швидкість передачі даних, яка теоретично може досягати до 10 Гбіт/с [7]. Це означає, що 5G у десять разів швидше за попереднє покоління 4G LTE, яке забезпечує пікову швидкість завантаження лише 1 Гбіт/с [8]. Така значна швидкість передачі даних забезпечує миттєве завантаження та передачу інформації, яка є критичною для багатьох сучасних програм, таких як стрімкі до високої якості, віртуальної реальності та Інтернет-

речей (IoT). Завдяки цій революційній швидкості 5G відкриває нові можливості для розробки інноваційних технологій і послуг, задовольняючи зростаючі вимоги до швидкості передачі даних [9].

Ще важливою характеристикою 5G є підтримка, яка може досягти всього 1-10 мс за рахунок використання IP-протоколів [1]. Це забезпечує миттєву реакцію мережі, що є критично важливим для автономної роботи, які вимагають низької затримки, таких як транспортні засоби та віддалене управління. Зниження затримки також покращує якість зв'язку під час використання голосових та відеодзвінків у реальному часі. Завдяки таким характеристикам 5G може забезпечити високий рівень користувальницького досвіду, що значно перевершує можливості попередніх поколінь мобільних мереж [5].

Крім того, 5G має можливість підтримувати до 1 мільйона пристроїв на квадратний кілометр, що є значним покращенням у порівнянні з 4G, який може підтримувати лише близько 100 тисяч пристроїв на такій же площі [10]. Це дозволяє реалізувати численні сценарії застосування, такі як розумні міста, де багато пристроїв, таких як датчики, камери та інші IoT-пристрої, можуть підключатися до мережі одночасно. Підтримка великої кількості одночасних підключень не тільки покращує можливості мережі, але й підтримує розвиток нових технологій, які вимагають інтеграції величезної кількості пристроїв у щоденне життя [11].

Роль IP технологій у 5G

IP-технології відіграють вирішальну роль у полегшенні зв'язку між функціями мережі в мобільних мережах 5G за допомогою протоколів IP [12]. Ці протоколи служать основою для обміну даними, забезпечуючи ефективний і ефективний обмін даними між пристроями. Реалізація IP-протоколів дозволяє бездоганно інтегрувати різні мережеві компоненти, що важливо для розгортання розширених програм і послуг. Оскільки мережі 5G вимагають вищої пропускної здатності та швидшого часу відгуку, ефективність, яку забезпечують протоколи IP, стає все більш важливою. Ця ефективність не тільки покращує роботу користувача, але й підтримує надійність критично важливих програм, таких як телемедицина та

автономні транспортні засоби, які потребують стабільного та високошвидкісного з'єднання (табл. 1.5).

Таблиця 1.5.

Переваги та підвищення продуктивності використання IP у 5G

Категорія	Опис переваг	Результат підвищення продуктивності
Масштабованість	Підтримка мільярдів пристроїв через IPv6, динамічну маршрутизацію і гнучкі мережеві зрізи (slicing).	Зростання ефективності роботи мережі навіть у умовах великого навантаження.
Продуктивність	Швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с, мінімізація затримок до 1 мс.	Забезпечення стабільного з'єднання для мультимедійних та реальних час сервісів.
Інтеграція сервісів	Інтеграція сервісів URLLC, eMBB і IoT через IP-протоколи.	Розширення спектру послуг і зростання доступності сервісів для абонентів.
Забезпечення якості обслуговування (QoS)	Пріоритизація критичних сервісів (URLLC) і управління ресурсами через політики QoS.	Мінімізація затримок і збоїв у роботі сервісів.
Безпека	Шифрування даних за допомогою IPsec, захист мікросервісів через TLS і REST API.	Підвищення довіри до мережі через надійний захист даних і абонентів.

Прийняття IPv6 має ключове значення для масштабованості та адресації пристроїв IoT у мережах 5G [13] (рис. 1.4.). На відміну від свого попередника, IPv4,

IPv6 пропонує значно більший адресний простір, який необхідний для розміщення зростаючої кількості підключених пристроїв в Інтернеті речей (IoT). Цей перехід дозволяє не тільки підключати більшу кількість пристроїв одночасно, але й покращує автоматичне налаштування, ефективнішу маршрутизацію та покращує безпеку [14]. Оскільки підприємства та галузі все більше покладаються на додатки IoT, здатність підтримувати широкий спектр пристроїв стає важливою для підтримки ефективності мережі та забезпечення безпеки. Наприклад, велике підприємство, яке перейшло на IPv6, змогло вдосконалити свої IoT-додатки з підтримкою 5G, зрештою підвищивши продуктивність і безпеку мережі [15].

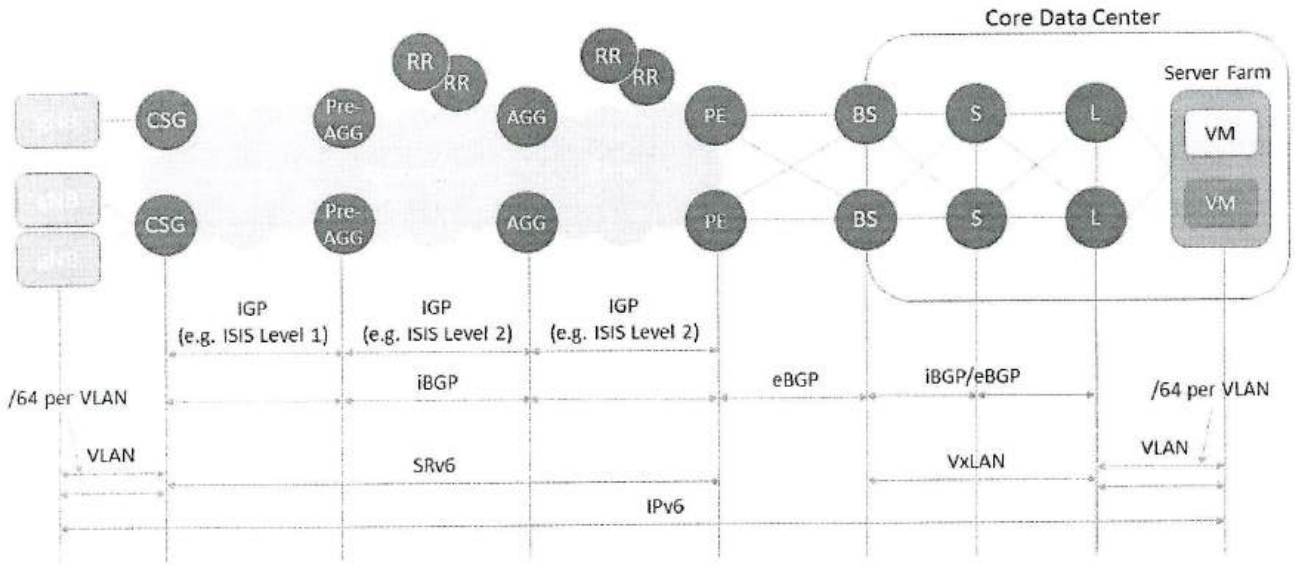


Рис. 1.4. Наскрізний перегляд мережі 5G на основі IPv6, включаючи RAN і Core DC

Multi-access Edge Computing (MEC) є ще одним важливим компонентом, який підтримує мережеву архітектуру 5G шляхом мінімізації затримки [16]. Наближаючи обчислювальні ресурси до кінцевого користувача, MEC забезпечує обробку даних у режимі реального часу, що важливо для додатків, які вимагають миттєвої відповіді. Інтеграція MEC з мережами 5G дозволяє нарізати мережу та реалізувати можливості хмарних обчислень на межі, значно зменшуючи затримку та покращуючи загальну ефективність мережі [17]. Така наближеність до користувача не тільки покращує якість обслуговування, але й посилює заходи

безпеки, створюючи більш надійне та чутливе мережеве середовище [18]. Отже, поєднання технологій MEC і 5G прокладає шлях для інноваційних застосувань у різних секторах, включаючи розумні міста, охорону здоров'я та промислову автоматизацію, в кінцевому підсумку змінюючи спосіб взаємодії з технологіями.

Мікросервісна архітектура (SBA)

Архітектура мікросервісів (SBA) у мобільних мережах 5G забезпечує безперебійну взаємодію між різними мережевими функціями через мережеві функції (NF), які обмінюються даними через протоколи IP [1]. Ця архітектура забезпечує модульний підхід до проектування мережі, де окремі функції мережі можна розробляти, розгортати та масштабувати незалежно. З прийняттям цієї основи ефективність мережевих операцій значно підвищується, оскільки вона дозволяє динамічно розподіляти ресурси та покращує керування продуктивністю. Архітектура мережі 5G включає ряд основних програмних модулів і мережевих функцій, які працюють разом, щоб забезпечити більш високу якість і швидкість передачі даних порівняно з попередніми поколіннями. Ця взаємодія має вирішальне значення для того, щоб мережеві служби могли адаптуватися до мінливих вимог користувачів і програм у режимі реального часу [19].

Щоб полегшити ефективну маршрутизацію запитів між мережевими функціями, проксі-сервер зв'язку (SCP) відіграє ключову роль в архітектурі 5G [20]. SCP діє як централізований пункт для управління трафіком сигналізації, гарантуючи, що запити направляються до відповідних мережевих функцій швидко та ефективно. Це централізоване керування не тільки оптимізує зв'язок між мережевими компонентами, але й підвищує надійність і відмовостійкість мережі шляхом балансування трафіку та зменшення вузьких місць. Реалізація SCP в архітектурі мікросервісів дозволяє більш гнучко реагувати на запити користувачів, зберігаючи оптимальну продуктивність мережі. У результаті мережа 5G може підтримувати величезну кількість одночасних з'єднань і забезпечувати покращену якість обслуговування [21].

Розгортання мережевих функцій у хмарному середовищі є ще одним критичним аспектом архітектури мікросервісів у мобільних мережах 5G [1]. Цей

хмарний підхід забезпечує віртуалізацію мережевих функцій, забезпечуючи більшу масштабованість і гнучкість. Використовуючи хмарну інфраструктуру, постачальники послуг можуть швидко розгортати, масштабувати та керувати мережевими функціями за потреби, швидко реагуючи на зміну умов мережі та вимог користувачів. Ця стратегія не тільки знижує операційні витрати, але й сприяє інноваціям, забезпечуючи швидкий розвиток і розгортання нових послуг. Крім того, хмарне середовище підтримує Multi-access Edge Computing (MEC), що має важливе значення для мінімізації затримки та покращення загального досвіду користувача в мережах 5G [22]. Завдяки такому поєднанню хмарного розгортання та архітектури мікросервісів мережі 5G можуть досягти безпрецедентного рівня продуктивності та задоволеності користувачів.

Продуктивність та QoS у 5G

У сфері 5G динамічна пріоритезація трафіку має вирішальне значення для того, щоб критично важливі служби отримували необхідну пропускну здатність і низьку затримку, яку вони потребують [23]. Зі збільшенням кількості підключених пристроїв і послуг мережі 5G повинні мати можливість адаптивно керувати трафіком на основі вимог різних додатків у реальному часі. Наприклад, додатки, що використовуються в охороні здоров'я, автономному керуванні автомобілем і реагуванні на надзвичайні ситуації, вимагають негайної передачі даних і мінімальних затримок. Використовуючи вдосконалені алгоритми та штучний інтелект для керування трафіком, 5G може ефективно визначати пріоритети цих критичних послуг, забезпечуючи оптимальну продуктивність. Цей підхід не тільки покращує взаємодію з користувачем, але й гарантує, що важливі функції зберігають свою надійність, таким чином підтримуючи зростаючий ландшафт взаємопов'язаних технологій.

URLLC (наднадійний зв'язок із низькою затримкою) — це життєво важливий компонент технології 5G, призначений для задоволення високих вимог програм, які покладаються на високу надійність і низьку затримку [11]. Цей стандарт зв'язку важливий для таких сценаріїв, як віддалені хірургічні операції та автоматизоване керування автомобілем, де будь-яка затримка може мати серйозні наслідки.

Використовуючи інноваційні протоколи IP, мережі 5G можуть ефективно підтримувати URLLC, забезпечуючи передачу пакетів з мінімальною затримкою та високою надійністю. Ця можливість значно підвищує продуктивність критично важливих додатків, дозволяючи їм безперебійно працювати в середовищах реального часу. У результаті URLLC стає наріжним каменем у реалізації повного потенціалу технології 5G, забезпечуючи широкий спектр розширених послуг, які раніше були недоступні.

Покращення якості потокового відео через адаптивні IP-протоколи є ще одним значним досягненням, досягнутим технологією 5G [5]. Завдяки здатності підтримувати більшу пропускну здатність і швидші відповіді мережі, 5G забезпечує більш плавну передачу, особливо для вмісту високої чіткості та 4K. Технології адаптивної потокової передачі регулюють якість відео в режимі реального часу залежно від стану мережі користувача, гарантуючи, що глядачі отримають найкращий досвід без перерв. Це особливо важливо, оскільки споживання вмісту зміщується в бік відео, і користувачі очікують безперебійної доставки на різні пристрої. Крім того, збільшена пропускна здатність мереж 5G дозволяє одночасно передавати кілька високоякісних відеоканалів, що ще більше зміцнює роль 5G у піднесенні мультимедійного досвіду на нову висоту.

Інтеграція IoT та IP у 5G

Інтеграція пристроїв IoT у мережі 5G значною мірою залежить від використання IP-протоколів для безперебійного підключення [24]. Ці протоколи служать основою для адресації та маршрутизації повідомлень між різними пристроями IoT, що дозволяє їм ефективно та надійно спілкуватися. Завдяки прогресу, який принесла технологія 5G, можливості IP-протоколів розширилися, враховуючи значне збільшення кількості підключених пристроїв. Це особливо важливо, оскільки ландшафт IoT продовжує розвиватися, що призводить до різноманітних застосувань від пристроїв розумного дому до промислової автоматизації. Використовуючи протоколи IP, мережі 5G можуть підтримувати широкий спектр додатків Інтернету речей, гарантуючи, що пристрої залишатимуться взаємопов'язаними та працездатними.

Одним із значних досягнень у технології 5G є впровадження вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT), який розроблений для малопотужних широкомасштабних додатків [25]. NB-IoT працює через IP, що дозволяє пристроям підтримувати зв'язок, споживаючи мінімальну енергію. Ця характеристика є важливою для пристроїв IoT, які можуть працювати у віддалених або важкодоступних місцях, де довговічність батареї є критичним фактором. Використання IP в NB-IoT гарантує, що ці пристрої можуть ефективно спілкуватися з мережею, мінімізуючи споживання енергії, таким чином подовжуючи термін їх експлуатації. Крім того, ця технологія підтримує величезну кількість пристроїв в одній комірці, що робить її придатною для програм розумного міста, моніторингу навколишнього середовища та інших масштабних розгортань IoT.

Ефективне керування величезними обсягами даних, які генеруються пристроями IoT, є ще одним критичним фактором інтеграції IoT та IP у мережі 5G, зокрема за допомогою використання IPv6 [26]. Ця новіша версія Інтернет-протоколу забезпечує значно більший адресний простір, враховуючи експоненціальне зростання підключених пристроїв в екосистемі IoT. Завдяки IPv6 кожен пристрій може мати унікальну адресу, що спрощує маршрутизацію даних і покращує загальну ефективність мережі. Крім того, IPv6 підтримує розширені функції керування даними, такі як покращені протоколи безпеки та більш ефективна обробка пакетів даних. Як наслідок, впровадження IPv6 у мережах 5G не тільки покращує зв'язок, але й забезпечує ефективне керування та передачу великих обсягів даних IoT, відкриваючи шлях для інноваційних програм і послуг у різних секторах.

Безпека у 5G через IP

Одним із найважливіших компонентів забезпечення безпеки в мережах 5G є шифрування трафіку за допомогою IPsec [27]. IPsec, що означає IP Security, містить набір протоколів, розроблених для захисту даних, що передаються через IP-мережі. Цей захід безпеки має важливе значення для захисту конфіденційної інформації від несанкціонованого доступу та забезпечення цілісності даних під час проходження

мережею [28]. Встановлюючи безпечні канали зв'язку, IPsec відіграє важливу роль у збереженні конфіденційності користувачів і захисті від потенційних кіберзагроз. Крім того, інтеграція IPsec в архітектуру 5G дозволяє посилити заходи безпеки, необхідні для підтримки збільшення кількості підключених пристроїв і величезних обсягів даних, створених цими пристроями.

Окрім IPsec, використання протоколів безпеки транспортного рівня (TLS) має вирішальне значення для захисту мікросервісів, що працюють у середовищах 5G [21]. TLS забезпечує додатковий рівень безпеки, шифруючи дані, якими обмінюються мікросервіси, гарантуючи, що конфіденційна інформація залишається конфіденційною навіть під час передачі. Це особливо важливо, оскільки залежність від мікросервісів у мережах 5G продовжує зростати, що сприяє створенню більш гнучкої та масштабованої архітектури. Впроваджуючи TLS, постачальники послуг можуть зменшити ризики, пов'язані з витоком даних, і зберегти довіру своїх користувачів. Поєднання IPsec і TLS створює надійну структуру безпеки, що забезпечує безперебійний і безпечний зв'язок між різними компонентами екосистеми 5G.

Крім того, інтеграція рішень безпеки для пристроїв Інтернету речей (IoT) є обов'язковою в контексті мереж 5G [29]. Оскільки 5G полегшує підключення мільярдів пристроїв IoT, важливо впровадити захисні заходи, які захищають ці пристрої від потенційної вразливості та атак. Це може включати розгортання спеціалізованих протоколів безпеки та рішень, розроблених спеціально для середовищ Інтернету речей, гарантуючи, що кожен підключений пристрій відповідає стандартам безпеки. Ефективне керування безпекою для пристроїв IoT не тільки захищає окремі пристрої, але й захищає ширшу мережу від потенційних загроз, які можуть використовувати вразливості в системах IoT. Вирішуючи ці проблеми безпеки, 5G може підтримувати безперервне зростання та надійність додатків IoT, зрештою сприяючи створенню безпечнішого та ефективнішого цифрового середовища.

Мережеві виклики 5G

Однією з основних проблем, з якими стикаються мережі 5G, є високе навантаження на інфраструктуру через експоненціальне зростання трафіку даних [1]. Оскільки використання мобільного Інтернету продовжує стрімко зростати, завдяки прогресу в технологіях і поширенню пристроїв IoT, мережева інфраструктура повинна адаптуватися для підтримки підвищених вимог до пропускної здатності [5]. Впровадження 5G базується на забезпеченні значно вищих швидкостей передачі даних і більшої ємності для одночасних з'єднань, що робить важливим для мережевих операторів удосконалити свої існуючі системи. У цьому контексті потреба в надійній інфраструктурі стає очевидною, оскільки вона повинна не тільки вміщати більше користувачів, але й підтримувати якісне обслуговування в різних програмах, зокрема: - Розширений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB) - Наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC) - Масивні комунікації машинного типу (mMTC)

Забезпечення сумісності з попередніми поколіннями, зокрема 4G, є ще одним критичним завданням для розгортання мереж 5G [11]. Перехід від 4G до 5G має бути плавним, дозволяючи користувачам безперебійно користуватися послугами, використовуючи як старі, так і нові технології. Ця міграція вимагає інтеграції існуючої мережевої інфраструктури з новими компонентами 5G. Крім того, оператори повинні розробляти системи, які можуть ефективно керувати ресурсами різних поколінь, гарантуючи, що застарілі пристрої все ще можуть підключатися без шкоди для продуктивності нових послуг 5G. Ця сумісність має вирішальне значення для: - Підтримка взаємодії з користувачем під час переходу - сприяння поступовій модернізації інфраструктури - Мінімізація збоїв у роботі

Впровадження 5G також підкреслює необхідність масштабування IP-мереж для забезпечення їх передових функцій [29]. Оскільки 5G представляє нові функції, такі як нарізка мережі та зв'язок із наднизькою затримкою, стає очевидним попит на більш складні архітектури IP-мереж. Цей процес масштабування передбачає не тільки модернізацію існуючої інфраструктури, але й впровадження нових технологій, які можуть ефективно впоратися зі збільшеним потоком даних і різноманітними вимогами додатків. Оператори мереж повинні враховувати

наступні аспекти під час масштабування своїх IP-мереж: — Розширені протоколи маршрутизації для покращеного керування даними - Збільшена потужність сервера для підтримки більших обсягів трафіку - Розширені заходи безпеки для захисту від потенційних вразливостей Вирішуючи ці проблеми, оператори можуть переконатися, що їхні мережі обладнані відповідно до вимог цифрового середовища, що швидко розвивається.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ІНТЕГРАЦІЇ IP ТЕХНОЛОГІЙ В МЕРЕЖІ ЧЕТВЕРТОГО ТА П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1. Методи інтеграції IP технологій у мережах 4G та 5G

Роль IP технологій у мережах 4G та 5G є фундаментальною, оскільки вони забезпечують уніфіковану платформу для передачі даних, управління трафіком і інтеграції різноманітних сервісів (рис. 2.1.). У 4G мережах IP став основою для архітектури EPC (Evolved Packet Core), що дозволило перейти від традиційного голосового зв'язку до високошвидкісної передачі даних і мультимедійних послуг, таких як VoLTE і потокове відео. Це значно спростило маршрутизацію, зробило мережу більш масштабованою та гнучкою.

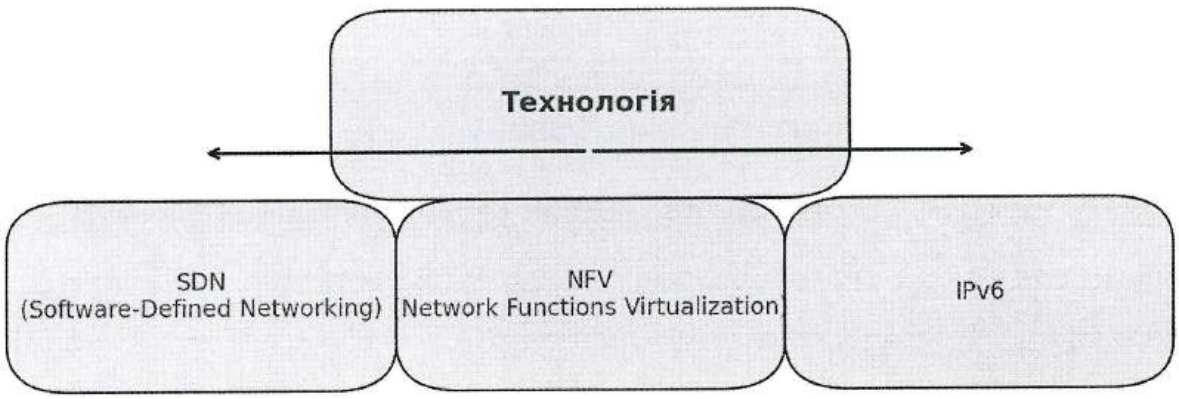


Рис. 2.1. Методи інтеграції IP технологій у мережах 4G та 5G

У мережах 5G роль IP технологій розширюється завдяки впровадженню Service-Based Architecture (SBA), де всі мережеві функції взаємодіють через стандартизовані IP-протоколи, такі як HTTP/2 і REST API. Це сприяє інтеграції нових сервісів, таких як IoT, AR/VR і автономні системи, забезпечуючи високу продуктивність, низькі затримки і масштабованість. IPv6 став основою для адресації величезної кількості підключених пристроїв, тоді як SDN і NFV забезпечують динамічне управління мережею, гнучкість у розподілі ресурсів і зниження витрат.

IP технології забезпечують платформу, яка об'єднує функції управління, безпеки та обробки даних, дозволяючи мобільним мережам ефективно реагувати на зростаючі вимоги до продуктивності та масштабованості в сучасному світі.

Роль методів інтеграції IP технологій у мережах 4G та 5G (табл. 2.1):

1. SDN (Software-Defined Networking). SDN розділяє управління мережевою інфраструктурою (control plane) та передачу даних (data plane), дозволяючи централізоване управління мережею. Це забезпечує:

- Динамічну маршрутизацію: Зміна маршруту трафіку в режимі реального часу залежно від умов мережі.
- Оптимізацію використання ресурсів: Автоматизоване управління пропускною здатністю та розподіл трафіку.
- Гнучкість: Швидке впровадження нових сервісів без змін фізичної інфраструктури.

У мережах 5G SDN використовується для динамічного керування мережевими зрізами (network slicing) з урахуванням різних потреб, наприклад, IoT або автономного транспорту.

2. NFV (Network Functions Virtualization)

NFV дозволяє віртуалізувати традиційні мережеві функції, такі як маршрутизація, брандмауери чи шифрування, замість їхньої реалізації на апаратному рівні. Це дає змогу:

- Зниження витрат: Використання загальних серверів замість спеціалізованого обладнання.
- Гнучке масштабування: Легке розширення або скорочення функцій залежно від навантаження.
- Швидкість впровадження: Прискорене розгортання нових послуг.

NFV у 5G дозволяє швидко віртуалізувати функції User Plane Function (UPF), забезпечуючи обробку даних ближче до кінцевих користувачів через MEC (Multi-access Edge Computing).

Таблиця 2.1.

Методи інтеграції IP технологій у мережах 4G та 5G

Технологія	Роль	Приклад
SDN (Software-Defined Networking)	Динамічна маршрутизація, оптимізація використання ресурсів, гнучкість у впровадженні нових сервісів.	Керування мережевими зрізами (network slicing) у 5G залежно від потреб IoT або автономного транспорту.
NFV (Network Functions Virtualization)	Зниження витрат, гнучке масштабування, швидкість впровадження мережевих функцій.	Віртуалізація User Plane Function (UPF) у 5G для обробки даних ближче до кінцевих користувачів через MEC.
IPv6	Підтримка масштабованості, ефективність маршрутизації, вбудована безпека для IoT.	Адресація мільярдів IoT-пристроїв у 5G з підтримкою автоматичної конфігурації та IPsec.

3. IPv6

IPv6 є основою для масштабованих IP-мереж завдяки розширеному адресному простору та вдосконаленим можливостям маршрутизації. Це забезпечує:

- Підтримку IoT: Масштабованість для підключення мільярдів пристроїв.
- Ефективність: Просте управління мережею завдяки спрощенню заголовків IP-пакетів і підтримці автоматичної конфігурації.
- Безпеку: Вбудовані механізми захисту, такі як IPsec, які забезпечують конфіденційність та цілісність даних.

У 5G IPv6 використовується для забезпечення адресації великої кількості IoT-пристроїв, що сприяє ефективній інтеграції з іншими IP-орієнтованими мережами.

2.2. Переваги SDN у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та інтеграції IP

Архітектура програмно-визначеної мережі (SDN) у мобільних мережах, зокрема в 4G і 5G, наголошує на розділенні площини керування та площини даних, що полегшує децентралізоване управління [1] (табл. 2.2). Це розділення дозволяє мережевим операторам ефективніше керувати трафіком і адаптивно реагувати на мінливий попит, не обмежуючись фізичними обмеженнями традиційної мережевої архітектури. Роз'єднавши ці дві площини, оператори можуть реалізувати динамічну маршрутизацію, розподіл ресурсів і коригування якості обслуговування в реальному часі. Ця зміна не тільки підвищує робочу гнучкість, але й відкриває шлях для інтеграції розширених служб і додатків, що, відповідно, покращує загальну якість послуг, що надаються користувачам [2] (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Роль SDN у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та інтеграції IP

Таблиця 2.2.

Роль SDN у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та інтеграції IP

Параметр	Роль SDN	Переваги для IP-мереж
Управління трафіком	Централізоване управління трафіком у реальному часі з урахуванням навантаження мережі.	Ефективне управління IP-пакетами для підвищення продуктивності.
Оптимізація маршрутизації	Динамічна маршрутизація на основі аналітики трафіку для мінімізації затримок.	Забезпечення маршрутизації IP-трафіку з мінімальними затримками.
Підтримка QoS і QoE	Пріоритизація трафіку для критичних сервісів (URLLC, eMBB) з гарантованою пропускною здатністю.	Гарантована якість обслуговування для IP-базованих сервісів, таких як VoLTE.
Мережеві зрізи (Network Slicing)	Логічне розділення ресурсів мережі для різних сценаріїв використання (IoT, мультимедіа).	Розширення можливостей IP-мереж для підтримки одночасного використання різних сервісів.
Інтеграція з MEC	Оптимізація передачі даних на периферії завдяки інтеграції MEC з SDN.	Зменшення затримок і збоїв у передачі IP-даних на рівні периферії.
Безпека	Виявлення загроз і динамічне застосування політик безпеки через SDN-контролери.	Захист IP-трафіку через автоматизоване шифрування та контроль доступу.

У контексті SDN протокол OpenFlow відіграє важливу роль у сприянні зв'язку між контролером SDN та мережевими пристроями [3]. OpenFlow дозволяє використовувати стандартизований метод керування потоком пакетів даних через мережу, дозволяючи контролеру приймати обґрунтовані рішення на основі умов

мережі в реальному часі. Цей зв'язок має вирішальне значення для підтримки ефективності та швидкості реагування мережі, оскільки дозволяє швидко коригувати потік даних і керувати ресурсами. Крім того, використання OpenFlow сприяє взаємодії різних мережевих компонентів, оскільки він може підтримувати як відкриті, так і пропрієтарні мережеві протоколи [4]. Ця гнучкість необхідна для сучасних мереж мобільного зв'язку, які мають підтримувати широкий спектр пристроїв і послуг.

Інтеграція SDN з Evolved Packet Core (EPC) у 4G і Service-Based Architecture (SBA) у 5G має важливе значення для забезпечення гнучких можливостей маршрутизації та покращеного надання послуг [5]. EPC служить основою для мереж 4G, тоді як архітектура SBA в 5G забезпечує більш модульний і сервіс-орієнтований підхід. Використовуючи принципи SDN, ці архітектури можуть динамічно розподіляти ресурси, оптимізувати потоки трафіку даних і підтримувати екосистему Інтернету речей (IoT), що розвивається. Ця інтеграція не тільки покращує здатність мережі справлятися зі збільшеним навантаженням даних і різноманітними вимогами до програм, але також сприяє інноваціям, дозволяючи швидко розгортати нові служби відповідно до мінливих вимог ринку [2]. Зрештою, ця синергія між SDN і базовими архітектурами є ключовою для реалізації повного потенціалу мереж 4G і 5G.

Одним із ключових методів оптимізації маршрутизації трафіку в мережах 4G і 5G є реалізація динамічного управління трафіком на основі даних у реальному часі [5]. Цей підхід дозволяє здійснювати безперервний моніторинг стану мережі, дозволяючи системі адаптивно налаштовувати маршрутизацію пакетів даних, щоб мінімізувати перевантаження та підвищити загальну продуктивність. Використовуючи архітектуру програмно-визначеної мережі (SDN), мережеві оператори можуть приймати рішення в реальному часі, які оптимізують шляхи трафіку даних, забезпечуючи ефективне використання доступної смуги пропускання та ресурсів. Переваги цієї методики: - Підвищена чутливість до коливань мережі — Покращена взаємодія з користувачем завдяки зменшеній затримці — Покращена загальна ефективність мережі

Інший важливий аспект оптимізації трафіку включає впровадження методів балансування навантаження [2]. Балансування навантаження гарантує, що мережевий трафік рівномірно розподіляється між кількома шляхами або серверами, запобігаючи тому, щоб будь-який окремий ресурс став вузьким місцем. Це особливо важливо в мережах 4G і 5G, де інтенсивне використання даних із таких програм, як потокове відео та онлайн-ігри, може призвести до значних стрибків трафіку. Ефективно керуючи навантаженням у мережі, оператори можуть досягти: - Вища пропускна здатність - Зменшена ймовірність перебоїв в обслуговуванні - Краще використання ресурсів Впровадження стратегій балансування навантаження не тільки покращує продуктивність мережі, але й підвищує надійність послуг, що надаються кінцевим користувачам.

Використання алгоритмів, спрямованих на мінімізацію затримок у мобільних мережах, є життєво важливим для оптимізації маршрутизації трафіку [6]. І в середовищах 4G, і в 5G затримка може суттєво вплинути на продуктивність програм у реальному часі, таких як передача голосу через IP (VoIP) і онлайн-ігри. Використовуючи розширені алгоритми маршрутизації, які визначають пріоритети шляхів із низькою затримкою, оператори мереж можуть гарантувати, що критично важливі пакети даних досягнуть місця призначення якомога швидше. Перевагами використання таких алгоритмів є: — Покращена продуктивність чутливих до часу програм - Покращена якість обслуговування (QoS) для кінцевих користувачів - Підвищена надійність мережі У міру розвитку мобільних мереж увага до мінімізації затримок ставатиме все більш важливою, особливо з розвитком Інтернету речей (IoT) та інших нових технологій, які потребують високопродуктивного підключення.

Управління мережевими ресурсами в мережах 4G та 5G є критично важливим для забезпечення ефективного використання спектру та задоволення потреб різних сервісів. У мережах 5G спектр розподілу виконується з урахуванням спеціальних вимог таких категорій, як Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC) та послуг Інтернет-речей (IoT) [7]. Ці категорії вимагають різних підходів до управління ресурсами, потім, наприклад, eMBB

вимагає високої пропускної здатності для мультимедійних додатків, тоді як URLLC потребує низьких затримок для критичних комунікацій [8]. Таким чином, правильний спектр розподілу є основою для забезпечення високої якості послуг та задоволення вимог користувачів у мережах 5G.

При розподілі мережевих ресурсів втратили оптимальну якість обслуговування (QoS), яка була достатньою для підтримки різних типів трафіку [8]. Наприклад, QoS визначає ймовірність того, що мережа виконує умови угоди про трафік, що є критичним місцем для успішного функціонування сервісів, які використовують технологію 5G [2]. Використання SDN (Software Defined Networking) дозволяє динамічно регулювати ресурси на основі реального часу, що забезпечує адаптацію мережі до змінених умов трафіку. Підхід необхідно оптимізувати використання ресурсів та забезпечити рівномірне обслуговування для всіх користувачів, особливо для тих, хто має високі вимоги до QoS.

Політика застосування Traffic Engineering грає важливу роль у підвищенні пропускної здатності мережі 4G та 5G [5]. Вони можуть більш ефективно керувати трафіком, запобігаючи перевантаженню мережі та забезпечуючи оптимальний розподіл ресурсів. Крім того, використання алгоритмів мінімізації затримок у мобільних мережах дозволяє забезпечити високу швидкість та надійність передачі даних [9]. Це особливо важливо для сервісів, які потребують моментального реагування, таких як додатки IoT та критично важливі комунікації. Впровадження такої політики може підвищити загальну продуктивність мережі та покращити користувацький досвід в умовах значного зростання попиту на мобільний трафік.

Інтеграція технологій віртуалізації мережевих функцій (NFV) у мережі 4G та 5G є критично важливою для ефективного розгортання віртуальних функцій, таких як User Plane Function (UPF) на програмованих платформах [10]. UPF дозволяє забезпечити доступ до даних та управління трафіком, що є особливими проблемами в умовах високої пропускної здатності мережі 5G. Це досягається шляхом використання віртуалізації, що дозволяє операторам швидко адаптувати мережеві ресурси під інші вимоги та сценарії використання. Крім того, віртуалізація

забезпечує можливість динамічного масштабування функцій у залежності від навантаження, що забезпечує загальну ефективність управління ресурсами.

Координація між SDN-контролерами та NFV-оркестраторами є ще одним аспектом інтеграції цих технологій у мережах 4G та 5G [2]. SDN-контролери відповідають за управління мережею, в той час як NFV-оркестратори займаються розгортанням та управлінням віртуалізованими функціями. Ця координація дозволяє забезпечити автоматичне налаштування мережевих ресурсів відповідно до вимог користувачів та специфікацій QoS. Крім того, автоматизація процесів управління дозволяє: - Змінити затримки в наданні послуг - Підвищити ефективність використання ресурсів - Оптимізація управління трафіком в мережі

Забезпечення автоматизації розподілу ресурсів для віртуальних мереж є ще одним ключовим фактором у контексті інтеграції SDN та NFV [11]. Автоматизація дозволяє не тільки підвищити швидкість та точність розподілу ресурсів, але й адаптуватися до змінених умов мережі. Це особливо важливо в умовах високої волатильності трафіку в мережах 5G, де попит на ресурси може змінюватися в реальному часі. Впровадження ефективних механізмів автоматизації забезпечує: - Інтелектуальне управління навантаженням - Динамічне перенаправлення трафіку - Підвищення загальної надійності мережі Таким чином, інтеграція SDN та NFV у мережах 4G та 5G створює основу для більшої гнучкої, масштабованої та ефективної інфраструктури зв'язку.

Використання SDN (програмованих мереж) для виявлення та ізоляції DDoS-атак є одним із основних аспектів забезпечення безпеки в сучасних мережах [12]. У SDN-мережах контролери можуть швидко аналізувати трафік і виявляти аномалії, що свідчать про можливу атаку. Наприклад, методи машинного навчання, такі як логістична регресія, можуть бути використані для встановлення патернів, характерних для DDoS-атак [13]. Це дозволяє не лише визначити загрозу, але й оперативно ізолювати уражені елементи мережі, мінімізуючи вплив на загальну інфраструктуру. Таким чином, SDN забезпечує проактивний підхід до захисту мережі від кіберзагроз.

Динамічне застосування політики доступу через контролери SDN є критичним місцем для забезпечення безпеки в мережах нового покоління [14]. Контролери SDN можуть автоматично адаптувати політику доступу на основі поточних умов і поведінки користувачів. Це включає в себе можливість блокування або обмеження доступу до ресурсів у разі виявлення помітної активності. Наприклад, якщо контролер виявляє аномальний трафік з певної IP-адреси, він може автоматично змінити політику доступу, щоб обмежити або заборонити доступ цього пристрою до критично важливих ресурсів. Ця гнучкість в управлінських політиках доступу дозволяє швидше реагувати на загрози та знижує ризик несанкціонованого доступу.

Впровадження шифрування даних за допомогою IPsec в SDN-мережах є кількома кроками у забезпеченні безпеки комунікацій [15]. IPsec, як набір протоколів для захисту даних, забезпечує конфіденційність та цілість переданих даних, що є особливою кількістю у всесвітньо зростаючих загрозах кібербезпеки [16]. Застосування IPsec в SDN-мережах дозволяє створити безпечні канали зв'язку між всіма елементами мережі, захищаючи їх від перехоплення та модифікації інформації. Це забезпечує високий рівень захисту даних, що організаціями забезпечує конфіденційність інформації та відповідає на зростаючі вимоги до безпеки в умовах цифрової трансформації.

Логічне розділення мережі – це ключова функція технології Network Slicing, яка дозволяє створювати окремі сегменти мережі для різних типів послуг у мережах 5G [11]. таким чином, це використання Інтернет-речей (IoT), послуги з розширеною мобільною широкосмуговістю (eMBB) та наднадійних і низьколатентних комунікацій (URLLC). Використання запрограмованих мережевих ресурсів через SDN дає можливість оптимізувати роботу кожного сегмента, який у своєму разі забезпечує ефективне виконання певних вимог до продуктивності та надійності різних програм. Наприклад, для IoT необхідно зосередитися на енергоефективності, тоді як для eMBB необхідно забезпечити високу швидкість передачі даних.

Управління ресурсами для кожного мережевого зрізу створюється через політику якості обслуговування (QoE), що дозволяє забезпечити оптимальний досвід користувача [17]. Ці політики враховують різні параметри, такі як пропускна здатність, підтримка та надійність, що є критичними для підтримки різноманітних послуг у мережах 5G. Наприклад, для eMBB робиться забезпечення високої успішності, тоді як для URLLC необхідно зменшити затримки до мінімуму. Застосування такої політики дозволяє оператору динамічно шукати ресурси, реагуючи на зміни в попиті на різні послуги та адаптуючи мережу до реальних умов експлуатації.

Моніторинг продуктивності зрізів у реальному часі є ще важливою складовою ефективного управління мережевими ресурсами [7]. SDN-контролери надають можливість відстежувати параметри продуктивності кожного зрізу, дозволяючи швидко виявляти й усувати якісь проблеми. Це включає в себе аналіз таких показників, як використання пропускної здатності, затримки при передачі даних і рівень надійності з'єднання. Завдяки цій інформації оператори можуть повільно відновлювати зміни в завантаженні та ефективно керувати ресурсами, що, зрештою, покращує загальний досвід користувачів у мережі 5G.

Програмовані SDN-маршрутизатори сприяють інтеграції межових обчислень із множинним доступом (MEC) в архітектуру мереж 5G. Ці маршрутизатори дозволяють динамічно розподіляти ресурси та керувати ними, що важливо для задоволення різноманітних потреб різноманітних програм, що працюють у мережах 5G [2]. Оскільки 5G має на меті підтримку величезної кількості підключених пристроїв і послуг, гнучкість, пропонована SDN, стає все більш важливою [18]. Використовуючи можливості програмування SDN, мережеві оператори можуть ефективно керувати сегментами мережі, адаптованими для конкретних випадків використання, таких як розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB), ультранадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC) та Інтернет речей (IoT). Ця інтеграція гарантує, що MEC може підвищити продуктивність мереж 5G, наблизивши обчислення та зберігання даних до користувача, тим самим покращуючи загальне надання послуг.

Однією з ключових переваг MEC є зменшення затримки, досягнуте за рахунок обробки даних на межі мережі, а не покладання на віддалені центри обробки даних [19]. Це особливо важливо для додатків, які вимагають обробки даних у реальному часі, таких як автономні транспортні засоби або телемедицина, де навіть незначні затримки можуть мати серйозні наслідки [20]. Переміщуючи обчислювальні завдання ближче до джерела даних, MEC мінімізує час передачі даних в обидві сторони, підвищуючи зручність і задоволеність користувачів. Наприклад, впровадження периферійних обчислень може призвести до зменшення затримки до 10 разів порівняно з традиційними моделями хмарних обчислень, що робить його життєво важливим компонентом архітектури 5G [18]. Ця можливість не тільки гарантує, що мережі 5G відповідають суворим вимогам щодо затримки, але й покращує швидкість реакції програм, які залежать від доступу до даних у реальному часі.

Управління обчислювальними ресурсами в середовищах MEC значно покращується завдяки використанню контролерів SDN [21]. Ці контролери забезпечують централізовану структуру для розподілу та оптимізації ресурсів, дозволяючи операторам ефективно керувати обчислювальними вимогами різних програм. Використовуючи SDN, мережеві оператори можуть встановлювати політики, які визначають пріоритетність розподілу ресурсів на основі показників продуктивності в реальному часі та попиту користувачів [22]. Це гарантує, що критично важливі програми отримають необхідну пропускну здатність і обчислювальну потужність, зберігаючи якість досвіду (QoE) у всій мережі. Крім того, можливість динамічно контролювати та коригувати розподіл ресурсів дозволяє операторам швидко реагувати на коливання мережевого трафіку, що ще більше підвищує ефективність MEC у середовищах 5G.

2.3. Переваги NFV у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та інтеграції IP

Розподіл мережевих функцій на VNF (Virtualized Network Functions) є ключовим аспектом архітектури NFV у мобільних мережах 4G та 5G [1]. Концепція передбачає віртуалізацію класів мережевих функцій, що дозволяє реалізувати мережеві елементи у вигляді віртуальних функцій [2] (рис. 2.3). Це забезпечує гнучкість у розгортанні та управлінні мережевими ресурсами, після VNF може бути швидко налаштовано та масштабовано відповідно до потреб мережі. Завдяки таким архітектурним операторам підтримується можливість оптимізувати використання ресурсів і знизити витрати, що є особливим місцем у контексті підвищення вимог до швидкості та надійності мобільних мереж.

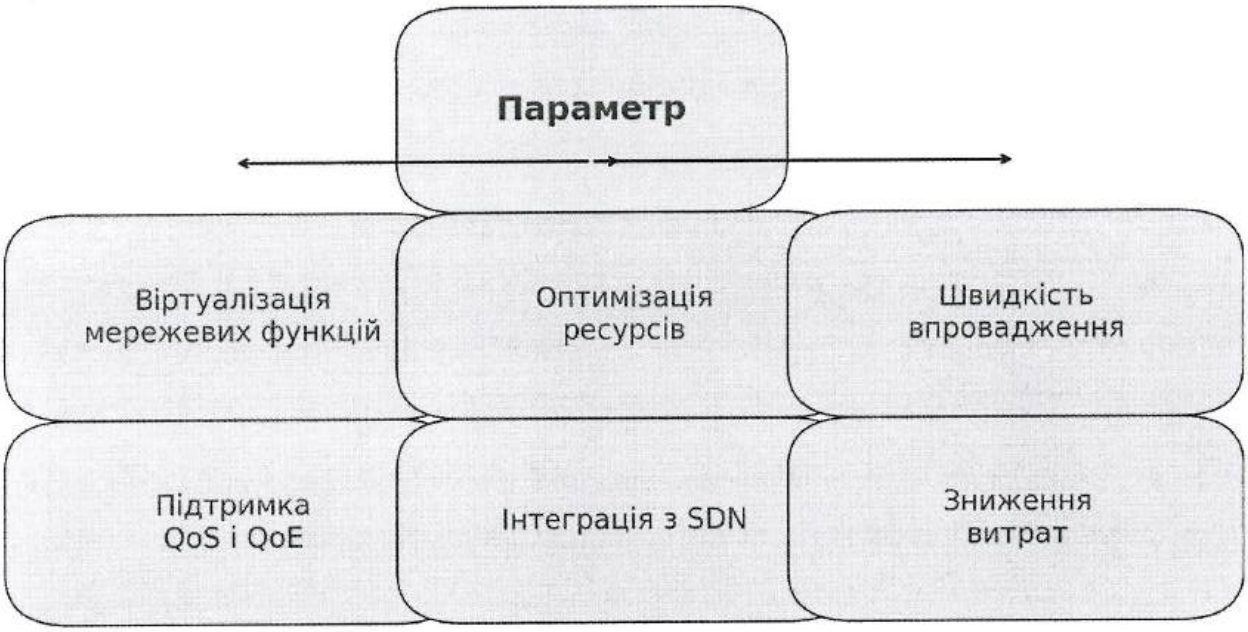


Рис. 2.3. Роль NFV у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та IP

Оркестрація VNF за допомогою NFV MANO (Management and Orchestration) є критично важливою для забезпечення ефективності управління віртуалізованими мережевими функціями [3] (табл. 2.3). NFV MANO забезпечує автоматизацію розгортання, налаштування та моніторингу VNF, що дозволяє зменшити час реакції на зміни в мережі [4].

Таблиця 2.3.

Роль NFV у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та IP

Параметр	Роль NFV	Переваги для IP-мереж
Віртуалізація мережевих функцій	Перенесення функцій, таких як маршрутизація та шифрування, у віртуальне середовище для підвищення гнучкості.	Гнучке управління IP-трафіком через віртуальні маршрутизатори.
Оптимізація ресурсів	Масштабування ресурсів залежно від навантаження через використання віртуалізації.	Ефективне використання IP-адрес завдяки масштабованій архітектурі.
Швидкість впровадження	Прискорення розгортання нових мережевих функцій завдяки автоматизації процесів.	Прискорення впровадження IP-базованих сервісів, таких як VoLTE.
Підтримка QoS і QoE	Забезпечення стабільної якості обслуговування через пріоритизацію трафіку та управління ресурсами.	Покращення продуктивності IP-сервісів завдяки гарантованій якості.
Інтеграція з SDN	Динамічне управління мережевими функціями у координації з SDN-контролерами.	Оптимізація маршрутизації IP-пакетів через координацію з SDN.
Зниження витрат	Зниження потреби у спеціалізованому обладнанні через використання стандартних серверів.	Зменшення витрат на обслуговування IP-мереж через стандартне обладнання.

Крім того, функціональне управління відносинами з VNF включає в себе можливості FCAPS (Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security), що сприяє підтримці стабільної роботи мережі. Завдяки цьому оператори можуть

швидше реагувати на запити користувачів і забезпечувати безперервність обслуговування.

Взаємодія NFV з фізичними та віртуальними мережевими ресурсами є ще одним аспектом, який впливає на ефективність мобільних мереж 4G та 5G [5]. NFV дозволяє інтегрувати як фізичні, так і віртуальні ресурси в єдину управлінську платформу, що забезпечує оптимальне використання наявних інфраструктур [6]. Це включає в себе можливість створення логічних мереж, або «слайсів», які вибирають VNF для задоволення певних вимог до якості обслуговування [7]. Така гнучкість дозволяє операторам адаптувати свої мережі до змінених умов і забезпечити високу продуктивність для різних типів трафіку.

Функція віртуалізації User Plane Function (UPF) є критичним числом елементів для обробки трафіку в мережах 5G [8]. UPF відповідає за маршрутизацію та управління трафіком, що проходить через мережу, і його віртуалізація дозволяє значно підвищити ефективність обробки даних. В умовах високої швидкості передачі даних, які забезпечують 5G, а також зменшеної затримки до 1 мілісекунди [1], віртуалізація UPF забезпечує гнучкість і масштабованість, необхідну для обробки збільшеного обсягу трафіку. Завдяки використанню віртуалізованих функцій мережі оператори можуть швидше адаптувати свої мережі під нові вимоги, знижуючи витрати на обладнання та підвищуючи загальну продуктивність мережі.

Наступним аспектом є реалізація віртуальних брендмауерів (vFW), яка забезпечує рівень безпеки в мережах 4G і 5G [2]. Віртуалізація брандмауерів дозволяє організаціям гнучко на ефективність політики безпеки залежно від вимог конкретного середовища. Це особливо важливо в умовах, коли зростає кількість кіберзагроз та атак, які можуть експлуатувати невразливості в традиційних мережах. Віртуальні брендмауери можуть інтегруватися з іншими віртуалізованими функціями, такими як системи управління трафіком, для забезпечення комплексного захисту. Це дозволяє не лише виявляти загрози в реальному часі, але й швидко реагувати на якісь атаки, забезпечуючи безпеку даних та мережевих ресурсів.

Віртуалізація функцій шифрування та VPN також має критичне значення для захисту IP-трафіку в сучасних мобільних мережах [8]. З ростом обсягу переданих даних та їх чутливості, необхідність у безпечному шифруванні стає першочерговою. Віртуалізовані рішення для шифрування можуть швидко адаптуватися до змінених загроз, забезпечуючи надійний захист даних під час їх передачі. Віртуальні приватні мережі (VPN) дозволяють користувачам безпечно підключатися до мережі, захищаючи їхнє з'єднання від несанкціонованого доступу. Завдяки цим технологіям оператори можуть гарантувати, що користувачі та їх дані залишаються в безпеці в умовах зростання використання мобільних технологій.

Динамічний розподіл ресурсів є фундаментальним аспектом управління мережевими ресурсами за допомогою віртуалізації мережевих функцій (NFV) як у мережах 4G, так і в 5G [9]. Цей підхід дозволяє збільшувати або зменшувати ресурси залежно від навантаження на мережу в реальному часі, забезпечуючи оптимальну продуктивність і ефективність. Оскільки вимоги до мережі коливаються через різну діяльність користувачів і вимоги додатків, NFV дозволяє швидко коригувати розподіл ресурсів. Наприклад, під час пікового навантаження додаткові функції віртуалізованої мережі (VNF) можуть бути розгорнуті для обробки збільшеного трафіку, тоді як у непікові періоди ресурси можна перерозподілити, щоб мінімізувати витрати. Ця можливість не тільки покращує роботу користувача завдяки покращенню якості обслуговування, але й підтримує загальні операційні цілі мережевих провайдерів шляхом оптимізації використання ресурсів.

Використання гіпервізорів є ще одним критичним елементом в управлінні ресурсами серед віртуалізованих мережевих функцій [10]. Гіпервізори полегшують розподіл обчислювальних ресурсів між декількома VNF, забезпечуючи ефективне керування обчислювальною потужністю, пам'яттю та сховищем. Використовуючи технологію гіпервізора, мережеві оператори можуть створити гнучке середовище, де ресурси динамічно розподіляються відповідно до конкретних потреб кожного VNF. Цей метод дає значні переваги, такі як: - Розширена масштабованість для задоволення різноманітних вимог. - Покращена відмовостійкість завдяки

резервуванню. - Спрощене розгортання нових служб без значних змін апаратного забезпечення. Отже, інтеграція гіпервізорів в архітектури NFV не тільки підтримує ефективність використання ресурсів, але й прискорює розгортання інноваційних послуг у мережах 4G і 5G.

Оптимізація енергоспоживання стає все більш важливою в контексті управління мережею, особливо в зв'язку з розширенням телекомунікаційної інфраструктури з появою 5G [2]. Завдяки віртуалізації мережевих функцій NFV може значно зменшити енергоспоживання мережевих операцій. Віртуалізація дозволяє запускати кілька VNF на одному фізичному сервері, тим самим зменшуючи кількість необхідних фізичних пристроїв і мінімізуючи споживання енергії. Це надзвичайно важливо, враховуючи зростаючі витрати на енергію та екологічні проблеми, пов'язані з мережевою інфраструктурою. Ключові переваги оптимізації енергоспоживання за допомогою NFV: - Зниження експлуатаційних витрат завдяки зменшеному споживанню енергії. - Зменшення викидів вуглецю сприяє зусиллям щодо сталого розвитку. - Покращена ефективність використання ресурсів, що збільшує термін служби обладнання. Ці переваги підкреслюють необхідність включення NFV в сучасну мережеву архітектуру для сприяння більш стійкому та ефективному телекомунікаційному ландшафту.

Взаємодія між SDN-контролером та NFV-оркестратором є критично важливою для динамічного управління трафіком у мобільних мережах. SDN (програмно-обумовлені мережі) дозволяє гнучко керувати мережевими ресурсами, у той час як NFV (віртуалізація мережевих функцій) дає можливість віртуалізувати мережеві елементи [8]. Ця інтеграція дозволяє швидко реагувати зміни у завантаженні, що забезпечує оптимальне використання ресурсів. Наприклад, SDN-контролер може автоматично перенаправляти трафік у зв'язку з поточним завантаженням, що зменшує затримки та забезпечує загальну продуктивність мережі [11]. Завдяки такій взаємодії оператори можуть ефективніше керувати ресурсами, знижуючи витрати та підвищуючи якість обслуговування.

Координація маршрутизації та розподілу функцій між VNF через SDN є ще одним аспектом інтеграції цих технологій у мобільних мережах. Використовуючи

SDN, оператори можуть централізовано контролювати маршрутизацію, що дозволяє досягти більшої ефективності в управлінні навантаженням [12]. Це дозволяє не лише зменшити затримки, але й оптимізувати використання мережевих ресурсів, останні функції можуть бути розподілені між віртуальними елементами мережі відповідно до поточних запитів. У результаті це зменшується завантаження на окремих компонентах мережі, що ввійшло в дію системи загальної надійності [13].

Спрощення впровадження нових послуг за допомогою інтеграції SDN та NFV є суттєвим фактором для розвитку мобільних мереж. Завдяки цій інтеграції оператори можуть швидше і легше запустити нові послуги, адже віртуалізація дозволяє швидко досягти та розгорнути мережеві функції [10]. Це особливо важливо в умовах швидко зміненого середовища, де попит на нові послуги зростає. Наприклад, оператори можуть миттєво активувати нові VNF для спеціальних служб, таких як IoT або послуги з високою пропускною здатністю, без необхідності фізичного розгортання нового обладнання [1]. Таким чином, інтеграція SDN і NFV не позбавляє гнучкість мережі, але відкриває нові можливості для інновацій у мобільних послугах.

Однією з ключових переваг використання NFV в мережах 4G та 5G є зниження витрат на фізичну інфраструктуру, що досягається за рахунок використання стандартного серверного обладнання [14]. Традиційні мережі традиційно вимагають спеціалізованого апаратного забезпечення для кожної мережевої функції, що може бути дорогим і важким для обслуговування. Проте NFV дозволяє віртуалізувати мережеві функції, що означає, що вони можуть працювати на загальному, стандартному серверному забезпеченні. Це лише зменшує капітальні витрати, але й підвищує ефективність використання ресурсів, що в остаточному підсумку призводить до зниження загальних витрат на експлуатацію мережі.

Прискорення впровадження нових сервісів і оновлення функцій є ще значною перевагою NFV в мобільних мережах [15]. Завдяки віртуалізації мережевих функцій оператори можуть швидше розгортати нові сервіси без необхідності в

складних апаратних змінах. Це дозволяє мобільним операторам бути більш гнучкими та адаптивними до змінених потреб ринку, що критично важливо в умовах швидкого розвитку технологій. Якщо оновлення функцій може бути здійснене програмним шляхом, це також зменшує ризики, пов'язані з ручним обслуговуванням апаратного забезпечення, і зменшує час простої мережі.

Гнучкість у розгортанні мережевих функцій є ще важливою перевагою NFV, особливо в контексті підтримки нових технологій, таких як IoT, URLLC та eMBB [14]. NFV надає можливість швидко адаптувати мережеву інфраструктуру для задоволення вимог різних типів трафіку та сервісів. Це означає, що оператори можуть ефективно керувати ресурсами, забезпечуючи оптимальну продуктивність для IoT-пристроїв, які постійно потребують низької затримки, або для eMBB-сервісів, що потребують високу пропускну здатність. Завдяки такій гнучкості, оператори можуть задовольняти вимоги до різних сегментів користувачів, які в свою чергу мають загальну ефективність і продуктивність мережі.

2.4. Переваги IPv6 у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та зокрема IP

Однією з найбільш значущих переваг IPv6 у мобільних мережах є його розширений адресний простір, який є важливим для підтримки мільярдів пристроїв IoT [1]. Оскільки Інтернет речей продовжує розвиватися, попит на IP-адреси різко зріс. На відміну від IPv4, який пропонує лише близько 4 мільярдів унікальних адрес, IPv6 забезпечує майже необмежену кількість адрес, враховуючи експоненціальне збільшення підключених пристроїв. Кожен пристрій, підключений до мережі, може отримати свою унікальну IP-адресу, що є вирішальним для ефективного зв'язку та обміну даними у все більш взаємопов'язаному світі [2]. Ця ємність не тільки сприяє безперебійному з'єднанню, але й підвищує ефективність мобільних мереж, забезпечуючи більш прямі та індивідуальні з'єднання між пристроями (рис. 2.4).

Окрім великого адресного простору, IPv6 запроваджує багатоадресну маршрутизацію, яка значно підвищує ефективність передачі даних [1]. Групова розсилка дозволяє надсилати один пакет даних до кількох адресатів одночасно, а не надсилати окремі пакети на кожен пристрій. Цей метод особливо корисний для таких додатків, як потокове відео, онлайн-ігри та зв'язок у реальному часі, де одні й ті самі дані часто запитуються багатьма користувачами одночасно. Використовуючи багатоадресну маршрутизацію, IPv6 зменшує загальне споживання пропускної здатності та мінімізує перевантаження мережі, що забезпечує швидше та надійніше обслуговування для кінцевих користувачів. Здатність ефективно передавати великі обсяги даних має вирішальне значення для продуктивності мереж 4G і 5G, які, як очікується, оброблятимуть величезні обсяги трафіку від безлічі пристроїв.



Рис. 2.4. Роль IPv6 у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та IP

Іншою важливою особливістю IPv6 є підтримка автоконфігурації адреси без збереження стану (SLAAC), яка спрощує процес налаштування мережі [1]. Через SLAAC пристрої в мережі можуть автоматично генерувати свої унікальні адреси

без необхідності ручного налаштування або централізованого сервера. Ця можливість спрощує розгортання нових пристроїв і покращує масштабованість мережі. Оскільки кожен пристрій ідентифікується на рівні MAC-адреси, процес автоматичного налаштування мінімізує людські помилки та скорочує час і ресурси, необхідні для керування мережею [3]. Крім того, легкість конфігурації, яку забезпечує SLAAC, особливо вигідна в мобільних середовищах, де пристрої часто підключаються та від'єднуються від мережі, гарантуючи, що користувачі відчувають мінімальні збої, а мережа залишається ефективною та оперативною.

Однією з ключових переваг IPv6 у мережах 4G і 5G є зменшення складності маршрутизації завдяки спрощеній структурі заголовка [3]. Заголовок IPv6 розроблено таким чином, щоб бути більш ефективним, ніж його попередник, IPv4, що забезпечує швидшу обробку та маршрутизацію пакетів через мережу [1]. Це спрощення призводить до менших вимог до обробки для маршрутизаторів, що дозволяє їм ефективніше обробляти великі обсяги трафіку даних. Як наслідок, загальна продуктивність мережі покращується, підтримуючи підвищені вимоги до даних сучасних програм, особливо в екосистемі Інтернету речей (IoT). Спрощений процес маршрутизації не тільки підвищує швидкість і ефективність, але також сприяє більш надійним з'єднанням, що є важливим для додатків, які вимагають передачі даних у реальному часі.

Іншою значною перевагою IPv6 є усунення трансляції мережевих адрес (NAT), що підвищує швидкість обробки трафіку [4] (табл. 2.4). NAT зазвичай використовувався в мережах IPv4, щоб впоратися з нестачею адреси, але він додає складності та затримки передавання даних. З IPv6 кожен пристрій може мати свою унікальну загальнодоступну IP-адресу, що дозволяє здійснювати прямий зв'язок без потреби в NAT [2]. Ця пряма адресація не тільки прискорює передачу даних, але й спрощує одноранговий зв'язок, покращуючи продуктивність таких програм, як потокове відео та онлайн-ігри. Отже, у міру переходу мобільних мереж на IPv6 користувачі можуть розраховувати на швидші та ефективніші з'єднання, покращуючи загальний досвід використання мобільних послуг.

І, нарешті, повна інтеграція IPv6 із мобільними протоколами, такими як GTP (протокол тунелювання GPRS) і NGAP (протокол додатків наступного покоління), додатково підвищує ефективність мереж 4G і 5G [1].

Таблиця 2.4.

Роль IPv6 у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та IP

Параметр	Роль IPv6	Переваги для IP-мереж
Розширений адресний простір	Забезпечення адресації для мільярдів IoT-пристроїв у 4G та 5G мережах.	Підтримка необмеженої адресації для IP-пристроїв.
Оптимізація маршрутизації	Спрощення маршрутизації через менш складні заголовки пакетів.	Покращення продуктивності IP-мереж завдяки оптимізації маршрутів.
Інтеграція IoT	Підтримка прямої комунікації IoT-пристроїв через 6LoWPAN.	Розширення функціональності IP для IoT, зокрема для CoAP-протоколу.
Забезпечення безпеки	Захист трафіку через вбудовані механізми шифрування (IPsec).	Підвищення довіри до IP-мереж завдяки безпечній передачі даних.
Підтримка мобільності	Забезпечення мобільності пристроїв за допомогою протоколу MIPv6.	Забезпечення безперервності з'єднань для мобільних пристроїв.
Виключення NAT	Підвищення швидкості передачі даних через виключення необхідності в NAT.	Зниження затримок і покращення QoS завдяки виключенню трансляції адрес.

Ці протоколи життєво важливі для керування сеансами даних і підтримки якості обслуговування в мобільних мережах. Сумісність IPv6 із цими протоколами дозволяє краще керувати ресурсами та обробкою даних, що має вирішальне

значення для високошвидкісних вимог мереж 5G. Крім того, здатність IPv6 підтримувати величезну кількість пристроїв гарантує, що в міру зростання кількості підключених пристроїв мережа може ефективно масштабуватися без шкоди для продуктивності [5]. Ця інтеграція не тільки підвищує пропускну здатність і швидкість мобільних мереж, але й підтримує широкий спектр послуг, на які користувачі звикли покладатися, від потокової передачі до додатків IoT.

IPv6 містить вбудовані механізми для шифрування та автентифікації, головним чином через протокол IPsec [1]. Ця функція має вирішальне значення для підвищення безпеки в сучасних мережах, особливо в умовах зростання попиту на надійну та безпечну передачу даних. IPsec дозволяє шифрувати пакети даних і надає послуги автентифікації, гарантуючи, що дані не тільки захищені під час передачі, але й що вони походять із перевіреного джерела [2]. Цей рівень безпеки необхідний у мережах 4G і 5G, де часто передається конфіденційна інформація. Впровадження IPsec може значно знизити ризик витоку даних, підвищуючи довіру користувачів до мобільних технологій і послуг.

Іншою значною перевагою безпеки IPv6 є його здатність захищати від IP-спуфінгу за допомогою використання унікальних адрес пристроїв [1]. На відміну від IPv4, де адресний простір обмежений і часто призводить до повторного використання адрес, IPv6 пропонує широкий адресний простір, який призначає унікальні IP-адреси кожному пристрою, підключеному до мережі [2]. Завдяки цій унікальності зловмисникам надзвичайно важко видавати себе за пристрої, тим самим зменшуючи ймовірність атак, які використовують дублювання адрес. Крім того, оскільки кожен пристрій має власну ідентифіковану адресу, мережеві адміністратори можуть більш ефективно контролювати та керувати діяльністю пристрою, що призводить до загального підвищення безпеки мережі.

Впровадження IPv6 також сприяє безпечній передачі даних між пристроями IoT через протокол 6LoWPAN [6]. Цей полегшений протокол обміну повідомленнями розроблено для пристроїв з низьким енергоспоживанням і обмеженими ресурсами, що робить його ідеальним для додатків IoT. Використовуючи IPv6, 6LoWPAN забезпечує ефективний зв'язок і гарантує, що

дані, що передаються між пристроями, є безпечними та надійними [1]. Поєднання великого адресного простору IPv6 і можливостей 6LoWPAN створює надійну структуру для екосистем Інтернету речей, що забезпечує безпечну взаємодію між пристроями, зберігаючи при цьому ефективність і швидкість, необхідні для додатків у реальному часі. Оскільки ландшафт IoT продовжує розвиватися, функції безпеки, властиві IPv6, відіграватимуть життєво важливу роль у захисті цих взаємопов'язаних мереж.

Однією з ключових переваг інтеграції IPv6 в мобільні мережі є використання протоколу CoAP (Constrained Application Protocol) для обміну даними між IoT-пристроями [1]. CoAP спеціально розроблений для обмежених середовищ, що дозволяє знизити накладні витрати при передачі даних, що є критичним місцем для пристроїв з низькою потужністю. протокол підтримує асинхронну передачу даних, що дозволяє пристроям взаємодіяти без постійного підключення до мережі. Завдяки можливості IPv6 кожен пристрій може отримати унікальну адресу, що спрощує процес комунікації та забезпечує більш ефективний обмін інформацією. У результаті інтеграція CoAP з IPv6 значно покращує обробку даних у мобільних мережах.

Оптимізація споживання енергії IoT-пристроїв за допомогою IPv6 є ще одним аспектом, який підвищує ефективність мобільних мереж [3]. Оскільки багато IoT-пристроїв функціонують на обмежених джерелах енергії, важливо зменшити енергетичні витрати під час передачі даних. IPv6 забезпечує автоматичну конфігурацію, що дозволяє скоротити час на підключення до мережі і, таким чином, зменшує споживання енергії. Крім того, завдяки підтримці багатоадресної адресації, IPv6 дозволяє одночасну передачу даних до кількох пристроїв, що також сприяє зменшенню витрат енергії. В результаті такі оптимізації сприяють продовженню терміну служби батарей IoT-пристроїв.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ IP ТЕХНОЛОГІЙ В 4G ТА 5G МЕРЕЖІ

3.1. Інтеграція пристроїв Інтернету речей (IoT) у мобільні мережі на основі IP-протоколів

Інтеграція IP-протоколів є фундаментальною для створення мереж IoT на основі технологій LTE (Long-Term Evolution) і NR (New Radio) у мобільних мережах як 4G, так і 5G [1]. Ці протоколи забезпечують безперебійний зв'язок між взаємопов'язаними пристроями, забезпечуючи ефективну передачу даних і підключення. Здатність IP-протоколів підтримувати широкий спектр пристроїв із різними вимогами є важливою для масштабованості додатків IoT [2]. Крім того, гнучкість мереж на основі IP дозволяє включати розширені функціональні можливості, забезпечуючи ефективне задоволення зростаючих вимог програм IoT. Ця архітектура не тільки покращує якість обслуговування, але й прокладає шлях для інноваційних послуг, які використовують можливості пристроїв IoT у мобільних мережах.

Вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT) став важливою технологією для забезпечення низькошвидкісних з'єднань у мережах 4G і 5G [3]. Ця технологія спеціально розроблена для задоволення потреб пристроїв IoT, які потребують мінімальної пропускної здатності, але широкого покриття. NB-IoT працює у вузькосмуговому спектрі, що забезпечує низьке енергоспоживання та тривалий термін служби батареї підключених пристроїв [3]. Прийняття NB-IoT підтримує широкий спектр програм, від інтелектуального вимірювання до моніторингу навколишнього середовища, що робить його ідеальним вибором для сценаріїв з низькою швидкістю передачі даних. Використовуючи цю технологію, мобільні оператори можуть ефективно керувати мережевими ресурсами, одночасно розширюючи свої пропозиції послуг IoT.

Інтеграція глобальних мереж низької потужності (LPWAN) за допомогою технологій на основі IP має вирішальне значення для підвищення охоплення та ефективності мереж IoT [4].

Технології LPWAN спеціально розроблені для забезпечення з'єднання на великій відстані з мінімальним енергоспоживанням, що робить їх придатними для різноманітних додатків IoT, які потребують постійного з'єднання на великих територіях [4]. Використовуючи IP-протоколи, ці мережі можуть легко з'єднуватися з існуючою інфраструктурою, забезпечуючи більш спрощений зв'язок і обмін даними. Ця інтеграція не тільки розширює можливості систем Інтернету речей, але й підтримує розгортання рішень для розумних міст, сільськогосподарського моніторингу та різноманітних промислових застосувань. Як наслідок, синергія між LPWAN та технологіями на основі IP сприяє створенню більш надійної та універсальної екосистеми IoT у мобільних мережах.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) став життєво важливим протоколом для передачі даних у реальному часі в програмах IoT [5]. Розроблений IBM у 1999 році MQTT відомий своєю легкою конструкцією та ефективністю, що робить його особливо придатним для пристроїв з обмеженими можливостями обробки та обмеженнями пропускної здатності. Його архітектура публікації/підписки забезпечує масштабовану та гнучку модель зв'язку, що дозволяє численним пристроям надсилати та отримувати повідомлення з мінімальними витратами. Це особливо важливо в контексті мереж 4G і 5G, де багато пристроїв IoT можуть одночасно передавати дані. Використовуючи MQTT, системи IoT можуть досягти зв'язку з низькою затримкою та гарантувати оперативну доставку критичної інформації, що важливо для таких додатків, як пристрої розумного дому та промислова автоматизація.

CoAP (Constrained Application Protocol) є ще одним важливим IP-протоколом, розробленим для середовищ IoT, особливо в обмежених налаштуваннях [5]. На відміну від традиційних протоколів, таких як HTTP, CoAP розроблений спеціально для пристроїв з обмеженими ресурсами, що робить його ідеальним вибором для додатків із низьким енергоспоживанням і низькою пропускною здатністю, які зазвичай зустрічаються в IoT. CoAP працює на основі протоколу дейтаграм користувача (UDP), що зменшує накладні витрати та підвищує ефективність зв'язку. Така легкість дозволяє пристроям у мережі 4G або 5G безперебійно

обмінюватися даними, полегшуючи такі сценарії, як віддалений моніторинг і керування датчиками в розумних містах або сільськогосподарських програмах. Здатність протоколу ефективно функціонувати в обмежених середовищах підкреслює його важливість у мінливому ландшафті IoT.

Таблиця 3.1.

Переваги IP-протоколів в інтеграції IoT у 4G та 5G мережі

Параметр	Переваги
Масштабованість	IPv6 забезпечує достатній адресний простір для підключення мільярдів IoT-пристроїв.
Підтримка різних типів трафіку	IP адаптований до низькошвидкісного трафіку (NB-IoT) та високошвидкісного трафіку (інтелектуальні системи).
Ефективність передачі даних	Протоколи, такі як MQTT і CoAP, мінімізують затримки та енергоспоживання.
Інтеграція з хмарними обчисленнями	IP забезпечує прямий доступ до хмарних платформ та знижує затримки через MEC.
Безпека та надійність	Вбудований IPsec забезпечує шифрування даних та захист від атак.
Гнучкість у розгортанні	IP дозволяє легко додавати нові IoT-пристрої без значних змін інфраструктури.
Підтримка мобільності	Mobile IPv6 дозволяє зберігати з'єднання під час переміщення пристроїв.
Зниження витрат на інфраструктуру	Уніфікація IP знижує витрати на розгортання та управління мережею.

IPv6 і 6LoWPAN відіграють вирішальну роль в IP-адресації пристроїв IoT у розгалужених мережах [6]. IPv6 з його величезним адресним простором дозволяє підключити до Інтернету безпрецедентну кількість пристроїв, враховуючи експоненційне зростання пристроїв IoT. 6LoWPAN, що означає IPv6 через

малопотужні бездротові персональні мережі, є механізмом стиснення, який дозволяє пакетам малого розміру ефективно проходити через малопотужні мережі. Ця комбінація гарантує, що навіть пристрої з обмеженими ресурсами зможуть підключитися до Інтернету без втрати продуктивності. У результаті IPv6 і 6LoWPAN стають основоположними технологіями для впровадження широкомасштабного розгортання IoT у мобільних мережах, таких як 4G і 5G, сприяючи безперебійному зв'язку та сумісності між різними пристроями.

Ефективне управління трафіком IoT за допомогою встановлення пріоритетів у IP-мережах має важливе значення для забезпечення якості обслуговування (QoS) у мобільних середовищах [7]. Оскільки кількість підключених пристроїв продовжує зростати, стає все більш важливим ефективно розподіляти мережеві ресурси, щоб задовольнити різноманітні вимоги різних програм. Цю пріоритезацію можна досягти за допомогою таких методів, як формування трафіку та політики якості обслуговування (QoS), які допомагають гарантувати, що критичні додатки IoT отримують пропускну здатність, необхідну для оптимальної продуктивності. Наприклад, програмам, які вимагають передачі даних у режимі реального часу, таким як автономні транспортні засоби або віддалені системи моніторингу стану здоров'я, можна надати вищий пріоритет над менш критичними службами. Впроваджуючи такі заходи, мобільні мережі можуть зменшити затримку та покращити загальну взаємодію з користувачем, таким чином сприяючи бездоганній інтеграції пристроїв IoT у мережі 4G та 5G [2].

Забезпечення надійної передачі даних для критично важливих додатків Інтернету речей, зокрема наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC), має вирішальне значення в контексті сучасних мобільних мереж [8]. URLLC розроблено відповідно до суворих вимог програм, де затримки та втрата даних можуть мати значні наслідки, наприклад у промисловій автоматизації чи системах реагування на надзвичайні ситуації. Для підтримки цього необхідно використовувати передові мережеві технології, включаючи резервні шляхи для передачі даних і надійні протоколи виправлення помилок. Крім того, інтеграція периферійних обчислень може підвищити надійність шляхом обробки даних

ближче до джерела, таким чином мінімізуючи затримку та збільшуючи час відповіді. Зосереджуючись на цих аспектах, мобільні мережі можуть забезпечити надійність, необхідну для критично важливих додатків IoT, забезпечуючи точну та оперативну передачу даних [9].

Підтримка масштабованості для великої кількості підключених пристроїв є ще одним важливим компонентом інтеграції IoT у мобільні мережі [10]. Оскільки прогнози свідчать про те, що кількість пристроїв, підключених до Інтернету, досягне 28 мільярдів, причому значна частина буде призначена для додатків IoT, мережева інфраструктура повинна бути розроблена таким чином, щоб відповідати цьому зростанню. Такі технології, як IPv6 і 6LoWPAN, відіграють важливу роль у вирішенні проблем масштабованості, надаючи величезний адресний простір для пристроїв і забезпечуючи ефективний зв'язок у обмежених середовищах [11]. Крім того, мобільні мережі повинні розвиватися, щоб включати масовий зв'язок машинного типу (mMTC), який дозволяє одночасне підключення багатьох пристроїв без шкоди для продуктивності. Віддаючи пріоритет масштабованості в проектуванні мережі, оператори мобільного зв'язку можуть гарантувати, що їх інфраструктура залишається надійною та здатною підтримувати зростаючі вимоги до систем IoT [12].

Інтеграція пристроїв IoT в платформи хмарних обчислень в першу чергу полегшується завдяки використанню Інтернет-протоколу (IP) для передачі даних [11]. Завдяки використанню IP пристрої IoT можуть безперебійно спілкуватися з хмарними службами, забезпечуючи ефективну обробку та зберігання даних. Ця інтеграція необхідна для різноманітних додатків, починаючи від автоматизації розумного дому та закінчуючи великомасштабними промисловими операціями. Гнучкість зв'язку на основі IP дозволяє з'єднувати різноманітні пристрої, гарантуючи, що кожен вузол IoT може надавати власні послуги, залишаючись частиною єдиної мережі [13]. У результаті здатність ефективно передавати дані на хмарні платформи покращує загальну продуктивність і функціональність додатків IoT.

Multi-access Edge Computing (MEC) відіграє вирішальну роль у зменшенні затримки для додатків IoT, особливо тих, які потребують обробки в реальному часі [14]. Наближаючи обробку даних до краю мережі, MEC мінімізує відстань, яку мають пройти дані, таким чином зменшуючи час, необхідний для надсилання та отримання інформації. Це особливо важливо для додатків, які вимагають негайної реакції, таких як автономні транспортні засоби або віддалений моніторинг охорони здоров'я. Впровадження MEC у мережах 5G підтримує потребу в продуктивності з низькою затримкою, забезпечуючи більш чутливу та ефективну екосистему IoT [2]. Отже, поєднання IoT і технології MEC сприяє створенню середовища, де програми можуть працювати в режимі реального часу, підвищуючи взаємодію з користувачем і надійність.

Інтеграція IoT у рішення Smart City значною мірою залежить від архітектури на основі IP, що полегшує спілкування та обмін даними між безліччю підключених пристроїв [2]. Ця архітектура дозволяє керувати різними службами, включаючи моніторинг дорожнього руху, управління відходами та споживання енергії, які є важливими компонентами розумного міського середовища. Використовуючи IP-протоколи, міста можуть досягти кращої сумісності між пристроями, дозволяючи їм бездоганно працювати разом. Крім того, можливість аналізувати дані з численних пристроїв IoT покращує процеси прийняття рішень, сприяючи більш ефективному управлінню містом і покращенню якості життя мешканців. Оскільки ініціативи Smart City продовжують розширюватися, інтеграція IoT на основі IP буде життєво важливою для досягнення сталого розвитку міст.

У магістерській роботі запропоновано архітектуру інтеграції пристроїв Інтернету речей (IoT) у мобільні 5G-мережі на основі IP-протоколів, яка забезпечує гнучку і масштабовану взаємодію між IoT-пристроями та 5G-інфраструктурою. Використання IP-протоколів є ключовим елементом для забезпечення сумісності, ефективності передачі даних та підтримки гетерогенних мережевих середовищ.

На рис. 3.1 представлено архітектуру 5G IoT-інфраструктури, яка складається з чотирьох основних сегментів:

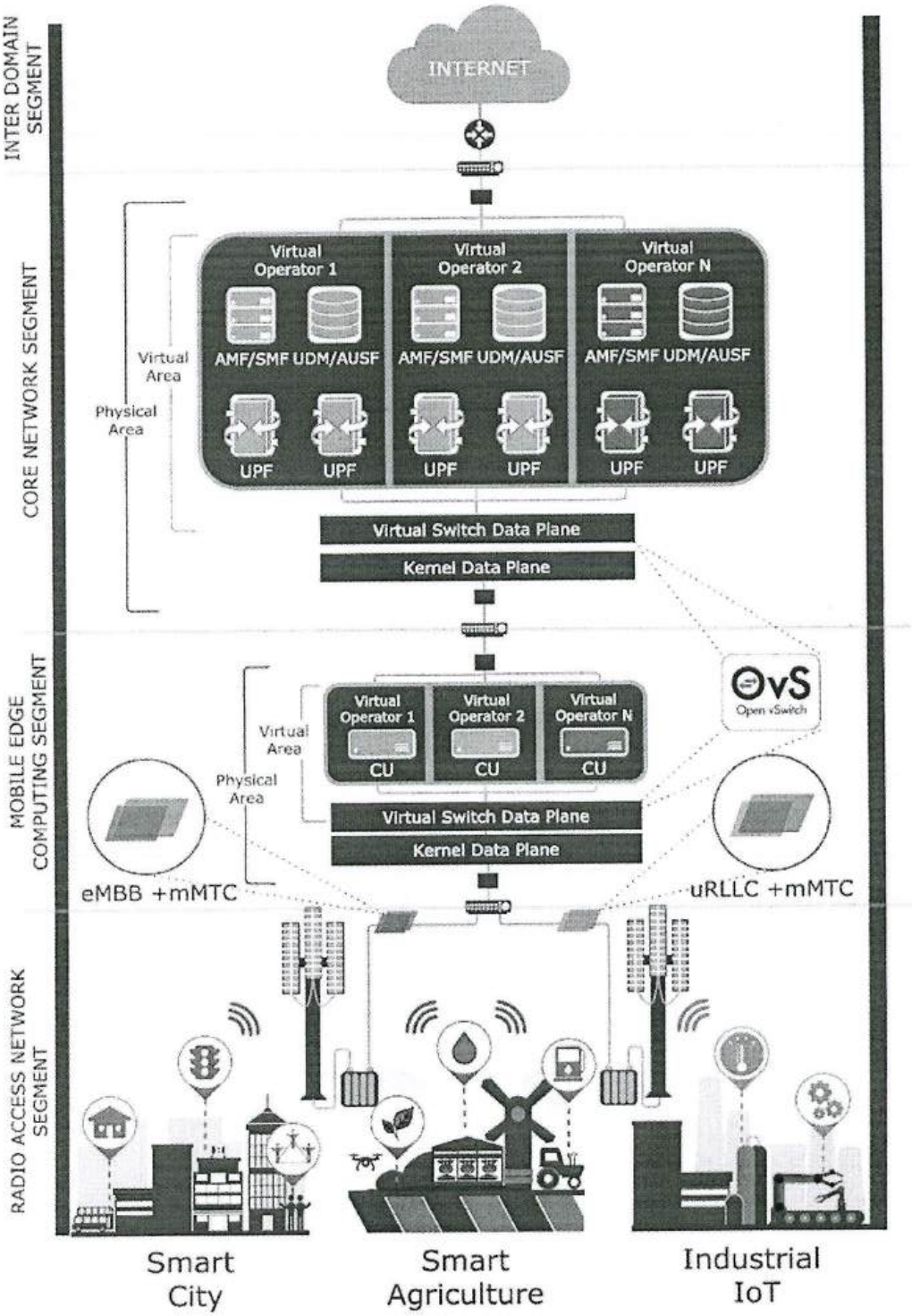


Рис. 3.1. Архітектура запропонованої 5G IoT-інфраструктури

1. Radio Access Network (RAN)

– Відповідає за початкову передачу даних від IoT-пристроїв до мережі 5G.

– Використання IP-протоколів у цьому сегменті забезпечує ефективну маршрутизацію та підтримку мобільності IoT-пристроїв.

2. Mobile/Multi-access Edge Computing (MEC)

– Локалізує обчислювальні ресурси поблизу користувачів, забезпечуючи зниження затримок.

– IP-протоколи використовуються для зв'язку між IoT-пристроями та обчислювальними вузлами MEC через IP-адресацію і тунелювання (наприклад, через VXLAN).

3. Ядро 5G-мережі (5G Core Network)

– Використовує IP-протоколи для маршрутизації трафіку між RAN, MEC і міждоменними сегментами.

– Протоколи, такі як GTP (GPRS Tunneling Protocol), забезпечують інкапсуляцію даних для мобільності користувачів, тоді як VXLAN гарантує ізоляцію трафіку для різних мережевих зрізів.

4. Міждоменний сегмент (Inter-domain Segment)

– Забезпечує інтеграцію з глобальними мережами та хмарними сервісами на основі IP-протоколів.

– IP-протоколи підтримують стандартизовану передачу даних між внутрішніми компонентами мережі та зовнішніми доменами.

Роль IP-протоколів в архітектурі

- Уніфікована адресація: використання IPv4 та IPv6 для ідентифікації IoT-пристроїв та забезпечення їх доступності в глобальній мережі.

- Інкапсуляція трафіку: тунельні протоколи, такі як VXLAN і GTP, застосовуються для передачі даних через різні сегменти мережі з мінімальними затримками та високим рівнем безпеки.

- Гнучка маршрутизація: IP-протоколи забезпечують ефективне управління маршрутом даних навіть у сценаріях з високим навантаженням або мобільністю пристроїв.

- QoS на основі IP: механізми пріоритизації, такі як DiffServ, дозволяють динамічно адаптувати ресурси мережі відповідно до вимог різних вертикальних сервісів.

Таким чином, запропонована архітектура поєднує всі переваги IP-протоколів і забезпечує ефективну інтеграцію IoT-пристроїв у мобільні 5G-мережі.

Основні характеристики архітектури

- Мультиорендність: дозволяє різним операторам і вертикальним сервісам спільно використовувати інфраструктуру з дотриманням угод про рівень обслуговування (SLA).
- Гнучке управління зрізами мережі (Network Slicing): кожен вертикальний сервіс має свій логічний зріз із відповідними QoS-параметрами.
- Масштабованість: підтримка мільйонів IoT-пристроїв із різними профілями трафіку.
- Безпека та ізоляція: використання тунельних протоколів (VXLAN, GTP) для забезпечення ізоляції даних і безперервності зв'язку.

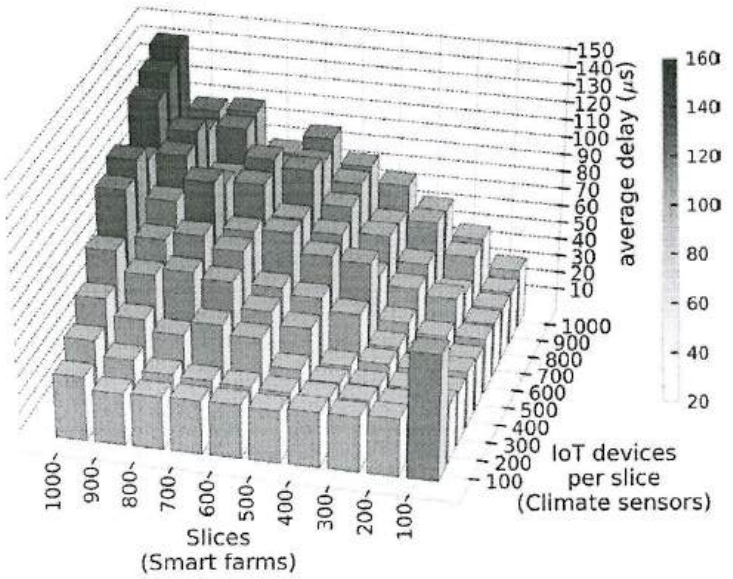
Ця архітектура дозволяє адаптивно керувати різними IoT-застосунками, забезпечуючи їх ефективне функціонування навіть за умов високого навантаження на мережу.

У магістерській роботі на основі запропонованої архітектури проведено дослідження ефективності її роботи. Рис. 3.2 ілюструє результати масштабованості системи при обробці однорідного трафіку 5G IoT. Графіки показують середню затримку передачі пакета (у мікросекундах) для кожного сценарію, при цьому оцінюється кількість вертикалей і кількість IoT-пристроїв. Усі сценарії демонструють виконання вимог щодо затримки, навіть за найбільш стресових умов із великою кількістю пристроїв.

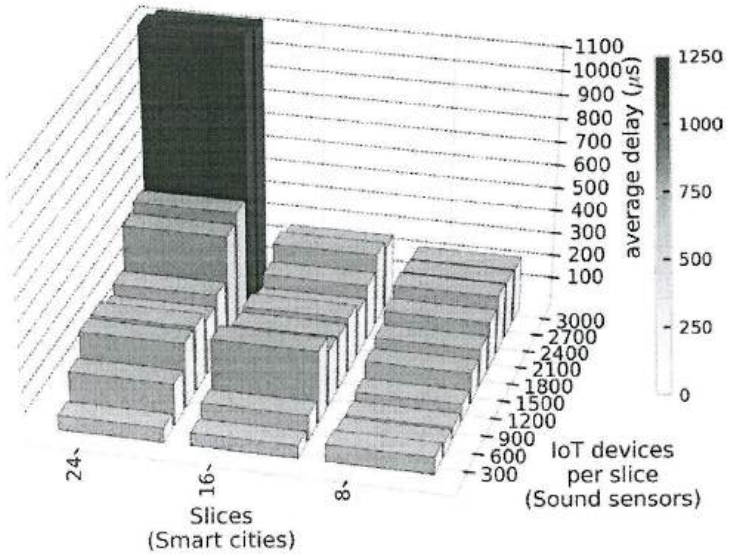
Сценарій 1: Моніторинг довкілля в Smart Agriculture (mMTC)

Цей сценарій передбачає моніторинг кліматичних параметрів на сільськогосподарських об'єктах за допомогою сенсорів IoT. Трафік характеризується малими пакетами, які надсилаються з низькою частотою.

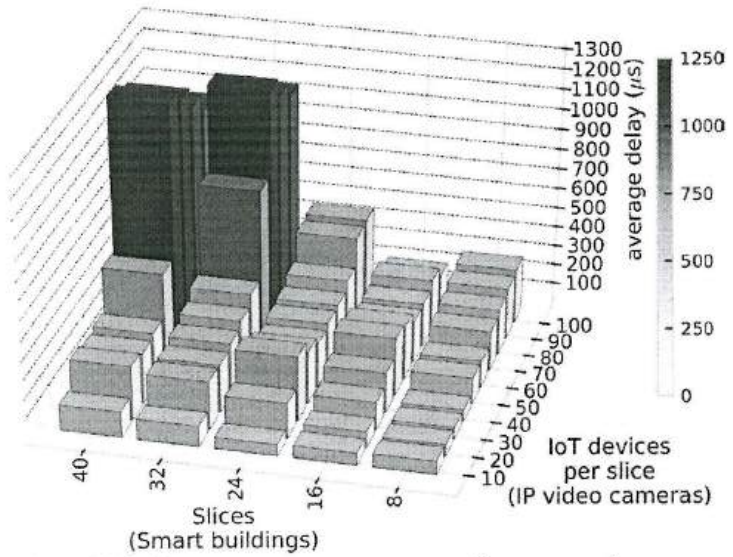
- Максимальна затримка: 143 мкс для сценарію з 1000 фермерських господарств, кожне з яких має 1000 сенсорів.
- Результати: Система здатна обробляти трафік від 1 мільйона IoT-пристроїв з нульовою втратою пакетів та мінімальною затримкою.



Сценарій 1. Моніторинг довкілля в Smart Agriculture (mMTC)



Сценарій 2. Аналіз звуків у Smart City (mMTC/eMBB)



Сценарій 3. Відеоспостереження в Smart Building (eMBB)

Рис. 3.2. Результати масштабованості системи при обробці однорідного трафіку 5G IoT

Сценарій 2: Аналіз звуків у Smart City (mMTC/eMBB)

Застосовується для моніторингу звукових патернів у міських умовах (наприклад, виявлення шумів, що свідчать про надзвичайні ситуації).

- Максимальна затримка: близько 1 мс для 24 міст, кожне з яких обладнане 3000 звуковими сенсорами.
- Результати: Затримка значно нижча за порогове значення (100 мс), трафік обробляється ефективно.

Сценарій 3: Відеоспостереження в Smart Building (eMBB)

Забезпечує відеоаналітику для керування безпекою, енергоефективністю та іншими процесами в розумних будівлях.

- Максимальна затримка: близько 1 мс для 40 будівель із 100 камерами в кожній.
- Результати: Система обробляє великі обсяги відеотрафіку з високою пропускною здатністю без втрат.

Графіки побудовані за допомогою Python (з бібліотеками Matplotlib, Seaborn).

Усі сценарії демонструють, що запропонована архітектура здатна забезпечувати необхідні показники QoS навіть у складних сценаріях.

3.2. Реалізація передачі голосових даних через IP-мережі за допомогою VoLTE та VoNR

IMS (IP Multimedia Subsystem) є базовою архітектурою для технологій VoLTE і VoNR у мобільних мережах [31] (рис. 3.2.). Ця система має вирішальне значення для ефективного управління та доставки мультимедійних послуг, включаючи голос, відео та обмін повідомленнями через IP-мережі.

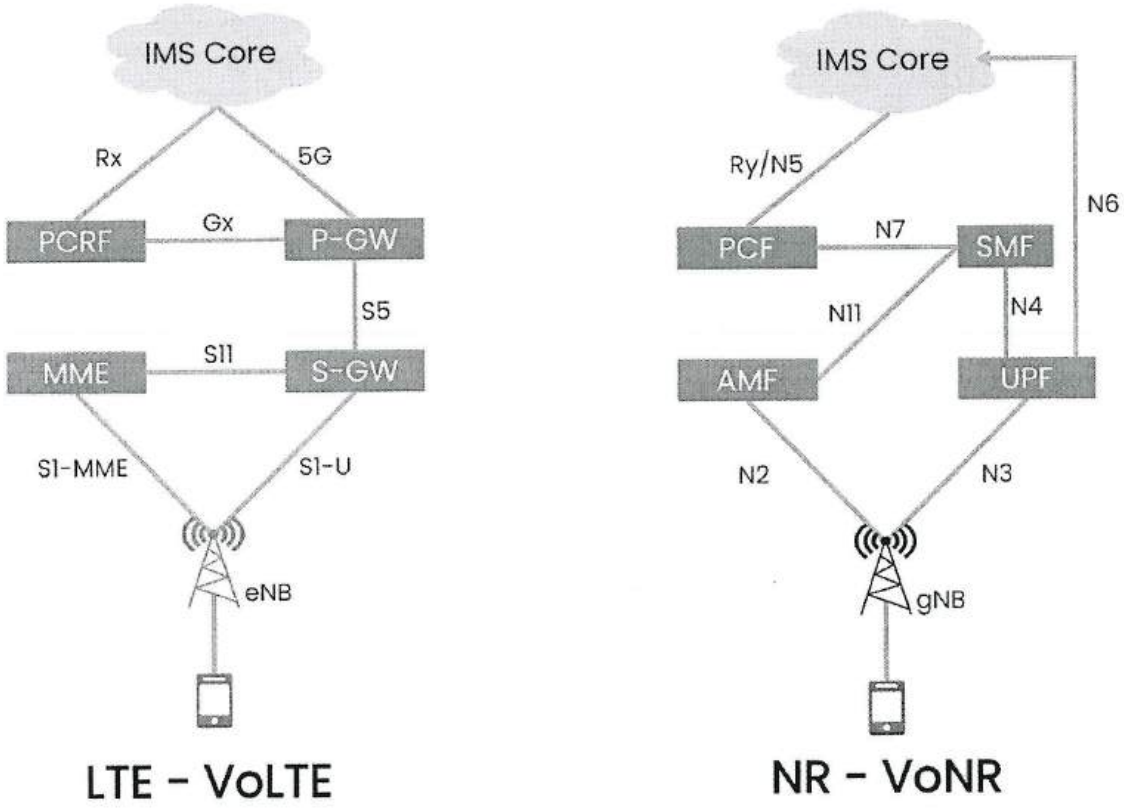


Рис. 3.2. Архітектура Voice over LTE та Voice over New Radio

Побудований на принципах протоколу IP, IMS забезпечує бездоганну інтеграцію різноманітних комунікаційних послуг у мережах різних поколінь, забезпечуючи ефективну передачу голосового трафіку без шкоди для якості [32]. Прийняття IMS у мережах 4G проклало шлях до впровадження VoLTE, що дозволяє голосовим викликам використовувати інфраструктуру LTE замість того, щоб покладатися виключно на традиційні мережі з комутацією каналів. Цей

перехід не тільки підвищує якість голосового зв'язку, але й оптимізує використання доступної смуги пропускання в мережі (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Особливості VoLTE та VoNR

Параметр	VoLTE (4G)	VoNR (5G)
Якість голосу	Висока якість завдяки AMR-WB та EVS.	Покращена якість завдяки сучасним кодекам.
Архітектура мережі	Побудована на IMS у EPC (Evolved Packet Core).	Побудована на SBA (Service-Based Architecture) у 5G Core.
Затримка	Мінімальна затримка завдяки QoS-класам.	Затримка ще менша завдяки URLLC.
Сумісність із передачею даних	Дозволяє одночасну передачу голосу та даних.	Підтримує одночасну передачу голосу, відео та даних.
Мережеві зрізи (Network Slicing)	Не підтримується.	Підтримується для стабільного голосового трафіку.
Інтеграція з URLLC	Не підтримується.	Підтримується для критичних застосувань.
Сумісність із попередніми мережами	Працює в мережах LTE та з CSFB для 2G/3G.	Сумісність лише з мережами 5G.

Протокол ініціації сеансу (SIP) відіграє життєво важливу роль у встановленні голосових дзвінків через IP-мережі, зокрема в реалізаціях VoLTE та VoNR [3]. SIP відповідає за ініціювання, підтримку та завершення сеансів зв'язку, що робить його важливим для успішної передачі голосових даних. У VoLTE SIP працює в мережі LTE за допомогою стека протоколів RTP/UDP/IP, що полегшує передачу голосових

пакетів із мінімальною затримкою [31]. Цей протокол забезпечує ефективність процесів встановлення та розірвання виклику, дозволяючи користувачам насолоджуватися високоякісним голосовим зв'язком. Крім того, інтеграція SIP з іншими протоколами, такими як протокол опису сеансу (SDP), розширює можливості VoLTE, забезпечуючи узгодження медіа-параметрів і забезпечуючи сумісність між різними пристроями та мережами.

Інтеграція EPC (Evolved Packet Core) для 4G і Service-Based Architecture (SBA) для 5G має вирішальне значення для ефективної передачі голосових даних у сучасних мобільних мережах [33]. EPC служить основою для послуг VoLTE, надаючи необхідну інфраструктуру для обробки голосового трафіку разом із службами передачі даних. Оскільки мережі переходять на 5G, впровадження SBA сприяє створенню більш гнучкої та масштабованої архітектури, яка є важливою для підтримки зростаючого попиту на голосові та відеопослуги через технологію VoNR (Голос через нове радіо) [33]. Ця інтеграція не тільки покращує якість голосового зв'язку, але й покращує загальну ефективність мережі шляхом оптимізації розподілу ресурсів і керування ними. Таким чином, співпраця між EPC і SBA являє собою значний прогрес у реалізації голосових послуг, гарантуючи, що користувачі отримають вигоду від чудової якості звуку та скорочення часу встановлення виклику.

Однією з основних переваг VoLTE та VoNR є висока якість голосу, яка досягає використання сучасних кодеків, таких як AMR-WB та EVS [31]. Ці кодеки забезпечують кращу чіткість звуку, що робить розмови більш комфортними та зрозумілими. Наприклад, кодек AMR-WB (Adaptive Multi-Rate Wideband) дозволяє передавати звук на широкій частоті діапазону, що значно підвищує якість голосу в порівнянні з традиційними кодеками, використовуваними в мережах 2G/3G [34]. З впровадженням VoLTE користувачі можуть насолоджуватися розмовами з якістю, яка раніше була недоступною, що є загальним задоволенням від зв'язку.

Ще важливою перевагою VoLTE та VoNR є низька підтримка в передачі голосових даних, що є суттєвим фактором для якісних комунікацій [5]. На відміну від технології CSFB (Circuit Switched Fallback), яка потребує переходу з пакетної

мережі на комутовану для здійснення дзвінка, VoLTE та VoNR можуть безкоштовно передавати голос через мережі LTE або 5G, зменшуючи затримки до мілісекунд [31]. Це означає, що користувачі можуть насолоджуватися більш природними та швидкими розмовами, що є масштабом аспекту для бізнес-комунікацій та особистих дзвінків.

Порівняння параметри VoLTE та VoNR: дозволяє наочно побачити переваги кожної технології за різними критеріями, такими як якість голосу, затримка, стабільність з'єднання тощо (рис. 3.4.).

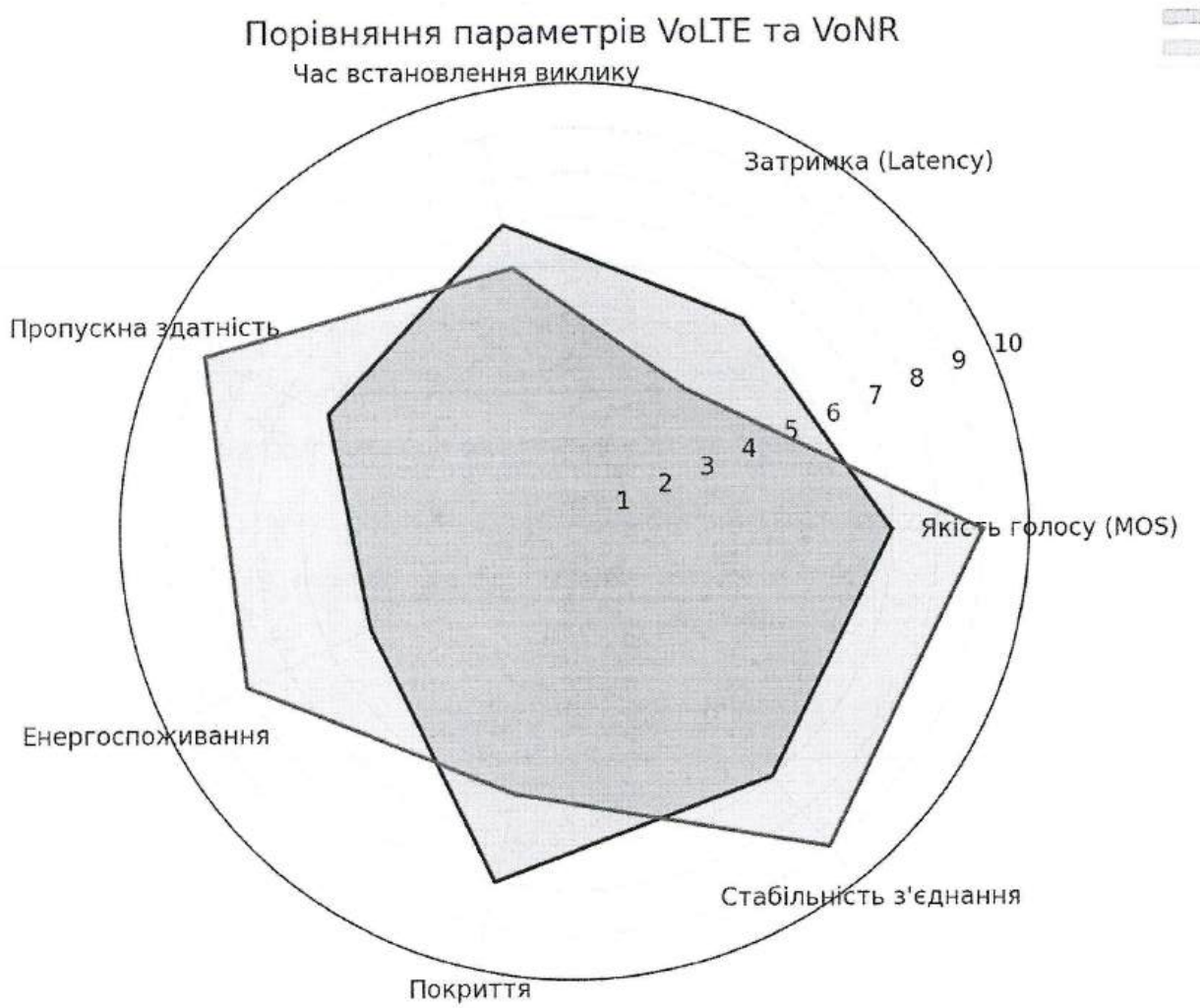


Рис. 3.4. Порівняння ефективності VoLTE та VoNR

Підтримка паралельної передачі голосу та даних через IP є ще однією ключовою перевагою VoLTE та VoNR [2]. Завдяки можливості пакетної передачі

даних користувачі можуть одночасно використовувати голосові дзвінки, а також використовувати інтернет-сервіси, такі як перегляд веб-сторінок або відео-дзвінків [33]. Це не тільки ефективність використання мобільної мережі, але й забезпечує більш зручний та інтерактивний досвід для користувачів. Таким чином, переходячи на технології VoLTE та VoNR, оператори можуть запропонувати своїм клієнтам нові можливості для зв'язку та підвищити загальну продуктивність мережі.

Для забезпечення стабільної якості голосових дзвінків у технологіях VoLTE та VoNR використано різні класи якості обслуговування (QoS) [31]. Ці класи не дозволяють оператору ідентифікувати та відрізняти трафік голосових дзвінків від інших типів даних, що передаються через мережу. Завдяки цьому, голосовий трафік отримує перевагу у випадку перевантаження мережі, що веде до зменшення затримок і покращення загальної якості зв'язку. Наприклад, клас QoS, який призначений для голосу, може забезпечити додаткові параметри передачі даних, такі як мінімальна підтримка та випуск втрат пакетів, що є критично важким для успішного ведення розмови.

Пріоритизація трафіку голосових дзвінків є ключовим аспектом для забезпечення якісного зв'язку через IP-мережі [33]. У технології VoLTE, наприклад, голосовий трафік обробляється окремо від даних, що дозволяє зменшити затримки та покращити якість звуку. Завдяки впровадженню механізмів пріоритезації, мережа може швидко реагувати на зміни трафіку, гарантуючи, що голосові дзвінки зберігають підтримку ресурсів навіть у момент високого навантаження. Підхід дозволяє також зменшити ймовірність виникнення затримок, які можуть негативно вплинути на досвід користувача.

Забезпечення надійного голосового зв'язку, навіть за умови перевантаження мережі, є ще одним аспектом технологій VoLTE та VoNR [32]. Завдяки інтеграції новітніх протоколів та механізмів управління трафіком ці технології можуть підтримувати стабільний зв'язок навіть при високих навантаженнях. Наприклад, використання алгоритмів адаптивного управління трафіком дозволяє динамічно регулювати пропускну здатність, забезпечуючи безперервність та якість зв'язку.

Це особливо важливо в умовах сучасних вимог до зв'язку, коли користувачі очікують високу якість звуку під час розмов, незалежно від стану мережі.

Шифрування трафіку голосових даних є критичним елементом забезпечення безпеки у VoLTE та VoNR [32]. Використання протоколу IPsec для шифрування забезпечує високий рівень захисту, оскільки він дозволяє захистити дані на рівнях мережі, що ускладнює їх перехоплення та модифікацію. IPsec створює захищені тунелі для передачі голосових дзвінків, що дозволяє забезпечити конфіденційність та цільність інформації, переданої через IP-мережі. Крім того, використання шифрування війни у запобіганні несанкціонованому доступу до голосових даних є особливою проблемою в сучасних умовах розвитку кіберзагрози.

Аутентифікація абонентів через IMS (IP Multimedia Subsystem) є ще одним аспектом безпеки голосових дзвінків у VoLTE та VoNR [34]. процес забезпечення перевірки особистості користувачів, що запобігає несанкціонованому доступу до мережі та зловживанням. Аутентифікація за допомогою IMS використовує різноманітні методи, такі як SIM-картки та дані облікових записів, щоб забезпечити, що лише авторизовані користувачі можуть використовувати голосові виклики. Це загальний рівень безпеки та надійності зв'язку, забезпечуючи довіру користувачів до системи.

Захист від підробки та перехоплення даних у VoLTE та VoNR реалізується через використання SIP-TLS (Transport Layer Security) для сигналізації голосових дзвінків [35]. SIP-TLS забезпечує шифрування сигналізаційних повідомлень, що дозволяє захистити інформацію про дзвінки від підслуховування та маніпуляцій. протокол створює безпечні з'єднання між абонентами та цими серверами, що забезпечує надійність комунікаційних послуг. Завдяки SIP-TLS користувачі можуть бути впевнені у тому, що їхні дзвінки не підлягають перехопленню, що є критичним аспектом у сфері захисту приватності та безпеки голосових комунікацій.

ВИСНОВКИ

У першому розділі розглянуто роль IP-технологій у мобільних мережах 4G, з акцентом на еволюцію архітектури та її вплив на продуктивність. Продемонстровано поступовий розвиток мобільних мереж від аналогових 1G до повністю IP-орієнтованих 4G, що забезпечило значне підвищення швидкості передачі даних і якості обслуговування (QoS). Деталізовано ключові параметри для кожного покоління, зокрема затримку та максимальну швидкість передачі даних, що ілюструє переваги впровадження IP-архітектури. Інтеграція протоколів IPv4 та IPv6 у 4G-мережах сприяла масштабованості, дозволивши підтримувати дедалі більшу кількість IoT-пристроїв і впроваджувати нові сервіси, такі як VoLTE і потокове відео. Таким чином, архітектура 4G заклала основу для подальшого розвитку мереж 5G, забезпечивши високошвидкісний доступ до Інтернету та мінімальні затримки.

Досліджено вплив IP-технологій у мобільних мережах 5G, які використовують Service-Based Architecture (SBA). Показано модульну архітектуру SBA, де мережеві функції взаємодіють через IP-протоколи, такі як HTTP/2 і REST API, що забезпечує ефективну роботу мережевих сервісів. Описано функції ключових компонентів SBA, таких як AMF, SMF і UPF, підкреслюючи їх роль у маршрутизації та управлінні трафіком через IP. Впровадження IPv6 дозволило значно збільшити адресний простір для підключення IoT-пристроїв і реалізувати мережеві зрізи (slicing), які забезпечують диференційовані рівні QoS для різних сервісів. Ці досягнення роблять мережі 5G критично важливими для підтримки додатків з низькою затримкою, таких як автономні системи та телемедицина.

У другому розділі запропоновано основні методи інтеграції IP-технологій у мобільні мережі 4G і 5G. Показано еволюцію архітектури від EPC (Evolved Packet Core) до SBA (Service-Based Architecture), де всі мережеві функції базуються на IP-протоколах. Виявлено, що впровадження SDN та NFV забезпечує динамічну маршрутизацію, оптимізацію ресурсів і гнучкість, необхідну для інтеграції сервісів IoT, AR/VR та інших. Продемонстровано ключові технології, такі як IPv6, які

забезпечують масштабованість і зниження витрат, сприяючи підвищенню ефективності сучасних мобільних мереж.

Розглянуто переваги використання SDN для підвищення ефективності мобільних мереж 4G і 5G. Показно, як SDN забезпечує централізоване управління трафіком, підтримку QoS та динамічну маршрутизацію. Деталізовано переваги SDN, такі як можливість впровадження мережевих зрізів (network slicing) для різних сценаріїв використання, що дозволяє адаптувати мережу до специфічних вимог IoT або URLLC.

Висвітлено роль NFV у віртуалізації мережевих функцій для підвищення ефективності 4G і 5G. Продемонстровано архітектуру NFV, яка дозволяє швидко масштабувати ресурси та оптимізувати їх використання. Підкреслено ключові переваги NFV, включаючи зниження витрат, швидкість розгортання мережевих функцій і гнучкість управління IP-трафіком. Завдяки NFV забезпечується надійна робота VNF, таких як User Plane Function (UPF), що сприяє підвищенню продуктивності мереж.

Досліджено переваги IPv6 у мобільних мережах. Показано використання IPv6 для забезпечення масштабованості та ефективності адресації в умовах зростаючої кількості IoT-пристроїв. Надано ключові функції IPv6, такі як оптимізація маршрутизації, усунення NAT і підтримка мобільності. Застосування IPv6 дозволяє значно підвищити продуктивність мереж, забезпечити безпеку та інтеграцію IoT-пристроїв, що є важливим для реалізації потенціалу 5G.

У третьому розділі запропоновано архітектуру інтеграції пристроїв Інтернету речей (IoT) у мобільні 5G-мережі на основі IP-протоколів. Детально показно принципи функціонування IP-технологій у середовищі мобільних мереж, їх вплив на продуктивність, масштабованість і якість обслуговування (QoS). Запропонована архітектура складається з чотирьох основних компонентів: RAN (Radio Access Network), MEC (Multi-access Edge Computing), ядра 5G-мережі (5G Core Network) та міждоменного сегмента. Аналіз показав, що використання IP-протоколів, таких як IPv6, GTP, MQTT та CoAP, забезпечує:

- уніфіковану адресацію і підтримку великої кількості IoT-пристроїв;

- ефективну маршрутизацію та управління трафіком навіть за умов високого навантаження;
- можливість підтримки мультиорендності та адаптивного управління мережевими зрізами (network slicing).

Експериментальні дослідження продемонстрували ефективність запропонованої архітектури для різних IoT-сценаріїв: моніторингу довкілля в Smart Agriculture, відеоспостереження в Smart Building і аналізу звуків у Smart City. Усі сценарії показали відповідність встановленим вимогам до QoS навіть за умов значного навантаження на мережу.

Таким чином, розроблена архітектура інтеграції IoT у мобільні 5G-мережі забезпечує ефективну підтримку різноманітних IoT-додатків, підвищує якість обслуговування, безпеку та масштабованість мереж, що робить її перспективним рішенням для подальшого розвитку телекомунікаційних систем.

Проведено аналіз сучасних технологій передачі голосових даних через IP-мережі, зокрема VoLTE та VoNR, у мобільних мережах 4G та 5G. Основну увагу приділено ролі архітектури IMS, що забезпечує інтеграцію мультимедійних послуг, таких як голос, відео та обмін повідомленнями, із застосуванням IP-протоколів.

Дослідження підтвердили, що VoLTE значно підвищує якість голосового зв'язку в мережах LTE, а впровадження VoNR у мережах 5G забезпечує ще вищу якість, знижуючи затримки завдяки технологіям URLLC та мережевим зрізам (network slicing). Розроблено діаграму, що ілюструє архітектуру та порівняння ефективності цих технологій, що підкреслює їх переваги, такі як мінімальна затримка, висока стабільність з'єднання та підтримка одночасної передачі голосу й даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chandrasekaran, A., Anand, S., & Kumar, S. The role of IP protocols in 4G and 5G mobile networks. *International Journal of Computer Networks and Communications*, 2021, Vol. 13, No. 2, pp. 24–33. DOI: URL https://doi.org/10.5121/ijcnc.2021.13202

2. Ramasamy, V., & Singh, A. K. IP-based architectures for next-generation mobile networks: 4G and 5G evolution. *IEEE Communications Magazine*, 2020, Vol. 58, No. 7, pp. 36–44. DOI: URL https://doi.org/10.1109/MCOM.2020.05

3. Sharma, P., Gupta, R., & Lee, C. QoS management in IP-based 5G networks: Challenges and opportunities. *Journal of Network and Computer Applications*, 2020, Vol. 150, pp. 1–15. DOI: URL https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102456

4. Xiang, T., & Wang, Y. IPv6 transition in 4G and 5G networks: Implementation and impact. *Computer Networks*, 2021, Vol. 193, pp. 108014. DOI: URL https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108014

5. Zhang, Z., et al. Software-defined networking (SDN) for IP-based 5G core networks. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 56789–56801. DOI: URL https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065892

6. Khan, M. R., & Al-Fuqaha, A. End-to-end IP architecture for 5G: A comprehensive review. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, Article ID 3949562, pp. 1–17. DOI: URL https://doi.org/10.1155/2021/3949562

7. Ali, M., et al. Integrating IoT devices in IP-based 5G mobile networks: An overview. *Sensors*, 2021, Vol. 21, No. 12, pp. 4096. DOI: URL https://doi.org/10.3390/s21124096

8. Abdelwahab, S., et al. Network slicing in 5G: Role of IP technologies. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, Vol. 7, No. 5, pp. 4561–4573. DOI: URL https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2967053

9. Chen, M., et al. Mobile edge computing and IP-based 5G networks: A review. *Future Generation Computer Systems*, 2020, Vol. 107, pp. 283–300. DOI: URL https://doi.org/10.1016/j.future.2020.01.025

10. Tang, F., et al. The evolution of IP protocols in 4G and 5G mobile networks. *Journal of Communications and Networks*, 2021, Vol. 23, No. 3, pp. 214–225. DOI: URL https://doi.org/10.23919/JCN.2021.000001

11. Islam, S. R., & Kim, D. H. Role of IP multimedia subsystem in 5G networks. *Journal of Network and Systems Management*, 2020, Vol. 28, No. 4, pp. 896–912. DOI: URL https://doi.org/10.1007/s10922-020-09529-4

12. Hossain, E., et al. Security in IP-based 5G mobile networks. *IEEE Wireless Communications*, 2021, Vol. 28, No. 1, pp. 24–31. DOI: URL https://doi.org/10.1109/MWC.2021.9426598

13. Sun, Y., et al. Mobility management using IP in 5G networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, Vol. 69, No. 10, pp. 10284–10295. DOI: URL https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3012345

14. Baker, M., IPv6 deployment challenges in 5G networks. *IEEE Network*, 2021, Vol. 35, No. 3, pp. 27–33. DOI: URL https://doi.org/10.1109/MNET.2021.006007

15. Zhu, X., & Li, W. Advanced IP-based services in 5G core networks. *Computer Communications*, 2020, Vol. 160, pp. 70–82. DOI: URL https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.05.021

16. Li, X., et al. SDN-based architecture for 5G mobile networks: Challenges and opportunities. *IEEE Wireless Communications*, 2021, Vol. 28, No. 4, pp. 34–40. DOI: URL https://doi.org/10.1109/MWC.2021.9478430

17. Wang, P., & Chen, H. NFV in 5G core networks: Design principles and use cases. *Journal of Network and Systems Management*, 2021, Vol. 29, No. 3, pp. 456–470. DOI: URL https://doi.org/10.1007/s10922-021-09571-1

18. Zhang, H., et al. Integrating SDN and NFV for scalable 5G core networks. *IEEE Network*, 2020, Vol. 34, No. 5, pp. 129–136. DOI: URL https://doi.org/10.1109/MNET.2020.3016824

19. Chen, L., & Zhang, Y. Transition to IPv6 in 4G and 5G networks: A comprehensive review. *Computer Networks*, 2020, Vol. 181, pp. 107590. DOI: URL https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107590

20. Kreutz, D., et al. Software-defined networking and its role in 5G networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, Vol. 23, No. 1, pp. 1–19. DOI: URL https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3111865

21. Ahmed, N., et al. NFV orchestration and its implementation in 5G. *Future Generation Computer Systems*, 2021, Vol. 125, pp. 94–110. DOI: URL https://doi.org/10.1016/j.future.2021.06.030

22. Gallo, A., et al. IPv6 deployment in 5G mobile networks: Key considerations. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, Vol. 8, No. 7, pp. 5296–5304. DOI: URL https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3061497

23. Gupta, R., & Lee, C. SDN-enabled network slicing for 5G core. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 2705–2716. DOI: URL https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3031062

24. Khan, A., & Al-Hussein, M. Enhancing IPv6 support for IoT in 5G networks. *Sensors*, 2021, Vol. 21, No. 10, pp. 3421. DOI: URL https://doi.org/10.3390/s21103421

25. Mishra, D., et al. NFV-based solutions for improving QoS in 5G networks. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 45689–45702. DOI: URL https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3018954

26. Tang, Y., et al. SDN-based dynamic resource allocation in 5G networks. *Journal of Communications and Networks*, 2021, Vol. 23, No. 4, pp. 234–244. DOI: URL https://doi.org/10.23919/JCN.2021.000020

27. Wang, X., & Liu, J. IPv6-based routing optimization in 4G and 5G. *Computer Communications*, 2020, Vol. 153, pp. 119–127. DOI: URL https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.017

28. Yang, S., et al. NFV frameworks for flexible 5G network slicing. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2021, Vol. 5, No. 3, pp. 34–40. DOI: URL https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2021.3101103

29. Sun, L., & Zhang, F. IPv6 transition challenges in SDN and NFV-based 5G networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2021, Vol. 195, pp. 103251. DOI: URL https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103251

30. Liu, Y., et al. Integration of SDN, NFV, and IPv6 for scalable 5G core networks. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2021, Vol. 8, No. 2, pp. 1432–1445. DOI: URL https://doi.org/10.1109/TNSE.2021.3054462

31. Zhang, Y., et al. VoLTE: Architecture, performance, and challenges in LTE networks. IEEE Communications Magazine, 2020, Vol. 58, No. 6, pp. 45–51. DOI: URL https://doi.org/10.1109/MCOM.2020.1900159

32. Choi, J., & Kim, S. VoNR: The next evolution of voice services in 5G networks. IEEE Wireless Communications, 2021, Vol. 28, No. 5, pp. 82–89. DOI: URL https://doi.org/10.1109/MWC.2021.9502332

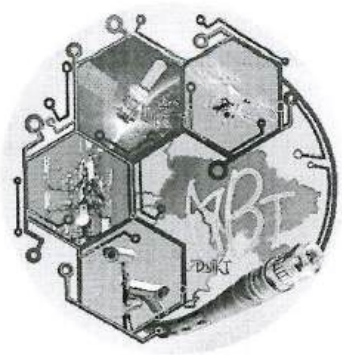
33. Lee, H., et al. Comparison of VoLTE and VoNR in next-generation mobile networks. Computer Networks, 2020, Vol. 182, pp. 107595. DOI: URL https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107595

34. Ahmed, N., et al. QoS management in VoLTE and VoNR: Current trends and future perspectives. Sensors, 2021, Vol. 21, No. 8, pp. 2673. DOI: URL https://doi.org/10.3390/s21082673

35. Sun, F., & Wang, X. Implementation of VoNR in 5G standalone networks. IEEE Access, 2021, Vol. 9, pp. 112045–112055. DOI: URL https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3100723

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



Презентація по магістерській роботі
на тему:

Метод інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку

Виконала: Катерина ПАНКЕВИЧ

Керівник: Любов БЕРКМАН, д.т.н., професор

Мета роботи

Мета роботи – дослідження методів інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних та забезпечення якості обслуговування (QoS) у мобільних мережах.

Предмет дослідження – методи інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку.

Еволюція мобільних мереж



	2G	3G	4G	5G
Commercialisation period	1990s	2000s	2010s	2020s
Application enabled	Voice calls, SMS, MMS, limited browsing	High-speed browsing, applications	Video conferencing, mobile TV	Multipurpose (AR/VR, Internet of Things)
Average speed	56-115 Kbps	5.8-14.4 Mbps	100-300 Mbps	100-5,000 Mbps



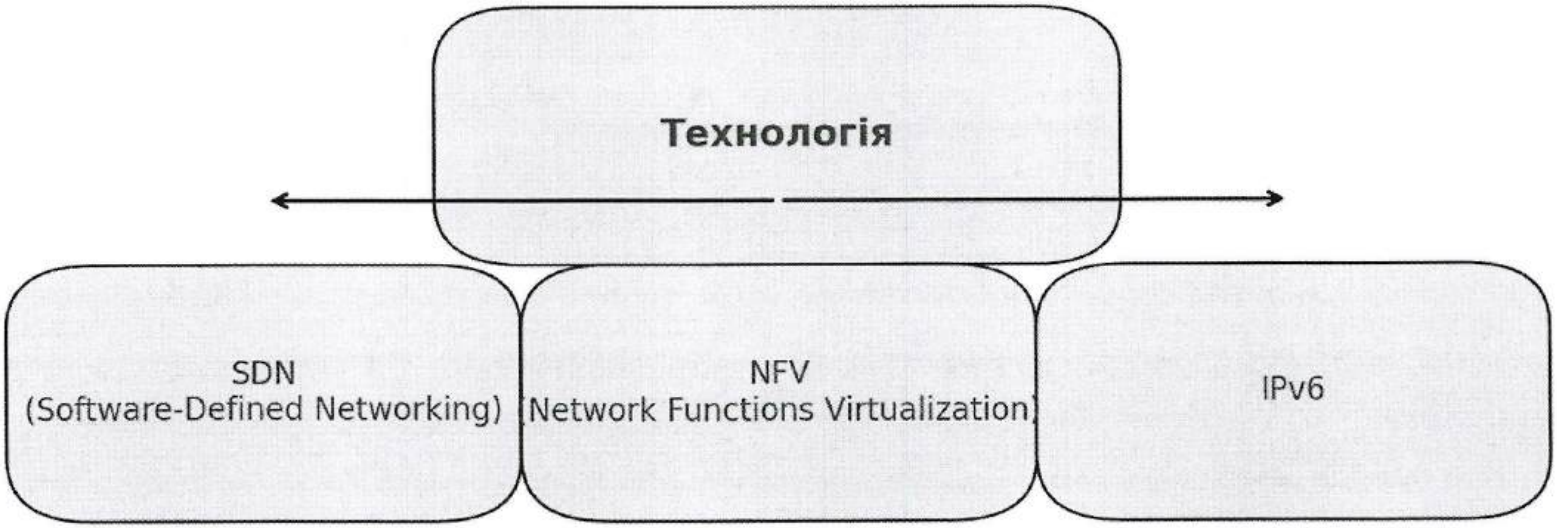
Mobile technology can account up to $10 out of every $100 of income per capita growth from the year 2000-2019.

- Development of mobile network technology help strengthen a country's economy.
- Mobile is the key for long-term economic growth.

Переваги та підвищення продуктивності використання IP у 4G та 5G

Категорія	Опис переваг	Результат підвищення продуктивності
Масштабованість	Підтримка мільярдів пристроїв через IPv6, динамічну маршрутизацію і гнучкі мережеві зрізи (slicing).	Зростання ефективності роботи мережі навіть у умовах великого навантаження.
Продуктивність	Швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с, мінімізація затримок до 1 мс.	Забезпечення стабільного з'єднання для мультимедійних та реальних час сервісів.
Інтеграція сервісів	Інтеграція сервісів URLLC, eMBB і IoT через IP-протоколи.	Розширення спектру послуг і зростання доступності сервісів для абонентів.
Забезпечення якості обслуговування (QoS)	Пріоритизація критичних сервісів (URLLC) і управління ресурсами через політики QoS.	Мінімізація затримок і збоїв у роботі сервісів.
Безпека	Шифрування даних за допомогою IPsec, захист мікросервісів через TLS і REST API.	Підвищення довіри до мережі через надійний захист даних і абонентів.

Методи інтеграції IP технологій у мережах 4G та 5G



Роль SDN у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та інтеграції IP



Параметр	Роль SDN	Переваги для IP-мереж
Управління трафіком	Централізоване управління трафіком у реальному часі з урахуванням навантаження мережі.	Ефективне управління IP-пакетами для підвищення продуктивності.
Оптимізація маршрутизації	Динамічна маршрутизація на основі аналітики трафіку для мінімізації затримок.	Забезпечення маршрутизації IP-трафіку з мінімальними затримками.
Підтримка QoS і QoE	Пріоритизація трафіку для критичних сервісів (URLLC, eMBB) з гарантованою пропускною здатністю.	Гарантована якість обслуговування для IP-базованих сервісів, таких як VoLTE.
Мережеві зрізи (Network Slicing)	Логічне розділення ресурсів мережі для різних сценаріїв використання (IoT, мультимедіа).	Розширення можливостей IP-мереж для підтримки одночасного використання різних сервісів.
Інтеграція з MEC	Оптимізація передачі даних на периферії завдяки інтеграції MEC з SDN.	Зменшення затримок і збоїв у передачі IP-даних на рівні периферії.
Безпека	Виявлення загроз і динамічне застосування політик безпеки через SDN-контролери.	Захист IP-трафіку через автоматизоване шифрування та контроль доступу.

Переваги NFV у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та інтеграції IP



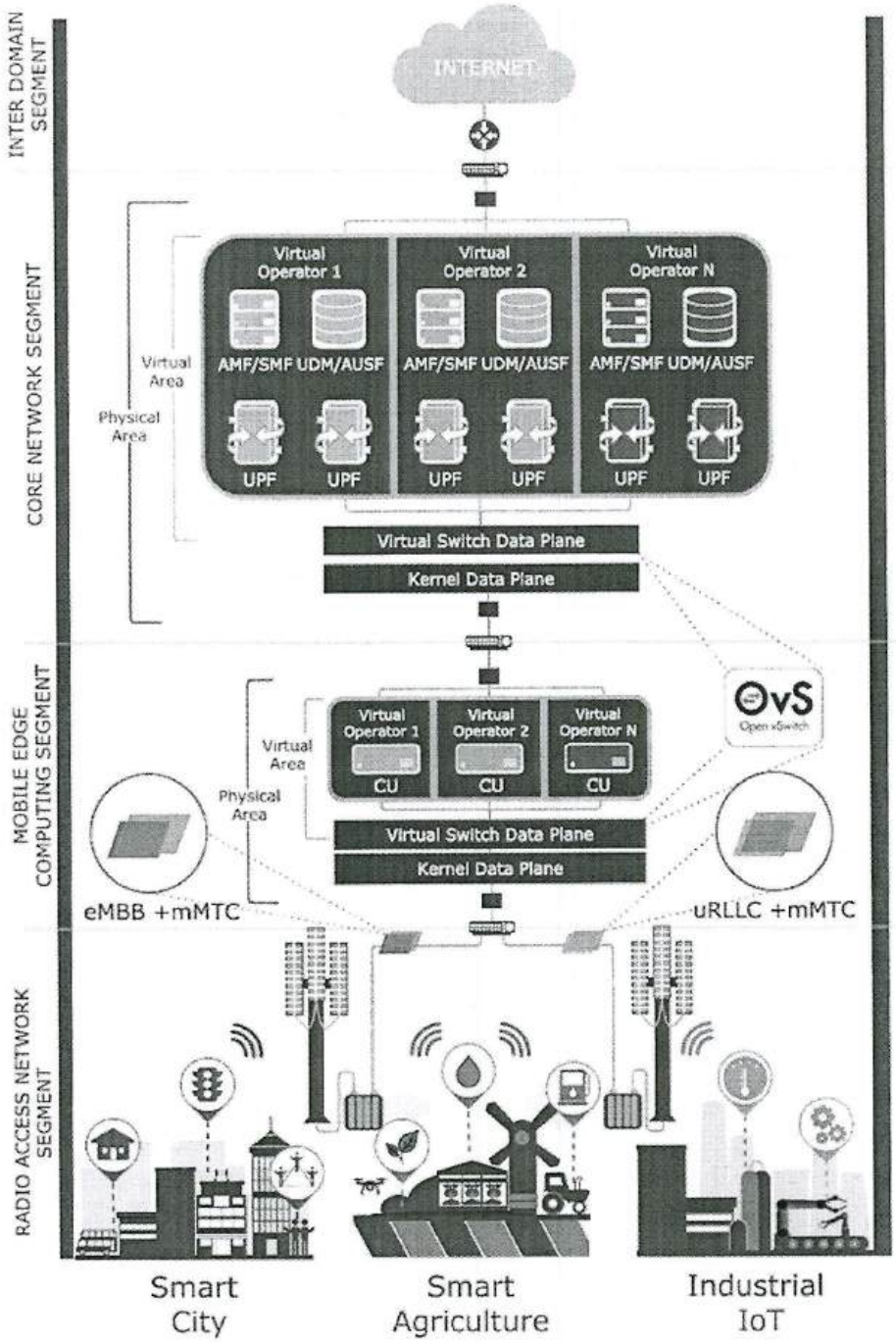
Параметр	Роль NFV	Переваги для IP-мереж
Віртуалізація мережевих функцій	Перенесення функцій, таких як маршрутизація та шифрування, у віртуальне середовище для підвищення гнучкості.	Гнучке управління IP-трафіком через віртуальні маршрутизатори.
Оптимізація ресурсів	Масштабування ресурсів залежно від навантаження через використання віртуалізації.	Ефективне використання IP-адрес завдяки масштабованій архітектурі.
Швидкість впровадження	Прискорення розгортання нових мережевих функцій завдяки автоматизації процесів.	Прискорення впровадження IP-базованих сервісів, таких як VoLTE.
Підтримка QoS і QoE	Забезпечення стабільної якості обслуговування через пріоритизацію трафіку та управління ресурсами.	Покращення продуктивності IP-сервісів завдяки гарантованій якості.
Інтеграція з SDN	Динамічне управління мережевими функціями у координації з SDN-контролерами.	Оптимізація маршрутизації IP-пакетів через координацію з SDN.
Зниження витрат	Зниження потреби у спеціалізованому обладнанні через використання стандартних серверів.	Зменшення витрат на обслуговування IP-мереж через стандартне обладнання.

Переваги IPv6 у підвищенні ефективності мереж 4G та 5G та зокрема IP

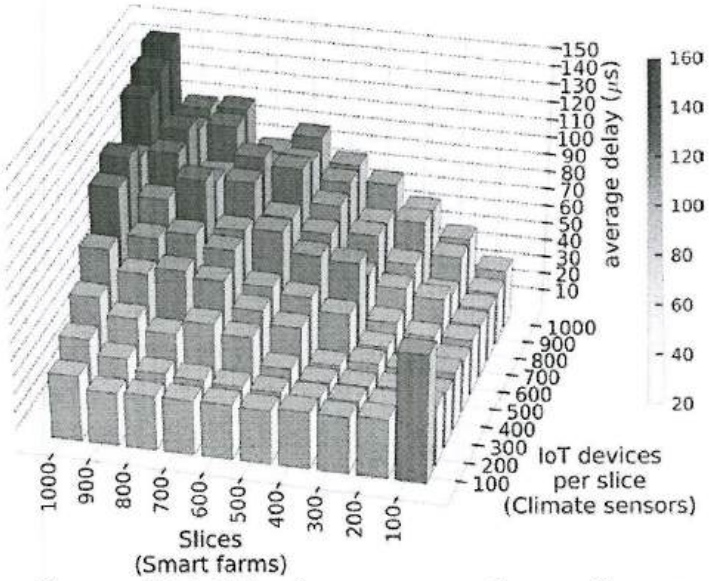


Параметр	Роль IPv6	Переваги для IP-мереж
Розширений адресний простір	Забезпечення адресації для мільярдів IoT-пристроїв у 4G та 5G мережах.	Підтримка необмеженої адресації для IP-пристроїв.
Оптимізація маршрутизації	Спрощення маршрутизації через менш складні заголовки пакетів.	Покращення продуктивності IP-мереж завдяки оптимізації маршрутів.
Інтеграція IoT	Підтримка прямої комунікації IoT-пристроїв через 6LoWPAN.	Розширення функціональності IP для IoT, зокрема для CoAP-протоколу.
Забезпечення безпеки	Захист трафіку через вбудовані механізми шифрування (IPsec).	Підвищення довіри до IP-мереж завдяки безпечній передачі даних.
Підтримка мобільності	Забезпечення мобільності пристроїв за допомогою протоколу MIPv6.	Забезпечення безперервності з'єднань для мобільних пристроїв.
Виключення NAT	Підвищення швидкості передачі даних через виключення необхідності в NAT.	Зниження затримок і покращення QoS завдяки виключенню трансляції адрес.

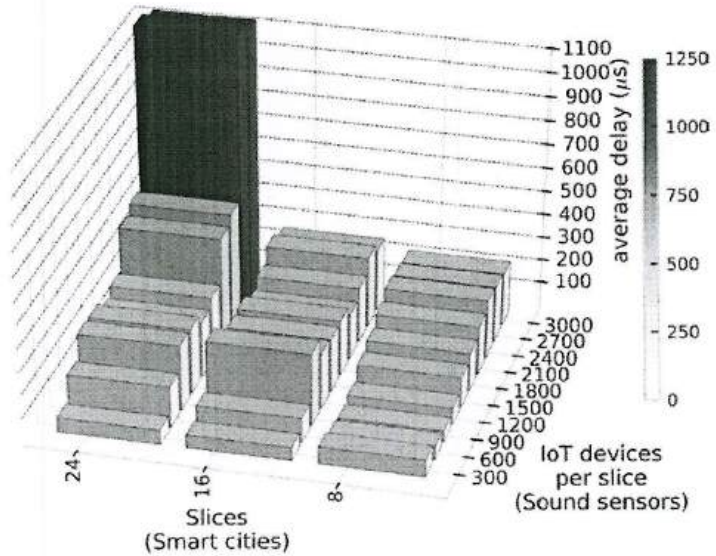
Архітектура запропонованої 5G IoT-інфраструктури



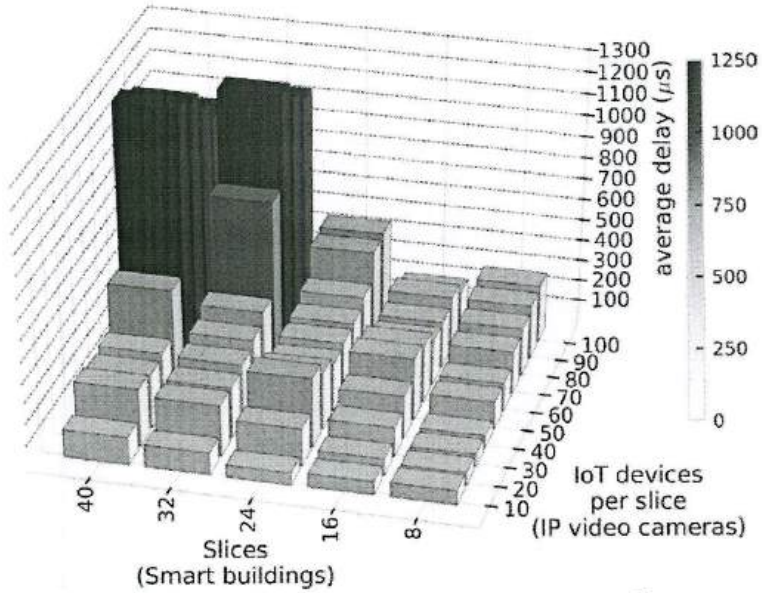
Експериментальні дослідження запропонованої архітектури



Сценарій 1. Моніторинг довкілля в Smart Agriculture (mMTC)

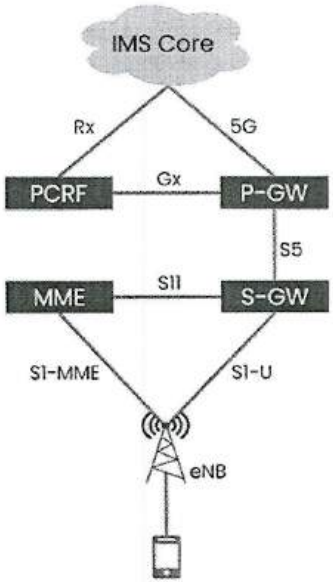


Сценарій 2. Аналіз звуків у Smart City (mMTC/eMBB)

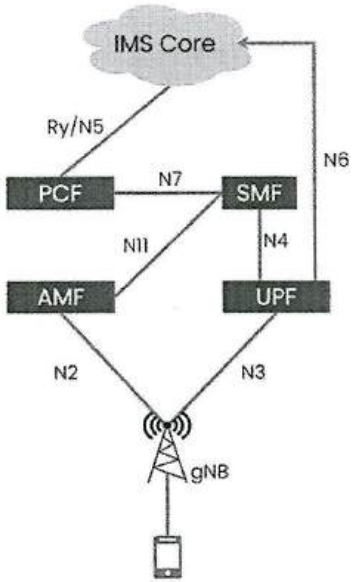


Сценарій 3. Відеоспостереження в Smart Building (eMBB)

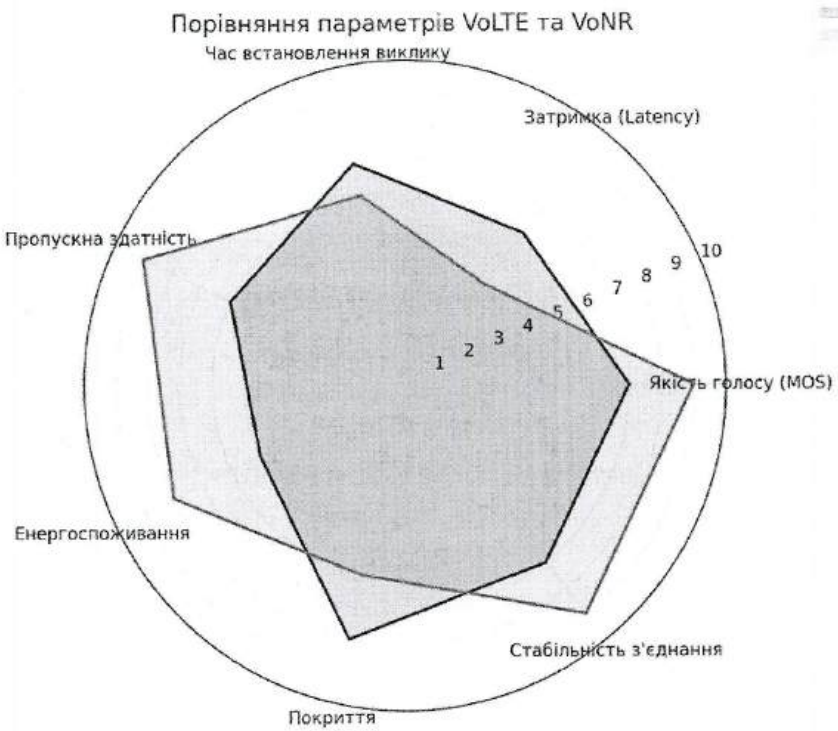
Архітектура Voice over LTE та Voice over New Radio



LTE – VoLTE



NR – VoNR



Висновки

В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

У першому розділі проведено аналіз ролі IP-технологій у мобільних мережах 4G, з акцентом на еволюцію архітектури та її вплив на продуктивність. Визначено, що перехід до IP-орієнтованих мереж забезпечив підвищення швидкості передачі даних і QoS. Інтеграція IPv4 та IPv6 у 4G сприяла масштабованості, підтримці IoT та впровадженню сервісів, таких як VoLTE. Розглянуто Service-Based Architecture (SBA) у 5G, яка використовує IP-протоколи для гнучкого управління трафіком і забезпечення диференційованого QoS, що критично для низьколатентних додатків, таких як телемедицина та автономні системи.

У другому розділі запропоновано методи інтеграції IP-технологій у мобільні мережі 4G і 5G. Висвітлено переваги SDN і NFV для динамічної маршрутизації, гнучкості та ефективного управління ресурсами. Продемонстровано, що SDN забезпечує централізоване управління трафіком і підтримку QoS, тоді як NFV дозволяє швидко масштабувати мережеві функції, знижуючи витрати й покращуючи продуктивність.

У третьому розділі запропоновано архітектуру інтеграції IoT у 5G-мережі, яка базується на IP-протоколах. Запропоновано ефективне використання компонентів RAN, MEC і 5G Core для уніфікованої адресації, ефективної маршрутизації та підтримки мережевих зрізів. Експериментальні дослідження підтвердили відповідність архітектури вимогам до QoS у різних IoT-сценаріях, таких як Smart Agriculture і Smart City. Проаналізовано технології VoLTE та VoNR, які демонструють значне покращення якості голосового зв'язку, мінімальні затримки та стабільність з'єднання в IP-мережах.

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: Катерина ПАНКЕВИЧ

Назва: Метод інтеграції IP технологій в мережі четвертого та п'ятого покоління мобільного зв'язку

Координатор: Любов БЕРКМАН

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:2.1

Коефіцієнт подібності 2:0.4

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*