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

Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей

«До захисту допущено»
ВО завідувача кафедри
_____ В’ячеслав НОСКОВ
«___»_____20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: «Аналіз варіантів абонентського доступу при побудові мереж NGN»

Виконав (-ла):
студент (-ка) IV курсу, групи ТС-12
Олійник Дмитро Олександрович _____

Керівник:
Доцент кафедри ЕКІР, к.т.н., доцентГаттуров В. К. _____

Рецензент:
Незалежний експерт з телекомунікацій,
к.т.н Мазор С. Ю. _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма – «Системи електронних комунікацій та інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ
ВО завідувача кафедри
_____ В’ячеслав НОСКОВ
«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Олійнику Дмитро Олександровичу

1. Тема роботи «Аналіз варіантів абонентського доступу при побудові мереж NGN», керівник роботи Доцент кафедри ЕКІР, к.т.н., доцент Гаттуров В. К., затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1755 - с

2. Термін подання студентом роботи: 14.06.2024

3. Вихідні дані до роботи: Використання моделювальних середовищ або інструментів для оцінки пропускної здатності та ефективності архітектур NGN.

4. Зміст роботи: 1) Цифрова ера та сучасні виклики телекомунікацій 2) Інноваційні технології абонентського доступу: огляд і порівняння 3) Аналіз та класифікація технологій абонентського доступу 4) Аналіз та оптимізація абонентського доступу в NGN

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): презентація 7 слайдів

6. Дата видачі завдання 21.02.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Цифрова ера та сучасні виклики телекомунікацій	21.02.2025 –15.03.2025	
2	Інноваційні технології абонентського доступу: огляд і порівняння	15.03.2025 – 05.04.2025	
3	Аналіз та класифікація технологій абонентського доступу	05.04.2025 – 20.04.2025	
4	Аналіз та оптимізація абонентського доступу в NGN	20.04.2025 – 15.05.2025	

Студент Дмитро ОЛІЙНИК

Керівник роботи Віктор ГАТТУРОВ

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 89 с., 18 рис., 11 табл., 10 джерел.

Мета роботи — дослідження, порівняння та обґрунтування ефективності різних варіантів абонентського доступу при побудові мереж наступного покоління (NGN) з урахуванням технічних характеристик, економічної доцільності та відповідності вимогам до якості обслуговування (QoS), з метою вибору оптимального рішення для впровадження у сучасні телекомунікаційні системи.

У даній дипломній роботі розглядаються основні принципи побудови мереж наступного покоління (NGN), їх архітектура, ключові функціональні особливості та переваги у порівнянні з традиційними телекомунікаційними мережами. Окрема увага приділяється дослідженню та аналізу сучасних технологій абонентського доступу, які можуть використовуватися під час впровадження NGN. Розглянуто дротові та бездротові рішення, їх технічні характеристики, переваги та обмеження. Проведено порівняльний аналіз варіантів доступу за критеріями ефективності, вартості, надійності, пропускної здатності та відповідності вимогам до якості обслуговування (QoS).

Ключові слова: NGN, АБОНЕНТСЬКИЙ ДОСТУП, МЕРЕЖІ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ, FTTX, XDSL, PON, LTE, QOS, КОНВЕРГЕНЦІЯ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МУЛЬТИСЕРВІСНІ МЕРЕЖІ

ABSTRACT

The textual part of the thesis: 89 pages, 18 figures, 11 tables, 10 references.

The aim of the thesis is to study, compare, and justify the efficiency of various subscriber access technologies in the design of Next Generation Networks (NGN), taking into account technical characteristics, economic feasibility, and compliance with Quality of Service (QoS) requirements, in order to select the optimal solution for implementation in modern telecommunication systems.

This thesis examines the fundamental principles of building Next Generation Networks (NGN), their architecture, key functional features, and advantages over traditional telecommunication networks. Particular attention is paid to the study and analysis of modern subscriber access technologies applicable to NGN deployment. Both wired and wireless solutions are considered, including their technical characteristics, strengths, and limitations. A comparative analysis of access options is conducted based on criteria such as efficiency, cost, reliability, bandwidth, and compliance with Quality of Service (QoS) requirements. Based on the obtained results, recommendations are provided for selecting the optimal subscriber access solution for different NGN deployment scenarios.

Keywords: NGN, SUBSCRIBER ACCESS, NEXT GENERATION NETWORKS, FTTX, XDSL, PON, LTE, QoS, CONVERGENCE, TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES, MULTISERVICE NETWORKS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

NGN	Next Generation Network – Мережа наступного покоління.
DSL	Digital Subscriber Line – Цифрова абонентська лінія.
FTTH	Fiber To The Home – Оптоволокно до дому.
Wi-Fi	Wireless Fidelity – Бездротовий доступ до мережі.
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification – Специфікація інтерфейсу служби передачі даних через кабель.
LTE	Long Term Evolution – Стандарт безпровідної високошвидкісної передачі даних.
SD-WAN	Software-Defined Wide Area Network – Програмно-визначена глобальна мережа.
GPON	Gigabit Passive Optical Network – Гігабітна пасивна оптична мережа.
xDSL	Digital Subscriber Line technologies – Узагальнена назва технологій цифрової абонентської лінії.
MPLS	MPLS – Multiprotocol Label Switching – Комутація з підтримкою декількох протоколів за мітками.
QoS	QoS – Quality of Service – Якість обслуговування.
QoE	QoE – Quality of Experience – Якість досвіду користувача.
IMS	IMS – IP Multimedia Subsystem – Підсистема мультимедійних послуг IP.
SIP	Session Initiation Protocol – Протокол ініціації сеансів.
NFV	Network Functions Virtualization – Віртуалізація мережевих функцій.
SDN	Software-Defined Networking – Програмно-визначені мережі.

DPI	Deep Packet Inspection – Глибокий аналіз пакетів.
VNF	Virtualized Network Function – Віртуалізована мережева функція.
MEC	Multi-access Edge Computing – Обчислення на периферії мережі.
BRAS	Broadband Remote Access Server – Сервер віддаленого широкосмугового доступу.
AAA	Authentication, Authorization, Accounting – Аутентифікація, авторизація та облік.
CPE	Customer Premises Equipment – Обладнання на стороні абонента.
HSS	Home Subscriber Server – Сервер домашніх абонентів.
DDoS	DDoS – Distributed Denial of Service – Розподілена атака на відмову в обслуговуванні.

ВСТУП

У сучасному світі стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій зумовлює необхідність створення нових підходів до організації телекомунікаційних мереж. Традиційні мережі вже не здатні повною мірою задовольнити зростаючі потреби користувачів у високоякісних, швидкісних та універсальних послугах зв'язку. У зв'язку з цим усе більшої актуальності набуває впровадження мереж наступного покоління (Next Generation Networks, NGN), що базуються на концепції конвергенції послуг, протоколів і середовищ передавання.

Одним із ключових елементів при побудові NGN-мереж є абонентський доступ – завершальна ланка, що забезпечує взаємодію кінцевого користувача з телекомунікаційною інфраструктурою. Якість, надійність та економічна доцільність обраного варіанту доступу значною мірою впливають на ефективність функціонування всієї мережі.

Сучасні технології абонентського доступу охоплюють широкий спектр рішень – від традиційних xDSL і Ethernet до волоконно–оптичних (FTTx, PON) та бездротових (Wi-Fi, LTE, 5G) технологій. Успішне впровадження NGN потребує глибокого аналізу цих технологій, зокрема з огляду на пропускну здатність, масштабованість, вартість розгортання та експлуатації, а також здатність забезпечувати вимоги до якості обслуговування (QoS).

Метою даної дипломної роботи є аналіз і порівняння різних варіантів абонентського доступу при проєктуванні мереж NGN з урахуванням технічних, економічних та експлуатаційних чинників. У процесі дослідження особливу увагу приділено класифікації доступних технологій, визначенню їх переваг і недоліків, а також обґрунтуванню доцільності їх використання в різних умовах експлуатації.

Актуальність теми зумовлена потребою в модернізації телекомунікаційної інфраструктури України відповідно до міжнародних стандартів і тенденцій розвитку електронних комунікацій.

1 ЦИФРОВА ЕРА ТА СУЧАСНІ ВИКЛИКИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

1.1 Інноваційні підходи в архітектурі NGN

Архітектура мереж наступного покоління (Next Generation Network, NGN) є результатом еволюції телекомунікаційних систем, спрямованої на інтеграцію різноманітних послуг на єдиній платформі з пакетною комутацією. Це дозволяє конвергувати голосовий, відео та інформаційний трафік на одній мережевій інфраструктурі, забезпечуючи високу ефективність використання ресурсів та підтримку мультисервісних рішень. NGN замінюють традиційні комутовані мережі, засновані на технології TDM (Time Division Multiplexing), на IP-орієнтовану архітектуру, що дозволяє знизити витрати на обслуговування та експлуатацію мережі, підвищити гнучкість та масштабованість системи, а також значно прискорити впровадження нових послуг.

Це досягається за рахунок використання пакетної комутації, яка забезпечує передачу даних у вигляді пакетів IP-протоколу, незалежно від типу інформації, що передається. Однією з основних особливостей NGN є мультисервісність, яка дозволяє надавати користувачам різноманітні послуги на єдиній мережевій платформі. Це стає можливим завдяки конвергенції послуг, яка забезпечує інтеграцію голосового зв’язку, передачі даних та відео на основі єдиної IPінфраструктури. Такий підхід підвищує ефективність використання мережевих ресурсів, спрощує управління послугами та знижує витрати на підтримку інфраструктури. Крім того, конвергенція послуг дозволяє операторам швидше впроваджувати нові сервіси та адаптувати існуючі до потреб ринку.

Важливою особливістю мультисервісних мереж є підтримка якості обслуговування (Quality of Service, QoS), яка забезпечується за допомогою механізмів пріоритезації трафіку, управління затримками та мінімізації втрат пакетів. Це особливо важливо для додатків реального часу, таких як IP-телефонія та відеоконференції, які вимагають низьких затримок та

гарантованої пропускної здатності. У NGN активно застосовується модель розподіленого управління послугами та викликами. Такий підхід дозволяє гнучко керувати мультисервісним трафіком, забезпечуючи високу продуктивність та масштабованість системи. Розподілене управління викликами реалізується за допомогою IP Multimedia Subsystem (IMS), яка дозволяє гнучко управляти мультимедійними сесіями та забезпечує підтримку QoS (Quality of Service) для різних типів трафіку. IMS базується на використанні Session Initiation Protocol (SIP) для встановлення, управління та завершення мультимедійних сесій, що забезпечує гнучкість у впровадженні нових послуг та можливість їх налаштування відповідно до вимог користувачів. Використання IMS дозволяє об’єднувати різні типи мережевого доступу (фіксований, мобільний, Wi-Fi) на єдиній IP-платформі,що забезпечує безшовний доступ до послуг незалежно від типу підключення.

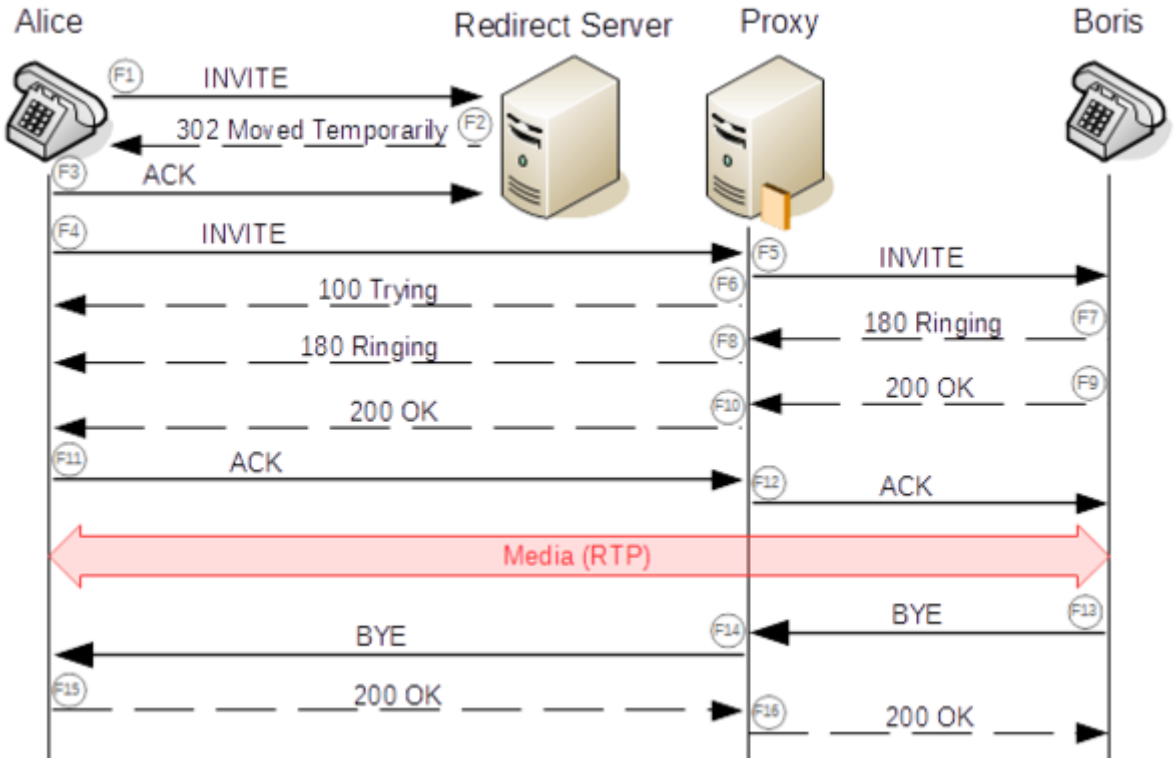


Рисунок 1.1 – Функціональна модель мережі NGN з розподілом на рівні: додатків, управління та передачі

Конвергенція послуг у NGN забезпечує швидке впровадження нових сервісів із мінімальними витратами, уніфікований доступ через різні типи мереж (мобільна, фіксована, Wi-Fi), а також гнучке управління трафіком. Це підвищує ефективність використання ресурсів і якість обслуговування. На єдиній IP-платформі оператори можуть надавати інтегровані сервіси: голос, дані, відео, IPTV, VoIP, VoD, хмарні сервіси та онлайн-ігри. Використання SDN (Software-Defined Networking) в NGN дозволяє розділити площину управління і передачі, що забезпечує централізоване, гнучке керування мережею. Через SDN-контролер оператор може динамічно налаштовувати маршрути, адаптувати мережу до змін трафіку, підвищувати QoS і впроваджувати нові послуги без зміни апаратної інфраструктури.

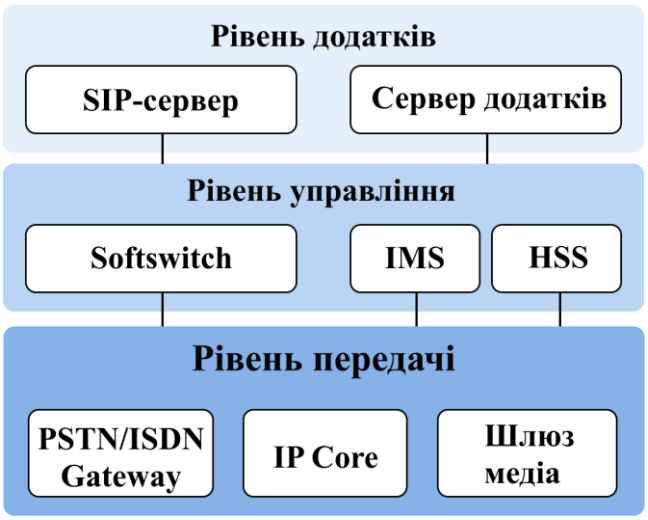


Рисунок 1.2 – Функціональна модель мережі NGN з розподілом на рівні: додатків, управління та передачі

NFV (Network Functions Virtualization) у NGN дозволяє перенести мережеві функції зі спеціалізованого обладнання на універсальні сервери, що спрощує управління, знижує витрати та забезпечує гнучке розгортання послуг. Це підвищує масштабованість і адаптивність мережі до змін у трафіку. MEC (Multi-access Edge Computing) забезпечує обробку даних

ближче до користувача, зменшуючи затримки та навантаження на ядро мережі.

Це критично для додатків реального часу — відеоконференцій, онлайн-ігор, автономного транспорту та промислового IoT. Архітектура мереж наступного покоління (NGN) є основою для побудови сучасних, гнучких і ефективних телекомунікаційних систем, здатних забезпечити широкий спектр послуг на базі єдиної IP-платформи. Конвергенція голосового, відео та інформаційного трафіку, підтримка мультисервісності, впровадження моделей розподіленого управління (IMS), програмно-конфігурованих мереж (SDN), віртуалізації функцій (NFV) та обчислень на межі мережі (MEC) відкривають нові можливості для операторів і користувачів, підвищуючи ефективність, масштабованість і якість обслуговування. Водночас, реалізація потенціалу NGN вимагає не лише відповідної технічної інфраструктури, а й вирішення низки викликів, зокрема в контексті організації абонентського доступу, що розглядатиметься у наступному розділі.

1.2 Виклики в організації абонентського доступу

Абонентський доступ в мережах наступного покоління (NGN) відіграє критичну роль у забезпеченні підключення кінцевих користувачів до мультисервісних мереж. Однак у процесі організації абонентського доступу виникає низка викликів, що вимагають комплексного підходу до їх вирішення. До основних викликів належать проблеми масштабованості, забезпечення якості обслуговування (QoS), безпеки та конфіденційності даних, а також економічні аспекти впровадження нових технологій. Ці виклики обумовлені зростаючими вимогами до пропускної здатності, збільшенням кількості підключених пристроїв, розширенням спектру послуг і загрозами інформаційної безпеки.

Одним із найважливіших викликів у побудові NGN-доступу є масштабованість, особливо з огляду на стрімке зростання кількості пристроїв

у сфері IoT та M2M-комунікацій. Для ефективної роботи таких систем застосовується IPv6, що забезпечує фактично необмежений простір IP-адрес, а також програмно-керовані мережі (SDN) і віртуалізація мережевих функцій (NFV), які дозволяють гнучко управляти ресурсами відповідно до навантаження.

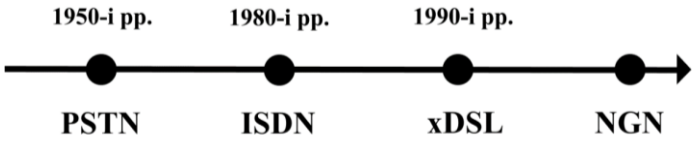


Рисунок 1.3 – Хронологія розвитку мереж абонентського доступу

Забезпечення якості обслуговування (QoS) є не менш важливою задачею. Різноманітні типи трафіку — голосовий, відео, дані — мають різні вимоги до затримки, пропускної здатності та стабільності. Для задоволення цих вимог у NGN використовуються технології MPLS, моделі DiffServ і IntServ, а також механізми управління чергами, формування трафіку та уникнення перевантажень. Безпека і конфіденційність також потребують особливої уваги. Вразливість зростає з появою великої кількості IoT-пристроїв, які часто мають обмежені можливості для захисту. Для цього в NGN впроваджуються багаторівневі методи захисту, серед яких шифрування (TLS, IPsec, SRTP), аутентифікація (RADIUS, Diameter), контроль доступу (NAC), а також системи моніторингу, включаючи DPI та засоби виявлення і запобігання вторгненням.

Важливим є також захист від DDoS-атак, який реалізується через фільтрацію трафіку, політики доступу і адаптивне управління пропускною здатністю. Економічна ефективність впровадження нових технологій абонентського доступу дуже необхідна сьогоднішній час. Сучасні рішення, такі як PON (Passive Optical Network), 5G FWA (Fixed Wireless Access) та Wi-Fi 6, забезпечують високу швидкість передачі даних та низьку затримку, але вимагають значних капіталовкладень в інфраструктуру. Оптичні технології

(GPON, XG-PON) забезпечують високу пропускну здатність і надійність з’єднання, але вимагають будівництва нових оптоволоконних ліній.

Безпровідні технології, такі як 5G FWA, забезпечують гнучкість та швидке розгортання мереж, але вимагають частого оновлення обладнання через короткий життєвий цикл технології. Це створює необхідність в оптимальному поєднанні провідних та безпровідних технологій для забезпечення високої продуктивності та економічної ефективності мережі. Окрім вищезгаданих пунктів, важливим аспектом організації абонентського доступу є управління якістю обслуговування (QoS) в умовах зростаючих навантажень. Збільшення кількості підключених пристроїв, а також підвищення вимог до мультимедійного контенту призводить до необхідності динамічного управління ресурсами мережі для забезпечення стабільної якості послуг. У NGN використовуються різні моделі QoS, зокрема DiffServ (Differentiated Services) та IntServ (Integrated Services). DiffServ дозволяє класифікувати пакети відповідно до їх пріоритету, що забезпечує гнучкість у керуванні трафіком, тоді як IntServ забезпечує резервування ресурсів для кожного окремого з'єднання, що дозволяє гарантувати якість обслуговування для додатків реального часу.

Для забезпечення QoS також використовуються механізми управління чергами, такі як Weighted Fair Queuing (WFQ) та Priority Queuing (PQ), які дозволяють пріоритизувати обробку критичних пакетів, таких як голосовий або відео трафік. Важливою складовою абонентського доступу в NGN є управління параметрами затримки (latency) та джитера, які критичні для сервісів реального часу, зокрема IP-телефонії, відеоконференцій та ігор. Для цього застосовуються механізми Traffic Shaping, Policing і Congestion Control, що дозволяють регулювати швидкість, контролювати перевищення лімітів та перенаправляти трафік у разі перевантажень, тим самим підтримуючи стабільну якість обслуговування.

Надійність мережі забезпечується за рахунок дублювання каналів, динамічної маршрутизації та механізмів швидкого переключення (Fast

Reroute), що дозволяє зберігати працездатність навіть при виникненні збоїв чи втраті основних маршрутів. Керування мультисервісним трафіком, який поєднує передачу голосу, відео та даних, потребує ретельної оптимізації. Для цього застосовуються методи Traffic Engineering, Load Balancing та PolicyBased Routing, що дають змогу адаптивно керувати потоками залежно від їхніх вимог до QoS та пропускної здатності. Комплексне впровадження таких рішень, зокрема із застосуванням SDN та NFV, дозволяє досягти високого рівня ефективності, масштабованості та гнучкості NGN-доступу. У таблиці 1.1 подано порівняльну таблицю традиційної телекомунікаційної мережі.

Таблиця 1.1 – Порівняння традиційної телекомунікаційної мережі (PSTN) та мережі наступного покоління (NGN)

Критерій	Традиційна телекомунікаційна мережа (PSTN)	Мережа наступного покоління (NGN)
Тип комутації	Комутація каналів	Комутація пакетів (IP)
Передача даних	Однотипна (голос)	Багатосервісна (голос, відео, дані)
Інфраструктура	Тісно пов’язана апаратно-програмна	Уніфікована платформа на базі IP
Гнучкість розгортання	Обмежена	Висока, модульна структура
Підтримка інновацій	Обмежена	Повна підтримка нових сервісів та додатків
Мережеве управління	Централізоване, ручне	Децентралізоване, з використанням SDN/NFV
Якість обслуговування (QoS)	Пріоритет голосу, фіксовані параметри	Гнучке управління QoS для кожного сервісу
Масштабованість	Складна при зростанні навантаження	Добре масштабується горизонтально

Продовження таблиці 1.1

Інтеграція з Інтернетом	Обмежена	Повна IP-інтеграція
Капітальні витрати (CAPEX)	Високі	Нижчі завдяки уніфікації
Експлуатаційні витрати (OPEX)	Високі	Нижчі завдяки віртуалізації

Організація абонентського доступу в мережах наступного покоління (NGN) пов’язана з низкою викликів, що охоплюють масштабованість, забезпечення якості обслуговування (QoS), безпеку, конфіденційність даних та економічну доцільність впровадження новітніх технологій. Ефективне вирішення цих питань потребує впровадження сучасних підходів, таких як SDN, NFV, DPI, MEC та передові протоколи безпеки, які забезпечують гнучкість, стійкість і адаптивність мережі до змін трафіку та зростаючих вимог користувачів. Комплексне управління мультисервісним трафіком, контроль затримок і джитера, а також підвищення надійності мереж є ключовими чинниками у формуванні якісного користувацького досвіду. Подальший розвиток абонентського доступу базується на технологічних інноваціях, що дозволяють модернізувати інфраструктуру «останньої милі» — саме ці аспекти розглядатимуться в наступному розділі.

1.3 Сучасні тенденції в абонентському доступі

Модернізація «останньої милі» є ключовою тенденцією в розвитку абонентського доступу NGN. Пасивні оптичні мережі (GPON, XG-PON, NG-PON2) замінюють мідні лінії, забезпечуючи високу швидкість, масштабованість і мультисервісність завдяки багатохвильовому мультиплексуванню. У бездротовому сегменті застосовуються 5G FWA і WiFi 6 — для покриття віддалених та щільно забудованих районів

відповідно. Технології mmWave, Massive MIMO та Wi-Fi 6 дозволяють забезпечити високу пропускну здатність і обслуговувати велику кількість користувачів. Інтеграція з MEC і хмарними платформами знижує затримки та оптимізує трафік, а використання SDN/NFV забезпечує гнучке управління ресурсами. Network Slicing у 5G дозволяє створювати ізольовані канали з гарантованим QoS, а Open RAN сприяє здешевленню та уніфікації інфраструктури. Широке впровадження IoT та M2M-комунікацій зумовлює потребу в енергоефективних технологіях доступу з великою щільністю підключень. NB-IoT, LTE-M, LoRaWAN і Sigfox забезпечують ефективне з'єднання великої кількості пристроїв із мінімальними затратами енергії та широкою зоною покриття, що робить їх актуальними для LPWAN-середовищ. Одним із важливих напрямів розвитку є забезпечення екологічності мережевого обладнання та оптимізація енергоспоживання у мережах NGN.

Впровадження алгоритмів енергозбереження, таких як Dynamic Spectrum Sharing (DSS) та AI-Driven Network Optimization, дозволяє операторам зменшити споживання електроенергії без втрати продуктивності мережі. Зокрема, використання технологій сплячих режимів (Energy-Efficient Ethernet, 5G Power Saving Mode) дозволяє знижувати навантаження на електромережу в періоди низького трафіку. Також активно впроваджуються рішення, що базуються на використанні відновлюваних джерел енергії для живлення базових станцій, що сприяє зменшенню вуглецевого сліду мереж операторів зв'язку. Ще однією тенденцією є розвиток технологій доступу, що дозволяють підключати користувачів на великих відстанях, таких як супутниковий Інтернет та інші платформи.

Розвиток абонентського доступу в мережах NGN відбувається під впливом глобальних технологічних трендів, які спрямовані на підвищення швидкості, надійності, масштабованості та адаптивності телекомунікаційної інфраструктури. Основними напрямами майбутнього розвитку є впровадження повністю децентралізованих мереж, подальша інтеграція з

квантовими комунікаціями, розширене застосування штучного інтелекту в управлінні мережею, впровадження технологій 6G, а також повна конвергенція мережевих середовищ для створення єдиної, гнучкої інфраструктури доступу.

Очікується, що одним із ключових векторів розвитку стане впровадження 6G-мереж, які зможуть забезпечити терабітні швидкості передачі даних, наднизьку затримку та нові концепції взаємодії користувачів з мережею, такі як голографічні комунікації та інтеграція доповненої реальності на базі інтелектуальних платформ. Для цього будуть використовуватися частоти в терагерцовому діапазоні (THz) та технології розподілених антенних решіток (Distributed MIMO), що дозволить значно збільшити пропускну здатність та енергоефективність системи. Очікується, що мережі 6G будуть глибоко інтегровані з хмарними обчисленнями та штучним інтелектом, що забезпечить автономну оптимізацію мережевого трафіку та персоналізацію доступу на основі аналізу поведінкових моделей користувачів.

Важливим напрямом розвитку абонентського доступу є впровадження AIорієнтованого управління мережею. Технології AI-driven Network Optimization дозволяють автоматизувати розподіл ресурсів, прогнозувати збої та адаптувати мережу до змін у реальному часі. У перспективі очікується перехід до повністю автономних Self-Organizing Networks (SON), що забезпечить стабільну роботу навіть в умовах високого навантаження, зокрема у «розумних» містах та промисловому IoT.

Серед перспектив - розвиток квантових комунікацій з використанням QKD, що забезпечують максимальний рівень захисту даних. Їх застосування стає актуальним у контексті зростання обчислювальних можливостей квантових систем, особливо для захищеного урядового та фінансового зв’язку. Економічні та екологічні тенденції передбачають зниження енергоспоживання та використання відновлюваних джерел енергії. Зокрема, сонячні панелі та вітрогенератори вже застосовуються для живлення базових

станцій, а алгоритми AI-оптимізації в 5G підвищують енергоефективність без шкоди для QoS. У центрі цього — концепція Green Networking. Децентралізовані мережі на базі DLT (зокрема блокчейну) забезпечують автономність, захищеність та прозорість керування доступом, зменшуючи залежність від централізованих операторів.

Супутникові системи (Starlink, OneWeb, Amazon Kuiper) із LEO-орбіти відкривають можливість глобального високошвидкісного доступу, зокрема у віддалених регіонах. Лазерні міжсупутникові канали підвищують надійність і знижують затримки, сприяючи конвергенції з наземними NGN-системами. Загалом, розвиток абонентського доступу у NGN орієнтований на гнучкість, масштабованість, стійкість до загроз, екологічність і тісну інтеграцію з інтелектуальними рішеннями. Поєднання традиційних і новітніх технологій - FTTH (GPON), 5G, Wi-Fi 6, MEC, SDN/NFV, квантових і супутникових рішень - формує основу адаптивної мережевої інфраструктури майбутнього.

1.4 Висновки до розділу 1

В даному розділі проаналізовано трансформацію телекомунікаційної галузі в умовах цифрової ери, зокрема, перехід від традиційних мереж до архітектури наступного покоління (NGN). Визначено, що NGN є результатом інтеграції новітніх інформаційних технологій та мережевих рішень, що базуються на пакетній комутації, IP-протоколах, а також принципах мультисервісності та конвергенції.

Розкрито значення таких технологій, як IMS, SDN, NFV та MEC, що забезпечують гнучкість, масштабованість, ефективне управління ресурсами та впровадження нових сервісів. Акцентовано на важливості підтримки QoS для критичних додатків реального часу, таких як VoIP та відеоконференції.

Серед ключових викликів виділено масштабованість мереж у контексті зростання IoT, забезпечення інформаційної безпеки, надійності передачі даних, а також економічну доцільність впровадження нових технологій.

Також проаналізовано сучасні тенденції, що формують майбутнє телекомунікацій — енергоефективність, використання штучного інтелекту, впровадження 6G.

2 ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ АБОНЕНТСЬКОГО ДОСТУПУ: ОГЛЯД І ПОРІВНЯНННЯ

2.1 Концепція NGN та її особливості

Мережі наступного покоління (Next Generation Networks, NGN) є результатом еволюції телекомунікаційних технологій, що спрямовані на інтеграцію всіх видів комунікацій (голос, дані, відео, мультимедійні послуги) на єдиній платформі. NGN є основою для створення гнучких, масштабованих та безпечних телекомунікаційних систем, що об'єднують усі види зв’язку на базі єдиної IP-інфраструктури. Впровадження інтелектуальних технологій управління мережею, віртуалізація функцій, використання хмарних сервісів та механізмів забезпечення якості обслуговування дозволяють NGN ефективно відповідати на сучасні виклики телекомунікаційної галузі та створювати платформу для майбутніх інновацій. Основною відмінністю NGN від традиційних телекомунікаційних систем є перехід до пакетної комутації, що забезпечує гнучкість, масштабованість та ефективність використання мережевих ресурсів. NGN використовують IPпротокол як єдину транспортну технологію, що дозволяє конвергувати різні типи трафіку на основі мультисервісної архітектури. Цей підхід забезпечує незалежність між рівнем надання послуг і рівнем транспорту, що дає змогу ефективно керувати доступом та оптимізувати використання ресурсів. Однією з головних особливостей NGN є конвергенція послуг, яка дозволяє інтегрувати традиційні телефонні, мобільні, широкосмугові та мультимедійні сервіси в єдиній мережевій інфраструктурі.

Завдяки цьому користувачі можуть отримувати доступ до широкого спектру послуг незалежно від типу підключення або використовуваного пристрою. Концепція "Triple Play" (голос, відео, дані) та "Quadruple Play" (додатково мобільний зв’язок) є реалізацією цієї конвергенції, яка стала можливою завдяки єдиній пакетній інфраструктурі.

Функціональна модель NGN складається з декількох рівнів:

- рівень доступу;
- транспортний рівень;
- рівень управління;
- рівень послуг;

Рівень доступу відповідає за підключення користувачів до мережі через провідні (FTTx, xDSL, Ethernet) або безпроводові (Wi-Fi, 5G, LTE) технології. Транспортний рівень забезпечує передачу даних між вузлами на основі IP/MPLS, що дозволяє ефективно маршрутизувати трафік. Рівень управління включає інтелектуальні механізми для встановлення, маршрутизації та контролю викликів, а також для забезпечення якості обслуговування (QoS) та безпеки. Рівень послуг відповідає за підтримку різноманітних комунікаційних сервісів, таких як IP-телефонія, відеоконференції, хмарні обчислення та потокове відео.

Ключовою архітектурною складовою NGN є IP Multimedia Subsystem (IMS) – набір стандартів, що дозволяє уніфікувати надання мультимедійних послуг. IMS базується на протоколі SIP (Session Initiation Protocol), який керує встановленням, контролем та завершенням мультимедійних сесій. Це рішення забезпечує операторам можливість створення гнучких сервісів, незалежних від транспортного середовища, а також впровадження наскрізного управління якістю обслуговування. Інтеграція SDN (Software-Defined Networking) та NFV (Network Functions Virtualization) у NGN відкриває нові можливості для гнучкого управління трафіком та віртуалізації мережевих функцій. SDN дозволяє операторам централізовано керувати мережею через SDN-контролери, що спрощує маршрутизацію, балансування навантаження та оптимізацію ресурсів. NFV дає змогу замінити апаратні комутатори та маршрутизатори програмними рішеннями, що значно знижує капітальні та операційні витрати на обслуговування мережі.

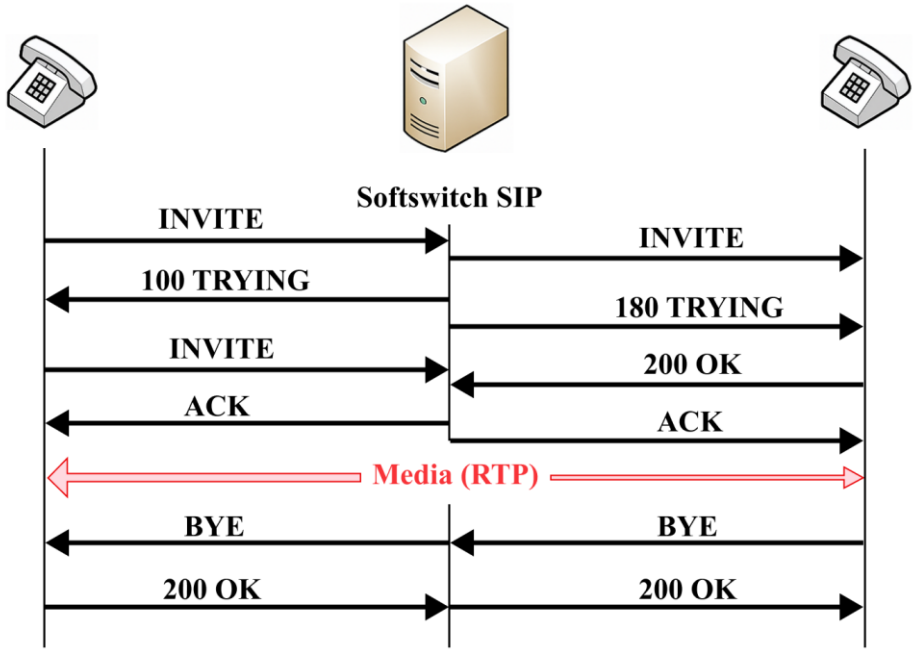


Рисунок 2.1 – Встановлення SIP-виклику через Softswitch у мережі NGN

Інтеграція хмарних обчислень і периферійних технологій (Cloud та MEC) у NGN забезпечує гнучке масштабування ресурсів, зниження затримок і підтримку сервісів у реальному часі. Завдяки MEC обчислення відбуваються ближче до користувача, що підвищує продуктивність і QoS.

Забезпечення якості обслуговування досягається через MPLS, пріоритезацію трафіку, резервування маршрутів і використання сучасних засобів безпеки (TLS, IPsec, RADIUS, Diameter), включаючи захист від DDoS-атак. Підтримка мобільності реалізується через Seamless Handover та Network Slicing, що дозволяє зберігати активне з'єднання при переході між мережами доступу. Це основа для концепції FMC (Fixed-Mobile Convergence) — інтеграції провідного (FTTx, xDSL) та мобільного (LTE, 5G) доступу. Віртуалізація мережевих функцій (NFV) сприяє адаптації NGN до вимог IoT, забезпечуючи створення окремих логічних сегментів для M2M-комунікацій, Smart City та промислових платформ.

Технології NB-IoT та LTE-M дозволяють підтримку мільйонів енергоефективних пристроїв. Edge та Fog Computing знижують навантаження на транспортні мережі та затримки, що є критичним для застосувань на

кшталт автономного транспорту чи телемедицини. AI/ML у NGN дають змогу мережам самостійно аналізувати трафік, прогнозувати навантаження, здійснювати динамічну маршрутизацію, балансування та виявлення кіберзагроз. Зростання обсягів переданих даних та розвиток нових цифрових сервісів створюють вимоги до вдосконалення методів керування ресурсами та безпеки. Використання Zero Trust Architecture (ZTA) дозволяє впроваджувати автоматизовані системи контролю доступу, де кожен запит на підключення перевіряється на автентичність незалежно від його походження. Крім того, розвиток квантової криптографії та алгоритмів Quantum Key Distribution (QKD) дозволяє створити захищені канали зв'язку, які неможливо скомпрометувати навіть за використання квантових комп'ютерів. Економічна ефективність NGN також залишається одним із найважливіших аспектів її розвитку.

Завдяки віртуалізації ресурсів, автоматизованому управлінню мережею та динамічному масштабуванню, NGN дозволяє суттєво знизити операційні витрати (OPEX) та капітальні витрати (CAPEX) операторів зв'язку. Це відкриває можливості для гнучкого розгортання нових сервісів, скорочення часу впровадження інноваційних рішень та оптимізації споживання енергії. Подальший розвиток NGN спрямований на інтеграцію з мережами 6G, що забезпечить терабітні швидкості, мінімальні затримки та інтелектуальне управління трафіком. Використання THz-діапазону, голографічного зв'язку та нейромережевих алгоритмів відкриває нові горизонти для телекомунікацій.

Мережі наступного покоління (NGN) відіграють ключову роль у трансформації телекомунікаційної інфраструктури, створюючи основу для гнучких, масштабованих і економічно ефективних цифрових сервісів. Завдяки впровадженню технологій віртуалізації, інтелектуального управління мережею, хмарних платформ і енергоефективних рішень, NGN забезпечують оптимізацію витрат, підвищення якості обслуговування та прискорення інноваційних процесів. Перспективи інтеграції з майбутніми

мережами 6G, використання терагерцового діапазону, голографічного зв’язку та нейромережевих алгоритмів управління свідчать про те, що NGN є не лише кроком уперед у розвитку комунікацій, а й базовою платформою для цифрового суспільства нового покоління. Детальніше про функціональну структуру NGN йтиметься в наступному розділі, присвяченому архітектурі цих мереж.

2.2 Архітектура рівня доступу в NGN

2.2.1 Основні рівні NGN та їх взаємодія

Архітектура мережі наступного покоління (NGN) базується на концепції функціонального розподілу, де кожен рівень виконує окремі завдання, але водночас забезпечує інтегровану взаємодію з іншими рівнями. Структура NGN зазвичай формується як чотирирівнева система: рівень доступу, транспортний рівень, рівень керування та рівень надання послуг.

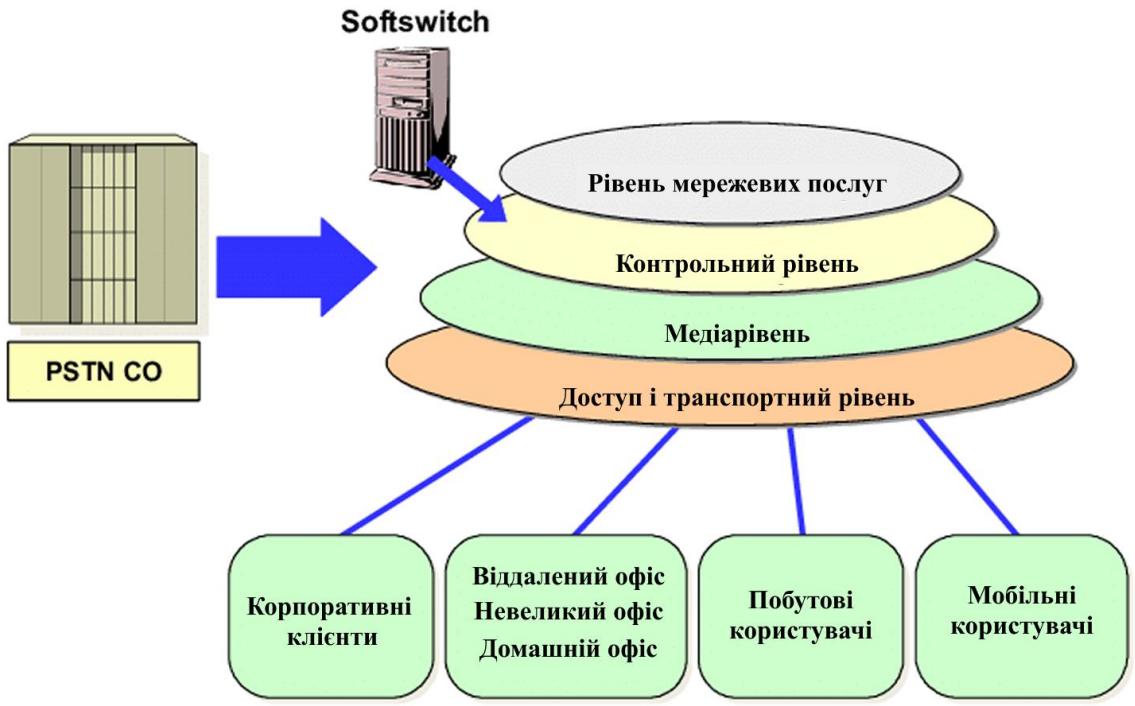


Рисунок 2.2 – Багатошарова архітектура NGN як еволюція від PSTN до пакетної моделі

Такий підхід описується в рекомендаціях MCE-T, зокрема Y.2011, і є основою для побудови мультисервісних, масштабованих і ефективних мереж зв’язку. Рівень доступу забезпечує підключення користувачів до транспортної частини мережі. Тут реалізуються різні технології, зокрема провідні (FTTx, xDSL, Ethernet) та безпроводові (Wi-Fi, 4G, 5G). Основне завдання цього рівня — концентрація трафіку від великої кількості користувачів і його передача до опорної інфраструктури. Серед ключових вимог до рівня доступу виділяють масштабованість, підтримку QoS, енергоефективність і здатність працювати з великим числом гетерогенних пристроїв, зокрема IoT. З огляду на це, NGN повинна підтримувати інтеграцію із пристроями різного типу, швидкості та протоколів доступу, що досягається шляхом підтримки відкритих інтерфейсів і модульної архітектури.

Транспортний рівень відповідає за надійну передачу даних по мережі між її окремими елементами. Він реалізований на основі IP-протоколу з розширенням MPLS (Multiprotocol Label Switching), що забезпечує гнучку маршрутизацію, механізми забезпечення якості обслуговування, швидке відновлення з’єднань у разі збою, а також підтримку віртуальних приватних мереж (VPN). Саме цей рівень формує магістральну частину мережі, що дозволяє інтегрувати NGN з іншими доменами, такими як телефонна мережа загального користування (PSTN), мережі даних (PDN), цифрова мережа з інтеграцією послуг (ISDN) тощо. Рівень управління реалізує інтелектуальні функції контролю сигналізації, комутації викликів, маршрутизації, автентифікації, авторизації та обліку (AAA). Ключовими елементами є Softswitch — програмний комутатор, що забезпечує логіку обробки викликів, контролер медіа-шлюзів (MGC), а також система управління викликами IMS з її ядром CSCF (Call Session Control Function).

IMS функціонує на базі SIP-протоколу, який дозволяє встановлювати, змінювати та завершувати мультимедійні сеанси. У складі CSCF виділяють

кілька модулів: Proxy-CSCF, Serving-CSCF, InterrogatingCSCF, кожен з яких відповідає за окрему ділянку контролю виклику — від ініціації до завершення сесії. Саме цей рівень є ключовим для забезпечення взаємодії з додатками та користувацькими сервісами, адже він виконує функції взаємодії з платформами надання послуг через стандартизовані інтерфейси, зокрема SIP, Diameter, Parlay.

Рівень послуг містить прикладні платформи, які відповідають за реалізацію телекомунікаційних сервісів: IP-телефонія, відеозв'язок, хмарні сервіси, послуги IPTV, управління профілями користувачів, тарифікацію тощо. Тут застосовується модель розподілених обчислень із підтримкою NFV (Network Function Virtualization), що дозволяє віртуалізувати сервери додатків і масштабувати обчислювальні ресурси у відповідь на зміну навантаження. Рівень послуг взаємодіє з рівнем керування через відкриті API, дозволяючи впроваджувати нові сервіси без необхідності зміни базової мережевої інфраструктури.

У рамках концепції MEC (Multi-access Edge Computing) функціональність цього рівня може частково розгортатися на периферії мережі, що суттєво зменшує затримки та підвищує ефективність обслуговування. Всі рівні NGN зв’язані між собою через стандартизовані інтерфейси, що дозволяє забезпечити сумісність між різними постачальниками обладнання та програмного забезпечення. Така архітектура створює передумови для реалізації відкритої екосистеми телекомунікаційних послуг із високим ступенем гнучкості, масштабованості, безпеки та економічної ефективності. Завдяки цьому мережі NGN здатні адаптуватися до зростаючих вимог цифрової епохи, надаючи універсальну платформу для впровадження нових сервісів у сфері зв’язку, розваг, бізнесу.

Продовжуючи розгляд архітектури рівня доступу в NGN, варто зосередити увагу на тому, що взаємодія між рівнями не є лише лінійним передаванням інформації, а реалізує механізми двостороннього інформаційного обміну, що забезпечує динамічну адаптацію мережі до

поточних умов. Наприклад, рівень послуг може ініціювати зміну параметрів маршрутизації на транспортному рівні у відповідь на зміну трафіку або вимог до якості обслуговування (QoS), що забезпечується через протоколи керування політиками, зокрема COPS (Common Open Policy Service) або Diameter. Ще однією важливою особливістю NGN є використання уніфікованих моделей обслуговування трафіку, зокрема через інтеграцію систем управління чергами, обліку трафіку, виявлення аномалій та застосування адаптивних механізмів балансування навантаження. Ці функції можуть бути реалізовані як на рівні керування, так і безпосередньо на вузлах доступу, що забезпечує інтелектуальну маршрутизацію трафіку на основі його типу, пріоритету та профілю користувача. Наприклад, у системах IMS інтеграція з HSS (Home Subscriber Server) дозволяє використовувати індивідуальні профілі для управління доступом, пріоритезації викликів та застосування тарифікаційних політик.

На рівні доступу дедалі більшого значення набуває застосування технологій програмно-визначених мереж (SDN), що дозволяють централізовано управляти конфігурацією пристроїв доступу, маршрутизаторів, комутаторів та точок агрегації. Контролери SDN, як правило, інтегруються на рівні керування і мають доступ до глобального бачення стану мережі, що дозволяє динамічно змінювати топологію з’єднань, змінювати політики QoS, реагувати на перевантаження або потенційні атаки. У свою чергу, тісна інтеграція з NFV дозволяє розгортати віртуалізовані функції (VNF), які забезпечують такі задачі, як фаєрвол, NAT, VPN, DPI або служби моніторингу. У випадку високої концентрації трафіку на рівні доступу, що характерно для щільно населених районів, великих офісних центрів або індустріальних об’єктів, NGN реалізує розподілену архітектуру доступу, що ґрунтується на концепції edge computing. Це дозволяє розміщувати обчислювальні ресурси ближче до користувача, знижуючи затримки, скорочуючи навантаження на магістральні сегменти та підвищуючи стійкість системи до відмов окремих елементів. У цьому

контексті відбувається зближення понять "рівень доступу" та "рівень обробки даних", оскільки фізичні вузли доступу часто стають частиною більш складної системи, яка реалізує функції кешування, аналітики або попередньої обробки трафіку.

В умовах подальшого розвитку концепцій Smart City, індустрії 4.0 та автоматизованого транспорту архітектура NGN з багаторівневою структурою забезпечує необхідну гнучкість, модульність і масштабованість. Вона дозволяє швидко адаптуватися до нових викликів, упроваджувати нові сервіси, використовувати відкриті API для інтеграції з зовнішніми платформами та забезпечувати високий рівень безпеки й керованості. З урахуванням цього, архітектурна модель NGN є не лише основою сучасної телекомунікаційної інфраструктури, а й фундаментом для побудови майбутніх розподілених цифрових екосистем.

2.2.2 Використання SDN/NFV на рівні доступу

Інтеграція технологій SDN (Software-Defined Networking) та NFV (Network Functions Virtualization) у структуру рівня доступу NGN відкриває нові горизонти для оптимізації, гнучкого управління та масштабованості мережевих ресурсів. Традиційні мережі доступу, орієнтовані на жорстко прив’язану інфраструктуру, стикаються з низкою обмежень, пов’язаних із залежністю від апаратного забезпечення, складністю впровадження нових сервісів та високою вартістю оновлень. У цьому контексті програмновизначені мережі забезпечують можливість централізованого управління маршрутизацією та конфігурацією обладнання через SDN-контролери, а віртуалізація функцій дозволяє замінити фізичні елементи мережі (наприклад, шлюзи, маршрутизатори, брандмауери) на гнучкі програмні модулі — VNF (Virtualized Network Functions). На рівні доступу NGN SDN виконує роль уніфікованого механізму контролю за мережею,

який дозволяє оператору централізовано керувати політиками доступу, пріоритезацією трафіку, балансуванням навантаження та маршрутизацією.

Однією з найважливіших функцій SDN у цьому середовищі є динамічне керування топологією мережі відповідно до змін у навантаженні або до вимог SLA (Service Level Agreement), що дозволяє досягти адаптивності та економічної ефективності. У системах з великою кількістю абонентів SDN забезпечує можливість автоматичної сегментації трафіку, швидкого масштабування ресурсів при підключенні нових пристроїв або сервісів, а також реалізації політик безпеки, наприклад, через OpenFlow ACL (Access Control Lists). NFV, у свою чергу, виконує стратегічну функцію перенесення мережевих сервісів із фізичного обладнання в хмарну або віртуалізовану інфраструктуру.

На рівні доступу це означає, що функції таких пристроїв, як BRAS (Broadband Remote Access Server), шлюзи безпеки, DHCP-сервери, можуть бути реалізовані як програмні модулі, що розгортаються на стандартному серверному обладнанні. Такий підхід дає змогу провайдерам динамічно масштабувати ресурси відповідно до навантаження, швидко розгортати нові сервіси, а також знижувати витрати на закупівлю та обслуговування апаратних засобів. Крім того, віртуалізоване середовище спрощує оновлення програмного забезпечення та запровадження інноваційних функцій, зокрема DPI (Deep Packet Inspection) або аналітики трафіку в реальному часі. Синергія SDN та NFV особливо ефективна у середовищі мультисервісного доступу, де до мережі одночасно підключені стаціонарні, мобільні, IoTпристрої, індустріальні сенсори тощо. Наприклад, завдяки NFV можна створювати віртуалізовані вузли доступу для підключення пристроїв з протоколами NB-IoT або LTE-M, при цьому використовуючи SDNконтролери для моніторингу їхнього навантаження і розподілу доступу до канальних ресурсів. У випадку інтенсивного використання ресурсоємних сервісів (IPTV, VoIP, AR/VR), SDN-контролер може автоматично перенаправити трафік через менш

завантажені маршрути або змінити топологію логічної мережі, мінімізуючи затримки та підвищуючи продуктивність.

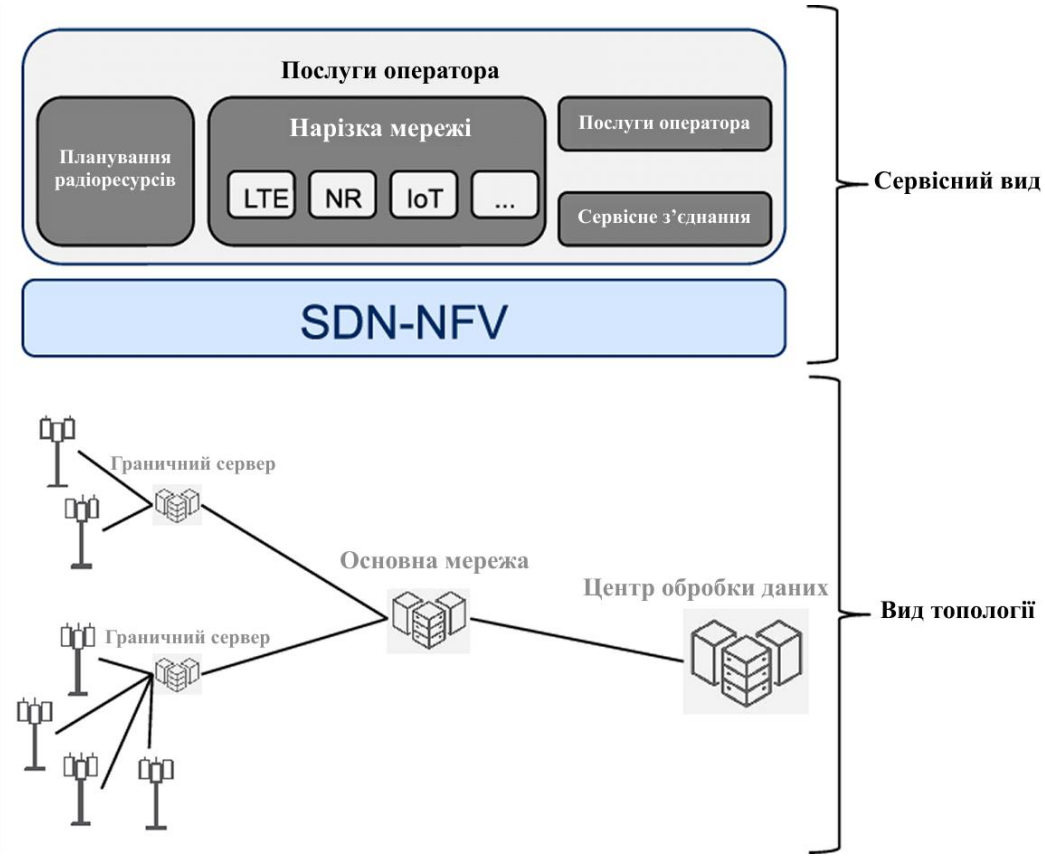


Рисунок 2.3 – SDN/NFV на рівні доступу

З технічної точки зору, впровадження SDN/NFV на рівні доступу потребує побудови гнучкої інфраструктури із використанням відкритих інтерфейсів, зокрема OpenFlow для передачі правил між контролером та мережевими пристроями, а також MANO (Management and Orchestration) — для управління життєвим циклом віртуалізованих функцій. У рекомендаціях ETSI NFV-IFA та ITU-T Y.2026 прописані вимоги до оркестрації функцій доступу в середовищі NGN.

Архітектурно, доступ на базі SDN/NFV будується з виділенням плоскостей: управління (control plane), користувача (data plane) та оркестрації (orchestration plane), що дозволяє чітко розмежовувати логіку прийняття рішень і виконання задач. Впровадження SDN/NFV на рівні доступу сприяє

також побудові енергозберігаючих мереж. Завдяки можливості централізованого управління енергоспоживанням, автоматичного виводу обладнання у сплячий режим при зниженні навантаження та оптимізації маршрутизації, NGN-мережі з SDN/NFV значно знижують витрати на експлуатацію.

Такий підхід є критично важливим для реалізації концепції "Green Networking", яка активно просувається в рамках стратегії цифрової трансформації ЄС та рекомендацій МСЕ з енергоефективного дизайну мереж. Загалом, інтеграція SDN та NFV на рівні доступу у NGN забезпечує високу ступінь автоматизації, адаптивності та масштабованості, що дозволяє не тільки ефективно управляти поточними ресурсами, а й оперативно впроваджувати інновації, відповідати на зростаючі вимоги цифрових сервісів, і забезпечувати стабільну роботу мережевої інфраструктури навіть в умовах динамічної зміни трафіку або непередбачених збоїв.

Такий підхід закладає основу для майбутніх мереж 6G, де гнучкість і програмно-визначена логіка стануть базовими критеріями для інфраструктури доступу. В контексті забезпечення якості обслуговування (QoS), використання SDN/NFV дає змогу реалізовувати адаптивну пріоритезацію трафіку на основі політик, заданих як адміністратором, так і динамічно — згідно з реальними умовами навантаження.

Наприклад, у пікові години трафік відеоконференцій або голосових дзвінків може отримувати вищий пріоритет порівняно з оновленнями програмного забезпечення чи передаванням файлів. Контролери SDN можуть оновлювати маршрутизаційні таблиці в режимі реального часу, спрямовуючи високопріоритетні потоки найменш завантаженими маршрутами, що зменшує затримки та ймовірність втрати пакетів. Особливого значення на рівні доступу набуває інтеграція з MEC (Multi-access Edge Computing), адже саме на периферії мережі SDN-контролери можуть взаємодіяти з локальними вузлами обчислення, розміщеними безпосередньо біля абонентів.

Це дозволяє забезпечити інтелектуальний розподіл обчислювального навантаження, прискорити обробку запитів користувачів та зменшити затримки до критичного рівня — менш як 10 мс, що є необхідною умовою для сервісів реального часу, таких як VR/AR, автономний транспорт або віддалене хірургічне втручання. З точки зору впровадження, сучасні оператори телекомунікаційних послуг активно адаптують свої інфраструктури до SDN/NFV-моделі. Наприклад, реалізація концепції Access Network Virtualization передбачає повну віртуалізацію пристроїв доступу та функцій агрегації, що дозволяє поступово відмовитися від спеціалізованого обладнання на користь уніфікованих обчислювальних платформ.

У такій архітектурі, так звані white-box рішення (універсальні комутатори без прив’язки до виробника) можуть бути динамічно налаштовані під потреби мережі, що ще більше здешевлює інфраструктуру доступу і сприяє прозорості постачальників обладнання. Інтеграція SDN та NFV у мережу NGN на рівні доступу є логічним етапом еволюції телекомунікаційних систем, що відповідає вимогам цифрової трансформації. Вона дозволяє не лише знизити операційні витрати та підвищити ефективність, але й створює умови для масового впровадження нових послуг, побудови адаптивної, захищеної та клієнтоорієнтованої інфраструктури, яка відповідає потребам як кінцевих користувачів, так і корпоративного сектору. З урахуванням розвитку технологій 6G, IoT та штучного інтелекту, така гнучка модель архітектури стане базисом для майбутніх комунікаційних платформ з підтримкою повної віртуалізації, автономного управління та наскрізної оптимізації на всіх рівнях мережі.

2.3 Вимоги до абонентського доступу в NGN

В умовах стрімкої еволюції інформаційно-комунікаційних технологій вимоги до абонентського доступу в NGN виходять за межі традиційного уявлення про «підключення користувача» до мережі. Сьогодні рівень

доступу виконує не лише роль фізичної точки входу до мережі, а й є критичним елементом забезпечення якості, надійності, безпеки та масштабованості телекомунікаційних послуг. Серед ключових вимог, які пред'являються до сучасних систем доступу, виділяють забезпечення високої пропускної здатності, гнучкості масштабування, підтримки QoS/QoE, захисту інформації, енергоефективності та здатності до інтеграції з багатосервісними середовищами, включаючи IoT, MEC та хмарні платформи.

Однією з базових вимог є забезпечення гарантованої якості обслуговування (QoS), що визначається сукупністю параметрів, таких як затримка, джиттер, втрата пакетів і доступна смуга пропускання. Відповідно до рекомендацій ITU-T Y.1541 та E.800, для кожного класу сервісу (включаючи реального часу, потокове відео, неголосовий трафік тощо) встановлені допустимі межі мережевих параметрів. Наприклад, для телефонного сервісу затримка не повинна перевищувати 150 мс, а втрата пакетів – 0.1%. Ці нормативи є обов'язковими при проєктуванні мережі доступу, оскільки саме цей сегмент є найбільш вразливим до варіацій рафіку та впливу зовнішніх чинників.

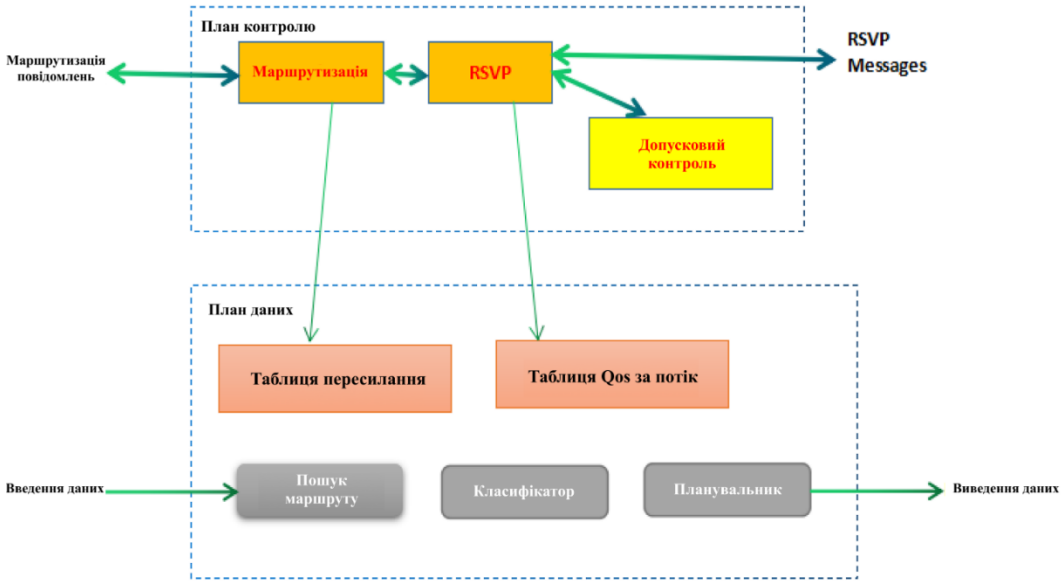


Рисунок 2.4 – функціональна схема управління якістю обслуговування (QoS)

Доповненням до QoS є концепція QoE (Quality of Experience) — суб’єктивне сприйняття користувачем якості послуги, що враховує не лише технічні параметри, а й очікування, тип терміналу, поведінку додатку, навіть контекст використання. Системи моніторингу мережі повинні забезпечувати не лише збір технічних метрик, а й оцінювання взаємозв’язку між фактичною якістю та користувацьким досвідом, адаптуючи конфігурацію мережі у відповідь на виявлені відхилення.

Це потребує впровадження інтелектуальних платформ управління обслуговуванням, заснованих на принципах SLA-контролю, аналізу телеметрії в реальному часі та AI-алгоритмів коригування. Ще одним ключовим аспектом є масштабованість, що стосується здатності мережі доступу обслуговувати динамічно зростаючу кількість користувачів і пристроїв без деградації якості. З огляду на стрімке зростання IoT-пристроїв, від систем доступу очікується підтримка масового підключення терміналів, що функціонують у різних режимах енергоспоживання, передають короткі пакети даних з великою періодичністю та мають специфічні вимоги до затримок.

У цьому контексті реалізація класів обслуговування на основі DSCP (Differentiated Services Code Point) дозволяє класифікувати трафік за пріоритетністю та типом, забезпечуючи ефективний розподіл ресурсів між критичними та некритичними потоками. Не менш важливою вимогою є надійність і безперервність обслуговування, які повинні відповідати рівню доступності “п’ять дев’яток” (99.999%), що еквівалентно простою не більше ніж 5,5 хвилин на рік. Це означає, що на рівні доступу повинні бути реалізовані механізми швидкого резервування, автоматичного відновлення після відмов, діагностики та ізоляції несправностей, а також підтримка гарячої заміни компонентів. Надійність прямо пов’язана з топологією мережі доступу: застосування архітектур з надлишковими зв’язками, кільцевими або деревоподібними структурами дозволяє забезпечити безперервність сервісу навіть при фізичних ушкодженнях ліній зв’язку. З огляду на загрозливе

зростання обсягів кіберзагроз, вимоги до інформаційної безпеки є критично важливими.

Мережа доступу повинна забезпечувати автентифікацію користувачів, шифрування трафіку, захист від атак типу DoS/DDoS, контроль доступу на основі політик та відповідність стандартам захисту даних, таким як ISO/IEC 27001. Особливо це актуально для конвергентних сервісів і корпоративних клієнтів, які використовують NGN як базу для передачі чутливої інформації. З огляду на високі енергозатрати в зоні доступу, дедалі більшої ваги набуває енергоефективність. Інтелектуальне керування живленням, автоматичне вимкнення неактивних портів та адаптивне регулювання потужності передавачів у бездротових системах дозволяють зменшити експлуатаційні витрати й вуглецевий слід. Ці підходи є складовою концепції Green Networking, що активно впроваджується у NGN.

Сучасні вимоги до доступу визначаються потребами у високій пропускній здатності, низькій латентності та підтримці мультипротокольного середовища. Для обслуговування відео у форматі 4K/8K, інтерактивного та реального часу контенту необхідні швидкості від 1 Гбіт/с для побутових користувачів та понад 10 Гбіт/с для бізнес-сегменту.

Таким чином, вимоги до NGN-доступу охоплюють технічні, економічні та користувацькі аспекти, що потребують впровадження інноваційних рішень, відкритих протоколів та гнучкої інтеграції між рівнями мережі. Ефективність NGN безпосередньо залежить від обґрунтованого вибору технології доступу, що потребує подальшого порівняльного аналізу їх характеристик і доцільності застосування.

2.4 Висновки до розділу 2

У другому розділі здійснено систематизований огляд сучасних технологій абонентського доступу, що застосовуються при побудові мереж NGN. Розглянуто провідні дротові рішення, зокрема технології xDSL,

Ethernet, FTTx, GPON, XG-PON та NG-PON2, які демонструють високу пропускну здатність, надійність і відповідність мультисервісним вимогам NGN-інфраструктури. Визначено, що пасивні оптичні мережі (PON) відіграють ключову роль у модернізації «останньої милі» завдяки своїй енергоефективності та масштабованості.

Також проаналізовано бездротові технології, серед яких 5G FWA, LTE, Wi-Fi 6, mmWave та Massive MIMO. Вони забезпечують мобільність, гнучке покриття та високу швидкість доступу, особливо актуальні для віддалених чи густонаселених районів. Окрему увагу приділено технологіям доступу для IoT та M2M-комунікацій — NB-IoT, LTE-M, LoRaWAN і Sigfox, які забезпечують високу щільність підключень при мінімальному енергоспоживанні.

У межах порівняння технологій окреслено їхні переваги, обмеження та доцільність застосування залежно від умов розгортання мережі. Також підкреслено важливість інтеграції доступу з архітектурою SDN/NFV, що забезпечує централізоване управління, гнучке конфігурування та зменшення витрат.

Узагальнюючи, розділ демонструє, що ефективна організація абонентського доступу в NGN-мережах можлива лише за умови поєднання інноваційних технологій провідного та бездротового доступу з урахуванням технічних, економічних і експлуатаційних чинників.

3 АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ АБОНЕНТСЬКОГО ДОСТУПУ

3.1 Провідні технології абонентського доступу

У структурі NGN провідні технології абонентського доступу відіграють важливу роль як під час впровадження, так і в процесі експлуатації. Вони забезпечують стабільність з’єднання, високу пропускну здатність та відповідність вимогам до QoS і QoE. Завдяки зрілості та стандартизації, провідний доступ ефективно використовує наявну інфраструктуру й дозволяє масштабувати ресурси відповідно до зростання попиту. Серед основних технологій вирізняють DSL (ADSL, VDSL, G.fast), FTTx, Ethernet, DOCSIS та PLC. Вибір залежить від технічних, економічних і топологічних умов. DSL — одна з найстаріших, але й надалі актуальних технологій, що базується на використанні мідної пари телефонної мережі. ADSL підходить для домогосподарств із переважно вхідним трафіком, тоді як VDSL і G.fast забезпечують вищі швидкості на коротких відстанях, підвищуючи потенціал у FTTdp-архітектурах. Попри обмеження в пропускній здатності, DSL залишається доцільною альтернативою в регіонах, де оптичний доступ економічно невигідний. Технологія добре інтегрується з NGN через підтримку PPPoE, VLAN, QoS та інших логічних механізмів керування трафіком.

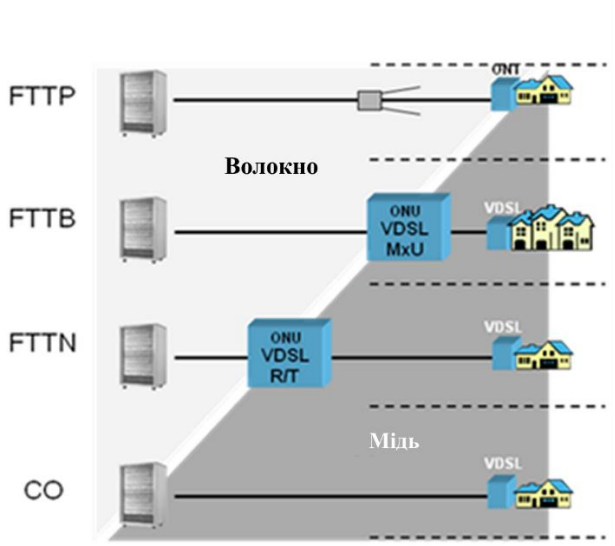


Рисунок 3.1 - Порівняння топологій FTTx: FTTP, FTTB, FTTN та традиційного доступу

Подальшим етапом еволюції доступу стало впровадження волоконнооптичних систем - FTTx (Fiber to the x), зокрема FTTH (до оселі), FTTB (до будівлі), FTTC (до бордюру/вузла). Найбільш перспективною є архітектура FTTH, яка забезпечує повністю оптичне середовище від центрального вузла до користувача, усуваючи будь-які електромагнітні спотворення, втрати сигналу й обмеження швидкості. Технології GPON (Gigabit Passive Optical Network), XG-PON і NG-PON2 дозволяють реалізувати симетричний гігабітний доступ, підтримують до 128 абонентів на одному волокні та мають вбудовані механізми шифрування трафіку, QoS, SLA-моніторинг і динамічну алокацію ширини каналу.

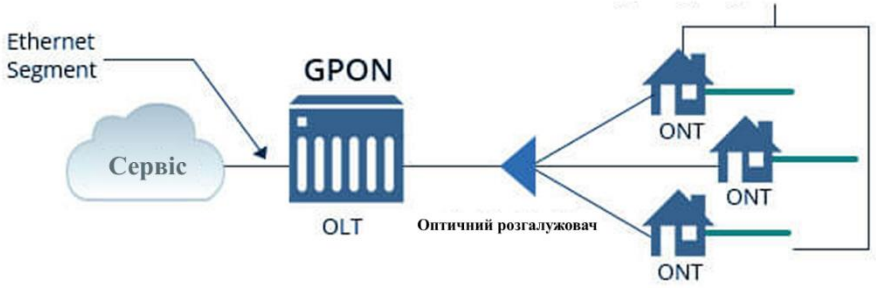


Рисунок 3.2 - Топологія використання GPON

Важливою перевагою оптичних мереж є їхня довгострокова ефективність - інвестиції в прокладання оптичного кабелю окуповуються через тривалий термін служби (20+ років) та мінімальні витрати на обслуговування. Завдяки високій надійності, масштабованості та сумісності з хмарними й периферійними платформами, саме FTTH вважається найбільш відповідною до концепції NGN технологією провідного доступу. Ще одним напрямом є кабельні мережі, побудовані за стандартом DOCSIS. Останні версії - DOCSIS 3.1 і DOCSIS 4.0 - забезпечують високошвидкісний доступ до Інтернету по коаксіальному кабелю з підтримкою частот до 1,2 ГГц, симетричну передачу даних та інтеграцію з IP-сервісами.

DOCSIS є особливо корисним для операторів кабельного телебачення, які можуть мінімізувати витрати за рахунок використання наявної інфраструктури. Застосування OFDM-модуляції, канального бондингу та механізмів управління смугою пропускання робить DOCSIS конкурентоспроможним навіть порівняно з волоконно-оптичними системами на останньому відрізку до користувача.

Окрему нішу займає технологія PLC (Power Line Communication), що базується на передачі даних по електромережі. Хоча її ефективність обмежена шумами та нестабільністю електричних ліній, вона може бути використана як резервне рішення або у випадках, коли прокладення окремого кабелю неможливе з технічних або архітектурних причин. PLC особливо корисна у сферах промислової автоматизації, системах "розумного дому", а також у тимчасових інсталяціях. Усі перелічені технології можуть бути інтегровані в архітектуру NGN через відповідні шлюзи доступу, мультисервісні маршрутизатори, модулі оптичної агрегації та системи моніторингу. Вибір конкретного рішення залежить від балансу між вартістю впровадження, очікуваною якістю обслуговування, масштабами покриття та подальшими перспективами модернізації. Провідні технології продовжують залишатися незамінною складовою NGN завдяки своїй високій стабільності,

передбачуваності параметрів та повній відповідності принципам багаторівневої, модульної архітектури мереж нового покоління.

3.2 Безпровідні технології абонентського доступу

Попри високу стабільність і технічну досконалість провідних технологій абонентського доступу, вони не завжди задовольняють сучасні вимоги до мобільності та швидкості розгортання, особливо в сільських і важкодоступних районах. Це стимулює розвиток безпровідних технологій у межах NGN, які доповнюють провідні рішення та стають невід'ємною частиною мультисервісної інфраструктури. Вони забезпечують оперативне масштабування, мобільність і незалежність від фізичних каналів. Безпровідний доступ поділяється на стільникові мережі (3G, 4G, LTE, 5G), Wi-Fi, технології для IoT (NB-IoT, LoRaWAN), а також супутникові рішення. Найбільше значення для NGN мають LTE і 5G, які поєднують високу пропускну здатність, низьку затримку та підтримку широкого спектру сервісів. LTE дозволяє передавати дані на швидкості до 300 Мбіт/с і підтримує ключові інструменти QoS та MIMO. Його розвиток у форматі LTE Advanced Pro орієнтований на підключення великої кількості пристроїв — що критично важливо для IoT. Мережі 5G, крім гігабітної швидкості та затримки менше 1 мс, підтримують мережевий поділ (network slicing), що дає змогу формувати логічно розділені канали для окремих сервісів. Це робить 5G ключовим інструментом для реалізації новітніх цифрових застосувань, зокрема в сферах телемедицини, автономного транспорту та індустріального IoT.

Технології SDN, NFV та MEC у комбінації з 5G підсилюють гнучкість і ефективність NGN. Wi-Fi залишається ключовою технологією у забезпеченні локального бездротового доступу в офісах, освітніх установах та публічних просторах. Сучасні стандарти Wi-Fi 5 (802.11ac) і Wi-Fi 6 (802.11ax) підтримують велику кількість підключень, ефективне управління спектром

(OFDMA) та якість сервісу (QoS). Новітній стандарт Wi-Fi 6E, що працює у діапазоні 6 ГГц, додатково знижує завади та покращує стабільність передачі у перевантаженому середовищі.

Завдяки простоті впровадження та відкритій архітектурі, Wi-Fi широко використовується як доповнення до стільникових мереж у концепціях об’єднаного доступу (FMC). Окрему роль відіграють бездротові технології з низьким енергоспоживанням для IoT: NB-IoT, LTE-M та LoRaWAN. NB-IoT забезпечує енергоефективність та надійне покриття у приміщеннях для пристроїв із низькими вимогами до швидкості. LoRaWAN, що працює в неліцензованому спектрі, є ефективним рішенням для сенсорних мереж, моніторингу середовища, розумного сільського господарства тощо. Супутниковий зв’язок забезпечує покриття у віддалених або складних для інфраструктурного підключення регіонах. Сучасні LEO-системи, як-от Starlink та OneWeb, демонструють затримки

3.3 Конвергентні технології доступу NGN

З огляду на зростання складності цифрових сервісів та потребу в уніфікованому користувацькому досвіді, конвергентні технології доступу дедалі більше виступають основною умовою ефективної реалізації NGN. Провідні та безпровідні технології, хоча й мають свої переваги, лише у поєднанні можуть забезпечити високу якість обслуговування, надійність та адаптивність до різних сценаріїв підключення. Конвергенція в NGN передбачає інтеграцію гетерогенних середовищ у єдину інфраструктуру з наскрізним управлінням трафіком, ресурсами та сервісами. Такий підхід дозволяє реалізувати концепцію повсюдного доступу («any service, any device, anytime»), незалежно від фізичного каналу підключення — оптичного, стільникового, Wi-Fi або коаксіального. Реалізація конвергентної архітектури зазвичай базується на платформах FMC, IMS, мультиінтерфейсних шлюзах, а також підтримці технологій безперервного перемикання (handover) між

доступами. Наприклад, користувач, що переходить із домашнього FTTH на мобільну мережу 5G, зберігає безперервність IP-сесії завдяки IMS, що синхронізує маршрутизацію, авторизацію та керування зв’язком на рівні ядра мережі.

Особливо важливою властивістю конвергентного доступу є можливість забезпечення єдиного QoS-контролю для гетерогенних мереж. Завдяки реалізації політик обслуговування, диференціації трафіку за пріоритетами (DSCP, 802.1p), резервуванню смуги пропускання для критичних сервісів та інтеграції з DPI-модулями, оператори можуть дотримуватись параметрів SLA для кожного клієнта, незалежно від фізичного інтерфейсу. Це особливо важливо для сервісів реального часу, таких як VoIP, IPTV, відеоконференцзв’язок, де навіть незначні коливання затримки чи втрат пакетів суттєво знижують якість сприйняття. Конвергентні технології доступу є ключовим елементом гнучкої побудови NGN-мереж, оскільки дозволяють ефективно використовувати різнорідну інфраструктуру — від FTTH у міських умовах до LTE/5G або супутникового зв’язку у сільських та важкодоступних регіонах. Завдяки уніфікованій логіці керування такі сегменти об’єднуються у спільне віртуалізоване середовище з прозорим доступом до сервісів. Це стало можливим завдяки використанню технологій SDN та NFV. SDN забезпечує централізоване керування мережею через логічно відокремлений контролер, тоді як NFV дозволяє гнучко розгортати функції мережевого рівня у віртуальному середовищі. Така архітектура надає NGN-мережам властивості самоорганізації, масштабованості й адаптивності.

Конвергентний підхід особливо важливий для сценаріїв Smart City, IoT, eHealth, де пристрої мають різні вимоги до пропускної здатності, затримок і безпеки. Через єдину платформу забезпечується наскрізна взаємодія між усіма видами доступу — від оптоволокна до бездротових протоколів — із централізованим моніторингом та аналізом. З технічного боку ключову роль відіграє архітектура E2E на базі IP/MPLS, яка забезпечує логічну агрегацію трафіку незалежно від фізичного інтерфейсу. Це дає змогу гарантувати QoS,

безпеку та стабільність у мультисервісному середовищі NGN. У цій моделі всі точки доступу, незалежно від того, чи це ONU в FTTH, eNodeB в LTE, або точка доступу Wi-Fi, підключаються до IP-ядра через мультисервісні гейти (multi-access edge nodes), які виконують функції BRAS (Broadband Remote Access Server), DHCP Relay, NAT, VLAN Tag Translation та PPPoE Termination.

У випадку мобільного доступу цю функціональність реалізують елементи EPC (Evolved Packet Core) — такі як PGW, SGW, MME, які забезпечують управління сесіями, облік, шифрування та маршрутизацію трафіку. Ключовою технічною основою NGN-конвергенції є уніфікований механізм ідентифікації абонентів, що реалізується через платформу AAA (Authentication, Authorization, Accounting). Це забезпечує єдину авторизацію незалежно від середовища доступу — FTTH, LTE чи Wi-Fi — із використанням Radius або Diameter.

Підтримка Mobile IP гарантує сталість IP-адреси при зміні каналу зв’язку, що критично для VoIP і мультимедійних сервісів. Для уніфікованої передачі даних застосовуються тунелювальні технології (L2TP, GRE, IPSec), які дозволяють прозоро інкапсулювати трафік у рамках NGN. Зокрема, L2oGRE чи L2oMPLS використовуються для забезпечення Layer-2 підключення між віддаленими сегментами.

Сервісна якість гарантується через профілі обслуговування, що формуються при автентифікації абонента й реалізуються на BRAS, EPC або SDNконтролерах.

Вони включають параметри мінімальної смуги, пріоритету, затримки тощо. QoS забезпечується за допомогою механізмів маркування (DSCP, 802.1p), формування трафіку (shaping/policing), планувальників черг (WFQ, SP) та динамічного управління ресурсами. Гарантії безперервності з’єднання забезпечуються технологіями адаптивного handover, такими як 802.11r для Wi-Fi, X2/S1 handover у LTE/5G, або multiRAT підхід. У NGN додатково

застосовуються механізми Policy-Based Routing, що дозволяють маршрутизувати трафік залежно від типу сервісу, часу чи політик оператора.

У контексті безпеки, NGN-конвергентна інфраструктура реалізує багаторівневу модель захисту. Це включає:

- Шифрування на рівні IPsec, TLS, MACsec;
- золяцію абонентських потоків через VLAN, VRF, GRE-tunnels;
- Контроль доступу за допомогою NAC (Network Access Control);
- Моніторинг через системи виявлення вторгнень (IDS/IPS), NGFW (Next Generation Firewall);
- Динамічний контроль загроз з інтеграцією в SIEM-системи (Security Information and Event Management).

Таким чином, технічна реалізація конвергентного доступу в NGN ґрунтується на складній ієрархії функціональних компонентів, стандартів і протоколів, які взаємодіють між собою у реальному часі. Вона потребує глибокої координації між транспортною, сервісною, контрольної та аналітичною площинами. Але результатом цієї складності є архітектура, що забезпечує повну прозорість сервісів, незалежно від середовища, пристрою чи місця підключення — що і становить основну цінність концепції NGN у сучасній телекомунікаційній парадигмі.

3.4 Порівняльний аналіз технологій доступу

3.4.1 FTTH (Fiber To The Home)

FTTH (Fiber To The Home) є однією з найбільш досконалих технологій фіксованого доступу, що передбачає прокладання оптичного волокна безпосередньо до оселі користувача. На відміну від FTTB або FTTC, FTTH забезпечує повністю волоконну архітектуру, що гарантує найвищі показники пропускної здатності, низькі затримки та стабільність з’єднання. Базовою технологією реалізації FTTH є GPON (Gigabit Passive Optical Network), яка

побудована за принципом «точка-мультипункт». Одне OLT (оптичний термінал провайдера) через пасивний спліттер обслуговує десятки ONU/ONT без активних елементів між ними. GPON підтримує динамічне виділення смуги (DBA), QoS, шифрування трафіку, VLAN та інтеграцію з IMS для надання мультисервісних послуг (IPTV, VoIP, хмари).

Переваги FTTH/GPON:

- Гігабітна швидкість у двох напрямках.
- Висока стійкість до завад, нульові втрати сигналу на дистанціях до 20 км.
- Пасивна інфраструктура з низькими експлуатаційними витратами.
- Гнучка підтримка QoS, логічне розділення абонентів.
- Інтеграція з SDN/NFV для адаптивного управління мережею.

Обмеження:

- Високі витрати на прокладання (CAPEX), особливо у міській забудові.
- Залежність від фізичного стану волоконної мережі.
- Обмеження кількості абонентів на спліттері через загасання сигналу.

FTTH із GPON є оптимальним вибором для реалізації NGN у містах і районах з високими вимогами до QoS та трафіку. Незважаючи на високі початкові витрати, технологія забезпечує довготривалу стабільність, масштабованість і якість обслуговування.

3.4.2 Технологія xDSL у NGN

Технологія xDSL (Digital Subscriber Line) охоплює групу методів передачі даних по існуючих мідних телефонних лініях, зокрема ADSL, VDSL, VDSL2, SHDSL та інші. У контексті абонентського доступу в NGN вона розглядається як перехідне рішення, що дозволяє задіяти наявну

інфраструктуру телефонних мереж для надання широкосмугових послуг. Найбільш актуальними реалізаціями у NGN є VDSL2 (Very-high-bit-rate DSL) та G.fast, які забезпечують значно вищі швидкості у порівнянні з попередніми стандартами (ADSL).

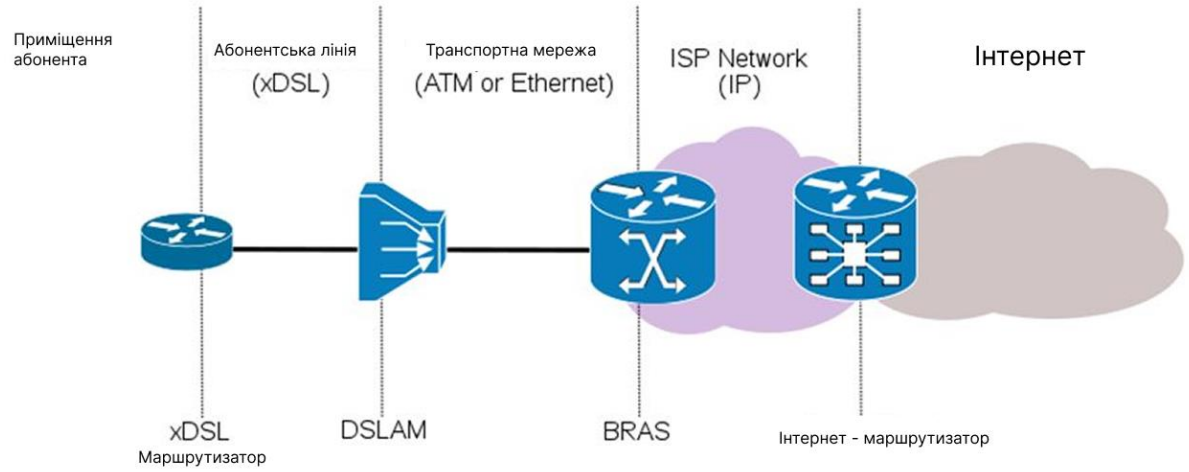


Рисунок 3.2 - Архітектура xDSL у NGN

Таблиця 3.1 - Технічні особливості VDSL2 / G.fast

Параметр	VDSL2 (17a профіль)	G.fast (106 МГц)
Швидкість прийому	до 100 Мбіт/с	до 1 Гбіт/с (на <100 м)
Швидкість передачі	до 50 Мбіт/с	до 500 Мбіт/с
Дальність	до 1,5 км (VDSL2)	до 250 м (G.fast)
Канал передачі	симетричний/асиметричний	здебільшого асиметричний
Тип кабелю	мідна витка пара (POTS)	мідна пара, FTTdp
QoS	через VLAN, IP-тегування	IP-пріоритезація

Однією з головних переваг xDSL є мінімальні капітальні витрати завдяки використанню існуючої телефонної інфраструктури. Це робить її надзвичайно привабливою для масового впровадження у мало забезпечених регіонах, сільській місцевості або історичних центрах, де прокладання оптоволокна є технічно складним або економічно невиправданим. Крім того, xDSL дозволяє швидко масштабувати кількість підключень, оскільки практично в кожному об’єкті вже є POTS-лінія. VDSL2-профілі також забезпечують підтримку три-плей сервісів (інтернет, VoIP, IPTV) для звичайного побутового користувача з помірним трафіком. Незважаючи на доступність, xDSL має фізіологічно закладені обмеження, зумовлені природою мідного кабелю. Основна проблема — це деградація швидкості при збільшенні довжини лінії, особливо в VDSL2, де швидкість падає до 20–30 Мбіт/с на відстані понад 700 м. Ще однією проблемою є перешкоди та перехресні завади (crosstalk) у старих телефонних кабельних пучках, які мають низьку екранізацію. Також DSLтехнології чутливі до електричних коливань, погодних умов, замикань, старих муфт. Інфраструктурно, DSLAM не завжди може підтримувати повноцінні NGN-сервіси, особливо у застарілих вузлах без підтримки VLAN або SNMP-керування. Використання xDSL у NGN найчастіше відбувається в межах архітектури FTTC (Fiber To The Cabinet) або FTTB (Fiber To The Building).

Оптичне волокно проводиться до DSLAM, після чого остання ділянка — до користувача — залишається мідною. Це дозволяє впровадити доступ до IMS-сервісів через SIP, підтримку IPTV через Multicast IGMP Proxy, VoIP-трафік через VLAN 802.1p та застосування політик QoS. xDSL — це практичне, але тимчасове рішення для NGN у регіонах із обмеженим бюджетом або складними умовами для розгортання FTTH. Її головною перевагою є доступність та швидке впровадження, а основним обмеженням — технічна деградація при збільшенні відстані. В умовах правильної топології (FTTC/FTTB) та інтеграції з сучасними BRAS/IMSплатформами

технологія все ще може забезпечувати базовий рівень мультисервісного доступу.

3.4.3 Технологія DOCSIS

DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification) - це міжнародний стандарт, який визначає методи передавання цифрових даних по коаксіальній інфраструктурі кабельного телебачення. Версія DOCSIS 3.1, затверджена CableLabs у 2013 році, є однією з найсучасніших реалізацій фіксованого широкосмугового доступу з можливістю передачі даних на швидкості до 10 Гбіт/с у напрямку downstream та до 1–2 Гбіт/с у напрямку upstream.

Цей стандарт відповідає ключовим вимогам NGN - мультисервісність, QoS, масштабованість - і часто використовується у міських умовах, де існує розгалужена кабельна інфраструктура.

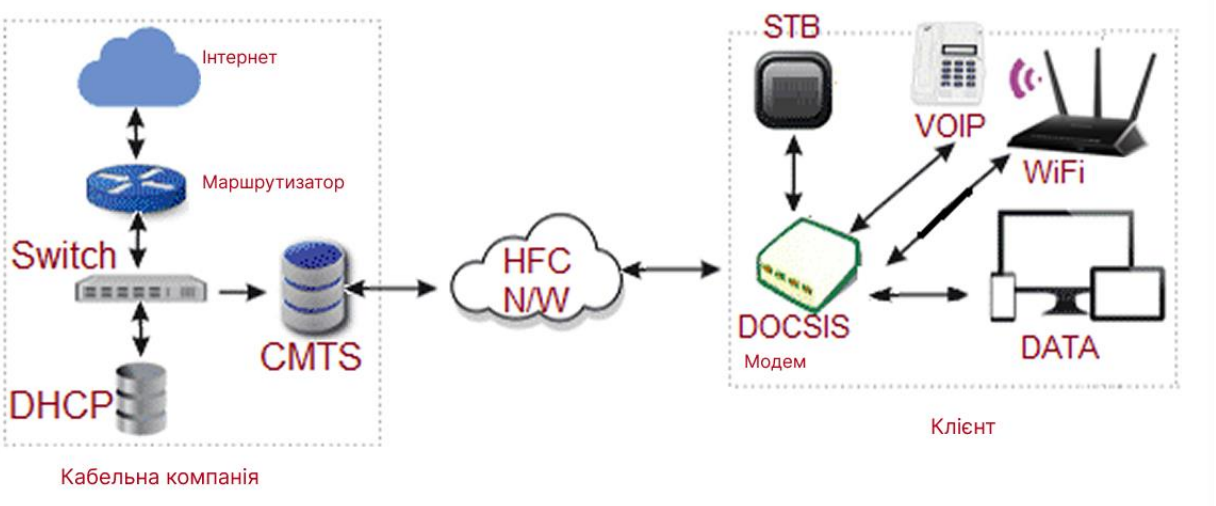


Рисунок 3.3- Архітектура DOCSIS

Технологія має низку визначальних переваг:

- Висока швидкість передачі даних, порівнянна з оптичними технологіями, без потреби повного оновлення фізичної мережі.

- Мінімальні витрати на впровадження, оскільки використовується вже прокладена коаксіальна інфраструктура.
- Гібридна інтеграція з оптичними мережами (HFC) — забезпечує поступовий перехід до FTTH.
- Повна підтримка QoS, включаючи класи трафіку, пріоритети, гарантії смуги.
- Шифрування та безпека (BPI+, AES-128/256), що актуально для інтеграції у NGN.

Незважаючи на потужність, DOCSIS має певні недоліки:

- Спільний канал зв'язку — декілька абонентів використовують одну й ту ж смугу, що може призводити до зниження продуктивності у години пікового навантаження.
- Залежність від стану коаксіального сегменту — старі з'єднання, муфти, розгалужувачі можуть створювати перешкоди.
- Низька ефективність для високої щільності користувачів, оскільки ширина каналу на одного користувача зменшується.
- Не підтримує повної симетрії — upstream значно обмежений у порівнянні з downstream, що погано підходить для офісів з високим обсягом передачі даних у мережу.

DOCSIS 3.1 — це перехідна та компромісна технологія NGN-доступу з високим рівнем інтеграції в уже існуючу інфраструктуру кабельного телебачення. Вона ідеально підходить для щільно заселених міських районів, де присутній коаксіальний сегмент і де впровадження FTTH пов’язане з великими витратами. Технологія забезпечує високі швидкості, стабільний QoS, підтримку мультисервісу, що дозволяє її розглядати як повноцінну альтернативу у NGN-середовищі.

3.4.4 Технологія 5G у NGN

5G розглядається не лише як еволюція мобільних мереж, а як ключова технологія абонентського доступу в NGN, що забезпечує бездротове широкосмугове підключення з високими показниками пропускної здатності, низькими затримками та масштабованістю.

Основними перевагами є:

- Універсальність доступу: підтримка як мобільного, так і фіксованого бездротового підключення (FWA);
- Масовість підключень: до 1 млн пристроїв/км², що критично для IoT-сценаріїв;
- Network slicing: логічне поділення фізичної мережі на віртуальні сегменти з ізольованим SLA;
- Низька затримка (<10 мс): досягається завдяки MEC (периферійним обчисленням), що розміщуються біля точки доступу.

Технологія побудована на основі:

- SDN/NFV — для програмного управління мережею та віртуалізації функцій;
- Архітектури 5GC SBA — сервісно-орієнтованої моделі ядра, сумісної з концепцією NGN.

Однак, попри всі технологічні переваги, впровадження 5G супроводжується певними викликами. Зокрема, значними є капітальні витрати на побудову щільної сітки базових станцій, особливо при використанні міліметрового діапазону (mmWave), який має обмежене покриття. Така топологія вимагає не тільки багатьох базових станцій, а й наявності волоконно-оптичного транспорту до кожного вузла (fronthaul), що може стати інфраструктурною проблемою в багатьох регіонах. Крім того, керування ресурсами у сценаріях з network slicing потребує розвинених систем моніторингу, прогнозування навантаження та автоматизованого оркестрування — тобто значної складності в управлінні мережею. Інтеграція

5G у NGN переважно відбувається через такі технології як IMS (IP Multimedia Subsystem) для реалізації голосових сервісів Vo5G, MEC і SDN — для контекстної маршрутизації трафіку, а також через IP-Core архітектуру, яка дозволяє гнучко керувати QoS на рівні кожного користувача чи додатку. Таким чином, 5G у середовищі NGN виступає не лише як мобільна платформа, але й як універсальний механізм доступу - особливо в умовах, де традиційні оптоволоконні технології (FTTH) технічно чи економічно неможливі. Такий підхід вже застосовується в концепції «Zero Fiber Access», де саме 5G забезпечує високошвидкісний доступ у сільських і віддалених регіонах, замінюючи класичні фіксовані рішення.

Таблиця 3.2 - Технічні параметри 5G

Параметр	Значення	Примітка
Швидкість прийому	до 10 Гбіт/с	у mmWave-діапазоні
Швидкість передачі	до 1–2 Гбіт/с	залежно від спектру
Затримка	до 1 мс	при використанні URLLC
Щільність підключень	до 1 млн пристроїв/км²	сценарій mMTC для IoT
Діапазони	Sub-6 GHz / mmWave / n78 / n258	ліцензовані та неліцензовані
QoS	Повна підтримка SLA через slicing	гарантовані послуги на різні сегменти
Інфраструктура ядра	5GC (Service-Based Architecture)	сумісне з NFV, SDN, MEC, IMS

3.4.5 Порівняльний аналіз

На основі детального розгляду технологій FTTH (GPON), xDSL (VDSL2/G.fast), DOCSIS 3.1 та 5G можна зробити висновок, що кожна з них має свої переваги залежно від умов розгортання, наявної інфраструктури та цільових сервісів.

Таблиця 3.3 - Порівняльна таблиця технологій абонентського доступу в NGN

Критерій	FTTH (GPON)	xDSL (VDSL2 / G.fast)	DOCSIS 3.1	5G (FWA)
Пропускна здатність	до 2,5 Гбіт/с	до 1000 Мбіт/с	До 10 Гбіт/с	до 10 Гбіт/с (DL)
Затримка	<5 мс	5–15 мс	5–20 мс	<10 мс (при MEC)
Вартість впровадження	Висока	Низька/ середня	Середня	Висока
Інфраструктура	Волоконно-оптична	Мідна пара	Коаксіал/ HFC	Радіодоступ
Сумісність із NGN	Висока	Обмежена	Висока	Висока (IMS, SDN, NFV)
Масштабованість	Висока	Обмежена	Середня	Висока
Тип середовища	Фіксоване	Фіксоване	Фіксоване	Мобільне/бездротове

На підставі аналізу та техніко-економічного порівняння можна зробити наступні висновки:

- FTTH (GPON) є найперспективнішою технологією в умовах нового будівництва або оновлення міської інфраструктури, де можливо реалізувати волоконну мережу «до будинку/до квартири». Вона забезпечує найвищу якість обслуговування (QoS), найнижчу затримку та максимальну пропускну здатність.
- xDSL, зокрема G.fast, може розглядатись як тимчасове або бюджетне рішення в умовах, де модернізація інфраструктури поки неможлива. Ця технологія не забезпечує довгострокової масштабованості, але дозволяє швидко впровадити NGN-сервіси на базі існуючої мідної інфраструктури.
- DOCSIS 3.1 має високу ефективність у щільно забудованих районах, де вже наявна коаксіальна інфраструктура (наприклад, мережі кабельного телебачення). Завдяки підтримці IP, QoS і мультисервісів DOCSIS може бути повноцінною NGN-технологією для операторів кабельного доступу.
- 5G виступає як стратегічне рішення для сценаріїв мобільного доступу, резервування, а також як єдина опція в регіонах без фіксованої інфраструктури. Особливо ефективною є її інтеграція в NGN у зв’язці з SDN, MEC, NFV та IMS.

Таким чином, універсального рішення не існує — вибір оптимальної технології залежить від:

- типу забудови (місто / передмістя / село),
- наявності інфраструктури (оптика / коаксіал / мідь),
- цільових сервісів (IPTV, IoT, VoIP),
- бюджету оператора,
- стратегічного бачення розвитку NGN.

Ці приклади ілюструють, що ефективність технології не визначається її максимальною швидкістю чи новизною, а тим, наскільки вона адаптована до реального середовища застосування та здатна інтегруватися у багаторівневу

архітектуру NGN. Саме така інженерна гнучкість є базовою вимогою до сучасної інфраструктури цифрового доступу.

3.5 Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено глибокий аналіз та класифікацію технологій абонентського доступу відповідно до критеріїв типу середовища передавання, архітектурних особливостей та придатності до мультисервісного використання в умовах NGN. Розгляд охоплює як традиційні підходи, засновані на існуючій інфраструктурі (наприклад, xDSL), так і сучасні рішення, зокрема оптичні (FTTH, GPON, XG-PON), бездротові (5G, WiMAX, Wi-Fi 6) та гібридні технології.

Визначено основні групи технологій: дротові, оптичні, бездротові, супутникові, кабельні та електромережеві (BPL), з детальним описом їхніх технічних характеристик, переваг і недоліків. Проаналізовано питання конвергенції мереж доступу, яке стає актуальним у зв’язку з потребою інтеграції різних середовищ передавання в єдину логічну інфраструктуру NGN. Також розглянуто проблеми сумісності, стандартизації та стратегії розвитку технологій доступу в контексті сучасних вимог до QoS, масштабованості та кібербезпеки.

Особливу увагу приділено порівняльному аналізу технологій доступу за ключовими параметрами: пропускна здатність, відстань передачі, вартість впровадження, час розгортання та адаптивність до зростаючого трафіку. На основі аналізу зроблено висновок, що жодна технологія не є універсальною — ефективне рішення передбачає гнучке поєднання різних варіантів доступу з урахуванням специфіки регіону, щільності абонентів, типів послуг та економічних чинників.

Таким чином, класифікація та порівняння технологій абонентського доступу дозволяє сформувати основу для прийняття обґрунтованих рішень

при проєктуванні NGN-мереж, з урахуванням їх подальшої масштабованості, надійності та якості обслуговування.

4 АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ АБОНЕНТСЬКОГО ДОСТУПУ В NGN

4.1 Критерії вибору технологій абонентського доступу в NGN

Абонентський доступ у мережах наступного покоління (NGN) виступає не просто фізичним або логічним з'єднанням між кінцевим користувачем і мережею оператора — він є критичною ланкою, через яку реалізується доставка всієї множини телекомунікаційних послуг. Це з'єднання є «першим кроком» для передачі даних, голосу та відео, а також основним компонентом, що забезпечує функціонування хмарних сервісів, IoT-пристроїв, дистанційного доступу та інших високотехнологічних сервісів.

У рамках концепції NGN, де мережа орієнтована на уніфіковану IPархітектуру, абонентський доступ стає особливо важливим, оскільки саме на цьому рівні формуються вимоги до якості обслуговування (QoS), адаптивності трафіку, швидкодії та захищеності. Водночас, цей доступ має бути економічно доцільним, легко масштабованим і здатним до підтримки мультисервісного навантаження з урахуванням динамічного характеру сучасного трафіку.

Від параметрів абонентського сегмента напряму залежить можливість реалізації основних архітектурних принципів NGN, серед яких домінують:

- Гнучкість у підтримці нових сервісів без зміни фізичної інфраструктури;
- Масштабованість у контексті підключення додаткових абонентів;
- Мобільність і підтримка конвергентного доступу (мобільні й фіксовані користувачі в єдиному середовищі);
- Якість та безперервність сервісів незалежно від типу навантаження (голос, відео, хмара, AR/VR тощо).

На відміну від попередніх поколінь мереж, де архітектура була сервісноорієнтованою (наприклад, окремі канали для телефонії, окремі для телебачення, окремо – інтернет), NGN ґрунтується на принципі повної сервісної конвергенції. Уся інформація передається через єдину уніфіковану

транспортну мережу IP/MPLS, а отже, вимоги до стабільності, надійності та якості обслуговування зосереджуються саме на доступному рівні.

З технічної точки зору, "остання миля" — тобто зв’язок від вузла оператора до кінцевого пристрою користувача — є найвразливішою ділянкою мережі, де можуть виникати затримки, втрати пакетів, нестабільність сигналу або навіть повне відключення сервісу. Тому забезпечення якісного абонентського доступу є фундаментальним завданням при побудові NGN. Необхідно не лише обрати технологію з достатньою пропускною здатністю, а й гарантувати дотримання нормативних стандартів ITU-T, ETSI, IEEE тощо. Таким чином, можна стверджувати, що ефективна реалізація NGN-послуг у великій мірі залежить від коректного вибору, проектування та оптимізації саме абонентського сегмента. У телекомунікаційних мережах нового покоління правильний вибір технології доступу визначається не абстрактними технічними характеристиками, а реальними можливостями забезпечення цільових показників якості сервісу, масштабування, надійності й економічної доцільності.

Пропускна здатність (bandwidth) — один із базових критеріїв, що визначає, скільки трафіку може бути передано каналом доступу за одиницю часу. Для NGN важливо враховувати не лише пікову швидкість, заявлену у специфікаціях, а й стабільну середню швидкість при навантаженні, рівень асиметрії між аплінком та даунлінком, і здатність до динамічного перерозподілу ресурсів. Наприклад, GPON має пікову швидкість 2,5 Гбіт/с у напрямку до користувача, однак ця швидкість ділиться між усіма абонентами сегмента. Якщо сегмент обслуговує 32 абоненти, то реальна середня пропускна здатність може становити ~78 Мбіт/с. Це вже впливає на можливість перегляду відео у форматі 4K з одночасним використанням хмарних сервісів. У бездротових технологіях (наприклад, 5G) номінальні швидкості досягають 10 Гбіт/с, але вони сильно залежать від щільності базових станцій, радіоумов та кількості користувачів у секторі.

Затримка (latency) — час, необхідний для проходження пакета через мережу. У NGN вона критична для сервісів реального часу: VoIP, геймінг, AR/VR. Наприклад, при затримці понад 200 мс у VoIP користувач відчуває «ехо» або накладення голосу, що значно знижує QoE. Особливу увагу слід приділяти джитеру — флуктуаціям затримки між пакетами. У відеоконференціях джитер понад 30 мс призводить до «заморожування» кадрів або затримки звуку. Провідні технології (FTTH, DOCSIS 3.1) забезпечують стабільну затримку

Надійність визначається стабільністю каналу й часом на відновлення з'єднання після збою. Для критичних NGN-сервісів, особливо у фінансовому секторі або охороні здоров'я, прийнятним вважається рівень доступності 99,999% (так звані п'ять дев'яток). Наприклад, FTTH не має активних елементів у полі, що знижує кількість можливих точок відмови — це пасивна архітектура, яка є стійкішою до вологи, електромагнітних завад, грозових розрядів. На відміну від цього, коаксіальні кабелі в DOCSIS-системах або мідна пара в xDSL схильні до деградації сигналу та механічних пошкоджень. У бездротових мережах надійність залежить не тільки від обладнання, а й від щільності покриття, якісного планування радіомережі, резервування електроживлення базових станцій.

Сучасні NGN повинні забезпечувати динамічне масштабування як у бік кількості абонентів, так і з точки зору навантаження. Наприклад, у містах з інтенсивною забудовою можливість використання технології FTTB (Fiber-tothe-Building) з подальшим розгалуженням через Ethernet дозволяє обслуговувати десятки квартир, не перевантажуючи магістраль. Мобільні технології, навпаки, легше масштабуються географічно, однак вимагають частішого оновлення спектрального ресурсу та планування сот. Високий потенціал масштабованості демонструє NFV-інфраструктура, де збільшення кількості користувачів передбачає лише віртуальне розгортання додаткових функцій (наприклад, BRAS або firewall), без фізичного втручання.

Обираючи технологію доступу, необхідно враховувати як початкові витрати на розгортання (CAPEX), так і довгострокові витрати на підтримку (OPEX). Так, прокладення оптичного волокна до кожного абонента (FTTH) — дорогий захід, однак у перспективі це дозволяє значно скоротити витрати на обслуговування. xDSL, навпаки, дешевий у розгортанні, оскільки використовує наявну мідну інфраструктуру, однак має високі експлуатаційні витрати (енергоспоживання, обмеження швидкості, короткий життєвий цикл). У сценаріях, де фінансування обмежене, доцільно комбінувати різні технології: наприклад, 5G для нових мікрорайонів без прокладеної інфраструктури, а DOCSIS — для районів із наявною коаксіальною мережею.

Ураховуючи, що NGN орієнтована на повну IP-архітектуру, безпека є критично важливою. На рівні доступу мають бути реалізовані методи шифрування трафіку (TLS, DTLS), автентифікація клієнта, контроль доступу, захист від атак на інтерфейсах ONU/CPE. 5G, наприклад, вперше реалізує наскрізне шифрування на рівні доступу (3GPP-defined), а DOCSIS 3.1 впроваджує 128-бітне шифрування від головної станції до клієнта. FTTH може інтегрувати функції безпеки на рівні ONU та OLT із використанням IEEE 802.1X.

Технологія має підтримувати основні архітектурні елементи NGN — IMS (IP Multimedia Subsystem), SDN, QoS-пріоритизацію трафіку, інтеграцію з мультисервісним середовищем. Наприклад, для забезпечення якості VoIP потрібно мати підтримку DiffServ (DSCP), RSVP, або MPLS-тегів у мережі доступу.

4.1.1 Аналіз критеріальної моделі вибору технологій доступу в NGN

З метою обґрунтованого вибору технології абонентського доступу для мережі наступного покоління (NGN) була розроблена критеріальна модель на основі методу зваженої суми. Модель дозволяє об'єктивно оцінити кожну з альтернативних технологій (FTTH, xDSL, DOCSIS 3.1, 5G), враховуючи їх

відповідність критеріям, про які згадано вище. Розрахунок базується на моделі зваженої суми балів, яка дозволяє кількісно оцінити ефективність кожної технології за низкою визначених критеріїв. Загальна формула для кожної технології така:

$$S = \sum_{i=1}^{n} (w_i + x_i)$$

де:

- S — інтегральний бал;
- w_i — вага критерію iii;
- x_i — бальна оцінка за критерієм iii;
- n — кількість критеріїв.

Таблиця 4.1 – Інтерпретація оцінок за кількістю балів

Бал	Інтерпретація
1	Дуже слабка відповідність критерію
2	Слабка, з суттєвими обмеженнями
3	Середній рівень відповідності
4	Добра, з незначними компромісами
5	Висока відповідність, безкомпромісна

Розпочнемо виставлення баллів під кожний із вище описаних критеріїв, з використанням інтерпретанційної таблиці.

Пропускна здатність

- FTTH (GPON): до 2,5 Гбіт/с - бал 5
- xDSL (VDSL2): до 100 Мбіт/с - бал 2
- DOCSIS 3.1: до 10 Гбіт/с, але знижена ефективність при навантаженні - бал 4
- 5G (mmWave): до 10 Гбіт/с, нестабільна у внутрішніх приміщеннях - бал 5 за потенціал

Затримка:

FTTH: <5 мс – 5

xDSL: до 20–40 мс – 3

DOCSIS 3.1: колективний доступ, 20-50 мс – 3

5G: <10 мс (в ідеальних умовах) - 4, через залежність від покриття

Надійність:

FTTH: пасивна оптика, без активних елементів – 5

DOCSIS: активна електроніка – 4

5G: залежить від щільності мережі та завад – 3

xDSL: старі кабельні мережі, чутливість до перешкод - 3

Вартість:

xDSL: використання існуючої мідної інфраструктури – 5

DOCSIS: середня вартість, коаксіальна мережа вже існує – 3

FTTH: дорогий монтаж, висока CAPEX – 2

5G: висока ціна за базові станції та щільну інфраструктуру - 3

Масштабованість:

5G: гнучка структура, підтримка mMTC – 5

FTTH: модульне нарощування портів OLT – 4

DOCSIS: обмеження через сегментацію вузлів – 3

xDSL: залежність від якості мідної пари - 2

Безпека:

FTTH (GPON) — використовує AES шифрування, автентифікація ONU – 5

xDSL – базовий рівень безпеки, вразливий до перехоплення: 3

DOCSIS 3.1 – BPI+ (Baseline Privacy Interface Plus), обов’язкове шифрування: 4

5G – повна підтримка TLS/IPSec, зашифроване управління ключами: 5

Сумісність з NGN:

FTTH – IP-навантаження, сумісність з IMS: 5

DOCSIS 3.1 – IP-based архітектура, підтримує IMS з оновленнями: 4

xDSL: обмежена підтримка IMS без глибокої інтеграції – 3

5G – проєктувалась під NGN і 5G Core: 5

Використані критерії та ваги для оцінювання технологій доступу в NGN.

Таблиця 4.2 – Вага кожного критерію

№	Критерій	Вага (w_i)
1	Пропускна здатність	0.25
2	Затримка	0.20
3	Надійність	0.15
4	Вартість	0.15
5	Масштабованість	0.10
6	Безпека	0.10
7	Сумісність з NGN	0.05

1. FTTH (GPON)

Бали: 4.45

- Пропускна здатність: 5
- Затримка: 5
- Надійність: 5
- Вартість: 2
- Масштабованість: 4
- Безпека: 5
- Сумісність: 5

Розрахунок: 5*0.25 + 5*0.2 + 5*0.15 + 2*0.15 + 4*0.1 + 5*0.1 + 5*0.05 = 4.45

2. xDSL (VDSL)

Бали: 2.95

- Пропускна здатність: 2
- Затримка: 3

- Надійність: 3
- Вартість: 5
- Масштабованість: 2
- Безпека: 3
- Сумісність: 3

Розрахунок: 2*0.25 + 3*0.2 + 3*0.15 + 5*0.15 + 2*0.1 + 3*0.1 + 3*0.05 = 2.95

3. DOCSIS 3.1

Бали: 3.55

- Пропускна здатність: 4
- Затримка: 3
- Надійність: 4
- Вартість: 3
- Масштабованість: 3
- Безпека: 4
- Сумісність: 4

Розрахунок: 4*0.25 + 3*0.2 + 4*0.15 + 3*0.15 + 3*0.1 + 4*0.1 + 4*0.05 = 3.55

4. 5G

Бали: 4.2

- Пропускна здатність: 5
- Затримка: 4
- Надійність: 3
- Вартість: 3
- Масштабованість: 5
- Безпека: 5
- Сумісність: 5

Розрахунок: 5*0.25 + 4*0.2 + 3*0.15 + 3*0.15 + 5*0.1 + 5*0.1 + 5*0.05 = 4.2

Результати проведеного оцінювання технологій абонентського доступу в NGN, що базуються на зваженій сумі балів за ключовими критеріями, мають не лише теоретичну, але й прикладну цінність. Кожна з технологій (FTTH, xDSL, DOCSIS 3.1, 5G) отримала свою інтегральну оцінку, яка дозволяє краще зрозуміти її сильні та слабкі сторони, а також порівняти їх між собою на основі кількісних показників. У реальному проєктуванні NGN-мереж така оцінка може бути використана для прийняття рішень щодо вибору тієї чи іншої технології залежно від умов: наявної інфраструктури, бюджету, потреб у пропускній здатності або масштабованості.

Наприклад, якщо головним критерієм є якість і надійність, то очевидно, що FTTH буде найкращим варіантом, навіть незважаючи на високу вартість. У випадках, коли бюджет обмежений, а в регіоні вже існує мідна інфраструктура, більш доцільним буде xDSL, хоча його оцінка нижча. Крім того, ці оцінки дають змогу звернути увагу на ті параметри, які найбільше «просідають» у кожної технології. Наприклад, у DOCSIS високі показники пропускної здатності, але середній рівень масштабованості. Це означає, що під час її впровадження потрібно звертати увагу саме на можливості розширення та сегментації. Або 5G — має відмінні технічні показники, але залежить від покриття і щільності розміщення базових станцій, що також потрібно враховувати на етапі планування. Узагальнюючи, можна сказати, що критеріальна оцінка — це не просто рейтинг технологій, а реальний інструмент, який допомагає об’єктивно обрати рішення і зрозуміти, як далі працювати з обраною технологією в умовах NGN.

4.2 Оптимізація використання ресурсів в NGN

У мережах наступного покоління (Next Generation Networks, NGN) поняття «ресурсу» набуває багатовимірного та міждисциплінарного значення. Якщо в традиційних телекомунікаційних системах основними ресурсами вважались фізичні канали передачі даних, пропускна здатність та

спектр частот, то в NGN це поняття охоплює також логічні, обчислювальні, енергетичні, топологічні та програмні компоненти, необхідні для забезпечення надання послуг високої якості (QoS) та з урахуванням досвіду користувача (QoE). NGN орієнтована на підтримку мультисервісного середовища, де одночасно передаються голос, відео, дані, телеметрія, хмарні сервіси, і всі ці сервіси мають різні вимоги до затримок, надійності, пропускної здатності та пріоритетності. Саме тому ресурс в NGN — це не лише елемент, що бере участь у фізичній передачі пакета, а будь-яка складова інфраструктури, яка впливає на здатність мережі стабільно та ефективно обслуговувати користувача.

Класифікація ресурсів у NGN:

1. Фізичні ресурси:

1.1.1. Канали передачі: оптоволоконні, мідні, коаксіальні, радіоканали (включаючи LTE та 5G).

1.1.2. Термінальне та активне обладнання: маршрутизатори, комутатори, базові станції, ONU, OLT, DSLAM, BRAS тощо.

1.1.3. Стан фізичних каналів впливає на швидкість, затримки, рівень втрат і надійність обслуговування. Наприклад, модернізація з xDSL до FTTH дозволяє суттєво знизити рівень затримки, втрат та покращити загальний QoE.

2. Логічні ресурси:

2.1.1. Таблиці маршрутизації, VLAN, MPLS-тунелі, QoS-політики.

2.1.2. Маршрутизація трафіку, клас сервісу, пріоритезація потоків.

2.1.3. Ці ресурси можуть бути адаптовані без фізичної перебудови мережі. Наприклад, змінюючи правила QoS, можливо змінити поведінку маршрутизаторів і комутаторів для різних типів трафіку.

3. Обчислювальні ресурси:

3.1.1. ЦПУ, оперативна пам’ять, віртуалізовані середовища, сховища даних.

3.1.2. Розміщуються в дата-центрах, на вузлах агрегування трафіку, в хмарній інфраструктурі.

3.1.3. У NFV та SDN-архітектурах саме обчислювальні потужності забезпечують виконання мережевих функцій. Перевантаження CPU в BRAS або SBC може призвести до зниження якості сервісу навіть при вільній пропускній здатності.

4. Енергетичні ресурси:

4.1.1. Потужність джерел живлення, резервування електроживлення, енергоефективність обладнання.

4.1.2. Зростає актуальність у контексті екологічної стійкості мереж та оптимізації OPEX.

5. Топологічні ресурси:

5.1.1. Структура мережі, кількість та положення вузлів, наявність резервування, рівень централізації.

5.1.2. Наприклад, надлишкова кількість хопів або нераціональна маршрутизація можуть спричинити додаткові затримки або втрати.

Оптимізація ресурсів у NGN базується на технологіях, що забезпечують ефективне управління трафіком і масштабованість. MPLS формує логічні маршрути для обходу перевантажень, SDN централізовано керує маршрутами в реальному часі. Балансування навантаження та CDN підвищують стабільність і якість сервісу.

NFV знижує витрати, дозволяючи віртуалізувати мережеві функції. DBA в GPON забезпечує динамічний розподіл пропускної здатності відповідно до навантаження. Таким чином, інтеграція згаданих технологій у рамках NGN формує адаптивну інфраструктуру, яка відповідає вимогам до масштабованості, стабільності та ефективного використання мережевих ресурсів. Для комплексного аналізу ефективності методів оптимізації ресурсів у NGNмережах доцільно здійснити їх порівняння за ключовими критеріями, такими як: ступінь зменшення затримок, зниження навантаження на інфраструктуру, гнучкість впровадження в існуючі архітектури, а також

загальна складність реалізації з точки зору технологічних та адміністративних ресурсів.

Критерій зменшення затримки відображає здатність технології скорочувати час передачі даних, що є критично важливим для сервісів реального часу. Зниження навантаження демонструє, наскільки метод дозволяє зменшити обсяг транзитного трафіку або рівень використання каналів. Гнучкість впровадження показує адаптивність технології до змінних умов, включаючи масштабованість і здатність інтегруватися з іншими мережевими рішеннями. Складність реалізації враховує потребу в додаткових налаштуваннях, обладнанні, ПЗ або технічній підтримці.

Таблиця 4.3 – Порівняльна ефективність методів оптимізації ресурсів у NGN

Метод оптимізації	Зменшення затримки	Зниження навантаження	Гнучкість впровадження	Складність реалізації
Трафік-інжиніринг (MPLS, SDN)	Середнє (10–15%)	Середнє (10–15%)	Висока	Середня
Балансування навантаження	Середнє (15–20%)	Середнє (15%)	Висока	Середня
Динамічне розподілення (DBA)	Високе (до 25%)	Високе (до 20%)	Середня	Висока
Кешування та CDN	Високе (до 30%)	Високе (до 25%)	Висока	Низька
Віртуалізація функцій (NFV)	Низьке (5–10%)	Середнє (до 15%)	Дуже висока	Висока

Як видно з аналізу, найбільш універсальними у практичному застосуванні є методи кешування контенту (CDN) та балансування навантаження, які мають високий показник ефективності при помірному

рівні складності реалізації. Водночас, технології, що передбачають глибоку інтеграцію, зокрема NFV та DBA, забезпечують суттєвий потенціал з точки зору масштабованості, однак потребують значних зусиль під час впровадження. Трафік-інжиніринг на основі SDN та MPLS є ефективним інструментом для контролю QoS та SLA, особливо в операторах зв'язку з великою абонентською базою та складною топологією.

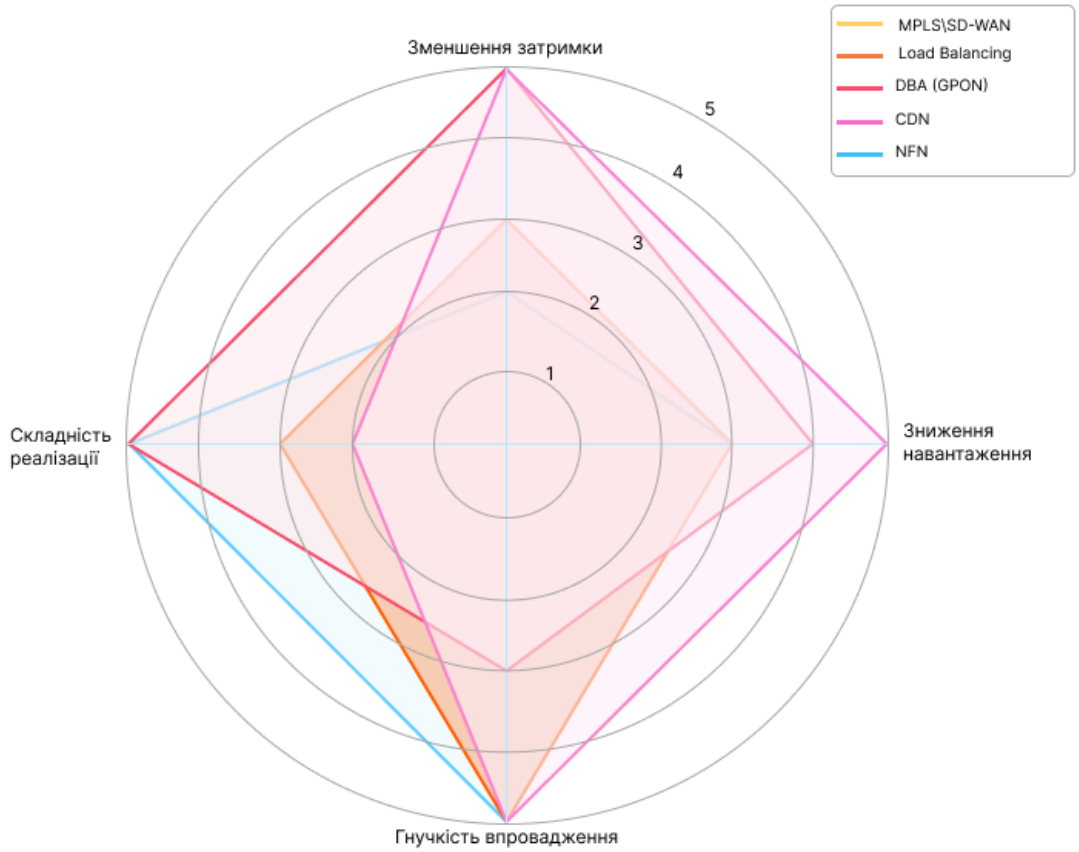


Рисунок 4.1 - Радарна діаграма ефективності методів оптимізації в NGN

Проведене порівняння методів оптимізації ресурсів у NGN-мережах на основі ключових критеріїв дозволяє зробити низку висновків. Згідно з побудованою радарною діаграмою, методи кешування та CDN демонструють найвищу ефективність за показниками зменшення затримки, зниження навантаження на мережу та гнучкості впровадження. Вони є оптимальними рішеннями для випадків, коли пріоритетом є покращення користувацького

досвіду при обмежених витратах на модернізацію. Трафік-інжиніринг (MPLS, SD-WAN) та балансування навантаження забезпечують збалансований результат і добре підходять для провайдерів із розгалуженою інфраструктурою та потребою в централізованому контролі. Їх варто розглядати як стратегічний фундамент для мереж операторського рівня, де критично важливим є керування маршрутами та ресурсами в реальному часі. Натомість, віртуалізація функцій (NFV), хоч і поступається за окремими критеріями, має потенціал для глибокої інтеграції з архітектурами NGN завдяки високій гнучкості та можливості швидкої адаптації до змін навантаження. Цей метод ідеально підходить для середовищ, що орієнтовані на хмарну інфраструктуру та віртуалізовані сервіси.

Технологія DBA у GPON показала хорошу ефективність у сценаріях з інтенсивним абонентським трафіком. Її ключова перевага — динамічне розподілення пропускної здатності — дозволяє досягати високої ефективності навіть у пікові періоди. Проте складність її впровадження обумовлює необхідність глибокого розуміння структури доступу та специфіки ONU/OLT.

Крім окремого розгляду кожного з методів оптимізації, важливо також враховувати можливість їх комбінованого використання, що відкриває нові підходи до побудови адаптивної архітектури NGN. Наприклад, поєднання CDN із SDN дозволяє не лише кешувати трафік ближче до користувача, а й динамічно змінювати маршрути доставки залежно від навантаження та географічного розташування запитів.

Такі сценарії є актуальними для хмарних сервісів, відеостримінгу та VoD-платформ. Також перспективним є використання NFV у зв’язці з MEC, де віртуалізовані мережеві функції виконуються безпосередньо на периферії мережі, скорочуючи затримки й знижуючи трафік до центральних дата-центрів. Цей підхід уже реалізується в комерційних 5G-мережах у вигляді edge-cloud платформ, здатних обслуговувати як користувацькі сервіси, так і критичні IoT-додатки.

Крім того, оптимізація ресурсів у NGN повинна супроводжуватись інтелектуальним моніторингом і прогнозуванням навантаження, що досягається за допомогою AI-алгоритмів і систем SON (Self-Organizing Networks). Вони здатні самостійно визначати вузькі місця в мережі та здійснювати адаптацію конфігурації в реальному часі, що особливо важливо в умовах високої динаміки трафіку.

Таким чином, ефективна стратегія оптимізації ресурсів в NGN полягає не лише у впровадженні окремих рішень, а у створенні інтегрованої екосистеми, що об'єднує засоби маршрутизації, кешування, віртуалізації та інтелектуального аналізу. Подальша оцінка якості обслуговування, яка буде здійснена в наступному підрозділі, дозволить встановити взаємозв’язок між використаними методами та кінцевими показниками QoS/QoE, що особливо важливо для практичної реалізації NGN-інфраструктури.

4.3 Інноваційні підходи до забезпечення QoS та QoE

Архітектура IP Multimedia Subsystem (IMS) є ключовою підсистемою мереж наступного покоління, що забезпечує передачу мультимедійного трафіку з гарантованими параметрами якості. IMS реалізує функціональне розділення мережі на площину сигналізації, управління сесіями та медіа-трафік, що дозволяє гнучко контролювати якість обслуговування (QoS).

Однією з особливостей IMS є використання протоколу SIP (Session Initiation Protocol) для встановлення, модифікації та завершення мультимедійних сесій. В рамках обробки SIP-запитів IMS може ініціювати процес резервування ресурсів у транспортній мережі, визначаючи пріоритет обробки трафіку відповідно до вимог до якості.

Під час передачі голосових або відеосесій SIP-сервер може маркувати пріоритет трафіку, зокрема через заголовки повідомлень, що вказують на клас обслуговування або вимоги до затримки. У практичних реалізаціях на основі open-source IMS платформ (наприклад, OpenIMSCore або Kamailio)

можна дослідити, як SIP-повідомлення типу INVITE містять параметри QoS, які надалі можуть використовуватись для диференціації трафіку в мережі.

Забезпечення QoS також тісно пов’язане з механізмами глибокої інспекції пакетів (DPI), що дають змогу мережевому обладнанню аналізувати вміст пакетів для класифікації трафіку. DPI дозволяє виявити тип послуги (голос, відео, дані) та застосувати відповідні політики маршрутизації чи обмеження. Наприклад, на рівні BRAS або граничних маршрутизаторів можна реалізувати контроль QoS, враховуючи DPI-аналіз у реальному часі.

Одним із перспективних підходів до забезпечення якості обслуговування у мережах наступного покоління є використання програмно-керованих мереж (SDN – Software Defined Networking). Ця концепція передбачає логічне розділення функцій управління мережею та пересилки трафіку, що дозволяє більш гнучко та оперативно реагувати на зміни навантаження або потреби в пріоритезації трафіку.

У SDN-архітектурі контрольна площина реалізується централізовано за допомогою програмного контролера. Такий підхід надає змогу з єдиної точки формувати політики обслуговування, розподіляти ресурси відповідно до типу трафіку та впроваджувати правила пріоритету без втручання у фізичну інфраструктуру.

До основних можливостей SDN у контексті QoS належать:

- визначення класів обслуговування (CoS) для різних типів трафіку, таких як VoIP, відео або дані;
- створення черг із різними параметрами обробки пакетів;
- перенаправлення трафіку в обхід перевантажених ділянок мережі;
- моніторинг затримок, джитера та втрат із подальшим коригуванням маршрутів у реальному часі.

Завдяки таким властивостям, SDN є ефективним інструментом для побудови адаптивних та масштабованих мереж із високим рівнем QoS. Його

застосування особливо актуальне для операторських середовищ, де необхідно динамічно керувати великим обсягом різнорідного трафіку.

Підтримка високої якості досвіду користувача (QoE) у мережах NGN є особливо складним завданням через змінність трафіку, особливо при роботі з потоковим відео, VoIP чи інтерактивними сервісами. У таких умовах традиційні статичні методи забезпечення QoS стають малоефективними. Це зумовлює необхідність у використанні інтелектуальних систем, здатних самостійно виявляти ознаки погіршення якості ще до того, як це відчує користувач.

Сучасні підходи включають застосування алгоритмів машинного навчання, які аналізують історичні дані трафіку та виявляють закономірності в зміні затримки, джитера чи втрат пакетів. Наприклад, за допомогою простих нейронних мереж можна навчитись прогнозувати погіршення QoE на основі накопичених даних про мережеві параметри.

Ці алгоритми можуть застосовуватись на вузлових точках SDN або MEC-інфраструктури, де вони отримують потік телеметричних даних, обробляють їх і формують рекомендації — змінити маршрут, зменшити бітрейт відео чи перенаправити трафік до менш завантаженого вузла.

Важливим є й те, що результати роботи таких моделей можна верифікувати безпосередньо через аналіз реального трафіку в інструментах на кшталт Wireshark. Саме там можна побачити, як змінюється реальна затримка, середній джитер чи MOS, залежно від реакції мережі на ті чи інші сценарії. Таким чином, підхід з використанням машинного навчання не лише забезпечує динамічну адаптацію, але й дозволяє формувати обґрунтовані висновки на основі практичних замірів.

Затримка є одним із ключових параметрів, що безпосередньо впливає на якість досвіду користувача (QoE) при роботі з чутливими до часу послугами, такими як голосові виклики, відеозв’язок, AR/VR, дистанційне керування тощо. Для мінімізації затримки в NGN-мережах усе ширше впроваджується концепція Multi-access Edge Computing (MEC).

Суть MEC полягає в розміщенні обчислювальних ресурсів ближче до абонента — безпосередньо на вузлах доступу або базових станціях. Це дозволяє скоротити маршрут проходження даних, знизити середній RTT (Round Trip Time) та, відповідно, загальну затримку.

У NGN-мережах MEC використовується для обробки VoIP-трафіку, стримінгового відео або аналітики в реальному часі. Замість надсилання кожного пакета до центрального датацентру, трафік може бути оброблений локально, що забезпечує більш стабільну та швидку взаємодію з сервісом.

У MEC на якість обслуговування буде проаналізовано за допомогою інструменту Wireshark. Зокрема, будуть зафіксовані та порівняні параметри затримки, джитера і втрат пакетів у сценаріях, що імітують використання MEC та централізованої обробки. Отримані результати дозволять зробити висновки щодо ефективності MEC-рішень у підвищенні QoS та QoE у NGN-середовищі. Так, що ми приступаємо до практичного аналізу параметрів Qos.

4.4 Практичний аналіз параметрів QoS

У рамках дослідження параметрів якості обслуговування в NGN-мережах було проведено практичний аналіз мережевого трафіку з використанням інструменту Wireshark. Об’єктом дослідження став UDP-трафік, згенерований під час відеозустрічі у сервісі Zoom через бездротову мережу Wi-Fi (5 ГГц). Основна мета — виявити, як змінюються параметри QoS у реальних умовах роботи користувача, зокрема в залежності від часу доби та навантаження на мережу.

Wireshark є галузевим стандартом для аналізу мережевого трафіку. Інструмент дозволяє фіксувати та детально аналізувати всі пакети, що проходять через обраний інтерфейс. Особливу цінність для дослідження параметрів QoS становить можливість відстежувати затримку (delay), джитер (jitter), втрати пакетів (packet loss), а також побудову I/O-графіків трафіку.

Саме ці параметри є критичними для сервісів реального часу, зокрема VoIP та відеоконференцій, через які ми будемо робити аналіз параметрів.

В нашому випадку ми розглянемо два варіанти, а саме, вечірний час (пікове навантаження на мережу) і нічний час (мінімальне навантаження). Саме в ці проміжки дня і буде виконуватись захоплення трафіку. У ході сесії було запущено відеозустріч у Zoom, з використанням відео, та аудіо передачі, також паралельно працював Wireshark, який здійснював запис UPD-потоків на мережі WI-FI.

Розглянемо захоплення трафіку під час максимального навантаження. Запускаємо захоплення пакетів при увімкненій трансляції в Zoom. Час проведення аналізу пакетів складає близько 5 хвилин.

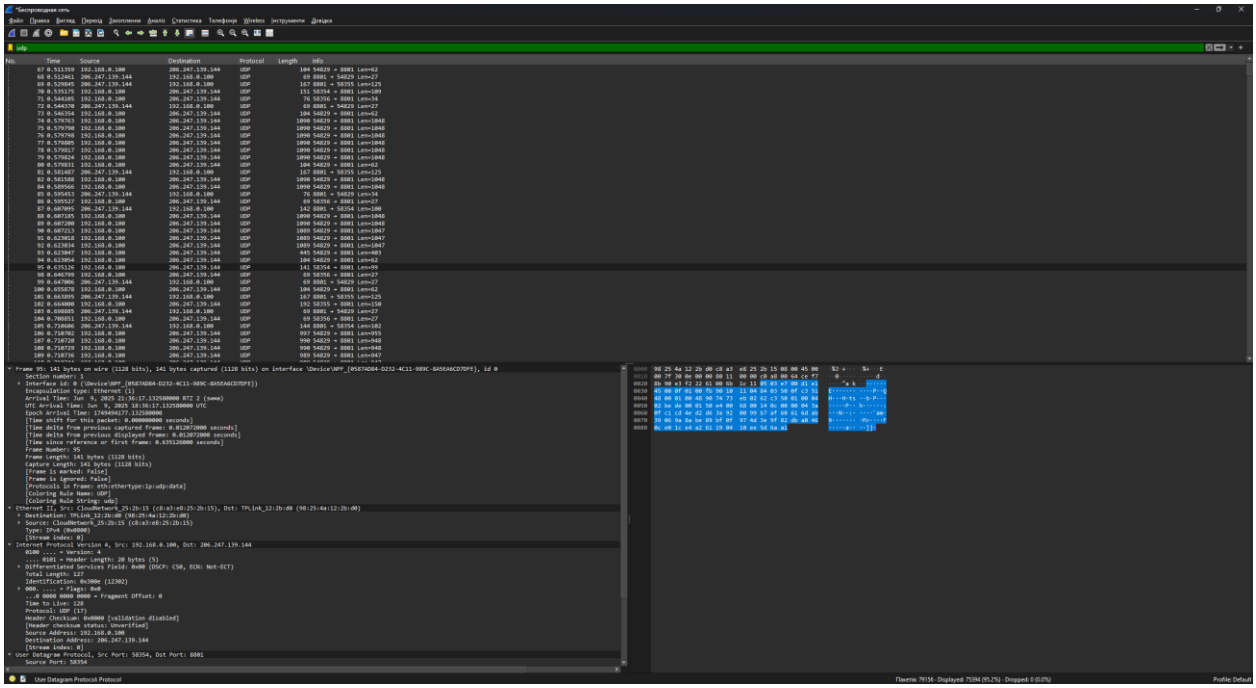


Рисунок 4.2 - Інтерфейс WireShark, фрагмент UPD-трафіку Zoom

Після закінчення конференції в Zoom, захоплення пакетів було призупинено, для збирання і аналізу інформації, яку захоплював Wireshark. В першу чергу відбулось дослідження пакетів, за стандарт було взято 10 послідовних UPD-пакетів. А саме значення параметра «Time delta from previous displayed frame».

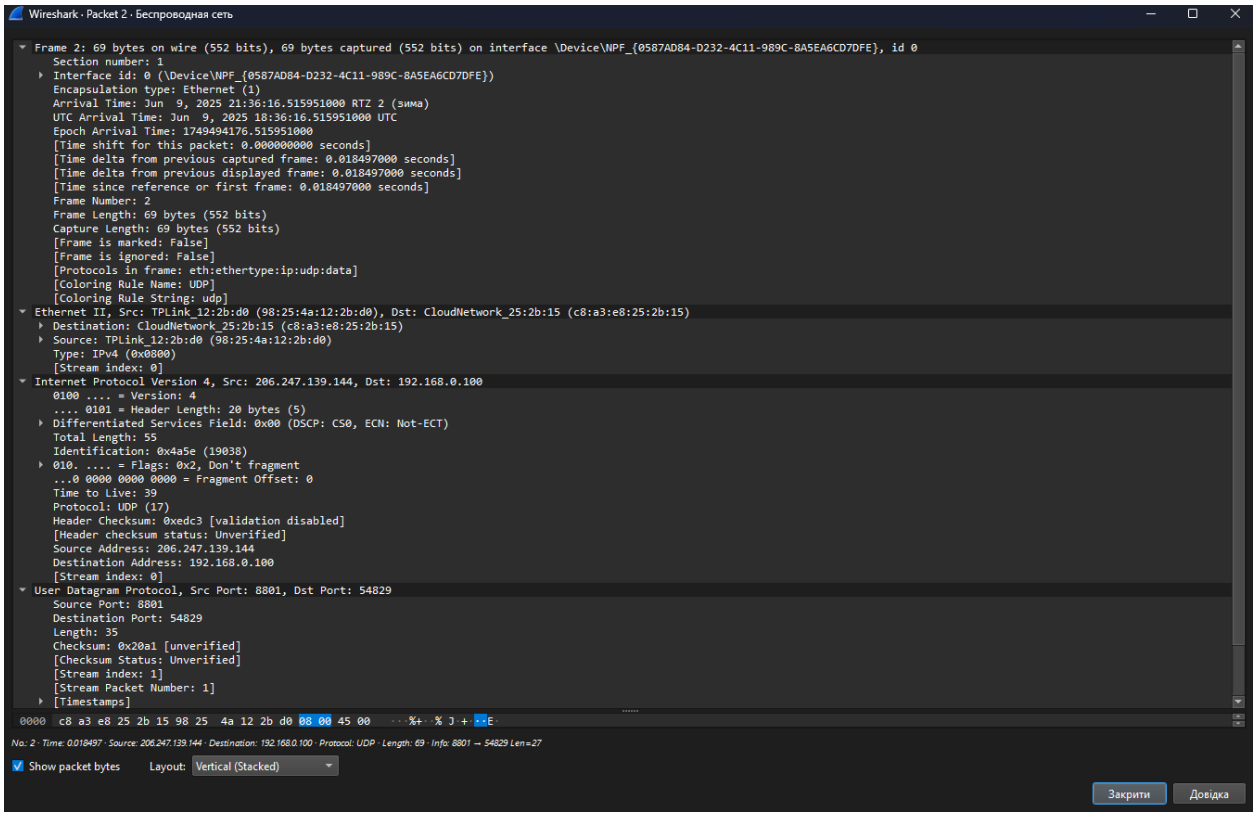


Рисунок 4.3 - Розшифровка другого UPD-пакета в Wireshark

Це зображення демонструє типовий формат UPD-пакета, захопленого в процесі відеоконференції. Саме нас цікавить Time delta from previous displayed frame: 0.018497000 seconds. І так ми збираємо данні з 10 пакетів, та вносимо їх в таблицю.

Розрахуємо середню затримку, не враховуючи перший пакет, так як він вважається нульовим, так як немає попередник, з допомогою якого ми могли би розрахувати час затримки.

Сума часу всіх пакетів: 0.018497 + 0.006591 + 0.000177 + 0.009988 + 0.000028 + 0.020186 + 0.004022 + 0.017142 + 0.000160 = 0.076791

Середня затримка:0.076791/9 = 0.00853233 = 8.53 мс

Максимальна затримка: 20.186 мс

Мінімальна затримка: 0.000028 сек = 0.028 мс

Таблиця 4.4 - Таблиця вимірювання затримки між UDP-пакетами (час пік)

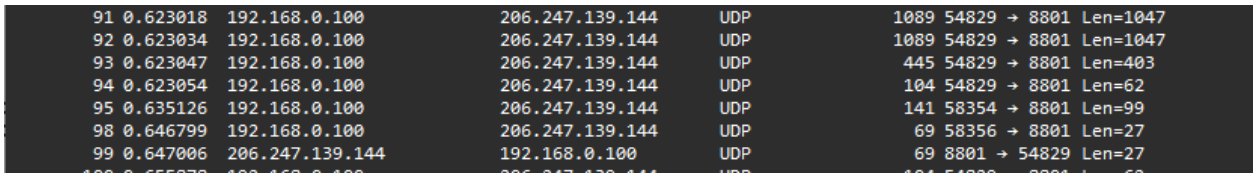
№ пакету	Time delta (сек)
1	0.000000
2	0.018497
3	0.006591
4	0.000177
5	0.009988
6	0.000028
7	0.020186
8	0.004022
9	0.017142
10	0.000160

Також розрахуємо джитер, який є критичним для якості аудіо- і відеозв’язку, оскільки навіть при невеликому рівні затримки, коливання може спричиняти спотворення, ривки, та розсинхронізацію потоку.

В нашому випадку джитер розраховувався вручну, оскільки RTP-інструмент Wireshark не був доступний, джитер визначався, як розмах (різницею між максимальною та мінімальною затримкою):

J = 20.186- 0.028=20.158 мс

Також, варто перевірити втрати пакетів, на основі аналізу послідовності нумерації пакетів у Wireshark було виявлено розриви, зокрема між пакетами №95 та №98, що вказує на пряму втрату пакетів, що є кричитичним для відеозв’язку. Протягом усього періоду захоплення трафіку фіксувались втрати в межах 2–5 пакетів на 100 переданих, що є характерним показником для перевантажених бездротових мереж у пікові години.



91	0.623018	192.168.0.100	206.247.139.144	UDP	1089 54829 → 8801 Len=1047
92	0.623034	192.168.0.100	206.247.139.144	UDP	1089 54829 → 8801 Len=1047
93	0.623047	192.168.0.100	206.247.139.144	UDP	445 54829 → 8801 Len=403
94	0.623054	192.168.0.100	206.247.139.144	UDP	104 54829 → 8801 Len=62
95	0.635126	192.168.0.100	206.247.139.144	UDP	141 58354 → 8801 Len=99
98	0.646799	192.168.0.100	206.247.139.144	UDP	69 58356 → 8801 Len=27
99	0.647006	206.247.139.144	192.168.0.100	UDP	69 8801 → 54829 Len=27

Рисунок 4.4 - Фіксація втрати двох UPD-пакетів у Wireshark

Динаміка втрат пакетів узгоджується з нестабільною передачею, що чітко відображено на графіку інтенсивності UDP-трафіку, який було отримано завдяки Wireshark.

Рисунок 4.5 - Статистика I/O у вигляді графіку в Wireshark

Графік показав значні коливання трафіку, стартова передача була плавною з поступовим нарощенням інтенсивності, після 100 секунди ми бачимо часті піки та падіння, хоча запис в Zoom проводилась в одному ж темпі. Максимальні значення досягали до 1200 пакетів/с. Ці всі данні свідчять про динамічну зміну якості передачі, а саме адаптацію до зміни

доступної пропускової здатності, а також про нестабільність каналу в години пікового навантаження. Також з додаткових спостережень можна вказати:

- Розмір UDP-пакетів варіюється в широкому діапазоні (від 69 до понад 1000 байт), що вказує на зміну бітрейту або кодека.
- Напрямок трафіку також асиметричний — частина потоку має 1 пакет у напрямку, 2 — у зворотному.
- Наявність різких Time delta стрибків у кількох точках вказує на можливі мікрофризи та втрати QoE.

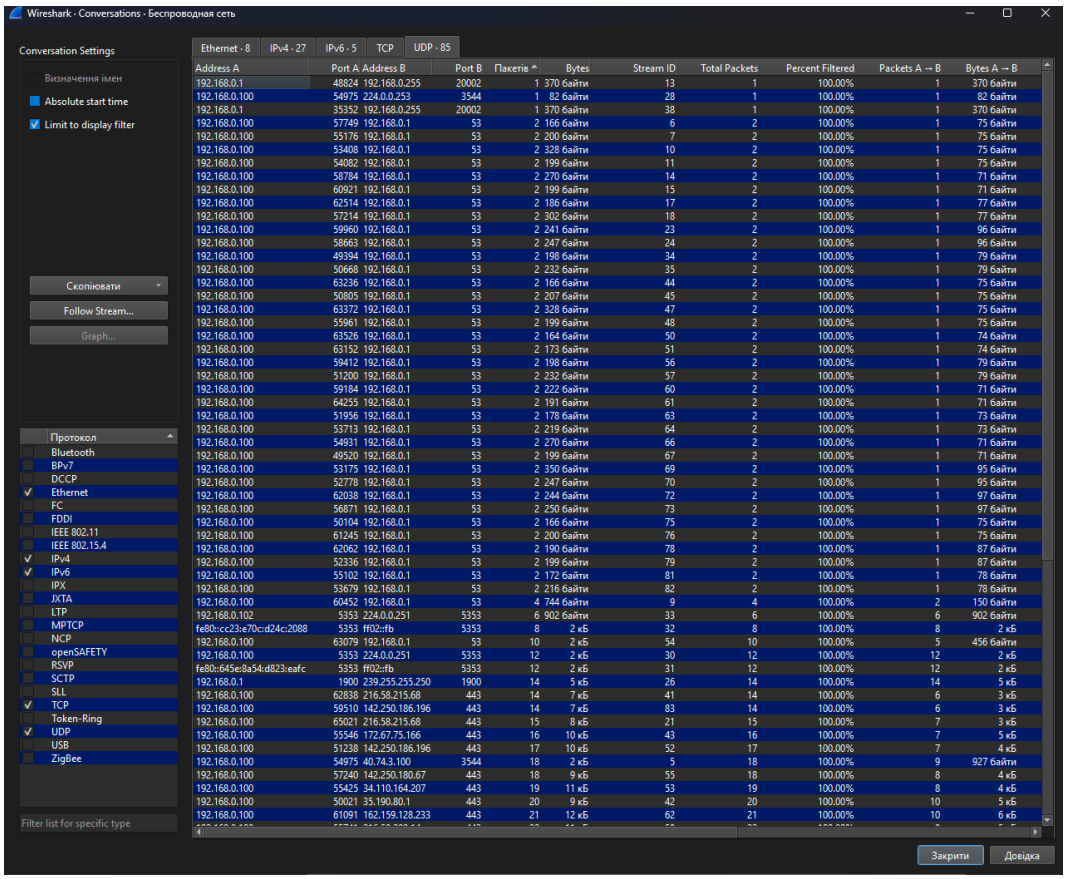


Рисунок 4.6 - Зображення таблиці UDP-сеансів у Wireshark

Тепер проведемо такі дослідження для нічного періоду часу, запускаємо конференцію в Zoom.

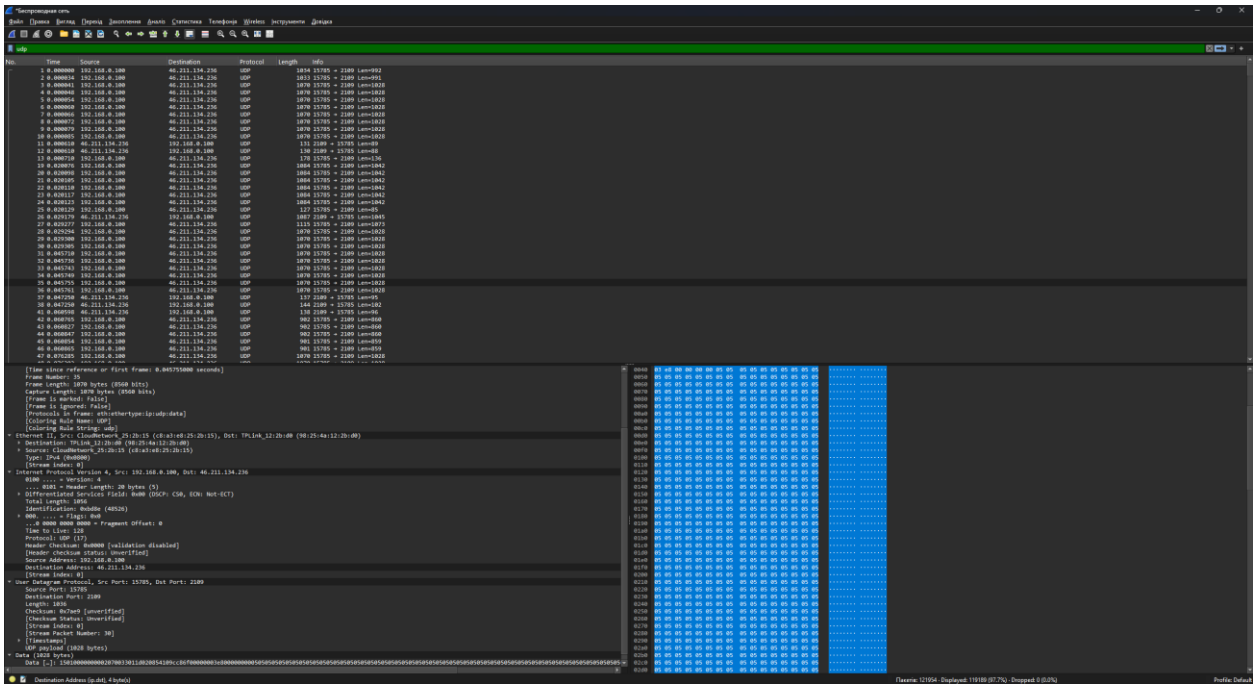


Рисунок 4.7 - Інтерфейс WireShark, фрагмент UPD-трафіку Zoom в нічний період

Після збору данних, можемо приступати знову до аналізу данних, які зафіксував Wireshark, а саме дослідження перших 10 пакетів.

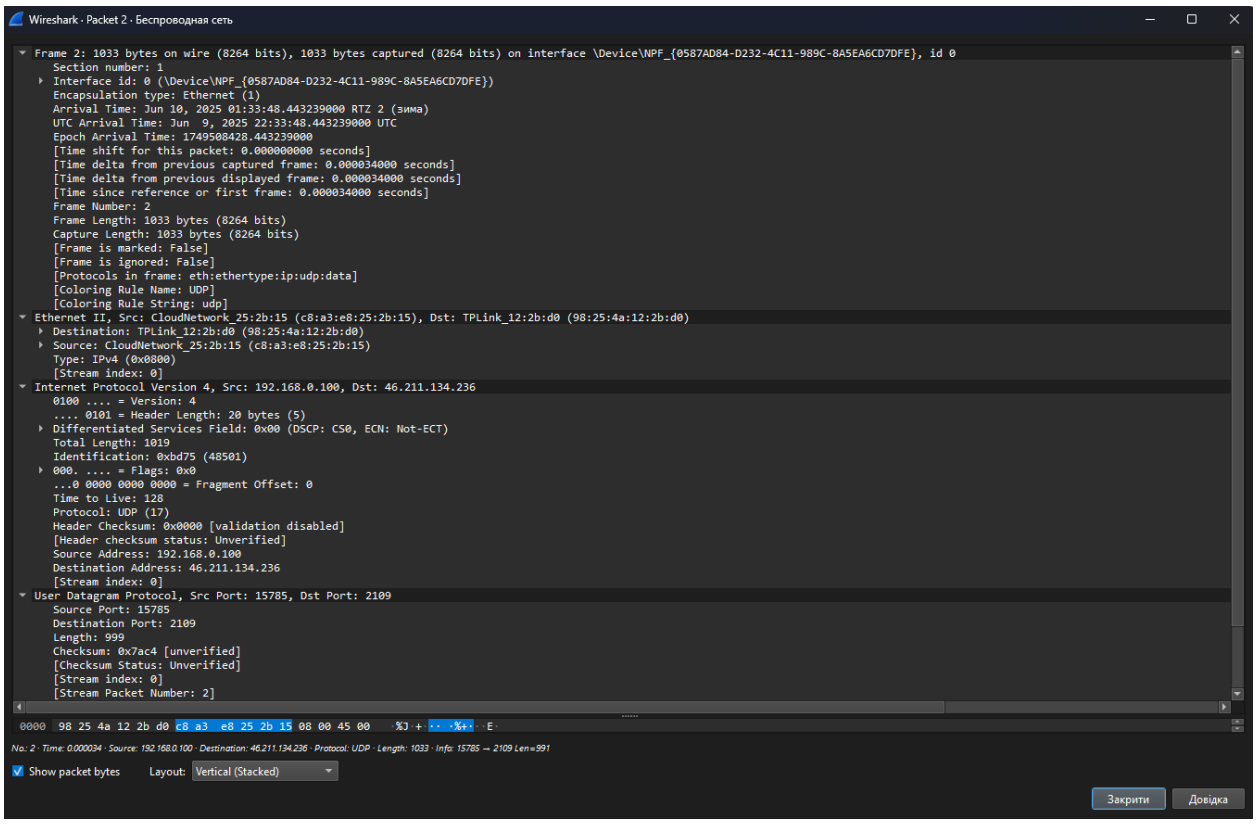


Рисунок 4.8 - Розшифровка другого UPD-пакета в Wireshark в нічний період

Як і раніше звертаємо увагу на time delta from previous displayed frame: 0.000034000 seconds. Всі дані з 10 пакетів вносимо в таблиці і проводимо всі ті самі розрахунки, які ми проводили вище.

Таблиця 4.5 - Таблиця вимірювання затримки між UDP-пакетами (низька активність)

№ пакету	Time delta (сек)
1	0.000000
2	0.003048
3	0.000140
4	0.000174
5	0.000060
6	0.000060
7	0.000060
8	0.000070
9	0.000070
10	0.000050

Сума часу всіх пакетів:0.003048 + 0.000140 + 0.000174 + 0.000060 + 0.000060 + 0.000060 + 0.000070 + 0.000070 + 0.000050 = 0.003732

Середня затримка:0.003732/9 = 0.00853233 = 0.415 мс

Максимальна затримка: 3.048 мс

Мінімальна затримка: 0.000050 сек = 0.05 мс

J = 0.003048- 0.000050=2.998 мс

У нічний період було зафіксовано значно менші коливання затримки між послідовними UDP-пакетами. Середній показник Time Delta становив лише 0.637 мс, що є істотно нижчим за значення, зафіксовані у пікові години. Джитер склав ≈ 2.998 мс, однак лише на початку сесії спостерігалося значне

відхилення. Така стабільність підтверджує низьке навантаження мережі в нічний час та відсутність втрат пакетів.

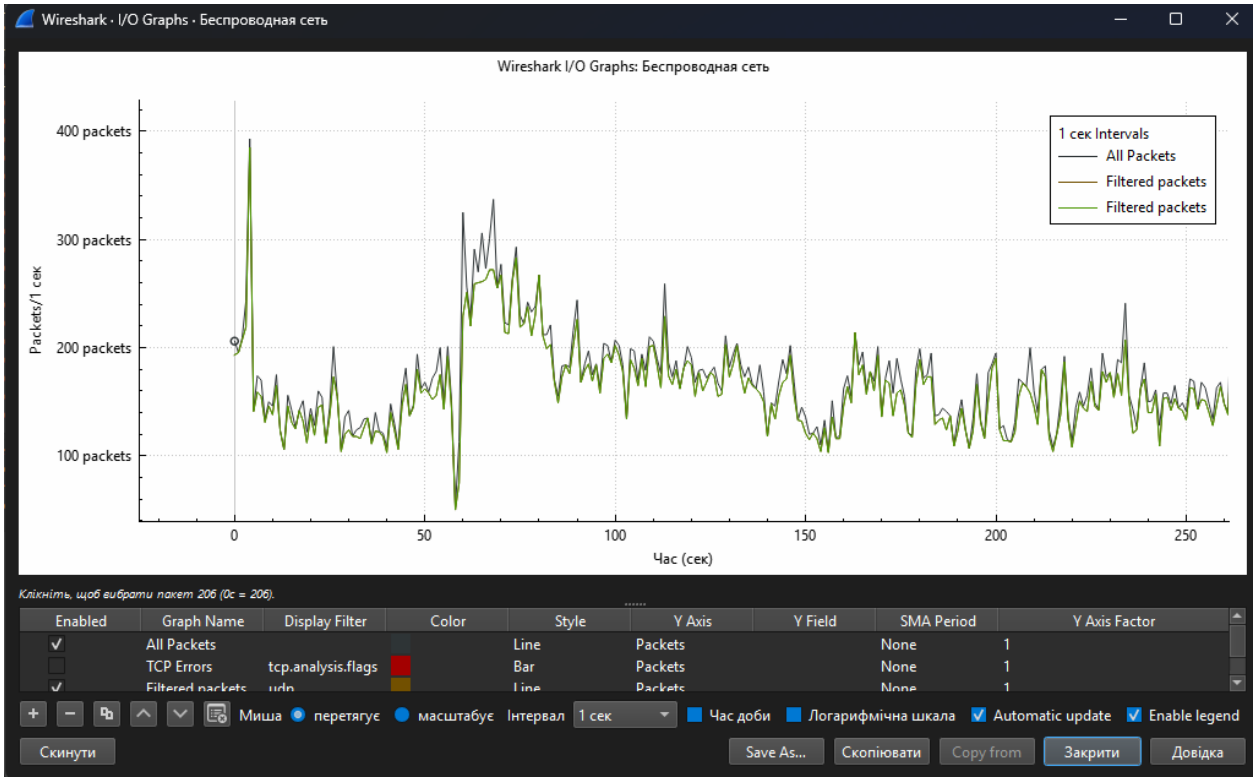


Рисунок 4.9 - Статистика I/O у вигляді графіку в Wireshark в нічний період

Загалом, протягом більшості часу спостерігається стабільний рівень трафіку на рівні 400–600 пакетів/с, з одиничними піками до ~2000 пакетів/с на початку сесії. У порівнянні з аналогічним графіком для денного часу, можна зробити висновок про меншу амплітуду коливань, відсутність затримок понад 1 мс та відсутність втрат пакетів.

Це підтверджує, що вночі канал передачі даних працює з меншими затримками, забезпечуючи кращу якість обслуговування (QoS) для сервісів реального часу, зокрема VoIP та відеоконференцій.

Додаткові спостереження (нічний період):

- Стабільність розміру пакетів: майже всі UDP-пакети мають однакову довжину (1070 байт), що може свідчити про використання одного й того ж кодека з постійним бітрейтом.

- Регулярність інтервалів передачі: затримки між послідовними пакетами не перевищують кількох мікросекунд, що вказує на відсутність затримок
- Симетричність трафіку: у потоці простежується однакова кількість пакетів у напрямку клієнт–сервер, що свідчить про відсутність втрат та збоїв на транспортному рівні.

Для об'єктивного оцінювання стану мережі було здійснено два незалежні сеанси перехоплення трафіку за допомогою програмного забезпечення Wireshark: перший – у вечірній піковий час (близько 21:30), другий – у нічний період (01:30).

Таблиця 4.6 - Порівняння параметрів якості мережі у денний (піковий) та нічний час з рекомендованими значеннями для VoIP/NGN

Параметр	Денний час (пік)	Нічний час	Рекомендоване значення (для VoIP/NGN)
Середня затримка (RTT)	~8.5 мс	~0.4 мс	≤ 150 мс (оптимально ≤ 50 мс)
Макс. міжпакетна затримка	~20.1 мс	~3.0 мс	≤ 50 мс
Джитер (розкид затримок)	~18 мс	~2.6 мс	≤ 30 мс (VoIP), бажано ≤ 15 мс
Втрати пакетів	~2–5 %	< 1 %	≤ 1 % (VoIP), критично ≤ 3 %
MOS (оцінка якості)	~3.5–3.8 (оцінка)	~4.3–4.5 (оцінка)	≥ 4 – відмінно, ≥ 3.6 – прийнятно

Аналіз отриманих даних показує:

Нічна мережа демонструє кращу швидкість передачі та нижчу затримку. Це пов’язано зі зниженням загального навантаження в позапікові години.

Втім, денний сеанс забезпечує вищу стабільність, тобто менші коливання кількості пакетів у часі, що є критичним для сервісів із вимогами до QoS.

Рівень втрат пакетів був низьким в обох випадках, однак у вечірній час зустрічались серії з кількома підряд втраченими пакетами, чого вночі не спостерігалося.

4.5 Висновки до розділу 4

Загальні результати підтверджують, що часові фактори мають вирішальне значення в процесі вибору архітектури та конфігурації абонентського доступу в NGN-мережах. Враховуючи зібрані параметри — середню затримку, коливання міжпакетного інтервалу, частоту втрат — можна стверджувати, що реальна продуктивність мережі в абонентському сегменті суттєво залежить від навантаження, яке формується в певний період доби.

Особливо це критично для сервісів реального часу чутливих до затримок, джитера та втрат. Саме тому мережі нового покоління повинні бути не просто високошвидкісними, а адаптивними — з урахуванням динамічних змін навантаження та можливістю керування QoS у реальному часі.

Проведене дослідження є формальним доказом того, що навіть у побутових умовах спостерігаються ключові ефекти, характерні для NGN-інфраструктур — а отже, їх правильне моделювання, проєктування та підтримка залишаються критично важливими задачами телекомунікаційної галузі.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було проведено комплексне дослідження підходів до побудови абонентського доступу в контексті мереж наступного покоління (NGN). NGN характеризуються інтеграцією послуг, високою масштабованістю, підтримкою QoS, зниженням витрат на обслуговування та експлуатацію, а також гнучкістю впровадження нових сервісів. Основна увага приділена аналізу варіантів організації абонентського доступу: традиційним і перспективним технологіям, таким як xDSL, HFC, FTTx (зокрема, PON).

Особливу увагу приділено аналізу критеріальної моделі вибору технологій абонентського доступу, в якій порівнювалися варіанти реалізації доступу (xDSL, PON, Ethernet, мобільні мережі) за низкою технічних та експлуатаційних параметрів. Це дозволило зробити обґрунтований вибір на користь найбільш ефективних рішень для впровадження в NGN-інфраструктуру.

Проведений аналіз, з використанням реального мережевого трафіку та вимірювання параметрів затримки, джитера та втрат пакетів, дозволив підтвердити не лише відповідність досліджуваних рішень нормативним вимогам для NGN/VoIP, а й виявити критичні відмінності між умовами функціонування мережі в піковий та нічний періоди. Ці результати мають практичну цінність для побудови ефективної архітектури NGN з урахуванням часових навантажень та оптимізації якості обслуговування (QoS).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакланов І. Г. NGN. Принципи побудови і організації. – К.: Техніка, 2008. – 400 с.

2. Wireshark Foundation. Wireshark User Guide. – Режим доступу: https://www.wireshark.org/docs/wsug_html_chunked/

3. Соколов Н. А. Мережі абонентського доступу.–М.: „Ентер", 2004– 254 с.

4. ITU-T Recommendation. NGN JRG/13 – Lucent Technologies. Management and Control for NGN, 2004. - 9 p.

5. Cisco Systems. Understanding Quality of Service (QoS). – Режим доступу: https://www.cisco.com/

6. Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г. Мережі зв’язку: Посібник для вузів, 2010. – 400 с.

7. New Generation Network Architecture. – ITU-T, 2020. – Режим доступу: https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/ngn/

8. Фриман Р. Волоконно-оптичні системи зв’язку/ Фриман Р. – М.:Техносфера, 2003. – 440 с.

9. Alcatel-Lucent Submission to Commerce Commission. Discussion Paper on Next Generation Networks, 2009. - 17 p.

10. ITU-T Recommendation Y.2011. Global information infrastructure, internet protocol aspects and next generation networks, 2004. - 34 p.

11. ITU-T Recommendation Y.3001. Future networks: Objectives and design goals, 2011, - 26 p.