

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МЕДВЕЦЬКИЙ МИХАЙЛО БОГДАНОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ ТА
ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ
ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ**

172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

17 «Електроніка та телекомунікації»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ / Медвецький Михайло Богданович /

Науковий керівник

Бешлей Микола Іванович д.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

ЛЬВІВ – 2025

АНОТАЦІЯ

Медвецький М.Б. Підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

В дисертаційній роботі розв’язано науково-практичне завдання підвищення якості сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах шляхом розроблення інтелектуальних методів моніторингу стану мережі, маршрутизації трафіку та ефективної доставки відеоконтенту в умовах обмежених ресурсів і змінних вимог користувачів.

Метою представленої роботи є підвищення показників якості сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах шляхом розроблення інтелектуальних методів моніторингу стану мережі, маршрутизації трафіку та ефективної доставки відеоконтенту в умовах обмежених ресурсів і змінних вимог користувачів.

Об’єктом дослідження є процеси управління інформаційними потоками для покращення якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми інтелектуального моніторингу стану мережі, розподілу ресурсів та маршрутизації інформаційних потоків в програмно-конфігурованих мережах.

У процесі дослідження застосовано методи теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії систем масового обслуговування, імітаційного моделювання, об’єктно-орієнтованого програмування, комбінаторного аналізу, машинного навчання, експертного оцінювання та аналізу часових рядів.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету дослідження та сформульовано науково-технічні завдання для її досягнення. Описано зв'язок проведеного дослідження з науковими програмами та темами, викладено наукову новизну отриманих результатів, їх практичне значення та особистий внесок автора. Крім того, надано інформацію про апробацію результатів дослідження.

У першому розділі **«Аналіз методів і моделей управління якістю сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах»** проведено аналіз сучасного стану телекомунікаційних мереж та визначено основні обмеження традиційних підходів до забезпечення якості обслуговування (QoS) і якості сприйняття послуг (QoE). Оцінювання QoE є актуальним, оскільки воно відображає реальне задоволення користувача якістю сервісу, доповнюючи технічні метрики QoS. У сучасних мережах, особливо при наданні мультимедійних послуг, забезпечення високого QoE є ключовим фактором конкурентоспроможності операторів і ефективності мережевого управління. Встановлено, що традиційні IP-мережі характеризуються статичною архітектурою з децентралізованою системою керування, жорсткою залежністю від фізичного мережевого обладнання та потребою в ручному конфігуруванні. Така архітектурна модель суттєво обмежує адаптивність, гнучкість масштабування та здатність до оперативного реагування на зміну мережевих умов і сервісних вимог. Обґрунтовано доцільність трансформації до програмно-конфігурованих мереж (SDN), які, завдяки централізованому контролю та абстракції рівня управління, створюють технологічне підґрунтя для реалізації гнучких, адаптивних моделей управління мережевим трафіком і якістю обслуговування. Архітектура програмно SDN, яка забезпечує централізоване управління та відокремлення контрольної площини від площини пересилання, відкриває нові можливості для реалізації QoE-орієнтованого управління трафіком. Однак у більшості поточних реалізацій застосовуються фіксовані інтервали збору телеметрії, що не враховують динаміку трафіку, викликаючи

або затримки в реакції на деградацію сервісу, або надмірне навантаження на мережеву інфраструктуру через надлишковий службовий трафік. Крім того, відсутність реалізованих механізмів багатошляхової маршрутизації та одночасного обслуговування користувача декількома точками доступу обмежує можливості адаптації до змінних умов і потреб високоякісної доставки мультимедійного контенту.

У контексті зростаючої складності мереж і зростаючого навантаження, зумовленого новими сервісами та пристроями, виникає потреба у впровадженні інтелектуальних методів моніторингу та управління ресурсами, здатних передбачати зміну якості сприйняття та адаптувати маршрутизацію відповідно до поточного та прогнозованого стану мережі.

У другому розділі **«Методи підвищення якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах»** запропоновано концептуальну модель інтелектуальної програмно-конфігурованої мережі, яка базується на використанні централізованого SDN-контролера, що забезпечує інтелектуальне управління мережевими ресурсами шляхом інтеграції трьох основних методів: інтелектуального моніторингу, адаптивної QoE-маршрутизації та багатошляхової маршрутизації. Метод інтелектуального моніторингу дозволяє динамічно змінювати інтервал моніторингу мережесих параметрів, що знижує навантаження на контролер та канали управління, не втрачаючи актуальності даних. Це особливо важливо у випадках високодинамічних навантажень, характерних для URLLC-сервісів та додатків реального часу.

Показано, що використання алгоритмів оцінки QoE (MOS, PESQ, APSNR) надає можливість конвертувати технічні метрики QoS у зрозумілі для користувача показники, що дозволяє мережі проактивно реагувати на потенційне погіршення якості сервісів. Застосування моделей машинного навчання, таких як LightGBM, продемонструвало високу точність прогнозування показників QoE на основі історичних даних мережі. Це дозволяє

реалізувати проактивні методи маршрутизації, які враховують не лише поточний, але й прогнозований стан мережі, забезпечуючи оптимальний користувацький досвід.

Важливим результатом дослідження є розроблений метод інтелектуальної QoE-маршрутизації, який передбачає використання прогнозованих значень QoE для вибору оптимальних маршрутів передачі трафіку. На відміну від традиційних підходів, що базуються винятково на QoS-метриках, запропонований підхід дозволяє враховувати нелінійні та комплексні взаємозв'язки між технічними параметрами та суб'єктивним сприйняттям користувача, підвищуючи ефективність управління мережею та загальну задоволеність кінцевих користувачів.

Проведений аналіз також показав, що інтеграція методів активного та пасивного моніторингу з використанням протоколів OpenFlow, LLDP та Echo-повідомлень надає можливість точного контролю стану мережі без значного навантаження на систему управління

Таким чином, розроблена концепція і методи реалізації адаптивного управління ресурсами на основі QoE у програмно-конфігурованих мережах демонструють суттєві переваги перед традиційними підходами. Вони дозволяють ефективно вирішувати завдання підтримки високоякісних сервісів в умовах динамічних мережевих середовищ, що робить їх перспективними для застосування в мережах нового покоління, включаючи 5G/6G.

У третьому розділі **«Моделювання та дослідження методів підвищення якості сприйняття послуг та ефективного використання ресурсів в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах»** проведено об'єктивне оцінювання якості відео та VoIP-трафіку за метриками APSNR і PESQ відповідно. Дослідження виявило сильну залежність показників QoE від параметрів QoS (затримки, втрат пакетів, пропускну здатності). Зокрема, втрата навіть 2% пакетів знижувала оцінку відео з «Відмінно» до «Добре», а затримка понад 800 мс негативно впливала на інтерактивність.

Особливу увагу приділено дослідженню навантаження на ЦП SDN-контролера в залежності від інтервалу моніторингу. Встановлено, що зменшення інтервалу вимірювань до 5 мс призводить до критичного завантаження CPU (до 92%), що вимагає балансування між точністю моніторингу і стабільністю мережевої інфраструктури.

Реалізовано регресійні моделі (Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost), здатні передбачати QoE на основі параметрів QoS. Для підготовки моделі використано як емпіричні дані (1024 записи), так і синтетичний датасет (10 000 записів), згенерований на основі апроксимації. Найвищу точність передбачення для VoIP та відео продемонстрували CatBoost і LightGBM ($MAE \approx 0,37$ для VoIP, $MAE \approx 0,21$ для Video).

Одним із ключових практичних досягнень, продемонстрованих у розділі, є стабілізація якості сприйняття у динамічному середовищі мережі шляхом інтеграції прогнозних моделей у процес маршрутизації. Традиційні системи управління трафіком зазвичай реагують на миттєве погіршення параметрів QoS, що може призводити до надмірно частих перемикань маршрутів. Такі коливання негативно впливають на якість сервісу, особливо в мультимедійних застосунках, де навіть короткотривалі коливання призводять до зниження задоволеності користувача.

Запропонована інтелектуальна система моніторингу використовує прогнозовані значення QoE для кожного каналу зв'язку на основі параметрів затримки, втрат пакетів і пропускної здатності. Якщо система фіксує тимчасову деградацію якості сервісу, але прогнозує її короткотривалість із подальшим відновленням, вона утримується від негайного перемикання маршруту. Таким чином, система не реагує імпульсивно на миттєві флуктуації, а діє з урахуванням перспективи розвитку ситуації. Експериментально показано, що метод інтелектуальної QoE-маршрутизації на 42 % перевищує ефективність відомого методу, що підтверджується аналізом кумулятивної функції розподілу (CDF).

У четвертому розділі «**Практична реалізація методів підвищення якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах**» представлено результати практичної реалізації, верифікації та аналізу ефективності запропонованого методу доставки контенту в архітектурі SDN. Здійснено експериментальну перевірку функціонування багатошляхового передавання відеопотоків у безпроводних мережах із використанням емулятора Mininet-Wi-Fi. Експерименти показали, що одночасне підключення мобільного пристрою до кількох точок доступу дозволяє значно покращити сумарну пропускну здатність та підвищити показники якості передачі відео (PSNR > 35 дБ).

У рамках практичного застосування запропоновано та реалізовано метод доставки відеоконтенту, який ґрунтується на динамічному розподілі відеопотоку між кількома серверами відповідно до залишкової пропускну здатності маршрутів і коефіцієнтів надлишковості. Такий підхід дозволяє забезпечити узгоджену доставку частин відеопотоку. В результаті експериментів зафіксовано підвищення показника PSNR до ≈ 36 дБ після використання багатосерверного передавання.

Крім того, впроваджено механізм балансування навантаження на фізичних комутаторах Zodiac GX та Zodiac FX за допомогою групових таблиць OpenFlow. Завдяки використанню вагових коефіцієнтів, було забезпечено рівномірний розподіл відеопотоку зі швидкістю 10 Мбіт/с двома маршрутами. Даний підхід не лише усунув вузькі місця в окремих каналах, а й дозволив ефективно використовувати доступні мережеві ресурси, уникаючи перевантаження окремих каналів і забезпечуючи стабільну якість обслуговування. Групові таблиці виступили ключовим інструментом для реалізації адаптивного трафік-інжинірингу в середовищі SDN з обмеженими апаратними можливостями.

Висновки до дисертації відображають отримані наукові результати та сформульовані практичні рекомендації щодо їх впровадження в програмно-

конфігурованих мережах. Розроблені інтелектуальні методи моніторингу, прогнозування параметрів якості сприйняття послуг (QoE) та управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах можуть бути впроваджені на практиці дослідницькими установами, телекомунікаційними компаніями та мобільними операторами.

Результати дисертаційної роботи використано при формуванні навчальних дисциплін, що викладаються студентам (за навчальним планом) у навчальному процесі кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», зокрема для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» в курсі лекцій з дисципліни «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку», а також у навчальному процесі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» в курсі лекцій з дисципліни «Мережеві інформаційно-комунікаційні технології».

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення якості сприйняття послуг в телекомунікаційній мережі ТОВ «Телекомунікаційна компанія», що підтверджено актом впровадження.

Ключові слова: програмно-конфігурована мережа, якість обслуговування, якість сприйняття послуг, маршрутизація, машинне навчання, відеосервіс.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації

1. H. Beshley, M. Beshley, M. Medvetskyi, and J. Pyrih, “QoS-Aware Optimal Radio Resource Allocation Method for Machine-Type Communications in 5G LTE and beyond Cellular Networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1–18, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/9966366>. (Scopus/Web of Science Q2).

Особистий внесок здобувача: формалізація завдання ефективного використання ресурсів для забезпечення необхідної якості обслуговування у мережах 5G.

2. M. Beshley, N. Kryvinska, H. Beshley, M. Medvetskyi, and L. Barolli, "Centralized QoS Routing Model for Delay/Loss Sensitive Flows at the SDN-IoT Infrastructure," *Comput. Mater. Contin.*, vol. 69, no. 3, pp. 3727–3748, 2021. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.018625>. (Scopus/Web of Science Q1).

Особистий внесок здобувача: побудова імітаційної моделі в середовищі Mininet для дослідження методів маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах.

3. M. Beshley, N. Kryvinska, H. Beshley, O. Panchenko and M. Medvetskyi, "Traffic engineering and QoS/QoE supporting techniques for emerging service-oriented software-defined network," in *Journal of Communications and Networks*, vol. 26, no. 1, pp. 99-114, Feb. 2024, doi: 10.23919/JCN.2023.000065. (Scopus/Web of Science Q1).

Особистий внесок здобувача: моделювання та порівняльний аналіз розробленого методу QoE-маршрутизації з відомими підходами у віртуалізованому середовищі програмно-конфігурованої мережі.

4. A. Lozynsky, I. Romanynshyn, B. Rusyn, M. Beshley, Mykhailo Medvetskyi, and Danylo Ivantyshyn, "Advances in Data Reduction Techniques to Solve Power Spectrum Estimation Problems for Emerging Wireless Networks," *Lecture notes in electrical engineering*, pp. 585–601, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_34. (Scopus Q4).

Особистий внесок здобувача: опрацювання та опис результатів процесу зниження обсягу даних у завданнях оцінки спектру сигналу для перспективних безпроводних мереж

5. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, А.І. Прислупський, Г.В. Бешлей "Метод ініціації хендоверу в програмно-конфігурованій безпроводній мережі на основі показника якості сприйняття послуг," *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 1, № 2, P. 1–10, 2021.

Особистий внесок здобувача: концептуальна модель програмно-конфігурованої мережі з вбудованим модулем інтелектуального моніторингу та QoE-маршрутизації.

6. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, А.І. Прислупський “Метод управління якістю сприйняття послуг для програмно-конфігурованих мереж заснованих на намірах,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 1, № 1, P. 76–85, 2021.

Особистий внесок здобувача: розгортання та налаштування системи моніторингу параметрів QoS у програмно-конфігурованій мережі з використанням симуляційного середовища Mininet.

7. М.І. Бешлей, А.І. Прислупський, М.Б. Медвецький, Г.В. Бешлей “Інтелектуальна система моніторингу та аналізу трафіку для виявлення атак у програмно-конфігурованих мережах,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 2, № 1, P. 1–11, 2022.

Особистий внесок здобувача: моделювання впливу інтелектуальної системи моніторингу стану функціонування програмно-конфігурованої мережі на якість обслуговування користувачів.

8. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, Г.В. Бешлей “Підвищення якості сприйняття відео в безпроводних програмно-конфігурованих мережах з використанням мультипідключення,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 3, № 2, P. 1–10, 2023.

Особистий внесок здобувача: моделювання та дослідження впливу процесу одночасного обслуговування користувача кількома точками доступу на якість сприйняття послуг у безпроводних програмно-конфігурованих мережах

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. M. Medvetskyi, M. Beshley and M. Klymash, "A Quality of Experience Management Method For Intent-Based Software-Defined Networks," *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Lviv, Ukraine, 2021, pp. 59-62, doi: 10.1109/CADSM52681.2021.9385250.

Особистий внесок здобувача: розроблення алгоритму оцінки якості сприйняття послуг на основі параметрів QoS.

10. C. Wang, L. Yuan, M. Medvetskyi, M. Beshley, A. Pryslupskyi and H. Beshley, "Machine Learning-Enabled Software-Defined Networks for QoE Management," *2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, 2021, pp. 234-238, doi: 10.1109/AICT52120.2021.9628961.

Особистий внесок здобувача: розроблення моделі машинного навчання для прогнозування рівня QoE в програмно-конфігурованих мережах.

11. M. Beshley, M. Medvetskyi, S. Jun, A. Pryslupskyi, Y. Bobalo and H. Beshley, "QoE-Aware Intelligent Handover Method for Intent-Based Software-Defined Wireless Network," *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 534-538, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767075.

Особистий внесок здобувача: розроблення імітаційної моделі для прогнозування рівня QoE в програмно-конфігурованих мережах.

12. M. Beshley, V. Kochan, H. Beshley, M. Medvetskyi, I. Kahalo and Y. Shkoropad, "QoS-Coordinated Adaptive Spectrum Management Method for Coexistence 5G-U and Wi-Fi Networks with Short-Term Channel Failures," *2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Jaroslaw, Poland, 2023, pp. 22-26, doi: 10.1109/CADSM58174.2023.10076520.

Особистий внесок здобувача: розроблення імітаційної моделі для дослідження методу одночасного обслуговування користувачів у технологіях 5G-U та Wi-Fi.

13. Z. Mingming, M. Medvetskyi, M. Beshley and H. Beshley, "QoE-Aware Fusion Technique of Multi-Path Video Transmission and Multi-Connection for Software-Defined 5G/6G Networks," *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2023, pp. 52-57, doi: 10.1109/AICT61584.2023.10452705.

Особистий внесок здобувача: розроблено метод доставки відеоконтенту на основі багатошляхової маршрутизації з одночасним обслуговуванням декількома точками доступу.

14. M. Medvetskyi, M. Beshley, I. Scherm, O. Urikova, H. Beshley and T. Dierkes, "SDN-Based 6G Video Content Delivery Technique via Multi-Path Routing, Multi-Server Architecture and Multi-Connectivity," *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2024, pp. 169-173, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755875.

Особистий внесок здобувача: розроблено та реалізовано експериментальну систему доставки відеоконтенту із застосуванням SDN-технологій на основі комутаторів Zodiac GX та Zodiac FX, що дозволило перевірити працездатність запропонованого методу в умовах реальної мережевої інфраструктури.

ABSTRACT

Medvetskyi M.B. Improving resource efficiency and quality of experience in intelligent software-defined networks. – Qualification research paper as a manuscript.

The thesis for the Doctor of Philosophy Degree in the specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The thesis solves the scientific and practical task of improving the quality of experience in software-defined networks by developing intelligent methods for network state monitoring, traffic routing, and efficient video content delivery under conditions of limited resources and dynamic user requirements.

The aim of this research is to enhance the indicators of quality of experience in software-defined networks by designing intelligent methods for real-time network monitoring, adaptive traffic routing, and effective video content delivery in resource-constrained environments with variable service demands.

The object of the research is the management of information flows aimed at improving the quality of experience in intelligent software-defined networks.

The subject of the research comprises methods, models, and algorithms for intelligent network state monitoring, resource allocation, and information flow routing in software-defined networks.

In the course of the research, the following methods were applied: probability theory and mathematical statistics, queuing theory, simulation modeling, object-oriented programming, combinatorial analysis, machine learning, expert evaluation, and time series analysis.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, defines the research aim, and formulates the scientific and technical objectives required to achieve it. It describes the relationship between the research and national scientific programs, highlights the scientific novelty of the obtained results, their practical significance, and the author's personal contribution. Additionally, it provides information on the validation and practical approval of the research findings.

In the first chapter «**Analysis of methods and models for quality of experience management in software-defined networks**» the current state of telecommunications networks is analyzed, and the main limitations of traditional approaches to ensuring Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) are identified. QoE assessment is recognized as highly relevant, as it reflects actual user satisfaction with the service quality and complements the technical QoS metrics. In modern networks, particularly in the delivery of multimedia services, maintaining a high QoE is a key factor for the competitiveness of service providers and the effectiveness of network management.

It has been established that traditional IP-based networks are characterized by a static architecture with decentralized control, a strong dependency on physical network infrastructure, and the necessity for manual configuration. This architectural model significantly limits adaptability, scalability, and the ability to respond quickly to changes in network conditions and service requirements.

The transition to SDN is justified, as SDN thanks to centralized control and abstraction of the control layer provides the technological foundation for implementing flexible and adaptive models for traffic and service quality management. The SDN architecture, which enables centralized management and separation of the control and forwarding planes, opens up new possibilities for implementing QoE-oriented traffic control.

However, most current SDN implementations use fixed telemetry collection intervals, which do not reflect real-time traffic dynamics. This can lead to either delays in detecting service degradation or excessive load on the network infrastructure due to unnecessary control traffic. Moreover, the absence of implemented mechanisms for multipath routing and simultaneous servicing of a user by multiple access points limits the network's ability to adapt to changing conditions and impairs the delivery of high-quality multimedia content.

In the context of increasing network complexity and rising traffic load caused by emerging services and connected devices, there is a growing need to introduce

intelligent methods of monitoring and resource management that are capable of predicting changes in QoE and adapting routing strategies based on the current and forecasted network state.

In the second chapter «**Methods for improving the quality of experience in intelligent software-defined networks**» a conceptual model of an intelligent software-defined network is proposed. This model is based on a centralized SDN controller that enables intelligent management of network resources through the integration of three core methods: intelligent monitoring, adaptive QoE-based routing, and multipath traffic routing. The intelligent monitoring method dynamically adjusts the interval for collecting network parameters, reducing the load on the controller and control plane without compromising data relevance. This capability is especially critical in high-dynamic load scenarios typical of URLLC services and real-time applications.

It is demonstrated that the use of QoE assessment algorithms (such as MOS, PESQ, and APSNR) makes it possible to convert technical QoS metrics into user-centric indicators, allowing the network to proactively respond to potential service degradation. The application of machine learning models like LightGBM has shown high accuracy in predicting QoE indicators based on historical network data. This enables the implementation of proactive routing methods that consider both the current and predicted network states, ensuring an optimal user experience.

A key outcome of the research is the developed QoE-aware intelligent routing method, which relies on predicted QoE values to select optimal traffic routes. Unlike traditional approaches that rely solely on QoS metrics, the proposed method takes into account non-linear and complex relationships between technical parameters and users' subjective service perception, thereby enhancing network management efficiency and overall user satisfaction.

The conducted analysis also shows that integrating active and passive monitoring methods using protocols such as OpenFlow, LLDP, and Echo messages

enables precise network state control without imposing excessive load on the management system.

Thus, the developed concept and methods for implementing adaptive, QoE-based resource management in software-defined networks offer significant advantages over traditional approaches. They effectively address the challenges of maintaining high-quality services in dynamic network environments, making them promising solutions for next-generation networks, including 5G and 6G.

In the third chapter «**Modeling and research of methods for improving quality of experience and efficient resource utilization in intelligent software-defined networks**», objective evaluations of video and VoIP traffic quality were conducted using the APSNR and PESQ metrics, respectively. The study revealed a strong correlation between QoE indicators and QoS parameters such as delay, packet loss, and bandwidth. Specifically, even a 2% packet loss degraded the video rating from "Excellent" to "Good," and delays over 800 ms had a negative impact on interactivity.

Particular attention was paid to analyzing the CPU load on the SDN controller depending on the monitoring interval. It was found that reducing the measurement interval to 5 ms leads to critical CPU utilization (up to 92%), necessitating a balance between monitoring accuracy and the stability of the network infrastructure.

Regression models (Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost) were implemented to predict QoE based on QoS parameters. Both empirical data (1024 records) and a synthetic dataset (10,000 records) generated through approximation were used for model training. The highest prediction accuracy for VoIP and video was achieved by CatBoost and LightGBM ($MAE \approx 0.37$ for VoIP, $MAE \approx 0.21$ for video).

One of the key practical achievements demonstrated in this chapter is the stabilization of perceived quality in dynamic network environments through the integration of predictive models into the routing process. Traditional traffic management systems typically react to immediate QoS degradation, which can lead

to excessively frequent route changes. Such fluctuations negatively affect service quality, particularly in multimedia applications, where even brief instabilities lead to a decrease in user satisfaction.

The proposed intelligent monitoring system utilizes predicted QoE values for each communication link based on delay, packet loss, and bandwidth parameters. If the system detects temporary service degradation but predicts a short-term recovery, it refrains from initiating an immediate route switch. Thus, the system avoids impulsive responses to momentary fluctuations and instead acts with consideration of the anticipated network behavior. Experimental results demonstrate that the proposed intelligent QoE routing method achieves 42% higher efficiency compared to the well-known approach, as validated by cumulative distribution function (CDF) analysis.

In the fourth chapter «**Practical implementation of methods for improving quality of experience in intelligent software-defined networks**» the results of the practical implementation, verification, and performance analysis of the proposed content delivery method within the SDN architecture are presented. An experimental evaluation of the multipath video stream transmission in wireless networks was conducted using the Mininet-WiFi emulator. The experiments demonstrated that simultaneous connection of a mobile device to multiple access points significantly improves aggregate throughput and enhances video transmission quality, achieving a PSNR greater than 35 dB.

As part of the practical implementation, a content delivery method was proposed and developed, based on the dynamic distribution of video streams across multiple servers according to the residual bandwidth of the routes and redundancy coefficients. This approach ensures synchronized delivery of video stream segments. The experiments recorded an increase in PSNR to approximately 36 dB when using multi-server transmission.

In addition, a load balancing mechanism was implemented on Zodiac GX and Zodiac FX physical switches using OpenFlow group tables. By applying weight coefficients, the video stream with a bitrate of 10 Mbps was evenly distributed across

two routes. This approach not only eliminated bottlenecks in individual channels but also enabled efficient utilization of available network resources, avoiding congestion and ensuring consistent quality of service. The group tables proved to be a key instrument for implementing adaptive traffic engineering in SDN environments with limited hardware capabilities.

The conclusions of the thesis reflect the obtained scientific results and formulated practical recommendations for their implementation in software-defined networks. The developed intelligent methods for monitoring, forecasting quality of experience parameters, and resource management in software-defined networks can be practically implemented by research institutions, telecommunications companies, and mobile network operators.

The results of the thesis have been integrated into the development of academic courses taught to students (according to the curriculum) at the Department of Information and Communication Technologies of Lviv Polytechnic National University. In particular, they are used in the course «Design and protocols of heterogeneous mobile networks» for students majoring in 172 – Electronic Communications and Radio Engineering, as well as in the course «Network Information and Communication Technologies» for students majoring in 126 – Information Systems and Technologies.

The main results of the dissertation have also been applied and implemented to enhance the Quality of Experience in the telecommunications network of Telecommunication Company LLC, as confirmed by an official implementation report.

Key words: software-defined network, quality of service, quality of experience, routing, machine learning, video service.

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published

1. H. Beshley, M. Beshley, M. Medvetskyi, and J. Pyrih, "QoS-Aware Optimal Radio Resource Allocation Method for Machine-Type Communications in 5G LTE and beyond Cellular Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1–18, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/9966366>. (Scopus/Web of Science Q2).

Author contribution: Formalization of the problem of efficient resource utilization to ensure the required quality of service in 5G networks.

2. M. Beshley, N. Kryvinska, H. Beshley, M. Medvetskyi, and L. Barolli, "Centralized QoS Routing Model for Delay/Loss Sensitive Flows at the SDN-IoT Infrastructure," *Comput. Mater. Contin.*, vol. 69, no. 3, pp. 3727–3748, 2021. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.018625>. (Scopus/Web of Science Q1).

Author contribution: development of a simulation model in Mininet for the study of routing methods in software-defined networks.

3. M. Beshley, N. Kryvinska, H. Beshley, O. Panchenko and M. Medvetskyi, "Traffic engineering and QoS/QoE supporting techniques for emerging service-oriented software-defined network," in *Journal of Communications and Networks*, vol. 26, no. 1, pp. 99-114, Feb. 2024, doi: 10.23919/JCN.2023.000065. (Scopus/Web of Science Q1).

Author contribution: modeling and comparative analysis of the developed QoE routing method against known approaches in a virtualized SDN environment.

4. A. Lozynsky, I. Romanynshyn, B. Rusyn, M. Beshley, Mykhailo Medvetskyi, and Danylo Ivantyshyn, "Advances in Data Reduction Techniques to Solve Power Spectrum Estimation Problems for Emerging Wireless Networks," *Lecture notes in electrical engineering*, pp. 585–601, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_34. (Scopus Q4).

Author contribution: processing and presentation of results related to data reduction in signal spectrum estimation tasks for next-generation wireless networks.

5. M.B. Medvetskyi, M.I. Beshley, A.I. Pryslupskyi, H.V. Beshley, “A Handover Initiation Method in Software-Defined Wireless Networks Based on Quality of Experience Indicator,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 1–10, 2021.

Author contribution: development of a conceptual model of a software-defined network with an embedded intelligent monitoring module and QoE-based routing.

6. M.B. Medvetskyi, M.I. Beshley, A.I. Pryslupskyi, “A Quality of Experience Management Method for Intent-Based Software-Defined Networks,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 76–85, 2021.

Author contribution: deployment and configuration of a QoS parameter monitoring system in an SDN using the Mininet simulation environment.

7. M. M.I. Beshley, A.I. Pryslupskyi, M.B. Medvetskyi, H.V. Beshley, “Intelligent Monitoring and Traffic Analysis System for Attack Detection in Software-Defined Networks,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, 2022.

Author contribution: modeling the impact of the intelligent monitoring system on the quality of service in SDN environments.

8. M.B. Medvetskyi, M.I. Beshley, H.V. Beshley, “Enhancing Video Quality of Experience in Software-Defined Wireless Networks via Multi-Connectivity,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 1–10, 2023.

Author contribution: Modeling and investigation of the impact of simultaneous service from multiple access points on the perceived service quality in SDN-based wireless networks.

Proceedings that certify an improvement of thesis materials

9. M. Medvetskyi, M. Beshley and M. Klymash, "A Quality of Experience Management Method For Intent-Based Software-Defined Networks," *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Lviv, Ukraine, 2021, pp. 59-62, doi: 10.1109/CADSM52681.2021.9385250.

Author contribution: development of a QoE evaluation algorithm based on QoS parameters.

10. C. Wang, L. Yuan, M. Medvetskyi, M. Beshley, A. Pryslupskyi and H. Beshley, "Machine Learning-Enabled Software-Defined Networks for QoE Management," *2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, 2021, pp. 234-238, doi: 10.1109/AICT52120.2021.9628961.

Author contribution: development of a machine learning model for predicting QoE in SDNs.

11. M. Beshley, M. Medvetskyi, S. Jun, A. Pryslupskyi, Y. Bobalo and H. Beshley, "QoE-Aware Intelligent Handover Method for Intent-Based Software-Defined Wireless Network," *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 534-538, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767075.

Author contribution: development of a simulation model for QoE prediction in SDNs.

12. M. Beshley, V. Kochan, H. Beshley, M. Medvetskyi, I. Kahalo and Y. Shkoropad, "QoS-Coordinated Adaptive Spectrum Management Method for Coexistence 5G-U and Wi-Fi Networks with Short-Term Channel Failures," *2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of*

CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland, 2023, pp. 22-26, doi: 10.1109/CADSM58174.2023.10076520.

Author contribution: development of a simulation model to study the method of simultaneous user servicing in 5G-U and Wi-Fi technologies.

13. Z. Mingming, M. Medvetskyi, M. Beshley and H. Beshley, "QoE-Aware Fusion Technique of Multi-Path Video Transmission and Multi-Connection for Software-Defined 5G/6G Networks," *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2023, pp. 52-57, doi: 10.1109/AICT61584.2023.10452705.

Author contribution: development of a video content delivery method based on multi-path routing and multi-point connectivity.

14. M. Medvetskyi, M. Beshley, I. Scherm, O. Urikova, H. Beshley and T. Dierkes, "SDN-Based 6G Video Content Delivery Technique via Multi-Path Routing, Multi-Server Architecture and Multi-Connectivity," *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2024, pp. 169-173, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755875.

Author contribution: Design and implementation of an experimental video delivery system using SDN technologies with Zodiac GX and FX switches, validating the proposed method in a real-world network infrastructure.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	25
ВСТУП	26
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ.....	34
1.1 Архітектура і принципи функціонування програмно- конфігурованих мереж	34
1.2 Особливості оцінювання якості обслуговування і якості сприйняття послуг в інформаційно-комунікаційних системах.....	38
1.3 Виклики та обґрунтування необхідності розробки нових моделей управління якістю сприйняття у мережах наступних поколінь	44
1.4 Огляд наукових досліджень щодо розвитку методів управління якістю сприйняття послуг у програмно-конфігурованих мережах	52
1.5 Формулювання науково-практичного завдання дисертаційного дослідження	61
Висновки до 1-го розділу.....	63
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ.....	65
2.1 Концептуальна модель інтелектуального управління якістю сприйняття послуг у SDN-інфраструктурі.....	65
2.2 Метод інтелектуального моніторингу стану функціонування програмно-конфігурованої мережі з адаптивним управлінням інтервалом спостереження та прогнозування змін показників якості сприйняття.....	75
2.3 Метод інтелектуальної QoE-маршрутизації в програмно- конфігурованих мережах	92
Висновки до 2-го розділу.....	99

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ ТА ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ	101
3.1 Дослідження моделей оцінювання якості сприйняття голосових і відеосервісів користувачами	101
3.2 Моделювання та дослідження інтелектуальної системи моніторингу стану функціонування програмно-конфігурованої мережі з прогнозуванням змін показників якості сприйняття	110
3.3 Моделювання та дослідження методу інтелектуальної QoE маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах.....	130
Висновки до 3-го розділу.....	148
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ	150
4.1 Моделювання та дослідження впливу процесу одночасного обслуговування користувача кількома точками доступу на якість сприйняття послуг у безпроводних програмно-конфігурованих мережах.....	150
4.2 Розроблення та дослідження методу доставки відеоконтенту в програмно-конфігурованих мереж.....	165
4.3 Практична реалізація методу доставки відеоконтенту на основі SDN-комутаторів Zodiac GX та Zodiac FX.....	177
Висновки до 4-го розділу.....	191
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ	193
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	198
Додаток А. Акти впровадження	213
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	216

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

5G/6G	– <i>Fifth/Sixth Generation</i>	– мережі п'ятого та шостого покоління
API	– <i>Application Programming Interface</i>	– інтерфейс прикладного програмування
APSNR	– <i>Averaged Peak Signal-to-Noise Ratio</i>	– усереднене пікове відношення сигнал/шум
CPU	– <i>Central Processing Unit</i>	– центральний процесор
CDF	– <i>Cumulative Distribution Function</i>	– кумулятивна функція розподілу
DQN	– <i>Deep Q-Network</i>	– глибока Q-мережа
E2E	– <i>End-to-End</i>	– наскрізний, від кінця до кінця
ICN	– <i>Information-Centric Networking</i>	– інформаційно-центричні мережі
IPTV	– <i>Internet Protocol Television</i>	– телебачення через Інтернет-протокол
ITU-T	– <i>International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector</i>	– Міжнародний союз електрозв'язку, сектор стандартизації електрозв'язку
ML	– <i>Machine Learning</i>	– машинне навчання
MEC	– <i>Multi-access Edge Computing</i>	– багатодоступні граничні обчислення
MOS	– <i>Mean Opinion Score</i>	– середня оцінка думки користувачів
NFV	– <i>Network Functions Virtualization</i>	– віртуалізація мережевих функцій
OSPF	– <i>Open Shortest Path First</i>	– відкритий протокол пошуку найкоротшого шляху
PESQ	– <i>Perceptual Evaluation of Speech Quality</i>	– перцептивне оцінювання якості мовлення
PSNR	– <i>Peak Signal-to-Noise Ratio</i>	– пікове відношення сигнал/шум
QoE	– <i>Quality of Experience</i>	– якість сприйняття користувачем
QoS	– <i>Quality of Service</i>	– якість обслуговування
RL	– <i>Reinforcement Learning</i>	– навчання з підкріпленням
RNN	– <i>Recurrent Neural Network</i>	– рекурентна нейронна мережа
SFC	– <i>Service Function Chain</i>	– ланцюг мережевих функцій
SDN	– <i>Software-Defined Networking</i>	– програмно-конфігуровані мережі
SSIM	– <i>Structural Similarity Index Measure</i>	– індекс структурної подібності
SVM	– <i>Support Vector Machine</i>	– машина опорних векторів
VoIP	– <i>Voice over IP</i>	– передача голосу через IP
VR/AR	– <i>Virtual/Augmented Reality</i>	– віртуальна/доповнена реальність
VMAF	– <i>Video Multimethod Assessment Fusion</i>	– метрика оцінки якості відео Netflix
URLLC	– <i>Ultra-Reliable Low-Latency Communications</i>	(наднадійний зв'язок з малою затримкою)
WAN	– <i>Wide Area Network</i>	– глобальна мережа

ВСТУП

Актуальність теми.

У сучасних умовах цифрової трансформації суспільства, інтенсивного розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та зростання вимог до якості електронних сервісів постає необхідність у фундаментальному перегляді принципів побудови та управління телекомунікаційними мережами. Традиційні архітектури мереж, що базуються на жорстко визначених маршрутах передавання даних і децентралізованому управлінні, виявляються малоефективними в умовах динамічного трафіку, обмежених ресурсів і високої варіативності користувацьких вимог. Водночас зростає потреба у впровадженні гнучких, адаптивних, інтелектуально керованих мережевих рішень, здатних не лише реагувати на зміну параметрів середовища, але й проактивно адаптувати власні механізми функціонування з урахуванням очікувань користувачів щодо якості сприйняття послуг та характеристик переданого контенту. У цьому контексті особливу актуальність набувають програмно-конфігуровані мережі (SDN, Software-Defined Networking), які завдяки архітектурному розділенню площин управління та пересилання даних, а також централізованій логіці контролю, створюють передумови для реалізації інтелектуального управління, автоматизації процесів конфігурування, ефективного використання мережевих ресурсів та глибокого аналізу поточних умов функціонування мережі. SDN відкривають нові можливості для гнучкої маршрутизації, віртуалізації функцій, підвищення масштабованості та стійкості інфраструктури, що робить цю технологію ключовою у формуванні майбутніх мереж п'ятого та шостого поколінь (5G/6G), розподілених обчислювальних середовищ і хмарних платформ обробки даних.

Аналіз сучасних наукових публікацій провідних вітчизняних та зарубіжних дослідників, зокрема О.В. Лемешка, Л.С. Глоби, Р.С. Одарченка, О.С. Єременко, Л. Н. Беркман, М.О. Євдокименко, М.А. Гніденка, В.А. Романюка, A. Luntovskyy, L. Wang, S. Zhang, J. Gazda, J. Gong, H. Nam та

T. Delaney, свідчить про те, що, незважаючи на значний прогрес у розвитку SDN, питання розроблення інтелектуальних механізмів адаптивного моніторингу та управління трафіком, орієнтованих на підвищення показників якості сприйняття послуг (QoE, Quality of Experience), на сьогодні залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого наукового опрацювання. Більшість існуючих рішень не враховують динаміку змін навантаження, обмеженість пропускнуої здатності каналів у пікові періоди, не використовують адаптивних механізмів збору статистичних даних, що призводить або до перевантаження контролера службовим трафіком, або до запізненого реагування на погіршення якості обслуговування. Крім того, підтримка багатошляхової маршрутизації та одночасного підключення до кількох точок доступу чи базових станцій у більшості реалізацій є обмеженою або відсутньою, що негативно впливає на якість сприйняття послуг кінцевими користувачами.

Таким чином, з урахуванням зростання обсягів, різноманітності та динаміки інформаційних потоків у телекомунікаційних мережах, а також зважаючи на ключову роль програмно-конфігурованих мереж як технологічної основи для побудови майбутніх мережевих архітектур 5G/6G, актуальним науково-практичним завданням є підвищення якості сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах шляхом розроблення інтелектуальних методів моніторингу стану мережі, маршрутизації трафіку та ефективної доставки відеоконтенту в умовах обмежених ресурсів і змінних вимог користувачів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалась в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розроблення інноваційних методів та моделей побудови індустріально-орієнтованих інформаційно-комунікаційних систем для модернізації цифрових інфраструктур промисловості» (№ держреєстрації 0122U000817) (2022-2024 рр.), «Стратегічні напрямки, методи і засоби цифровізації та інтелектуалізації енергетичних систем з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних

технологій» (2023-2025 рр.) (№держреєстрації 0123U101692); «Розробка методів і засобів побудови мобільних кіберфізичних систем із штучним інтелектом для соціальних, безпекових та оборонних завдань» (№держреєстрації 0125U000645) (2025-2027 рр.).

Мета і завдання дослідження. Метою представленої дисертаційної роботи є підвищення показників якості сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах шляхом розроблення інтелектуальних методів моніторингу стану мережі, маршрутизації трафіку та ефективної доставки відеоконтенту в умовах обмежених ресурсів і змінних вимог користувачів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи управління якістю сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах.

2. Розробити метод інтелектуального моніторингу стану мережі, що забезпечує адаптацію інтервалу моніторингу з урахуванням навантаження мережі, CPU контролера та мережевої затримки між комутаторами.

3. Запропонувати алгоритми оцінки якості сприйняття послуг на основі метрик PSNR, APSNR, PESQ.

4. Розробити моделі машинного навчання для прогнозування рівня QoE та визначення оптимального інтервалу моніторингу в умовах змінного навантаження.

5. Розробити метод інтелектуальної QoE-маршрутизації, що забезпечує вибір шляху передавання даних з урахуванням прогнозованої якості сприйняття послуг.

6. Розробити метод доставки відеоконтенту на основі багатошляхової маршрутизації та одночасного обслуговування кількох точок доступу для покращення QoE сервісу.

7. Експериментально дослідити ефективність запропонованих рішень в умовах реального навантаження та змінних сценаріїв, порівнюючи з альтернативними методами.

Об'єктом дослідження є процеси управління інформаційними потоками для покращення якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми інтелектуального моніторингу стану мережі, розподілу ресурсів та маршрутизації інформаційних потоків в програмно-конфігурованих мережах.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовано методи теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії систем масового обслуговування, імітаційного моделювання, об'єктно-орієнтованого програмування, комбінаторного аналізу, машинного навчання, експертного оцінювання та аналізу часових рядів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено метод інтелектуального моніторингу стану функціонування програмно-конфігурованих мереж, який на відміну від відомих рішень із фіксованим або статичним інтервалом збирання телеметричних даних, використовує машинне навчання для прогнозування змін показників якості сприйняття послуг (QoE) та адаптивного коригування частоти моніторингу залежно від типу трафіку, навантаження на контролер, комутатори та канал, що дало змогу підвищити точність оцінки QoE, зменшити обсяг службового трафіку та забезпечити своєчасне виявлення погіршення якості обслуговування в умовах динамічного мережевого середовища.

2. Удосконалено метод інтелектуальної QoE-маршрутизації, який на відміну від відомих, передбачає застосування моделей машинного навчання для прогнозування значень QoE залежно від типу трафіку (VoIP, відео), пропускної здатності, затримки та втрат даних на маршрутах між джерелом і призначенням, що дало змогу здійснювати адаптивний вибір маршруту з урахуванням динаміки мережевого середовища для забезпечення високого рівня якості сприйняття послуг.

3. Набув подальшого розвитку метод доставки відеоконтенту в програмно-конфігурованих мережах, який, на відміну від відомих, забезпечує адаптивний розподіл потоків між декількома маршрутами з урахуванням QoS-параметрів каналів, прогнозування пропускної здатності та замовленого рівня QoE сервісу, а також реалізує одночасне підключення до кількох точок доступу або серверів доставки контенту, що дало змогу підвищити ефективність використання ресурсів та якість сприйняття послуг.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Реалізація системи інтелектуального моніторингу QoS-параметрів на всіх ділянках мережі, включно з навантаженням на CPU контролера та комутаторів, дала змогу забезпечити гнучке управління мережею, зменшити обсяг службового трафіку на 56,4% і своєчасно виявляти часові інтервали погіршення QoE, що, у свою чергу, сприяло підвищенню ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг користувачами мережі.

2. Використання алгоритмів оцінки QoE на основі показників PSNR, APSNR, PESQ дозволило об'єктивно визначити рівень якості сприйняття відео- та аудіопотоків кінцевими користувачами. Зокрема, в експериментальних сценаріях запропонований метод інтелектуальної QoE-маршрутизації продемонстрував на 42 % вищу ефективність забезпечення необхідного рівня якості сприйняття порівняно з відомою ML-стратегією QoE-маршрутизації, що підтверджується аналізом кривих кумулятивної функції розподілу CDF.

3. Застосування моделей машинного навчання для прогнозування QoE та адаптивного вибору інтервалу моніторингу дозволило зменшити службове навантаження на мережу й підвищити здатність системи своєчасно виявляти зміни в якості сприйняття, що забезпечило точніше прийняття рішень щодо маршрутизації та дало змогу досягти до 17% виграшу у виборі найкращого шляху для забезпечення необхідного рівня QoE.

4. Розроблений метод доставки відеоконтенту, заснований на багатошляховій маршрутизації з одночасним обслуговуванням кількома

точками доступу, продемонстрував високу ефективність у п'яти динамічних сценаріях моделювання, реалізованих у середовищі Mininet, які передбачали поступове переміщення клієнта між зонами покриття точок доступу, зміну пропускну здатності каналів, перевантаження серверів, тимчасову недоступність маршрутів, а також флуктуації затримки та втрат даних, забезпечивши стабільну якість відеопотоку із середнім значенням PSNR у межах 33–35 дБ, що на 4-8 дБ перевищує показники альтернативних підходів в аналогічних умовах.

Результати дисертаційної роботи використано при формуванні навчальних дисциплін, що викладаються студентам (за навчальним планом) у навчальному процесі кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», зокрема для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» в курсі лекцій з дисципліни «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку», а також у навчальному процесі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» в курсі лекцій з дисципліни «Мережеві інформаційно-комунікаційні технології».

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення якості сприйняття послуг в телекомунікаційній мережі ТОВ «Телекомунікаційна компанія», що підтверджено актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основний зміст роботи, всі теоретичні та практичні результати, дослідження і висновки, які представлено до захисту, одержані автором особисто. У працях (Додаток Б), опублікованих у співавторстві, внесок Медвецького Б.М. є вирішальним, зокрема авторіві належать: у роботі [1] формалізована модель ефективного розподілу ресурсів для забезпечення QoS у мережах 5G; [2] імітаційна модель у Mininet для дослідження централізованої маршрутизації в SDN; [3] проведення моделювання та порівняння QoE-маршрутизації з існуючими підходами; [4] опрацювання та опис результатів процесу зниженню обсягу даних у завданнях оцінки спектру 5G сигналу; [5] концептуальна модель SDN з інтелектуальним

моніторингом і QoE-маршрутизацією; [6] налаштування системи QoS-моніторингу у середовищі Mininet; [7] дослідження впливу методу інтелектуального моніторингу на QoS-користувача; [8] моделювання та дослідження впливу процесу одночасного обслуговування користувача кількома точками доступу на QoE у безпроводних програмно-конфігурованих мережах; [9] алгоритм оцінки QoE на основі QoS; [10] модель ML для прогнозування QoE; [11] імітаційна модель для прогнозування рівня QoE в програмно-конфігурованих мережах; [12] імітаційна модель для дослідження методу одночасного обслуговування користувачів у технологіях 5G-U та Wi-Fi; [13] метод доставки відеоконтенту на основі багатошляхової маршрутизації з одночасним обслуговуванням декількома точками доступу; [14] експериментальна система доставки відеоконтенту із застосуванням SDN-технологій на основі комутаторів Zodiac GX та Zodiac FX. Усі ці роботи демонструють вагомий внесок здобувача в галузі програмно-конфігурованих мереж, управління якістю обслуговування, інтелектуальної маршрутизації та доставки мультимедійного контенту в мережах нового покоління.

Іншим авторам спільних публікацій належить: постановка задач досліджень у сфері SDN та 5G/6G [1–3, 5, 6, 11–14] (М. Beshley, N. Kryvinska); аналітичний огляд літератури та обґрунтування вибору методів [2–4, 7, 10, 13] (О. Panchenko, Z. Mingming); розробка математичного апарату оптимального керування спектром та моделювання завадостійких каналів [4, 12, 13] (В. Rusyn, І. Romanyshyn, D. Ivantyshyn); проєктування топологій SDN-IoT та мультисерверних архітектур [2, 14] (L. Barolli, I. Scherm, T. Dierkes); впровадження методів машинного навчання та їх програмна реалізація [10, 11] (С. Wang, L. Yuan, S. Jun); оцінювання якості обслуговування, розрахунок показників MOS, PSNR, APSNR [3, 8, 13, 14] (Н. Beshley, Y. Shkoropad); розробка і тестування сценаріїв маршрутизації та хендоверу [5–8, 10, 11] (А. Pryslupskyi); організація апробації результатів, підготовка тез конференцій, участь у редагуванні публікацій [11, 12, 14] (О. Urikova, Y. Bobalo, I. Kahalo).

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення дисертаційної роботи були представлені, доповідалися та обговорювалися на п'яти міжнародних науково-технічних конференціях, зокрема на International IEEE Conferences on Advanced Information and Communication Technologies (м. Львів, 2021, 2023 pp.), Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки і застосування САПР» (м. Львів, 2021 р.; м. Ярослав, 2023 р.), а також на Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів–Славське, 2022, 2024 pp.). Крім того, дисертаційна робота в повному обсязі була представлена та обговорена на наукових семінарах кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 14 наукових праць, з них 3 статті у науковому періодичному виданні інших держав, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science (віднесених до квартилів (Q1-Q2)), 1 стаття у науковому виданні інших держав, що входить до наукометричних баз Scopus, 2 статті у наукових фахових виданнях України, та 2 статті у періодичному виданні України, 5 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій індексованих у наукометричній базі Scopus та Web of Science.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 218 сторінок друкарського тексту, із них 8 сторінок вступу, 167 сторінок основного тексту, 75 рисунків, 16 таблиць, список використаних джерел із 111 найменувань та 2 додатків. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список праць автора.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Архітектура і принципи функціонування програмно-конфігурованих мереж

Програмно-конфігуровані мережі, або SDN (Software-Defined Networking) – це мережна архітектура, в якій площина управління мережею відокремлена від мережевих пристроїв і винесена в програмне забезпечення [1]. Такий підхід дозволяє централізовано та гнучко керувати мережевим трафіком за допомогою програм, на відміну від традиційних мереж, де кожен маршрутизатор чи комутатор самостійно приймає рішення. Основна ідея SDN полягає у відокремленні площини управління від площини даних, що спрощує адміністрування і дає можливість програмно налаштовувати мережу згідно з потребами додатків [2]. Це досягнуто через впровадження центрального контролера, який координує роботу мережі і керує потоком даних на всіх мережевих пристроях одночасно [3]. В результаті, SDN забезпечує логічно централізоване управління всією мережею, надаючи адміністраторам глобальний огляд топології і стану мережі та інструменти для швидкої конфігурації політик.

SDN набув популярності завдяки зростаючим вимогам до гнучкості та динамічності сучасних мереж. Традиційні мережі зі статичною конфігурацією важко пристосувати до змін трафіку або нових сервісів, оскільки кожне налаштування потребує внесення змін на багатьох пристроях вручну. Натомість у SDN контролер може програмно змінити маршрути трафіку чи застосувати нові правила безпеки для всіх пристроїв одночасно через стандартизовані інтерфейси. Такий рівень автоматизації і централізації керування значно спрощує розгортання нових мережевих сервісів і прискорює реакцію на події в мережі. SDN вважається однією з форм віртуалізації мережевих ресурсів, адже

дозволяє абстрагувати логіку керування від конкретного мережевого обладнання [4]. Сьогодні концепції SDN лежать в основі багатьох інновацій – від хмарних датацентрів до програмно-конфігурованих WAN-мереж – і продовжують розвиватися, щоб задовольнити потреби масштабованості, безпеки та гнучкості в сучасних комунікаціях.

Архітектура SDN зазвичай поділяється на три основні рівні (площини), які взаємодіють між собою через відкриті інтерфейси. Цими рівнями є: площина даних (інфраструктури), площина управління (контролерів) та площина застосунків (взаємодії).

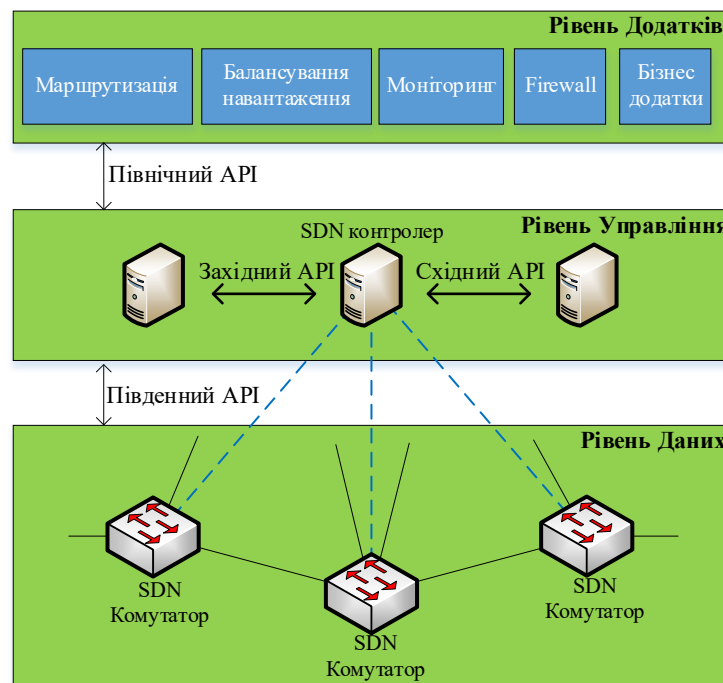


Рис.1.1. Архітектура програмно-конфігурованих мереж

У площині даних SDN-мережі знаходяться фізичні або віртуальні комутатори й маршрутизатори, які безпосередньо виконують пересилання пакетів. На відміну від традиційних мереж, де кожен пристрій сам приймає рішення про маршрутизацію, в SDN ці пристрої працюють під керуванням зовнішнього контролера. Вони просто виконують інструкції: пересилити пакет на певний порт, відкинути його чи змінити певні поля заголовка. Це спрощує обладнання та підвищує швидкість пересилання, оскільки вся інтелектуальна

обробка винесена за межі комутатора. Пристрої площини даних повідомляють контролеру свою поточну інформацію (наприклад, статус портів, статистику трафіку) і чекають на команди щодо того, як обробляти нові потоки даних.

Площина управління представлена одним або кількома центральними SDN-контролерами. Контролер – це програмна система, що виконується на сервері (або кластері серверів) і володіє глобальною картиною мережі. Він отримує інформацію від усіх мережевих пристроїв (топологію, таблиці потоків, статистику) та приймає рішення про передачу даних. Контролер можна розглядати як центральний інтелект мережі або її операційну систему, яка забезпечує управління потоками трафіку відповідно до налаштувань і завдань, визначених на рівні площини застосунків. Він виконує двосторонню комунікацію: через південний інтерфейс з комутаторами для впровадження правил маршрутизації, та через північний інтерфейс з зовнішніми додатками та службами, надаючи їм інформацію про стан мережі і приймаючи від них високорівневі інструкції. Завдяки централізації управління мережею, SDN-контролер може оптимально розподілити ресурси мережі, запобігти перевантаженням, застосувати єдині політики безпеки та QoS по всій мережі. Варто зазначити, що фізично контролерів може бути декілька – для підвищення відмовостійкості або розподілу навантаження.

Площина застосунків (взаємодії) включає всі програми та сервіси, що використовують мережу і потребують певної мережевої функціональності. У традиційних мережах такі функції, як балансування навантаження, брандмаузери, системи виявлення атак або маршрутизація трафіку певним чином, реалізовувалися апаратними засобами (спеціалізовані балансувальники, фаєрволи, тощо) або розподіленими протоколами на самих мережевих пристроях. В SDN ці функції можуть бути реалізовані як програмні модулі або SDN-додатки на верхньому рівні архітектури. Наприклад, застосунок оптимізації трафіку може аналізувати статистику завантаження каналів зв'язку і давати вказівки контролеру перенаправити частину потоків альтернативним

маршрутом для розвантаження магістралі. Інший приклад – мережевий застосунок безпеки може динамічно встановлювати правила блокування підозрілого трафіку на периферійних комутаторах. SDN-додатки взаємодіють з контролерами через північний API, подаючи їм свої вимоги до мережі у вигляді високорівневих політик або запитів. Контролер, у свою чергу, перекладає ці вимоги на конкретні правила маршрутизації і політики на рівні пристроїв. Таким чином, площина застосунків дозволяє інтегрувати мережу із потребами бізнес-логіки та сервісів. Завдяки абстракції, яку надає, розробники можуть створювати інноваційні мережеві додатки, не заглиблюючись у деталі кожного окремого комутатора.

В цілому, архітектура SDN забезпечує модульність і гнучкість: кожна площина виконує свою чітку роль, а стандартизовані інтерфейси між ними дозволяють замінювати або оновлювати компоненти незалежно. Наприклад, можна замінити одного виробника комутаторів іншим – за умови підтримки стандартного південного інтерфейсу (наприклад, OpenFlow) контролер продовжить працювати з новим обладнанням без змін у логіці. Аналогічно, можна додавати нові додатки (наприклад, системи аналітики трафіку), які взаємодіятимуть з існуючим контролером через північний API. Така відкритість і сумісність є ключовою перевагою SDN перед традиційними мережами.

У програмно-конфігурованих мережах (SDN) логічне розділення на площину даних, контрольну площину та площину застосунків потребує чітких механізмів взаємодії. Цю роль виконують три ключові типи інтерфейсів у SDN.

Southbound API (південний інтерфейс) – це інтерфейс між контролером та мережевими пристроями. Через південний інтерфейс контролер надсилає на пристрої команди керування трафіком і отримує від них інформацію про стан. Абстрагує апаратне різноманіття мережевих пристроїв і надає єдиний протокол для управління. Найвідомішим є протокол OpenFlow, який став першою реалізацією SDN-протоколу [5]. Контролер через OpenFlow може додавати, змінювати або видаляти правила в таблицях потоків комутаторів, запитувати у

комутаторів статистику, отримувати повідомлення про нові невідомі потоки тощо. OpenFlow визначає чітку модель комутатора (набір таблиць, набір можливих матчів і дій), що уніфікує управління мережевим обладнанням різних вендорів.

Northbound API (північний інтерфейс) – це інтерфейс між SDN-контролером та додатками/сервісами верхнього рівня (площиною застосунків). На відміну від добре стандартизованого південного інтерфейсу, північні API менш формалізовані і можуть відрізнятися залежно від реалізації контролера. Їхня мета – надати зручний спосіб додаткам звертатися до функцій контролера, не переймаючись низькорівневими деталями. Таким чином, SDN-контролер виступає як шар абстракції між бізнес-рівнем і власне мережею.

East-West інтерфейс – це інтерфейс між контролерами одного рівня, тобто для обміну повідомленнями між декількома SDN-контролерами, що керують різними частинами мережі або працюють в кластері. Цей інтерфейс є критично важливим, якщо SDN-архітектура передбачає розподілену (децентралізовану) площину управління. Хоча концепція SDN передбачає логічну централізацію, фізична децентралізація (розподіл) необхідна для масштабованості великих мереж та підвищення надійності.

1.2 Особливості оцінювання якості обслуговування і якості сприйняття послуг в інформаційно-комунікаційних системах

У сфері телекомунікацій розрізняють поняття Quality of Service (QoS) – якість обслуговування та Quality of Experience (QoE) – якість сприйняття користувача. Хоча обидва показники стосуються якості надання мережеслужб, їхній фокус суттєво різниться [6]. QoS характеризує технічні параметри роботи мережі – пропускну здатність, затримку, джиттер, відсоток втрат пакетів тощо – і відображає, наскільки ефективно мережа забезпечує необхідний рівень сервісу. Натомість QoE відображає суб'єктивне задоволення

кінцевого користувача від роботи сервісу: наскільки користувач вважає послугу зручною, надійною, якісною з його точки зору.

QoS зазвичай вимірюється об'єктивними кількісними показниками (час затримки в мілісекундах, пропускна здатність у Мбіт/с, процент втрат і т.д.), які легко формалізувати і виміряти пристроями [7]. QoE же визначається суб'єктивними оцінками – через опитування користувачів, їхній рівень задоволеності, експертні оцінки якості контенту. Таким чином, навіть при однакових технічних показниках QoS, різні користувачі можуть відчувати різний QoE, оскільки на нього впливають очікування користувача, контекст використання, зручність інтерфейсу та інші людські фактори.

Відмінності між QoS та QoE підсумовано у Табл. 1.1. Загалом, QoS є метрикою, важливою для інженерів мереж (гарантувати продуктивність системи), а QoE – для бізнесу та кінцевого успіху послуги (задоволеність клієнтів). Обидва підходи доповнюють одне одного: висока QoS створює передумови для доброї QoE, але остаточним критерієм успіху сервісу є саме QoE – чи отримав користувач необхідну якість обслуговування.

Таблиця 1.1

Відмінності між QoS та QoE

Аспект	Quality of Service (QoS)	Quality of Experience (QoE)
Фокус оцінювання	Технічні параметри роботи мережі (пропускна здатність, затримка, втрати).	Сприйняття якості послуги користувачем (надійність, зручність, задоволеність).
Метод вимірювання	Об'єктивні метрики і лічильники (через прилади моніторингу мережі).	Суб'єктивні оцінки (опитування, анкети, шкала задоволеності користувачів).
Мета забезпечення	Ефективне використання ресурсів мережі, виконання SLA з технічних показників.	Висока лояльність і задоволення користувачів, відповідність їх очікуванням від сервісу.
Основні споживачі	Інженери та адміністратори мереж (для контролю роботи системи).	Кінцеві користувачі, маркетинг та служби підтримки (для оцінки успіху послуги).

Як видно, QoS є необхідною умовою, але не гарантією хорошої QoE. Тому сучасні підходи до управління мережами орієнтуються на QoE-управління: не

лише контролювати параметри мережі, а й прогнозувати якість сприйняття, фокусуючись на тому, що справді відчуває користувач. Взаємозв'язок параметрів QoS та факторів, що впливають на оцінку QoE користувачем у телекомунікаційних мережах показано на рис.1.2.

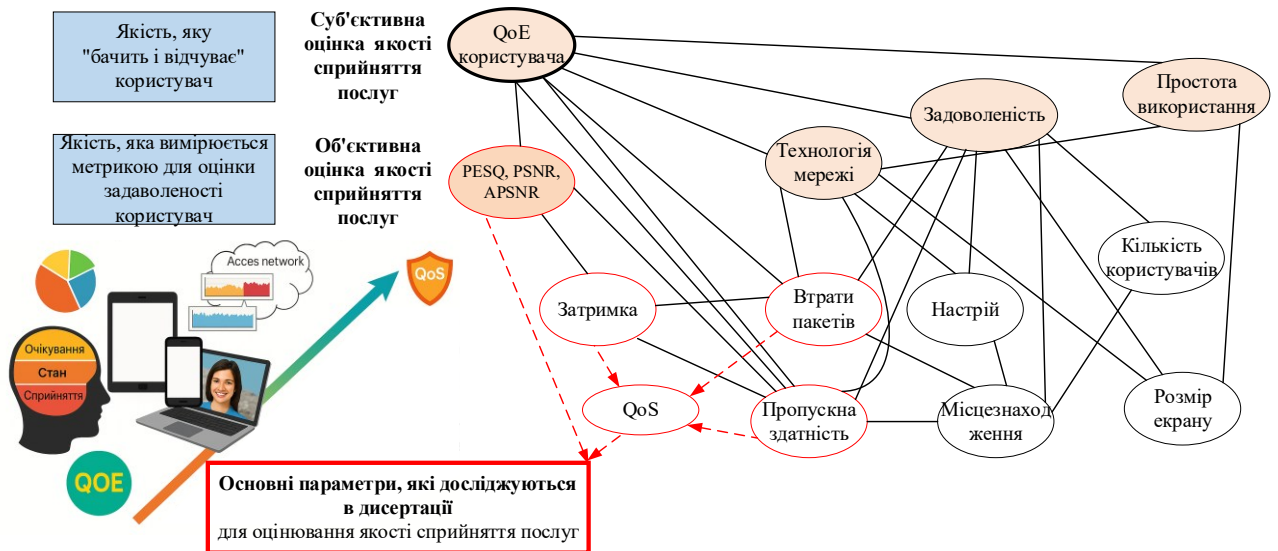


Рис.1.2. Структура взаємозв'язків між технічними параметрами QoS і QoE

Задля кількісної оцінки QoE використовують як суб'єктивні, так і об'єктивні метрики. Найбільш відомим стандартом суб'єктивної оцінки є Mean Opinion Score (MOS) – середня оцінка якості, виставлена групою користувачів за п'ятибальною шкалою (1 – «погано», 5 – «відмінно»). MOS дозволяє безпосередньо виміряти сприйняття, але вимагає проведення дорогої та тривалої кампанії опитувань і може давати розбіжності через людський фактор. Для автоматизації оцінювання QoE розроблено низку об'єктивних метрик, які намагаються передбачити MOS на основі вимірюваних параметрів. Об'єктивні метрики бувають повноеталонні, коли відомий оригінальний сигнал. Прикладами є пікове відношення сигнал/шум (PSNR, Peak Signal-to-Noise Ratio) та індекс структурної подібності (SSIM, Structural Similarity Index Measure). PSNR широко застосовується для оцінки якості відео, проте його недоліком є ігнорування особливостей людського зору [8]. SSIM натомість враховує яскравість, контраст і структурні подібності між зображеннями, краще

корелюючи з сприйняттям спотворень. Існують і інші повноеталонні метрики, зокрема (VQM, Video Quality Metric), що узагальнює вплив шуму, розмиття та блокових артефактів і збільшується зі зростанням рівня спотворень. У потокових відеосервісах (наприклад, DASH, Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) для оцінки QoE також важливі такі показники, як час старту відтворення (затримка буферизації перед початком), кількість та сумарна тривалість пауз (rebuffering), середня роздільність/бітрейт відео, а також частота зміни якості. Дослідження показали, що паузи на буферизацію (сталлінг) – один з найкритичніших факторів, які негайно і значно знижують QoE користувача. Саме тому алгоритми адаптивного потокового відео прагнуть уникати переповнення чи спустошення буфера – наприклад, шляхом зміни рівня якості відео залежно від пропускної здатності каналу.

Для аудіосервісів (зокрема VoIP та потокового аудіо) також використовують MOS як універсальну міру якості мовлення. Об'єктивною альтернативою MOS для голосу є Е-модель (ITU-T G.107) – аналітична модель, що комбінує різні імперичні чинники погіршення якості в єдиний рейтинг R [9]. Е-модель враховує втрати пакетів, кодек, затримку та інші фактори погіршення і обчислює значення R в діапазоні 0–100 (де 100 – ідеальна якість). Це значення потім можна зіставити з очікуваним MOS-класом користувачів. Формально Е-модель визначається рівнянням:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_e + A \quad (1.1)$$

де R_0 – базовий рівень якості, що залежить від відношення сигнал/шум, I_s – погіршення спричинене сигнальними факторами, I_d – погіршення пов'язане із затримкою, I_e – погіршення спричинене обладнанням, A – фактор переваги, який відображає суб'єктивну компенсацію якості. У сучасних цифрових мережах ключову роль часто відіграє фактор I_e , який відображає вплив втрат пакетів і спотворень, спричинених кодеком. Для типового корпоративного середовища Е-модель може бути спрощена до виразу:

$$R = 93,4 - I_e \quad (1.2)$$

Альтернативним підходом до оцінки якості мовлення є використання алгоритмів, таких як PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) або POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Analysis) [10]. Ці методи базуються на порівнянні оригінального та переданого аудіосигналу, генеруючи оцінку, що корелює з MOS. Вони переважно застосовуються для офлайн-тестування, наприклад, для оцінки продуктивності кодеків. Натомість для моніторингу якості в реальному часі в телекомунікаційних мережах перевага надається параметричним моделям, таким як E-модель, завдяки їхній здатності оперативно враховувати мережеві параметри.

З огляду на складність прямого вимірювання QoE в реальному часі, сучасні системи все частіше покладаються на гібридні методи оцінки – коли об'єктивно вимірювані параметри QoS конвертуються у прогнозовану оцінку QoE (MOS) через математичні моделі або алгоритми машинного навчання. Наприклад, існують стандартизовані рекомендації ITU для параметричного оцінювання відео. Зокрема, ITU-T P.1203/1204 описує модель оцінки QoE для потокового відео, яка враховує кількість пауз, частоту перемикання якості та роздільність відтвореного відео, щоб розрахувати підсумковий MOS. Подібні моделі дають можливість мережевим елементам або додаткам автоматично оцінювати якість сервісу з точки зору користувача, не проводячи опитувань, і вживати заходів для покращення QoE.

Незважаючи на успіх складних моделей оцінки якості, виклик залишається в тому, щоб забезпечити моніторинг QoE онлайн, у реальному часі в працюючій мережі. Пряма суб'єктивна оцінка (опитування користувачів) в реальному часі неможлива, тому оператори покладаються на непрямі методи. Існує кілька підходів:

- Параметричне оцінювання QoE. В цьому випадку системи намагаються передбачити QoE на основі вимірюваних QoS-показників в реальному часі. Наприклад, для відеострімінгу можна міряти частоту буферизацій, затримку

старту відео, поточну швидкість потоку – і за допомогою моделі (отриманої наперед шляхом тестів) апроксимувати, який MOS відповідає таким умовам. Подібні моделі стандартизовані для VoIP та відео (серії ITU-T G.107 E-model для голосу, P.1203 для HTTP Adaptive Streaming тощо). Їх можна реалізувати на мережевому обладнанні або у ПЗ контролера, отримуючи оцінку QoE автоматизовано без участі користувача.

- Активний моніторинг і тестові агенти. Оператор може періодично запускати тестові потоки через мережу: наприклад, спеціальні програмні агенти передають еталонне відео і на приймальній стороні обчислюють його якість із відомим оригіналом (тобто застосовують повноеталонний метод). Це фактично автоматизована версія MOS, де експертом є алгоритм. Такий підхід дає оцінку близьку до реальної QoE, але збільшує навантаження на мережу і не завжди відображає QoE реального користувача.

- Аналіз на стороні клієнтського додатку. Багато сучасних застосунків (відеоплеєри, веб-браузери, VoIP-клієнти) самостійно збирають телеметрію якості – рівень гучності, втрати пакетів, затримки, кількість перепідключень, показники буферу тощо. Ці дані можуть у реальному часі надсилатися на сервер моніторингу. На їх основі обчислюється QoE для кожної сесії. Цей метод дуже точний, бо враховує саме те, що бачить користувач, однак потребує підтримки в додатку і домовленостей про збір таких даних (проблеми конфіденційності та інтеграції).

- Методи з використанням ML для оцінки QoE. Новітній тренд – застосування алгоритмів машинного навчання, які, проаналізувавши великий масив даних (об'єктивні метрики, логи застосунків, навіть непрямі ознаки на кшталт перемоток або рівня гучності), навчаються прогнозувати суб'єктивну оцінку якості. Наприклад, запропоновано систему DeepQoE, що за допомогою глибокого навчання оцінює якість відеопотоків навіть у зашифрованому трафіку: вона аналізує патерни пакетів і, не розкриваючи сам контент, робить висновок про ймовірний MOS користувача. Інші роботи демонструють

поєднання активного вимірювання мережевих показників та ML-моделей: так, у середовищі WebRTC було показано, що вимірявши затримку RTP-потoku і використавши навчений алгоритм, можна оцінити відео-QoE без доступу до застосунку. Перевага ML-підходів – здатність врахувати комплексні залежності між параметрами і оновлювати модель по мірі зміни умов, забезпечуючи більш точне відображення реального сприйняття якості послуг.

1.3 Виклики та обґрунтування необхідності розробки нових моделей управління якістю сприйняття у мережах наступних поколінь

Традиційні телекомунікаційні мережі характеризуються жорстко визначеною архітектурою та значною залежністю від апаратного забезпечення. Зокрема, історично мережеві пристрої (маршрутизатори, комутатори) працювали автономно, з розподіленим керуванням і ручним налаштуванням параметрів. Це призводить до низької гнучкості мережі: зміни конфігурації вимагають втручання адміністратора і часто не можуть бути виконані швидко або автоматично. У результаті керування такими мережами є складним, а масштабування – обмеженим. В більшості наукових досліджень відзначається, що статичність традиційних мереж та ручне конфігурування ускладнюють ефективне управління і стримують зростання мережі. До того ж, використання пропрієтарного апаратного забезпечення (фізичних комутаторів, маршрутизаторів тощо) підсилює складність інфраструктури, ускладнюючи централізоване управління мережею. Така архітектура зумовлює обмежену гнучкість і високу операційну складність: внесення змін або впровадження нових функцій потребує значних зусиль і витрат, а реакція на нові вимоги трафіку є повільною. Таким чином, традиційні мережі стикаються з низкою фундаментальних обмежень, які заважають ефективно забезпечувати якість обслуговування та якість сприйняття для сучасних застосувань.

QoS визначає здатність мережі надавати гарантований рівень сервісу для трафіку, вимірюваний об'єктивними показниками такими як затримка пакетів,

джиттер (коливання затримки), рівень втрат пакетів і пропускна здатність каналу. У традиційних IP-мережах переважає модель best-effort, за якої всі пакети обробляються без пріоритетів, і мережа не гарантує фіксованих значень цих показників. Це породжує кілька ключових проблем QoS у звичайних мережах:

- Затримки (Latency): Час доставки пакетів може суттєво зростати під час навантаження мережі. Відсутність механізмів пріоритизації трафіку означає, що пакети реального часу (наприклад, голос чи відео) можуть очікувати в чергах за пакетами менш критичних застосунків, що призводить до великих затримок.

- Джиттер (Jitter): Нестабільність затримки між пакетами викликає коливання в інтервалах прибуття. Високий джиттер особливо шкідливий для аудіо- та відеострімінгу, оскільки одержувачу важко плавно відтворювати потік даних. Непередбачувані варіації затримки можуть спричинити ривки або паузи у відтворенні медіа.

- Втрата пакетів (Packet loss): У перевантажених мережах буферизація маршрутизаторів переповнюється, і пакети відкидаються. Втрата навіть невеликого відсотка пакетів може суттєво знизити якість таких сервісів, як VoIP або відеоконференції (артефакти звуку, погіршення відео тощо). QoS-метрики традиційно включають рівень втрат, оскільки саме цей показник безпосередньо впливає на цілісність переданої інформації.

- Пропускна здатність: Традиційні мережі не гарантують сталі смуги пропускання для окремих застосунків. Пропускна здатність, доступна кожному користувачу, залежить від конкурентного доступу – при зростанні числа одночасних потоків ефективна швидкість для кожного з них падає. Нестабільність пропускної здатності (коливання від високих до низьких значень) призводить до непередбачуваного якості роботи сервісів, особливо помітного під час пікових навантажень.

Через описані фактори забезпечення належного QoS є складним завданням у традиційних мережах. Фахівці зазначають, що надання гарантованого end-to-

end QoS залишається невирішеною проблемою в існуючих мережевих архітектурах. Мережний трафік має різномірну природу, і без спеціальних механізмів керування якістю важко досягти стабільних параметрів для всіх типів послуг. Незважаючи на багаторічні дослідження і стандартизацію (наприклад, моделей інтегрованих або диференційованих служб), QoS досі розглядається як фундаментальна проблема мереж у провідних і бездротових середовищах. Особливо критичними є затримка, джиттер та втрати, оскільки саме вони найбільше впливають на продуктивність інтерактивних та мультимедійних застосунків. В умовах перевантаження мережі ці параметри погіршуються: зростають черги і затримки, відкидаються пакети, а фактична пропускна здатність може коливатися або падати до неприйняттого рівня. Таким чином, традиційна мережа не має вбудованих засобів, щоб гарантувати стабільно високі показники QoS для різних видів трафіку, що створює передумови для пошуку нових моделей управління якістю обслуговування. Як показано на рис. 1.3, QoE формується під впливом параметрів QoS, що вимірюються на різних сегментах телекомунікаційної мережі від мережі доступу до серверів кінцевого призначення.

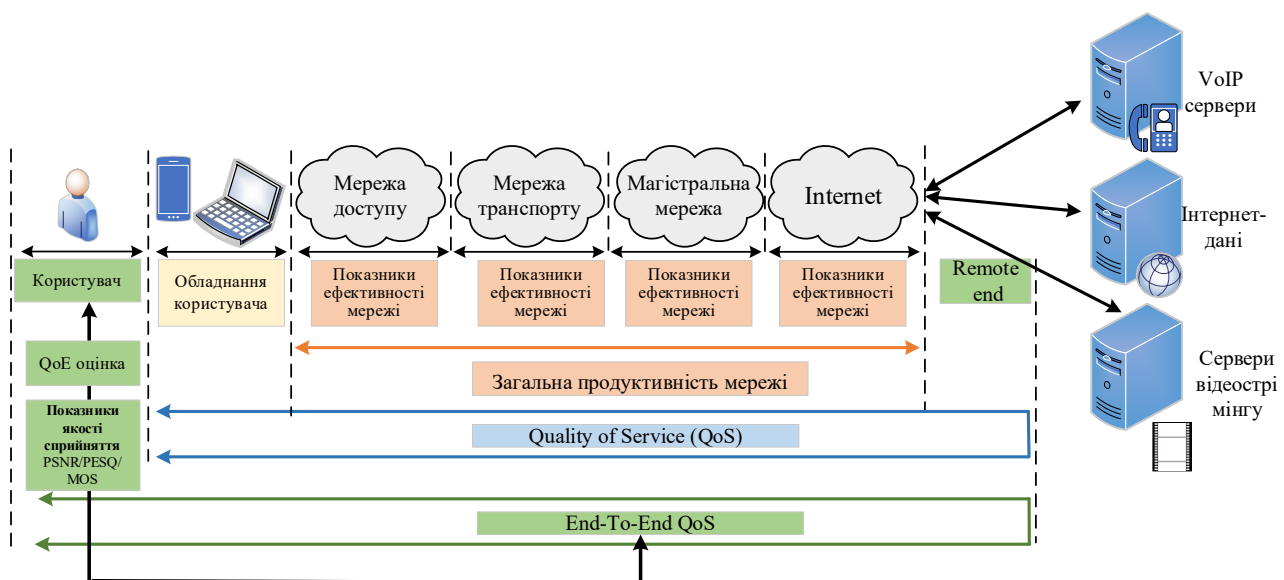


Рис.1.3. Взаємозв'язок оцінки QoE користувача з параметрами QoS на різних сегментах телекомунікаційної мережі

На відміну від QoS, що оперує технічними метриками, QoE відображає суб'єктивну оцінку користувачем отримуваної послуги. QoE фокусується на тому, наскільки задоволеним чи розчарованим є користувач під час користування сервісом. Якість QoE визначається як суб'єктивна оцінка задоволення від користування послугою, що залежить як від технічних параметрів, так і від очікувань користувача..

Гарантувати високий QoE у традиційних мережах складно з кількох причин. По-перше, відсутність прямого зв'язку між QoS і QoE ускладнює управління: хороші показники QoS не завжди гарантують задоволення користувача. Існують випадки, коли два сервіси мають схожі технічні метрики, але сприймаються користувачами по-різному через відмінності в контенті чи інтерфейсі. Співвідношення між QoS і QoE може бути нелінійним: наприклад, невелике поліпшення затримки не помітне користувачу після певного рівня, тоді як перевищення порогу втрат пакетів різко погіршує якість сприйняття сервісу (характерні експоненційні чи логарифмічні залежності між метриками QoS та оцінками QoE). По-друге, QoE залежить від людського фактору та контексту: на сприйняття впливають індивідуальні очікування, характер контенту, пристрій відображення, умови середовища та навіть настрої користувача. Традиційні мережеві системи моніторингу не враховують цих чинників, оскільки вони працюють лише з вимірюваними мережевими показниками.

Ще одна проблема – відсутність методів вимірювання QoE. На відміну від QoS, яку можна оцінити інструментально (часом, відсотком втрат тощо), QoE найчастіше визначається через опитування користувачів або спеціальні моделі, такі як Mean Opinion Score (середній бал думки). У реальному часі мережа не має прямого зворотного зв'язку про суб'єктивне задоволення користувача. Через це оператори змушені опосередковано впливати на QoE, підтримуючи максимально можливий рівень QoS та роблячи припущення про те, як це відобразиться на якості сприйняття. Такий підхід не завжди ефективний:

наприклад, якщо користувачі очікують відео у високій роздільності, навіть достатня з точки зору мережі швидкість може не виправдати їхніх очікувань, що призведе до невдоволення. В традиційних мережах не має можливості реалізувати механізми адаптації якості обслуговування під користувача: мережа не знає, яку саме якість отримує користувач у даний момент і чи задовольняє він його. Відтак, можливі ситуації, коли формально мережеві показники в нормі, але QoE низька через фактори поза контролем мережі.

Погіршення об'єктивних показників QoS майже завжди негативно впливає на QoE. Наприклад, для інтерактивних ігор навіть невелика затримка або втрата пакетів може серйозно знизити задоволення гравця, роблячи гру неплавною і неприємною. Так само, для потокового відео або VoIP, перевищення джиттера чи втрати пакетів викликає помітне погіршення якості (затинання відео, спотворення звуку), що одразу відзначається користувачем. Отже, проблема забезпечення QoE полягає у тому, що навіть при вирішенні суто технічних завдань QoS, мережа має враховувати суб'єктивне сприйняття. Традиційні підходи не пропонують інструментарію для цього: вони не інтегрують зворотний зв'язок від користувача та не можуть динамічно підлаштовувати якість послуг під індивідуальні потреби. Така ситуація є вагомим аргументом на користь розробки нових моделей управління, орієнтованих на кінцевий рівень QoE.

Алгоритми маршрутизації, що використовуються в традиційних мережах, теж мають суттєві обмеження з точки зору гнучкості та швидкості реакції на зміни трафіку. Більшість класичних протоколів (наприклад, OSPF, BGP) були спроектовані для забезпечення коректності та стійкості маршрутизації (знаходження валідних шляхів, уникнення петель, відновлення після відмов), але не для оптимізації продуктивності в умовах динамічного навантаження. У результаті маршрути за замовчуванням обираються за статистичними метриками (статична вага, найменша кількість хопів тощо) і, як правило, залишаються фіксованими, поки не зміниться сама топологія або конфігурація

мережі. Це призводить до ситуацій, коли при зміні розподілу навантаження мережа не переналаштовує маршрути автоматично під нові умови. Якщо певний напрямок перевантажений, пакети продовжують слідувати тим самим шляхом, навіть якщо існують альтернативні менш завантажені канали, оскільки традиційна маршрутизація не враховує поточний стан трафіку (відсутній механізм динамічного балансування навантаження). Таким чином, реагування на зміни навантаження є запізнілим та неефективним: поки адміністратор не втрутиться або поки мережа не виявить критичну проблему (наприклад, відмову вузла), маршрути залишаються незмінними.

Негнучкість традиційної маршрутизації проявляється і в обмеженому використанні множинних шляхів. Хоча деякі протоколи підтримують рівномірний поділ трафіку між рівноцінними маршрутами (ECMP), загалом відсутня можливість гнучко перерозподіляти потоки в реальному часі залежно від завантаження. Дослідження відзначають, що такі сучасні можливості, як балансування навантаження (динамічний розподіл трафіку між різними маршрутами), фактично відсутні у традиційних мережах. Це означає, що класична мережа не може самостійно уникнути ситуації, коли один канал перевантажений, а інший простоює, шляхом перерозподілу частини потоків – такі дії не передбачені без додаткових механізмів. Більш того, час реакції протоколів маршрутизації на серйозні зміни (наприклад, обрив зв'язку) може вимірюватися секундами чи навіть хвилинами, як у випадку глобальних протоколів на зразок BGP. Протягом цього часу мережа може працювати в деградованому стані, пакети можуть слідувати неоптимальними обхідними маршрутами або губитися. У контексті змін саме навантаження (не відмов, а коливань інтенсивності трафіку) традиційні протоколи взагалі не пропонують автоматичної корекції маршрутів, оскільки їхні метрики не оновлюються залежно від миттєвого рівня заторів. Відповідно, основною перешкодою є не відсутність механізмів адаптації, а недостатня здатність мережі до адаптації в режимі реального часу до змін трафіку

Наслідком негнучкої маршрутизації є неефективне використання ресурсів і погіршення показників QoS. Якщо окремі сегменти мережі перенавантажені, виникають черги і втрати, тоді як інші сегменти можуть мати резерв пропускної здатності. Традиційна мережа, як правило, не перерозподіляє динамічно трафік для вирівнювання завантаження. Це підтверджується тим, що механізми балансування трафіку в режимі реального часу розглядаються вже в контексті сучасних підходів, тоді як у звичайних мережах така здатність відсутня. Таким чином, маршрутизація в традиційних мережах є обмеженою встановленими статичними правилами і погано реагує на динаміку трафіку, що створює передумови для розробки гнучкіших моделей управління трафіком.

Описані вище проблеми керування і маршрутизації безпосередньо призводять до неефективного використання мережевих ресурсів. Під ресурсами розуміємо пропускну здатність каналів, обчислювальні можливості вузлів (комутаторів, маршрутизаторів), буферну пам'ять, час процесора для обробки трафіку тощо. У традиційній мережі розподіл цих ресурсів відбувається децентралізовано і часто статично, що нерідко створює як перевантажені, так і недовантажені сегменти. Наприклад, при проектуванні мережі є поширеною практика закладати в ядро мережі високу пропускну здатність, щоб впоратися з піковими навантаженнями. Однак у години пік окремі ділянки все одно можуть страждати від перевантаження (через нерівномірний розподіл потоків), тоді як в непікові години значна частина пропускної спроможності простоює. Дослідники відзначають таке явище: під час пікових годин критичні сервіси ледве підтримують роботу через перевантаження, тоді як у міжпікові періоди мережеві ресурси лишаються невикористаними. Іншими словами, мережа налаштована на максимальні навантаження, але не може гнучко перерозподілити чи масштабувати ресурси відповідно до актуальної потреби в кожен момент часу. Це призводить до марнування ресурсів (idle capacity) у один час і недостатності ресурсів у інший.

Крім часового дисбалансу, присутній і просторовий дисбаланс ресурсів у мережі. Окремі канали можуть бути перевантажені трафіком, якщо туди спрямовано багато потоків (через обмеження маршрутизації, описані вище), тоді як альтернативні маршрути лишаються напівпорожніми. Аналогічно, буферна пам'ять на одних вузлах може переповнюватися, тоді як на інших – використовуватися мінімально. Таке нераціональне використання ресурсів зумовлене відсутністю глобальної координації в традиційній архітектурі: кожен маршрутизатор приймає рішення локально, не маючи повної картини навантаження в масштабах мережі. Інженери мереж часто стикаються з необхідністю компромісів, щоб уникнути катастрофічних заторів: типово ресурси резервують із надлишком (*over-provisioning*) для критичних сегментів, що веде до їхнього недовантаження більшу частину часу, але гарантує роботу у піку. Такий підхід не є оптимальним економічно і технічно, адже інфраструктура не використовується на повну потужність.

Особливо складним є керування ресурсами у розподіленому середовищі з обмеженими ресурсами, як-от бездротові або сенсорні мережі. В таких системах пропускна здатність та енергетичні ресурси строго обмежені, і неефективний розподіл призводить не тільки до простою каналів чи затримок, а й до передчасного вичерпання заряду батарей, зниження терміну служби вузлів тощо. У традиційних мережах відсутні засоби централізованого або кооперативного планування ресурсів між вузлами. Як наслідок, гарантувати оптимальне використання кожного ресурсу практично неможливо – завжди існують сценарії, де або спостерігається перевантаження і деградація якості, або ресурси витрачаються неефективно.

Сумарно, неефективність використання ресурсів проявляється у двох вимірах: (1) неповне використання доступних можливостей мережі (коли мережа могла б пропустити більший обсяг трафіку або обслуговувати більше користувачів при кращому управлінні), і (2) нездатність забезпечити необхідні ресурси там і тоді, де вони потрібні (коли критичні служби страждають від

браку пропускної здатності чи високих затримок, хоча в інших частинах мережі ресурси є). Це пряма вказівка на необхідність нових моделей управління: таких, що зможуть адаптивно та оптимально розподіляти мережеві ресурси в масштабах усієї системи, реагуючи на поточний попит і пріоритети сервісів.

Перелічені проблеми традиційних телекомунікаційних мереж – низька гнучкість архітектури, труднощі із забезпеченням QoS (затримки, втрати, нестабільність пропускної здатності), розрив між QoS та суб'єктивною QoE, негнучка маршрутизація та неефективне використання ресурсів – разом створюють серйозні перешкоди для надання якісних послуг сучасним користувачам. У міру зростання вимог до мереж (стрімінгові сервіси, реального часу комунікації, масове підключення пристроїв тощо) ці обмеження стають все більш критичними. Традиційні підходи більше не забезпечують необхідного рівня керованості і продуктивності мережі. Це обґрунтовує нагальну потребу в розробці нових моделей управління QoS/QoE – таких, що зможуть подолати вказані недоліки. Нові моделі мають враховувати динаміку трафіку, забезпечувати гарантії якості на рівні сервісу та користувацького сприйняття, гнучко маршрутизувати потоки залежно від ситуації та ефективно використовувати наявні ресурси мережі. Лише вирішивши описані проблеми, можна досягти стійкого високого QoS та QoE в телекомунікаційних мережах наступного покоління, що є мотивацією для активних наукових досліджень у цьому напрямку.

1.4 Огляд наукових досліджень щодо розвитку методів управління якістю сприйняття послуг у програмно-конфігурованих мережах

З появою потокових мультимедійних послуг, таких як 4K/8K і доповнена реальність, управління та оптимізація надання мультимедійних послуг кінцевим користувачам залишається складним завданням для операторів мобільного зв'язку, інтернет-провайдерів. Для вирішення існуючих проблем і викликів, пов'язаних з управлінням мультимедійним трафіком і якістю

сприйняття в мережах наступного покоління, потрібні нові підходи до управління мережею і послугами для мультимедійних сервісів. Тому майбутні мережі поступово переходять від традиційної монолітної структури, орієнтованої на апаратне забезпечення, до сучасної концепції гнучких, віртуалізованих та програмно-конфігурованих систем на основі технологій SDN, NFV і хмарних або граничних обчислень. SDN і NFV докорінно змінили дизайн 5G і мереж наступних поколінь, пропонуючи такі функції, як реконфігурація, програмованість, гнучкість і адаптивність для підтримки різноманітних варіантів використання, включаючи потокові мультимедійні послуги. Більшість інтернет-сервісів, зокрема обчислювальні, комунікаційні послуги та сервіси доставки контенту з ефектом присутності, змінюють підхід від класичної централізованої моделі клієнт-сервер до більш розподіленої і модульної парадигми, що розглядаються як ключові технології для управління мережею і послугами в майбутніх інтелектуальних мережах.

Однак, підтримка та покращення якості сприйняття [11] при наданні мультимедійних послуг вважається складним завданням через декілька факторів, включаючи [12] (а) змінні характеристики мережі, (б) обмеженість мережевих ресурсів, нестабільність безпроводних каналів та характеристик фіксованих/мобільних мереж в гетерогенних середовищах, та (в) появу нових додатків та послуг VR/AR, послуги потокового відео з ефектом присутності та хмарні відеоігри) у поєднанні з оптимізацією операційних витрат мобільних операторів та постачальників послуг. Швидке зростання і популярність мультимедійних послуг в Інтернеті, а також неоднорідність пристроїв кінцевих користувачів з різними можливостями, такими як обчислювальна потужність, можливості зберігання даних і розмір екрану, також сприяють виникненню проблем з управлінням якістю сприйняття. Більше того, дуже складним завданням є розподіл ресурсів між кінцевими користувачами з різними уподобаннями щодо QoE.

Незважаючи на значні зусилля постачальників послуг та операторів мереж, спрямовані на підвищення якості обслуговування для потокового мультимедіа, існують дві ключові технічні проблеми для досягнення загального управління, моніторингу та контролю мультимедіа в мережах 5G з гарантією забезпечення QoE. По-перше, створення надійної, точної, масштабованої і стійкої моделі прогнозування QoE для потокового відео високої чіткості в мобільних мережах 5G та мереж наступного покоління - це постійна активна область досліджень [13], яка розвивається в поєднанні з технологіями доставки контенту.

По-друге, популярність і стрімке зростання мультимедійних сервісів створюють ще більше викликів під час розподілу обмежених ресурсів між користувачами з різними вимогами щодо QoE. Зокрема, моделі потокового передавання на основі QoE повинні враховувати гетерогенність кінцевих пристроїв із різними технічними можливостями, такими як розмір екрана, обчислювальні ресурси, обсяг пам'яті тощо. У мережах 5G і наступного покоління, зокрема в мережах 6G, такі характеристики мають враховуватись інтелектуальними методами. Крім того, розвиток технологій AR/VR створив нові виклики в мережевій сфері щодо забезпечення ефективної підтримки таких застосунків.

Розвиток мереж п'ятого (5G) та шостого (6G) поколінь висуває нові вимоги до забезпечення якості сприйняття користувачів. У сучасних дослідженнях особлива увага приділяється процесам впровадження технологій SDN та NFV - як засобам гнучкого та ефективного управління мережевими ресурсами з метою покращення QoE.

У всеосяжному огляді, представленому Barakabitze [14], запропоновано уніфікований підхід до управління якістю сприйняття в контексті програмно-конфігурованих мереж 5G/6G. Зокрема, автори описують узагальнену екосистему забезпечення QoE для мультимедійних сервісів, що базується на інтеграції технологій SDN, NFV та мобільних обчислень на краю мережі (MEC). Огляд охоплює низку сценаріїв застосування, включно з QoE-

орієнтованим управлінням мультимедійним трафіком у крайових сегментах мережі, адаптивним моніторингом якості за умов змінного навантаження, а також використанням методів машинного навчання у SDN-контролерах для автоматизованого управління QoE в мережах нового покоління.

У контексті мереж 5G особливої актуальності набувають архітектурні рішення для управління якістю сприйняття користувачів (QoE), що базуються на концепції SDN та інтегруються з бізнес-процесами операторів зв'язку. Зокрема, у дослідженні Nairi [15], запропоновано нову SDN-архітектуру для мереж 5G, яка передбачає інтеграцію моделі Enhanced Telecom Operations Map (eTOM) з метою удосконалення процесів моніторингу та керування QoE. Представлений підхід охоплює сценарій верифікації угод про рівень послуг (SLA), заснований на eTOM, що дозволяє покращити ефективність управління якістю сприйняття за рахунок поєднання гнучкого контролю, який забезпечується SDN, зі стандартизованими бізнес-процесами управління послугами.

Іншим важливим напрямом є забезпечення QoE в межах архітектури мережевої сегментації (network slicing), яка є ключовою характеристикою мереж 5G. Завдяки можливостям програмно-конфігурованих мереж оператори отримують змогу динамічно розподіляти мережеві ресурси між різними сервісами на основі QoE-вимог кінцевих користувачів. У роботах [12], присвячених розвитку 5G і перспективних 6G мереж, наголошується на необхідності глибокої інтеграції інтелектуальних функцій управління, що сприятимуть досягненню мінімальних затримок і високої пропускної здатності – критично важливих характеристик для підтримки нових типів трафіку, таких як XR, VR або тактильний інтернет.

Зокрема, у дослідженні Taħa [16] зазначається, що архітектура мереж шостого покоління буде побудована на основі розширених механізмів штучного інтелекту та синхронного управління ресурсами в режимі реального часу. Це зумовлює необхідність переосмислення ролі QoE як ключового

критерію ефективності управління, а також створення нових методів оцінки та забезпечення QoE в умовах високої динаміки та гетерогенності трафіку, притаманних мережам 6G.

Ефективне управління якістю сприйняття є неможливим без постійного моніторингу на рівні кінцевого користувача. Традиційні методи вимірювання здебільшого обмежуються оцінюванням параметрів QoS, однак сучасні дослідження активно впроваджують інтелектуальні системи, здатні безпосередньо оцінювати рівень QoE на основі як об'єктивних, так і суб'єктивних метрик - таких як індекси якості відео, оцінки MOS, а також поведінкові характеристики користувача.

Так, у роботі Saadi [17] представлено апаратно-програмний комплекс для провайдерів інтернет-послуг, орієнтований на моніторинг QoE широкого спектру сервісів (веб-контент, потокове відео, VoIP, IPTV, Wi-Fi) на різних рівнях мережевої інфраструктури. Розроблена система інтегрується у внутрішню архітектуру оператора зв'язку та забезпечує збір QoE-показників у реальному часі як з кінцевих пристроїв, так і з вузлів мережі. Експериментальне впровадження системи в інфраструктурі великого провайдера підтвердило її здатність до моніторингу мережі та своєчасного виявлення проблем, які негативно впливають на сприйняття послуг. Таким чином, оператор отримує інструмент для проактивного управління: наприклад, у разі виявлення зниження QoE відеострімінгу в певному географічному сегменті, система може ініціювати перепланування ресурсів або повідомлення технічним службам.

Окрему категорію рішень становлять системи, що автоматизують оцінювання QoE із застосуванням методів машинного навчання (ML). Зокрема, Bassey та Umoren [18] запропонували систему моніторингу QoE для відеострімінгу у безпроводних локальних мережах (WLAN), яка використовує алгоритми підтримки векторів (SVM) та штучні нейронні мережі для класифікації рівнів QoE. Модель була навчена на основі великого масиву суб'єктивних оцінок якості відео, зібраних від реальних користувачів протягом

60 днів, що дозволило виявити стійкі кореляційні залежності між метриками QoS (затримка, втрати пакетів, нестабільність каналів) та оцінками QoE. Результатом стала розробка високоточного (~90%) програмного модуля з графічним інтерфейсом, інтегрованого у WLAN-середовище для візуалізації поточного рівня QoE та підтримки рішень щодо оптимального використання мережевих ресурсів.

Одним із ключових напрямів забезпечення якості сприйняття користувача є розробка алгоритмів маршрутизації, що враховують показники сприйняття під час вибору шляхів передавання даних. На відміну від традиційних підходів, орієнтованих переважно на параметри QoS, новітні методики спрямовані на безпосередню оптимізацію кінцевого QoE.

Прикладом такого підходу є дослідження Ge та ін. [19], у якому запропоновано QoE-центричний алгоритм маршрутизації на основі методу k-найкоротших шляхів Єна (Yen's K-shortest paths). Запропоноване рішення враховує обмеженість мережевих ресурсів і спрямоване на забезпечення високої якості сприйняття користувачів. У цьому контексті вибір маршрутів здійснюється не лише за критеріями мінімальної затримки або пропускної здатності, а й із урахуванням впливу на сприйняття, зокрема зменшенням переривань відеопотоку.

Особливої актуальності набуває проблема QoE-маршрутизації для відеотрафіку, включаючи потокове відео та контент віртуальної реальності (VR). Так, Liu та ін. [20] представили схему QoE-орієнтованої маршрутизації для VR-відео в SDN-мережах, відому як QFR (QoE-driven Fine-grained Routing). Рішення було орієнтоване на задоволення жорстких вимог VR-додатків, які вимагають значної пропускної здатності та наднизької затримки. Запропонована методика забезпечує гнучкий вибір маршрутів у програмно-конфігурованому середовищі, динамічно адаптуючись до зміни мережевих умов для збереження стабільної якості сприйняття.

Окремий підхід до оптимізації QoE полягає в інтеграції функцій маршрутизації з кешуванням контенту. У цьому контексті Fekih та ін. [21] запропонували архітектуру R3CMN для мобільних мереж, орієнтованих на потокове відео. Ця архітектура поєднує принципи інформаційно-центричних мереж (Information-Centric Networking, ICN) із можливостями SDN для побудови розумної маршрутизації та розподілу кешованого контенту. Результати емпіричного дослідження засвідчили переваги R3CMN порівняно з традиційними методами доставки контенту, зокрема у вигляді зниження часу доступу до відео та підвищення показників QoE.

Сучасною тенденцією у сфері управління мережевим трафіком є використання методів штучного інтелекту та машинного навчання для реалізації інтелектуальної маршрутизації, спрямованої на оптимізацію QoE у режимі реального часу. Один із прикладів такого підходу представлено в дослідженні Darwich та Khalil [22], де розроблено систему QoE-орієнтованого управління трафіком у SDN, призначену для систем відеоспостереження IoT. У межах запропонованої архітектури SDN-контролер використовує рекурентну нейронну мережу (RNN) для прогнозування оптимальних маршрутів передавання відео з камер спостереження. Попередня обробка відеопотоків виконується на крайових вузлах, після чого застосовується спеціалізований алгоритм маршрутизації, навчений для максимізації QoE. Проведені експерименти показали суттєве зниження втрат пакетів і скорочення затримки до 50%, водночас точність прогнозування найкращого маршруту сягнула 94%, що забезпечило підвищення загального рівня якості сприйняття послуг.

Іншим перспективним напрямом є застосування підходів навчання з підкріпленням для динамічної маршрутизації. Turner та ін. [23] запропонували інтелектуальну мультимедійну систему, яка поєднує технології SDN з агентом RL для оптимізації QoE при потоковій передачі відео. Агент у режимі реального часу досліджує стан мережі та навчається вибирати маршрути, які забезпечують найвищу якість для кінцевого користувача з урахуванням

затримок, навантаження та втрат. За результатами експериментів, система досягла кращих показників відеоякості (оцінених за метриками VMAF і SSIM), а також забезпечила вищу пропускну здатність та нижчий рівень втрат порівняно з класичними алгоритмами. Навчений агент був здатен своєчасно змінювати маршрути під час пікових навантажень, зокрема у вечірній час, коли трафік від стримінгових сервісів досягає максимуму, тим самим запобігаючи деградації QoE.

Крім оптимізації відеострімінгу, методи глибокого навчання знаходять застосування у складніших мережесценаріях, зокрема для обслуговування множинних ланцюгів мережесценаріїв (Service Function Chains, SFC). У дослідженні Yan та ін. [24] розглянуто задачу кооперативної маршрутизації множинних SFC з урахуванням QoE. Запропоновано багатокритеріальну модель оптимізації, що враховує утилітарність користувача, стабільність QoE та загальну затримку, з метою забезпечення якісного обслуговування всіх активних ланцюгів. Розв'язання задачі здійснюється з використанням алгоритму Deep Q-Network (DQN), доповненого вдосконаленою архітектурою Dueling DQN. Результати моделювання продемонстрували переваги розробленого підходу у порівнянні з наявними методами – зокрема щодо показників середнього QoE, затримки, пропускну здатності та стійкості до відмов мережесценарієвих елементів.

Маршрутизація з урахуванням параметрів QoS залишається однією з найпоширеніших стратегій оптимізації мережесценарієвого сервісу. Переважна більшість підходів використовує обмежений набір мережесценарієвих метрик як суворі обмеження, оптимізуючи за іншими показниками [25], [26]. Так, алгоритм Widest Shortest Path (WSP) спочатку знаходить найкоротші шляхи, а з-поміж них обирає маршрут із найбільшою пропускну здатністю [27]; натомість Shortest Widest Path (SWP) спершу відсіює шляхи з максимальною пропускну здатністю, а далі вибирає той, що має мінімальну кількість переходів [28]. У

низці робіт проблема прокладання маршруту за умови гарантованої пропускної здатності розглядається як ключова [29], [30].

Однак наведені QoS-орієнтовані стратегії ігнорують реальний QoE кінцевого користувача, тобто не оцінюють якість сприйняття самого сервісу. Це зумовлює потребу у QoE-орієнтованих методах маршрутизації, зосереджених на сприйнятті сервісу користувачем. Наприклад, Найтінгейл та ін. запропонували фреймворк 5G-QoE для моделювання сприйняття UHD-відео в мережах 5G [31]; Лемешко та ін. розробили адаптивний алгоритм маршрутизації з оцінкою QoE на основі R-фактора з E-моделі [32]; Nam та ін. застосували QoE-орієнтований підхід до відеоструменевих сервісів [33]. Усі ці роботи спрямовані на підвищення продуктивності застосунків завдяки урахуванню QoE.

Водночас далеко не всі існуючі стратегії використовують адекватні індикатори QoE, що корелюють із суб'єктивним сприйняттям. Так, у [33] пропонуються метрики затримки запуску відео, частоти буферизації та рівня заповнення буфера, проте їхній безпосередній зв'язок із людським QoE неочевидний. Подібним чином Баракабітзе та ін. фокусуються на мінімізації кількості перемикань якості та затримки старту [34]; проте приналежність цих показників до справжньої QoE не підтверджено. Отже, актуальним залишається вимірювання таких метрик, що достовірно відображають суб'єктивне сприйняття.

Для цього застосовують як суб'єктивні, так і об'єктивні показники QoE [35]. Наприклад, Лю та ін. [20] запропонували систему оцінювання VR-відео, основу на опитуваннях користувачів. Попри точність, такі методи складно масштабувати та неможливо використовувати в реальному часі. Тому дедалі більшої популярності набувають машино вимірювані індикатори: Ху та ін. залучили ML для прогнозування показника PESQ у VoIP-сценаріях [37], а Jіe та ін. [38] використовували PSNR як KPI відео якості. Такі метрики легко автоматизуються й можуть служити наближеним відображенням QoE.

Не менш важливим є й адекватний моніторинг стану мережі. Існують дві базові парадигми: End-to-End (E2E) та між вузлові (per-link) вимірювання. E2E-метрики оцінюють конкретний шлях «A ↔ B» лише в момент потреби, тому отримані значення найточніше відповідають реальним доступним ресурсам; такий підхід активно застосовується як у QoS-, так і в QoE-маршрутизації [39], [40]. Разом із тим E2E-тестування є дорогим з погляду на передавання трафіку [41], а очікування завершення повного циклу вимірювань може затримувати встановлення маршруту, що критично, наприклад, для голосових сервісів.

1.5 Формулювання науково-практичного завдання дисертаційного дослідження

На основі проведеного аналізу робіт, дотичних до тематики дисертаційного дослідження, встановлено, що у сучасних телекомунікаційних мережах ключовим критерієм успішності надання послуг стає не лише забезпечення гарантованих показників QoS, а й досягнення високої якості QoE. На відміну від QoS, який характеризує суто технічні параметри, QoE є інтегрованою метрикою, що відображає суб'єктивне сприйняття сервісу кінцевим користувачем. Забезпечення QoE вимагає урахування не лише параметрів затримки, пропускної здатності та втрат пакетів, але й таких аспектів, як тип трафіку, чутливість сервісу до спотворень, контекст користування та динаміка навантаження.

Однак, більшість традиційних підходів до управління мережами орієнтуються переважно на параметри QoS. У таких підходах рішення щодо маршрутизації, обробки трафіку або масштабування ресурсів приймаються на основі фіксованих технічних метрик, без урахування впливу цих рішень на реальне сприйняття якості послуги користувачем. Як наслідок, навіть при формально задовільних QoS-показниках, користувач може відчувати низький рівень якості обслуговування через затримки відтворення відео, буферизацію чи нестабільну якість аудіо.

Крім того, сучасні інтелектуальні мережі, побудовані на основі архітектури SDN, відкривають нові можливості для динамічного та адаптивного управління трафіком завдяки централізованому контролеру та програмно-керованим правилам (Рис.1.4). Проте існуючі реалізації часто застосовують фіксовані інтервали моніторингу, які не враховують динаміку трафіку, що знижує ефективність реагування на погіршення QoS/QoE. З іншого боку, занадто частий моніторинг призводить до перевантаження службовими даними, створюючи додаткове навантаження на контролер і канали зв'язку, що, у свою чергу, негативно впливає на продуктивність та QoE.

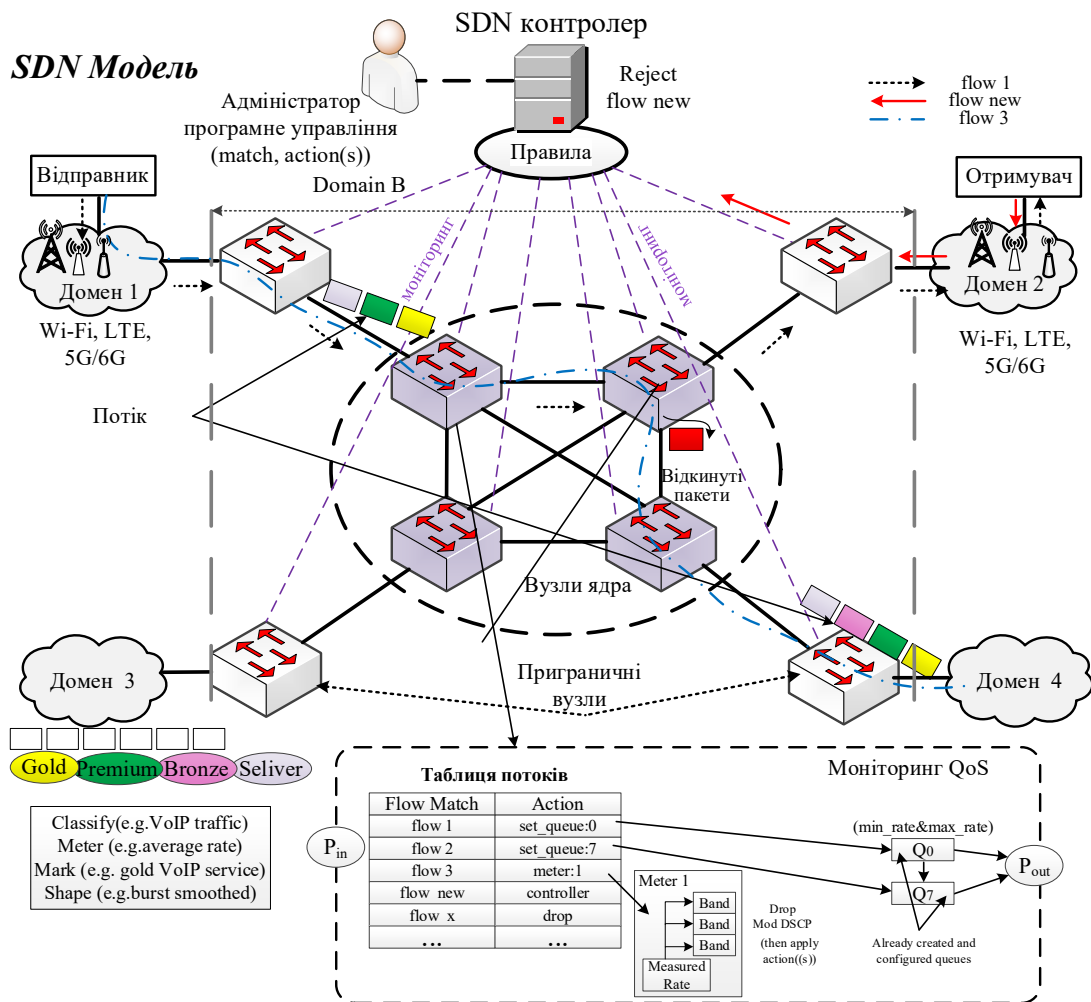


Рис.1.4. Основні методи управління трафіком та QoS в SDN

Ще одним обмеженням традиційних SDN-рішень є відсутність підтримки багатошляхової маршрутизації та одночасного обслуговування кількох

точками доступу, що є критично важливими в умовах перевантажених каналів і зростаючих вимог до потокової передачі мультимедійного контенту. Водночас прийняття рішень у таких мережах часто здійснюється на основі поточних метрик без урахування прогнозованого впливу на QoE, що не дозволяє своєчасно попереджати зниження якості.

У цьому контексті постає потреба у розробленні інтелектуальних методів, здатних адаптивно реагувати на зміну мережових умов, прогнозувати рівень якості сприйняття та забезпечувати ефективну маршрутизацію трафіку і доставку відеоконтенту з урахуванням обмеженості ресурсів. Такі методи мають враховувати як технічні, так і поведінкові характеристики користувачів, тип трафіку, пріоритетність сервісів, а також можливості мережевої інфраструктури.

Таким чином, з урахуванням зростання обсягів, різноманітності та динаміки інформаційних потоків у телекомунікаційних мережах, а також зважаючи на ключову роль програмно-конфігурованих мереж як технологічної основи для побудови майбутніх мережових архітектур 5G/6G, актуальним науково-практичним завданням є підвищення якості сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах шляхом розроблення інтелектуальних методів моніторингу стану мережі, маршрутизації трафіку та ефективної доставки відеоконтенту в умовах обмежених ресурсів і змінних вимог користувачів.

Висновки до 1-го розділу

Сучасні телекомунікаційні мережі стикаються зі зростаючими вимогами до гнучкості та якості послуг, що ставить під сумнів ефективність традиційних підходів. Традиційні мережі мають жорстко визначену архітектуру, залежність від апаратного забезпечення, децентралізоване керування та ручне налаштування, що призводить до низької гнучкості, обмеженої масштабованості та високої операційної складності. Це ускладнює забезпечення належного рівня якості обслуговування (QoS), що

характеризується технічними параметрами, такими як затримка, джиттер, втрата пакетів та пропускна здатність. Зокрема, традиційні IP-мережі працюють за моделлю "best-effort", не гарантуючи пріоритетів чи фіксованих показників.

Крім того, існує відмінність між об'єктивними метриками QoS та суб'єктивною якістю сприйняття (QoE), яка відображає задоволення кінцевого користувача. QoE залежить від багатьох чинників, включаючи людський фактор та контекст, і її важко виміряти в реальному часі. Традиційні алгоритми маршрутизації є негнучкими та не враховують динаміку трафіку, що призводить до неефективного використання ресурсів мережі та погіршення показників QoS.

Наукові дослідження активно розвивають методи управління якістю сприйняття, особливо зосереджуючись на QoE-орієнтованій маршрутизації. Хоча традиційні алгоритми маршрутизації QoS враховують мережеві метрики, вони не завжди відображають реальну якість сприйняття сервісу користувачем. Сучасні підходи використовують як суб'єктивні (наприклад, MOS), так і об'єктивні метрики (наприклад, PSNR, SSIM, E-модель) для оцінки QoE, а також активно застосовують машинне навчання для прогнозування QoE на основі мережевих параметрів. Важливим аспектом є вибір між наскрізними (E2E) та метриками каналу для моделювання QoE, причому метрики каналу, які часто збираються в SDN, можуть бути життєздатною альтернативою E2E метрикам, незважаючи на їхні переваги.

Таким чином, описані проблеми традиційних мереж та можливості, які надає SDN, обґрунтовують необхідність розробки нових, гнучких та адаптивних моделей управління QoS/QoE, орієнтованих на кінцевого користувача та ефективне використання ресурсів, що є ключовим напрямком для телекомунікаційних мереж наступного покоління.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Концептуальна модель інтелектуального управління якістю сприйняття послуг у SDN-інфраструктурі

У роботі запропоновано концептуальну модель інтелектуального управління якістю сприйняття послуг у програмно-конфігурованих мережах (SDN), яка спрямована на розв'язання актуального науково-практичного завдання підвищення QoE в умовах обмежених ресурсів та змінних вимог користувачів (Рис.2.1). Модель поєднує методи адаптивного моніторингу стану мережі, інтелектуальної маршрутизації трафіку та ефективної доставки відеоконтенту, що особливо важливо для сучасних мереж із високою динамікою навантаження та вимогами до обслуговування мультимедійних сервісів [42].

Ключову роль у запропонованій концепції відіграє SDN-контролер, який реалізує централізоване інтелектуальне управління мережею. У межах моделі розроблено три методи: метод інтелектуального моніторингу стану мережі, метод інтелектуальної маршрутизації з урахуванням QoE та метод багатошляхової маршрутизації відеопотоків з можливістю одночасного обслуговування кількох точками доступу. Перший метод дозволяє динамічно змінювати інтервали збору телеметрії залежно від прогнозованих змін QoE, що забезпечує зниження обчислювального навантаження на контролер. Другий метод формує оптимальні маршрути передавання трафіку з урахуванням поточних і прогнозованих показників QoE, забезпечуючи максимальну якість сприйняття послуг для кінцевого користувача. Третій метод реалізує багатошляхову маршрутизацію відеопотоків у ситуаціях, коли користувацький пристрій одночасно підключений до кількох точок доступу, таких як 5G/Wi-Fi, що дає змогу розподіляти трафік між каналами, підвищуючи надійність

передавання даних, зменшуючи втрати пакетів та забезпечуючи ефективніше використання доступних ресурсів.

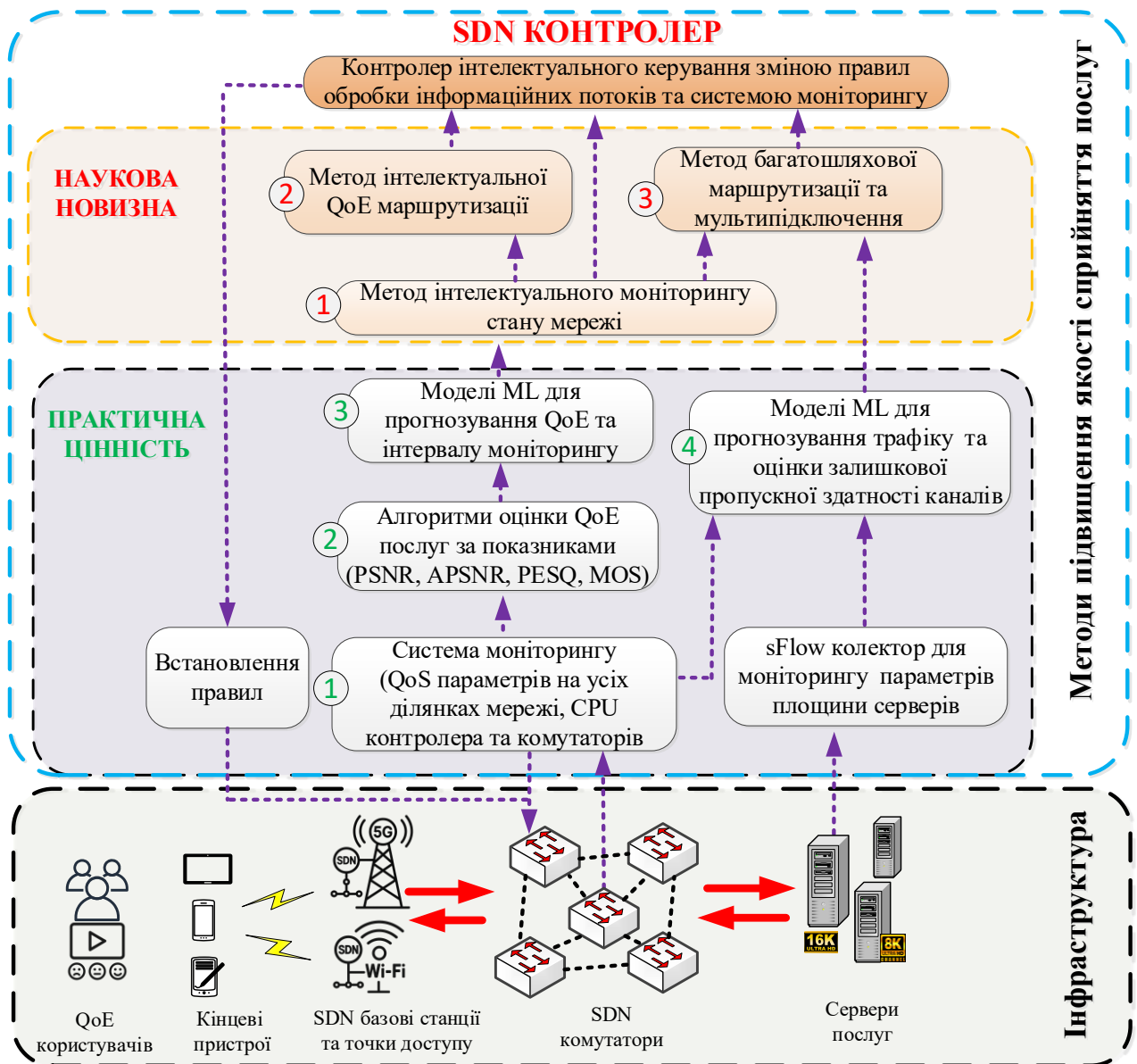


Рис.2.1. Концептуальна модель інтелектуального управління якістю сприйняття послуг у SDN-інфраструктурі

Розглянемо основні функціональні компоненти запропонованої моделі, які слугують основою для реалізації розроблених методів.

Система моніторингу в SDN-відповідає за збір інформації про стан мережі в реальному часі. Вона вимірює ключові параметри якості обслуговування (QoS) на мережевих лінках – затримку, джиттер, пропускну спроможність та

втрати пакетів, оскільки саме ці метрики визначають базову продуктивність мережі. Централізований SDN-контролер, маючи глобальний огляд мережі, постійно моніторить трафік і стан вузлів та оперативно реагує на зміни; при цьому його власна продуктивність (наприклад, завантаженість CPU) безпосередньо впливає на якість обслуговування в мережі. Тому система моніторингу також відстежує завантаження ресурсів, зокрема CPU контролера та комутаторів, щоб попередити перевантаження або відмови. Вимірювання використання CPU контролера (процесора контролера) слугує показником його поточного навантаження, а контроль за використанням CPU комутаторів дає оцінку рівня навантаження на кожен мережевий вузол.

Необхідність моніторингу полягає в тому, щоб забезпечити достовірні дані для ухвалення рішень мережевим контролером. Якщо, приміром, виявлено збільшення затримки або джиттера на певному каналі, контролер може вжити заходів (перемаршрутизувати трафік, змінити пріоритети тощо) ще до того, як це суттєво вплине на користувачів. Дані про стан мережі також є основою для оцінки якості сприйняття послуг користувачами: самі по собі метрики QoS не відображають суб'єктивного сприйняття, але слугують вхідними величинами для моделей оцінки QoE. Таким чином, система моніторингу – це фундаментальний інструмент для інтелектуального моніторингу стану мережі, оскільки вона забезпечує збір необхідної інформації для подальшого інтелектуального аналізу. Зібрані показники мережі і ресурсів надходять до модулів аналізу, де далі використовуються для розрахунку показників QoE та ухвалення рішень щодо маршрутизації.

Поряд із забезпеченням QoS, сучасні мережі все більше фокусуються на алгоритмах оцінки QoE – якості сприйняття користувача, тобто наскільки задоволеним є кінцевий користувач послугою [43]. QoE враховує суб'єктивне сприйняття сервісу (відео, голосу, вебдодатку тощо) і допомагає операторам налаштовувати мережу відповідно до очікувань користувачів. Пряме вимірювання QoE є складним через його багатоаспектну природу та

необхідність зворотного зв'язку від реальних користувачів. З цією метою у межах концепції пропонуються *алгоритми оцінки якості* сприйняття послуг (QoE), що реалізують підходи до обчислення відповідних індикаторів на основі аналізу характеристик медіаконтенту або параметрів мережі. У структурно-функціональній моделі SDN-мережі передбачено модуль, який обчислює такі показники для оцінки якості послуг:

- MOS – середня оцінка думки користувачів[44]. MOS є числом від 1 до 5, що відображає середню суб'єктивну оцінку якості, отриману від групи людей. Наприклад, для голосового чи відео-зв'язку MOS=5 означає відмінну якість, а MOS=1 – дуже погану. Це базовий показник QoE, отриманий шляхом опитування, але його можна прогнозувати і об'єктивними методами.

- PESQ – перцептуальна оцінка якості мовлення [45]. Це стандартизований алгоритм (ITU-T P.862), що аналізує переданий і отриманий голосовий сигнал та видає оцінку, яка корелює із суб'єктивним MOS для телефонії. Проще кажучи, PESQ автоматично пророкує, яку MOS-оцінку дав би середній слухач для якості голосового з'єднання. Цей алгоритм широко застосовується для VoIP та аудіосервісів.

- PSNR – пікове відношення сигнал/шум. PSNR є об'єктивною метрикою, що використовується для оцінки якості відео (або зображень) шляхом порівняння оригінального та переданого відеосигналів [46]. Вимірюється в децибелах і характеризує ступінь спотворення: що вищий PSNR, то менше втрачених деталей і краща формальна якість зображення. Наприклад, відео без помітних артефактів матиме $PSNR > 40$ дБ, тоді як сильно стиснене – < 30 дБ. Однак, варто зауважити, що попри популярність і простоту обчислення, значення PSNR не завжди добре відображає суб'єктивну якість з точки зору людини. Тому були запропоновані вдосконалені варіанти метрики PSNR. Один із таких – APSNR – враховує вирівнювання кадрів або локальне усереднення якості. Дослідження показують, що локально усереднений показник PSNR (APSNR) може мати значно кращу кореляцію з MOS, ніж стандартний PSNR.

Таким чином, APSNR точніше передбачає реальну якість сприйняття відео користувачами у порівнянні з традиційним PSNR.

Застосування наведених алгоритмів оцінки QoE дозволяє SDN-контролеру отримати кількісні показники якості, яку відчуває користувач. Їхнє значення для якості сприйняття послуг кінцевими користувачами є визначальним: мережеві рішення можна приймати не лише на основі технічних метрик QoS, а й з огляду на те, як вони вплинуть на кінцевого споживача. Наприклад, PSNR дає уявлення про чіткість переданого відео, а PESQ/MOS – про розбірливість мови у VoIP-з'єднанні. Якщо певний відеопотік має низький прогнозований MOS, система може вирішити переключити його на інший шлях із кращими умовами або збільшити виділену йому пропускну здатність. Отже, алгоритми оцінки QoE є ключовими для реалізації методу інтелектуальної QoE-маршрутизації, оскільки вони надають мережі здатність розуміти якість обслуговування очима користувача. Знання показників QoE для різних сервісів дає змогу контролеру пріоритезувати трафік і маршрути таким чином, щоб максимально підвищити задоволеність користувачів.

Взаємозв'язок між моніторингом та оцінкою QoE полягає в наступному: отримані системою моніторингу дані QoS (затримка, втрати, швидкість тощо) можуть слугувати вхідними параметрами для обчислення QoE-метрик. Далі, маючи як QoS, так і обчислені QoE показники, система здатна ухвалювати більш обґрунтовані рішення щодо керування трафіком. Наступним кроком є використання методів штучного інтелекту для автоматизації та прогнозування цих показників у реальному часі.

Інтеграція *моделей машинного навчання* (ML) в SDN-контролер дозволяє зробити моніторинг і управління мережею значно більш інтелектуальними та проактивними. Зокрема, ML використовується у схемі для двох тісно пов'язаних завдань: прогнозування QoE послуг та динамічного налаштування інтервалів моніторингу.

По-перше, моделі ML можуть навчатися на історичних даних мережі (показниках QoS, параметрах трафіку) і відомих значеннях QoE (наприклад, вимірних MOS або PSNR), щоб будувати модель залежності між ними. Надалі така модель здатна прогнозувати показники QoE в режимі реального часу на основі поточних вимірів QoS, топології тощо. Сучасні дослідження демонструють зростаючий тренд використання методів глибокого навчання для передбачення QoE користувачів. Результати показують, що за наявності достатнього обсягу даних можна досягти високої точності оцінки задоволеності користувача без прямого опитування. Приміром, у наступному розділі буде описано одну з практичних реалізацій запропонованого підходу, в межах якої було зібрано понад 20 тисяч зразків мережевих параметрів та суб'єктивних оцінок користувачів. Навчена модель Random Forest забезпечила прогнозування рівня задоволеності з точністю близько 95,8%, що дало змогу в режимі реального часу здійснювати оптимальний розподіл ресурсів для підтримання високого рівня QoE. Таким чином, ML-модуль прогнозування QoE в межах концептуальної моделі побудови інтелектуальної програмно-конфігурованої мережі дає контролеру змогу передбачати, як користувачі сприйматимуть зміни мережі, і завчасно коригувати налаштування (наприклад, змінювати маршрут або пропускну здатність) для запобігання погіршенню якості. Така можливість є основою для реалізації згаданого вище методу інтелектуальної QoE-маршрутизації, адже рішення про маршрути тепер можуть прийматися з урахуванням не поточного QoE, а прогнозованого наперед.

Другим важливим компонентом в пропонованій концепції мережі є *адаптивне визначення інтервалів моніторингу*, що реалізуються за допомогою ML-моделі, що аналізує динаміку мережевих станів. Фіксований частий опит мережевих лічильників (пакетних лічильників, станів портів тощо) може створювати значне навантаження на контролер і канал управління, тоді як надто рідкісні вимірювання призводять до втрати актуальності даних. Інтелектуальна система моніторингу в пропонованій концепції SDN може в

майбутньому використовувати алгоритми навчання (наприклад, методи reinforcement learning – навчання з підкріпленням) для оптимізації частоти опитування комутаторів. Зокрема, агент з підкріпленням може динамічно змінювати інтервал між вимірюваннями, прагнучи зберігати показники точності контролю в межах допустимих, але мінімізувати накладні витрати на збір даних. У результаті такого підходу досягається баланс: підтримується належна актуальність інформації про мережу при зниженні навантаження на систему. За даними досліджень, адаптивне вибіркового моніторингу дозволяє скоротити кількість службових повідомлень на 55–70% порівняно з традиційною фіксованою частотою опитування. Це означає менше зайвого трафіку між контролером та комутаторами і менше використання CPU контролера для обробки телеметрії, при збереженні достатньої точності даних про мережевий стан. Суть методу інтелектуального моніторингу стану мережі полягає у здатності системи підлаштовуватися під умови, наприклад, за стабільного трафіку опитування здійснюється рідше, а за різких змін частіше, без потреби в ручному налаштуванні. В цілому, застосування ML у моніторингу та прогнозуванні QoE робить управління мережею проактивним: контролер не просто реагує на вже здійснений факт погіршення якості, а прогнозує його та запобігає. Інформація від ML-моделей (прогнози QoE, оптимальні інтервали опитування) надходить до модуля прийняття рішень SDN-контролера, тісно інтегруючись із функціями маршрутизації. Далі розглянемо, як ML-моделі використовуються для прогнозування трафіку та залишкової пропускної здатності – ще одного важливого аспекту адаптивного керування маршрутизацією.

Ефективне управління маршрутами в SDN вимагає не лише врахування поточного стану мережі, але й прогнозу її завантаження наперед [47]. Тому у концепції передбачено модулі машинного навчання для прогнозування мережевого трафіку та оцінки залишкової пропускної здатності каналів. Призначення цих модулів – допомогти контролеру приймати оптимальні

рішення щодо маршрутизації та розподілу навантаження, базуючись на прогнозованих умовах, а не тільки на миттєвих вимірах.

Прогнозування трафіку ґрунтується на аналізі часових рядів даних про інтенсивність потоків. Сучасні методи ML (наприклад, рекурентні нейронні мережі LSTM, моделі на основі градієнтного бустингу XGBoost, тощо) дають змогу з високою точністю передбачати майбутні коливання трафіку на основі історичних шаблонів мережевого навантаження [48-49]. Загалом прогнозування інтернет-трафіку є надзвичайно цінним для ефективного керування мережею та виділення ресурсів. Завдяки прогнозу контролер, маючи централізований огляд всієї мережі, може гнучко й завчасно переналаштовувати маршрути, щоб уникнути перевантаження: наприклад, якщо очікується пікове навантаження на певному відрізку через кілька секунд, частину потоків можна завчасно перевести на альтернативні шляхи. Іншими словами, точний прогноз трафіку дає можливість динамічно керувати ресурсами для запобігання перевантажених ділянок мережі і підтримання високого рівня QoS [50]. У випадку SDN це особливо актуально – центральний контролер, знаючи наперед де і коли зросте трафік, може проактивно здійснити перевантаження маршрутів, балансування навантаження або масштабування ресурсів. Дослідження підтверджують, що точні передбачення трафіку підвищують ефективність рішень щодо маршрутизації і перемикання, покращуючи загальну продуктивність і масштабованість мережі.

Тісно пов'язаним із прогнозуванням трафіку є оцінка залишкової пропускної здатності (англ. available bandwidth) на мережевих каналах. Залишкова пропускна здатність – це різниця між максимальною теоретичною пропускною спроможністю каналу та поточним/прогнозованим навантаженням на нього. Моделі ML можуть допомагати оцінити цей параметр у реальному часі, враховуючи як виміряні дані, так і прогноз трафіку. Наприклад, якщо пропускна здатність лінку – 1 Гбіт/с, а прогнозований трафік на наступну хвилину – 700 Мбіт/с, то очікувана залишкова пропускна здатність ~300 Мбіт/с.

Контролер використовує цю інформацію при виборі маршруту для нових потоків або при балансуванні існуючих: очевидно, варто спрямувати трафік шляхом, де є достатній запас пропускної здатності. ML-моделі можуть працювати на рівні окремих каналів або шляхів. Замість окремого моніторингу кожного каналу, модель здійснює оцінку сумарної спроможності маршруту щодо доставки трафіку. На основі цієї оцінки SDN-контролер обирає той маршрут, який відповідає заданим вимогам до якості обслуговування (QoS) та забезпечує найбільш ефективне балансування мережевого навантаження. По суті, такий підхід дозволяє виконувати маршрутизацію на основі прогнозованого залишкового ресурсу: маршрут планується з урахуванням майбутньої доступної ширини каналу, а не тільки поточної. Це надзвичайно важливо для багатошляхових рішень, коли трафік можна розподілити між кількома шляхами.

Інформація від ML-модуля прогнозу трафіку і пропускної здатності безпосередньо впливає на ефективність роботи алгоритмів маршрутизації в контролері. По-перше, вона дає змогу реалізувати *метод багатошляхової маршрутизації з одночасним обслуговуванням декількома точками доступу* [51]. Зокрема, контролер, знаючи залишкову пропускну здатність на різних альтернативних шляхах, може організувати одночасне використання кількох маршрутів для одного з'єднання або розподіл потоків між шляхами. Це підвищує надійність (у разі проблем на одному з каналів трафік може йти іншими) та ефективність використання ресурсів (можна задіяти сумарну пропускну спроможність декількох маршрутів). По-друге, прогнозування трафіку сприяє кращому балансуванню навантаження в мережі: інтелектуальний контролер уникатиме ситуацій, коли один шлях перевантажений, а інші простоюють. Замість реактивного перемикання вже після появи перевантаження, він розподілить трафік заздалегідь. У результаті мережа працює ближче до оптимальної ефективності – високий середній рівень використання каналів без локальних перевантажень.

Нарешті, знання про залишковий ресурс каналів дозволяє гарантувати дотримання вимог QoS для критичних потоків. Якщо новий високопріоритетний потік (наприклад, відеоконференція) надходить у систему, контролер на основі прогнозних даних обере для нього маршрут, який забезпечить необхідну пропускну здатність і затримку (тобто де залишковий ресурс достатній), замість того щоб покладатися на поточний стан, який може миттєво змінитися. Даний підхід є проявом проактивного QoS-орієнтованого управління.

Таким чином, пропонована концептуальна модель SDN-мережі демонструє, як поєднання системи моніторингу, алгоритмів оцінки QoE та моделей машинного навчання дає змогу побудувати інтелектуальну мережу, здатну самостійно адаптуватися до умов трафіку і забезпечувати високий рівень якості сприйняття послуг для кінцевих користувачів. Система моніторингу постачає контролер актуальною інформацією про мережу (метод інтелектуального моніторингу), модулі QoE переводять технічні параметри в показники QoE (основа для інтелектуальної QoE-маршрутизації), а модулі ML прогнозують майбутній стан мережі (трафік, QoE, ресурси) та оптимізують як моніторинг, так і маршрутизацію. У сукупності ці компоненти дають змогу SDN-контролеру приймати рішення, що максимально враховують QoE користувача і ефективно використовують ресурси мережі. Такий підхід є практично цінним кроком уперед у напрямку побудови інтелектуальних мереж наступного покоління 5G/6G [52].

У наступних розділах розглядаються детальні принципи роботи запропонованих методів інтелектуального управління, зокрема механізми моніторингу стану мережі, оцінювання якості сприйняття послуг (QoE) та адаптивної маршрутизації, що реалізуються в рамках загальної концепції.

2.2 Метод інтелектуального моніторингу стану функціонування програмно-конфігурованої мережі з адаптивним управлінням інтервалом спостереження та прогнозування змін показників якості сприйняття

Програмно-конфігуровані мережі вирізняються розділенням площини управління та площини даних, що надає контролеру глобальний огляд і централізований контроль мережі. Протокол OpenFlow часто розглядається як стандартний засіб для конфігурації і моніторингу комутаторів у середовищі SDN [53-55]. Контролер, використовуючи OpenFlow, може не лише встановлювати правила обробки трафіку на комутаторах, а й отримувати зворотну інформацію про стан мережі та трафік. Зокрема, OpenFlow дозволяє запитувати детальну статистику по потоках (лічильники пакетів і байтів) та вводити спеціальні пакети в мережу для моніторингу. Ці можливості відкривають шлях до гнучкого і точного контролю стану мережі централізовано через контролер.

Для порівняння, традиційні протоколи моніторингу мережі, такі як SNMP або NetFlow, мають істотні обмеження[56]. SNMP надає дані переважно на рівні інтерфейсів (портів) і вузлів, агрегуючи трафік по всьому комутатору або інтерфейсу, що не дає уявлення про окремі потоки[57-58]. Крім того, SNMP вимагає регулярного опитування пристроїв, яке при занадто частому виконанні може перевантажувати їх CPU. NetFlow забезпечує пасивний моніторинг потоків через вибірккову обробку пакетів (наприклад, кожен n-ний пакет) та екстраполяцію статистики на основі цих вибірок. Такий підхід прийнятний для довгострокових усереднених показників, але точність знижується: дрібні або короткочасні потоки можуть залишитися непоміченими або недооціненими. На відміну від цього, SDN-контролер завдяки OpenFlow отримує безпосередній доступ до лічильників кожного потоку без вибіркковості, що забезпечує більш точний та оперативний моніторинг трафіку.

Таким чином, завдяки вбудованим механізмам OpenFlow контролер може здійснювати моніторинг стану мережі двома різними підходами: активним та

пасивним. Нижче розглянемо переваги, обмеження й типові сценарії застосування кожного підходу.

Активні методи моніторингу полягають у введенні спеціально створеного тестового трафіку в мережу з метою вимірювання таких параметрів, як затримка, втрати пакетів і пропускна здатність каналів. Цей метод використовує спеціальні пробні пакети, які проходять через контрольовані маршрути. У контексті OpenFlow активні вимірювання можуть виконуватись за допомогою повідомлень типу PacketOut. SDN-контролер формує пробний пакет, який надсилається через заданий маршрут. На кінцевому вузлі цей пакет повертається контролеру, повідомленням типу PacketIn, що дозволяє точно виміряти час проходження маршруту.

Головна перевага активних методів моніторингу – пряме вимірювання потрібного показника в контрольованих умовах. Він дозволяє отримати дані навіть якщо реальний трафік відсутній або недостатній. До того ж, активні методи можуть бути дуже точними у часі – достатньо використовувати високоточні таймери. Однак недоліком є додаткове навантаження на мережу: моніторингові пакети займають смугу пропускання і можуть впливати на користувацький трафік. Якщо надсилати такі пакети надто часто, це створює значний вплив і може навіть спричинити перевантаження контролера SDN запитами.

Пасивний моніторинг базується на спостереженні за реальним мережевим трафіком без введення додаткових пробних пакетів. В SDN мережах цей метод реалізується через збір статистики портів, потоків і інтерфейсів, що дозволяє оцінювати втрати пакетів, завантаженість каналів та інші параметри. За допомогою OpenFlow, пасивний моніторинг виконується шляхом регулярних запитів статистики (Stats Request), зокрема статистики портів (PortStatsRequest) або потоків. Лічильники OpenFlow фіксують кількість прийнятих, переданих і відкинутих пакетів, що дозволяє контролеру розраховувати рівень втрат та фактичну пропускну здатність каналів.

Головна перевага пасивних методів – відсутність впливу на трафік: вони не створюють додаткового навантаження на мережу. Це особливо цінно в середовищах із великими обсягами трафіку, де введення додаткових пакетів небажане. Пасивний моніторинг дозволяє спостерігати за реальною поведінкою мережі під навантаженням, фіксуючи метрики всіх користувацьких потоків одразу. Однак пасивні методи можуть пропускати короткотривалі чи малопомітні потоки (особливо при вибіркового зборі даних).

Сучасні методи моніторингу в SDN мережах часто поєднують активний і пасивний підходи для досягнення оптимального балансу між точністю та впливом на мережу[59]. Наприклад, контролер може пасивно вимірювати загальний стан мережі за допомогою статистики OpenFlow, а при виявленні аномалій виконувати точні активні вимірювання, щоб локалізувати та вирішити проблему. Таким чином, моніторинг із використанням OpenFlow у SDN дозволяє ефективно поєднувати різні методи для забезпечення високої якості обслуговування та точного контролю за станом мережі, відповідаючи вимогам різних сценаріїв експлуатації та діагностики [60].

Вимірювання затримки між контролером і комутаторами відбувається з використанням повідомлення Echo. Як згадано, Echo-повідомлення – це вбудований спосіб перевірки зв'язку між контролером і комутаторами. Контролер може регулярно (наприклад, щосекунди) надсилати *Echo Request* на кожен комутатор і вимірювати час до отримання *Echo Reply*. Цей інтервал часу включає двосторонню затримку: від контролера до комутатора і назад. Контролер Ryu ініціює пакет OFP_ECHO_REQUEST до кожного під'єданого комутатора і реєструє мітку часу $T_{request}$. Комутатор, отримавши Echo Request, негайно повертає Echo Reply з тим самим навантаженням. Після отримання OFP_ECHO_REPLY з ідентичним ідентифікатором контролер фіксує T_{reply} . Різниця отриманих значень відображає повний час проходження пакета та відповіді, тобто RTT:

$$RTT_{ctrl_sw} = T_{reply} - T_{request} \quad (2.1)$$

Якщо припустити, що шлях до і від комутатора симетричний, приблизний час одного напрямку:

$$D_{ctrl_sw} \approx \frac{RTT_{ctrl_sw}}{2} \quad (2.2)$$

Пакети Echo передаються по службових каналах зв'язку між контролером та комутаторами, тому не навантажують канали які призначені для передавання корисних даних мережі – їхній розмір не перевищує 64 байти. Процес вимірювання затримки між контролером та комутаторами зображено на рис. 2.2.

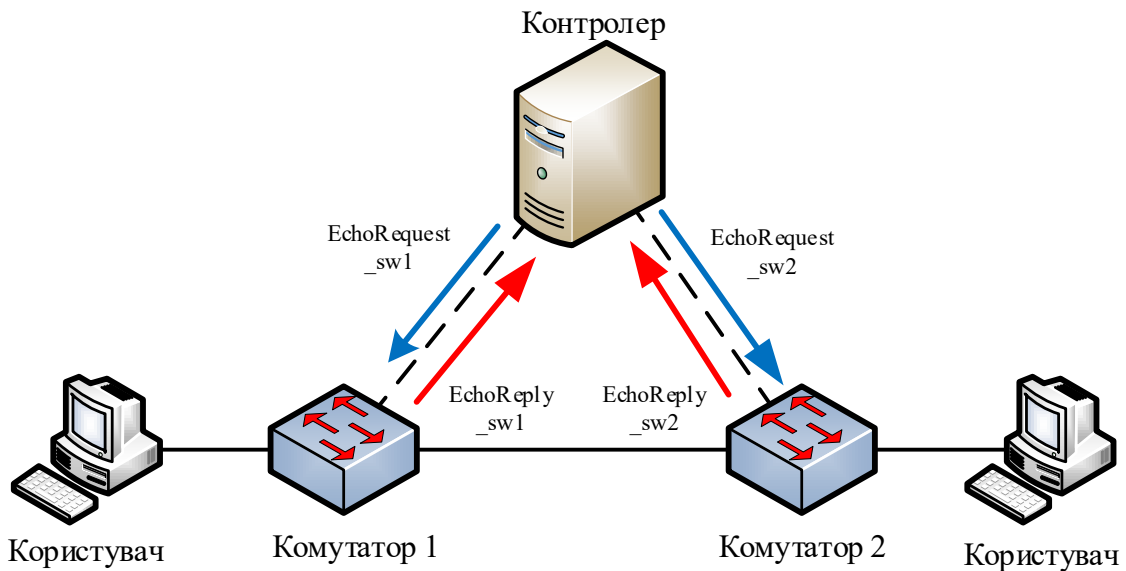


Рис.2.2. Процес вимірювання затримки між контролером та комутаторами

Для вимірювання затримки у каналах зв'язку між комутаторами використовується протокол LLDP. Це стандартний протокол канального рівня для виявлення мережевих пристроїв у мережі. У SDN-контексті LLDP широко застосовується контролером для автоматичного виявлення топології мережі [61]. Контролер періодично від імені кожного OpenFlow-комутатора розсилає LLDP-кадри на всі його порти, ці кадри приймаються сусідніми комутаторами і

надсилаються назад до контролера, що дозволяє йому визначити, які комутатори з'єднані між собою якими портами.

Формат LLDP-кадру при цьому виглядає так:

- Ethernet-заголовок: Destination MAC = спеціальна multicast-адреса LLDP (01-80-C2-00-00-0E), Source MAC = MAC відправляючого порту комутатора; EtherType = 0x88CC (LLDP).

- LLDP PDU (набір TLV полів): починається з Chassis ID TLV (ідентифікатор відправника, часто це MAC або інший унікальний ID комутатора), Port ID TLV (ідентифікатор порту відправника), TTL TLV (час життя, зазвичай 120 с). Потім можуть іти опційні TLV: контролер може вставити Custom TLV з міткою часу (напр. Type = нестандартне значення, Length = 8 байт, Value = 64-бітний timestamp). LLDP-кадр завершується End of LLDPDU TLV (маркер кінця).

- CRC: 4-байтовий контрольна сума кадру (FCS).

Контролер для кожного дуплексного каналу $e_{i,j}$ формує LLDP-кадр і надсилає його як OFPT_PACKET_OUT на порт $p_{i \rightarrow j}$ комутатора S_i із часовою позначкою T_s . Коли сусідній комутатор S_j приймає цей кадр, він за відсутності спеціального правила сприймає LLDP як некерований трафік і надсилає його до контролера використовуючи повідомлення OFPT_PACKET_IN, додаючи локальну позначку T_r . Контролер, маючи раніше виміряні $D_{ctrl_sw_i}$ та $D_{ctrl_sw_j}$, обчислює затримку каналу.

$$D_{total} = T_r - T_s \quad (2.3)$$

Щоб визначити саме затримку між комутаторами, треба усунути вплив затримки каналу контролер-комутатор. Для цього використовується описаний вище спосіб з Echo повідомленням. В результаті, маючи повний RTT і знаючи затримку між контролером та комутатором, залишається затримка на ділянці між комутаторами.

$$D_{sw_i-sw_j} = D_{total} - D_{ctrl-sw_i} - D_{ctrl-sw_j} \quad (2.4)$$

Послідовність і взаємодія відображені на рис.2.3. При фіксованому інтервалі опитування Δt (наприклад 1с) контролер оновлює матрицю $D = \{D_{sw_i-sw_j}\}$ і фіксує значення для подальшого аналізу.

У підсумку контролер отримує значення затримки на кожному лінку і може використовувати його, наприклад, при виборі найкращих маршрутів, виявленні аномально повільних з'єднань чи зміні топології.

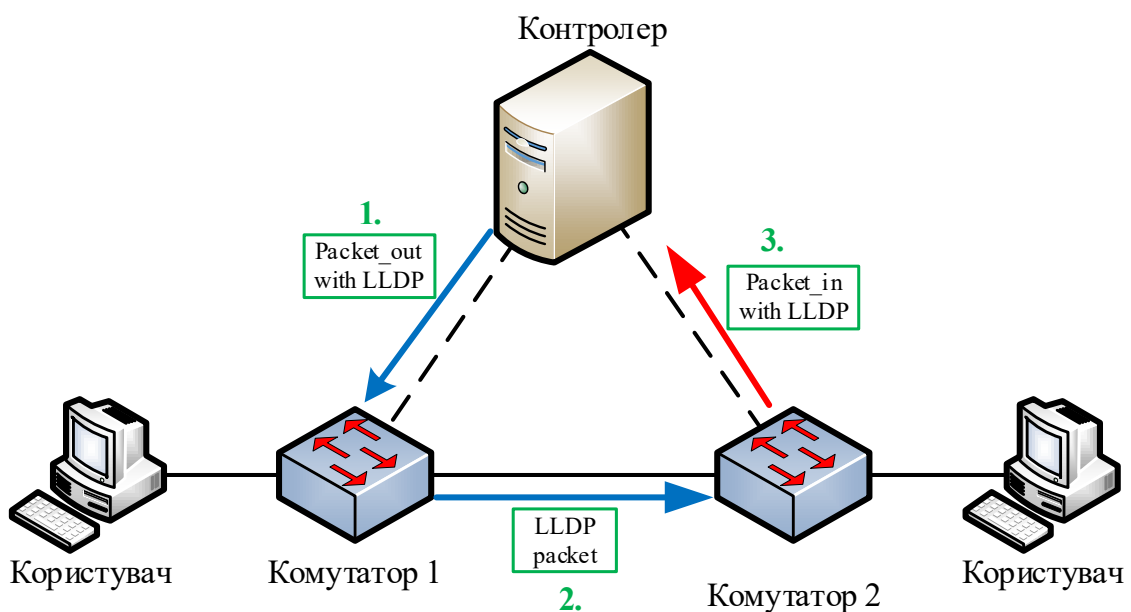


Рис.2.3. Процес вимірювання затримки між комутаторами

Слід підкреслити, що запропонований спосіб вимірювання затримки не потребує сторонніх інструментів: він базується лише на стандартних засобах SDN: LLDP для виявлення топології та OpenFlow-повідомленнях Packet-Out/Packet-In, які забезпечують проходження пакета крізь мережу. Виміряна таким чином затримка включає як час передачі по середовищу, так і час обробки кадру комутаторами та черги, якщо вони були.

Для повноцінного моніторингу продуктивності мережі недостатньо знати лише затримки – важливо ще оцінювати пропускну спроможність каналів

(реальне навантаження трафіком) та втрати пакетів (через перевантаження чи помилки). У традиційних мережах такі дані отримують, опитуючи інтерфейси через SNMP. В SDN цей підхід є централізованим: моніторингова система на базі контролера оцінює втрати пакетів на каналах зв'язку, використовуючи статистичні дані, що надаються комутаторами, та/або активні пробні пакети. Основний підхід ґрунтується на зборі лічильників пакетів, які підтримуються мережевими комутаторами на портах. Кожен комутатор веде рахунок кількості переданих і отриманих через порт пакетів, а також кількості пакетів, що були відкинуті (втрачені) при передачі або прийомі. Моніторингова система періодично опитує комутатори і отримує актуальні значення цих лічильників. На основі зібраних даних обчислюється частка пакетів, що не дійшли до пункту призначення.

Одним із методів оцінювання втрат на окремому каналі між двома комутаторами є зіставлення кількості пакетів, переданих на канал з одного боку, з кількістю пакетів, прийнятих з іншого боку протягом однакового часового інтервалу. Якщо протягом певного інтервалу комутатор А передав через певний порт N пакетів, а сусідній комутатор В прийняв на відповідному порту М пакетів (зафіксовано лічильниками tx_packets на А та rx_packets на В), то якщо $N > M$, різниця $N - M$ інтерпретується як кількість пакетів, втрачена при передачі по даному каналу у цьому інтервалі.

$$\Delta Tx = Tx_2 - Tx_1, \quad \Delta Rx = Rx_2 - Rx_1 \quad (2.5)$$

де Tx_1, Tx_2 - значення лічильника переданих пакетів на вихідному порту комутатора у моменти часу t_1 та t_2 відповідно. А Rx_1, Rx_2 - значення лічильника отриманих пакетів на вхідному порту суміжного комутатора у ті ж моменти.

$$Loss = \left(1 - \frac{\Delta Rx}{\Delta Tx}\right) \cdot 100 \quad (2.6)$$

Аналогічно, можна безпосередньо відстежувати приріст лічильників скинутих пакетів: наприклад, якщо на порту комутатора А збільшився лічильник tx_dropped (кількість пакетів, не переданих у канал) або на порту В –

rx_errors (помилки прийому), ці значення вказують на те, скільки пакетів було втрачено або відкинуто при передачі через канал зв'язку. Для підвищення точності вимірювань система може враховувати втрати з обох боків лінку та усувати дублювання підрахунку. Зібравши показники з обох кінців каналу, контролер обчислює кількість втрачених пакетів і відносний рівень втрат (відсоток від загальної кількості переданих) на кожному каналі.

Для вимірювання залишкової пропускної здатності використовуються ті ж значення лічильників переданої кількості байтів що пройшли через порт комутатора. Якщо контролер опитує ці значення періодично, наприклад кожні $\Delta t = 10$ секунд, він може визначити приріст байтів за інтервал:

$$B_{used} = \frac{Tx_2 - Tx_1}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Залишкова пропускна здатність каналу визначається як частина його максимальної пропускної спроможності, не зайнята поточним трафіком, тобто доступний резерв смуги пропускання для додаткових даних [62]. Моніторингова система оцінює цей параметр шляхом вимірювання фактичного завантаження каналу та порівняння його з номінальною пропускною здатністю.

$$B_{available} = B_{max} - B_{used} \quad (2.8)$$

Таким чином, використовуючи вбудовані засоби збору статистики, SDN-контролер може визначити, який обсяг ресурсу смуги пропускання залишається доступним на кожному каналі в мережі.

Отримані значення доступної ширини каналу дозволяють системі моніторингу виявляти потенційні вузькі місця і приймати рішення щодо перенаправлення трафіку, забезпечуючи дотримання вимог QoS. Зібрані дані про залишкову пропускну здатність разом з показниками затримки та втрат пакетів дають цілісну картину стану мережевих каналів і слугують основою для ефективного керування мережею.

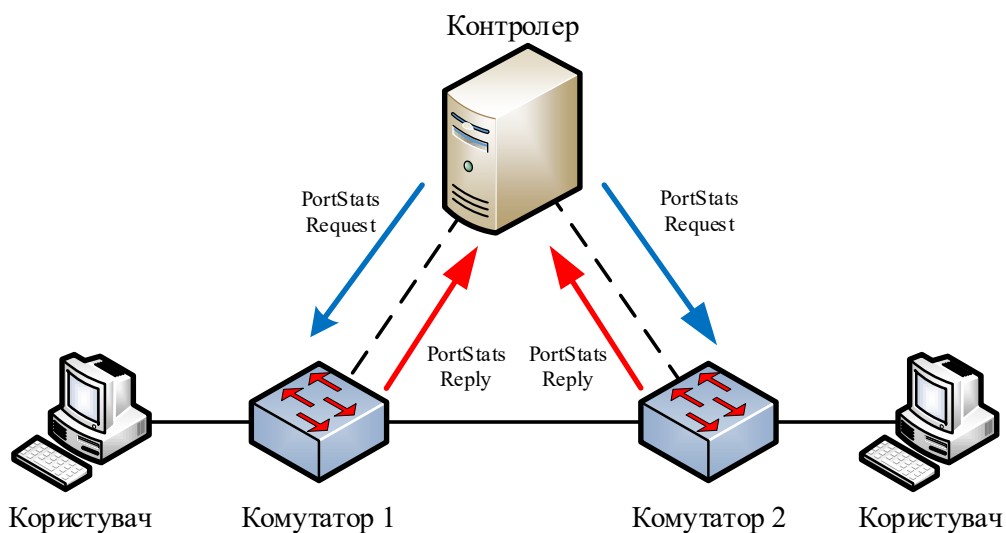


Рис.2.4. Процес отримання статистичних даних від комутаторів

Сучасні мережеві сценарії - від тактильної телемедицини та дистанційного керування роботизованими системами до автономного транспорту й кіберфізичних виробничих ліній - потребують гарантій передачі даних із кінцевою затримкою у межах одиниць, а подекуди й часток мілісекунди. Парадигма Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC), закріплена в 5G - 5G-Advanced і вже формалізована в концепціях 6G та IEEE TSN/DetNet, істотно жорсткіше регламентує не лише пропускну здатність, а й мікро варіабельність затримок, джитеру та втрат пакетів [63]. У таких умовах класичні, періодично опитувані механізми моніторингу виявляються недостатньо гнучкими: з одного боку, вони не забезпечують потрібної часової роздільної здатності для раннього виявлення деградацій, з іншого – породжують надмірне сигнальне навантаження, що саме по собі погіршує метрики URLLC-сервісів [64].

Однак забезпечення URLLC-рівня обслуговування в SDN неможливе без оперативного, точного й водночас ресурсно-ефективного вимірювання ключових показників - затримки, втрат пакетів, залишкової пропускну здатності та змін обчислювального навантаження мережевого обладнання. Нерегульований частий обмін LLDP, Echo-та PortStats-повідомленнями

призводить до експоненційного росту службового трафіку площини управління та до перевантаження CPU комутаторів і контролера, особливо у топологіях із сотнями вузлів.

Відтак виникає необхідність розроблення інтелектуальної системи моніторингу SDN, здатної:

1. Адаптивно регулювати частоту та обсяг вимірювань на основі поточного стану мережі, історичних трендів і прогнозів Machine Learning, мінімізуючи сигнальне навантаження без втрати точності вимірювань.

2. Прогнозувати погіршення QoS/QoE (напр., затримку Flow-Rule Instance чи стрибок джитеру) завдяки моделям, що враховують кореляції між трафіком, завантаженням ЦП та поведінкою черг.

3. Забезпечувати проактивне налаштування мережі - від перенаправлення потоків на основі прогнозу до динамічної маршрутизації - ще до виникнення критичних подій є надзвичайно важливим для сервісів із вимогами до затримки менш ніж 5 мс.

4. Підвищувати надійність за рахунок адаптивної логіки, яка автоматично визначає інтервал моніторингу залежно від рівня завантаженості мережі.

Таким чином, інтелектуальна система моніторингу стає базовим компонентом SDN-екосистеми для URLLC-сценаріїв, покращуючи не лише експлуатаційні показники мережі, а й відкриваючи шлях до нових методів QoE-орієнтованої маршрутизації та самооптимізації мереж.

Сучасні мережеві системи суттєво відрізняються за можливостями моніторингу, точністю визначення мережевих змін та здатністю адаптуватись до динамічних умов експлуатації. Традиційні мережі, які широко використовувались протягом останніх десятиліть, характеризуються тривалими інтервалами моніторингу, які становлять від 10 хвилин до 1 години. Це обмежує можливість оперативного реагування на зміни стану мережі, що особливо важливо для критично-важливих сервісів. Такий підхід забезпечує лише низьку точність виявлення змін, що робить його практично непридатним

для сучасних критичних застосувань. Проте важливою перевагою традиційних мереж залишається їх низьке навантаження на систему, але за рахунок повільної реакції на зміни умов.

Перехід до програмно-конфігурованих мереж дозволяє значно покращити ситуацію завдяки більш коротким інтервалам моніторингу-приблизно 1 секунда. У свою чергу це підвищує точність виявлення змін до середнього рівня, створюючи певний баланс між точністю, навантаженням на ресурси та швидкістю реакції. SDN мережі частково придатні для URLLC-сервісів завдяки швидшому, хоча й обмеженому адаптивному управлінню. Втім, існуючі підходи до моніторингу та управління SDN все ще мають певні обмеження щодо точності та ефективності реагування на надзвичайно швидкі зміни, характерні для сучасних високонавантажених додатків.

Запропонований інтелектуальний підхід до моніторингу в SDN системах передбачає суттєве зменшення інтервалу моніторингу до значень менше 1 секунди (від 3 до 1000 мс). Така висока частота моніторингу забезпечує високу точність у визначенні змін, що робить цей підхід повністю придатним для підтримки сервісів із надзвичайно низькою затримкою. Крім того, використання методів машинного навчання дозволяє реалізувати повноцінне адаптивне управління інтервалами моніторингу відповідно до поточних і прогнозованих умов у мережі. Проте зазначені переваги супроводжуються суттєвим зростанням навантаження на обчислювальні ресурси системи, що потребує ретельного планування та застосування адаптивних алгоритмів керування ресурсами.

Таким чином, порівнюючи зазначені підходи, можна стверджувати, що запропонована концепція інтелектуального моніторингу в SDN є найбільш перспективною для реалізації в умовах, де критично важливими є висока точність та адаптивність, незважаючи на супутні ресурсоємні вимоги до системи.

Таблиця 2.1 нижче узагальнює порівняльні характеристики розглянутих підходів, підкреслюючи основні їх переваги, недоліки та сфери застосування.

Таблиця 2.1

Порівняння систем моніторингу

Тип системи	Інтервал моніторингу	Точність виявлення змін	Придатність до URLLC	Підходить для адаптивного управління	Вплив на навантаження системи
Традиційна мережа	10 хв – 1 год	Низька	Непридатні	Ні	Низьке навантаження, але повільна реакція
SDN	1 секунда	Середня	Обмежено придатні	Частково	Середнє навантаження, баланс між точністю та ресурсами
Пропонований підхід для SDN	< 1 секунди (3–1000 мс)	Висока	Придатні (реагування < 1 с)	Так	Високе навантаження, потрібна адаптивна зміна інтервалу та ML-прогнозування

Високочастотне опитування мережевих показників є критично важливим для своєчасного виявлення короткотривалих перевантажень, що здатні суттєво погіршити якість обслуговування (QoS) і, як наслідок, якість сприйняття користувачів (QoE).

На рисунку 2.5 синьою лінією подано реальний трафік за хвилинний інтервал, зумовлений типовими робочими коливаннями і раптовими імпульсними сплесками. Чим менший інтервал моніторингу, тим точніше виявляються ці різкі зміни.

- 10-секундний інтервал (червона пунктирна крива) істотно усереднює дані: піки згладжуються до величин ~55 од., що більш ніж удвічі знижує

реальне навантаження. Такий проміжок у 10 с може призвести до пізнього виявлення перевантаження й затримки у відреагуванні контролера.

- 1-секундний інтервал (зелена крива) фіксує більшість коливань, однак усе ще недооцінює амплітуду деяких коротких піків (наприклад, імпульси тривалістю < 1 с із амплітудою понад 90 од.).

- 0,5-секундний інтервал (фіолетова лінія) майже співпадає з фактичним кривою трафіку, точно відтворюючи як базову динаміку, так і найкороткочасніші сплески. Отже, лише субсекундне опитування забезпечує повну видимість миттєвих навантажень.

Недооцінення пікових навантажень формує хибне уявлення про доступні резерви пропускної здатності, що призводить до помилкового вибору маршрутів або відсутності перерозподілу потоків. Отже, застосування субсекундних інтервалів моніторингу стає критично необхідним для гарантованого забезпечення QoS/QoE в умовах високодинамічного навантаження.

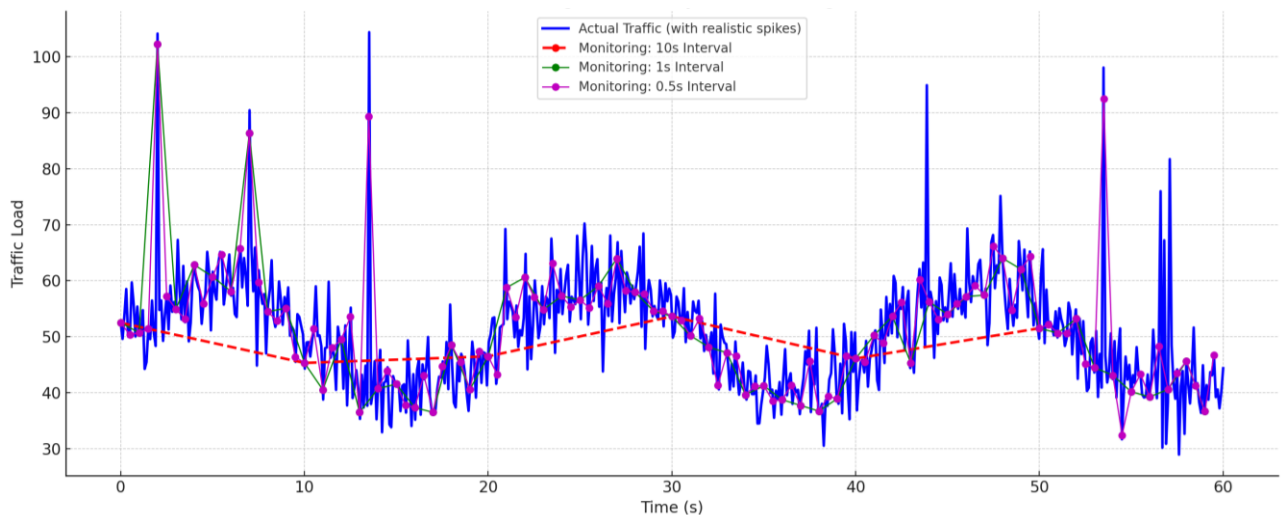


Рис.2.5. Переваги використання моніторингової системи в SDN з наднизьким інтервалом вимірювання

У поширених адаптивних схемах телеметрії SDN частота опитування визначається винятково поточним завантаженням площини управління. За

перевантаження ЦП контролера або комутаторів інтервал Δt традиційно збільшують, зменшуючи обсяг службового трафіку. Водночас під час пікових навантажень своєчасне отримання інформації про стан каналів є ключовим фактором запобігання деградації якості сприйняття. У класичній логіці адаптивного моніторингу виникає протиріччя – у критичні моменти, коли система перевантажена, з одного боку, потрібно зменшити навантаження (збільшити інтервал моніторингу), з іншого – саме в цей момент потрібно детальніше спостерігати за мережею, щоб вчасно виявити деградацію якості. Щоб розв’язати цю суперечність, пропонується гібридний інтелектуальний метод адаптивного та проактивного моніторингу, що формалізується за такими принципами.

Нехай $L_c(t)$ і $L_s(t)$ позначають, відповідно, поточне завантаження процесора контролера та сумарне завантаження процесорів комутаторів у момент часу t (у відсотках). Нехай $T(t)$ - інтенсивність користувацького трафіку, $Q(t)$ миттєвий показник QoE, оцінений, наприклад, за PESQ, APSNR, а $\hat{Q}(t + \tau)$ прогнозована оцінка QoE у проміжку $(t, t + \tau]$. Історична вибірка H містить значення $\{L_c, L_s, T, Q\}$ за N попередніх тактів.

Інтервал моніторингу Δt визначається як добуток двох коефіцієнтів:

$$\Delta t = f_{adaptive}(L_c + L_s) \cdot f_{proactive}(\hat{Q}(t + \tau), H), \quad (2.9)$$

Що гарантує невід’ємність інтервалу та дає змогу переважати одному з компонентів залежно від поточної мережевої ситуації.

Адаптивний компонент орієнтований на зменшення навантаження мережевого обладнання:

$$f_{adaptive} = \begin{cases} 1 + \alpha(L_c + L_s - \theta), & L_c + L_s > \theta, \\ 1, & L_c + L_s \leq \theta, \end{cases} \quad (2.10)$$

де θ є пороговим завантаженням (рекомендовано $\theta = 70\%$), а $\alpha \in (0; 0,05]$ - коефіцієнт чутливості. Збільшення α доцільне у

випадку обмежених процесорних ресурсів, тоді як зниження - у багатоядерних середовищах.

Проактивний компонент орієнтований на прогнозування QoE, формує оцінку $\hat{Q}(t + \tau)$. Якщо прогноз вказує на можливу деградацію якості сприйняття послуг нижче порогового значення $Q_{\min}$, інтервал скорочується шляхом множення на коефіцієнт $\beta \in (0;1)$:

$$f_{proactive} = \begin{cases} \beta, & \hat{Q}(t + \tau) < Q_{\min}, \\ 1, & \hat{Q}(t + \tau) \geq Q_{\min}. \end{cases} \quad (2.11)$$

Величину β добирають з урахуванням класу сервісу: для URLLC рекомендовано $\beta \approx 0,25$, для VR/AR - $\beta \approx 0,5$, для VoIP та IPTV - $\beta \approx 0,75$.

Поєднання виразів (2.10) та (2.11) реалізує наступну логіку:

- за низького навантаження та стійкої QoE інтервал не скорочується;
- за високого навантаження та ризику погіршення QoE пріоритет надається якості, віть якщо це потребує додаткових обчислювальних ресурсів процесора;
- одержане значення Δt додатково обмежується інтервалом $[\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max}]$, що запобігає як нестачі аналітичних даних, так і надмірному навантаженню на площину управління.

Таким чином, вперше розроблено метод інтелектуального моніторингу стану мережі в SDN, який на відміну від відомих рішень із фіксованим або статичним інтервалом збирання телеметричних даних, використовує машинне навчання для прогнозування змін показників якості сприйняття послуг та адаптивного коригування частоти моніторингу залежно від типу трафіку, навантаження на контролер, комутатори та канал, що дало змогу підвищити точність оцінки QoE, зменшити обсяг службового трафіку та забезпечити своєчасне виявлення деградацій сервісу в динамічному мережевому середовищі.

Блок схема запропонованого методу інтелектуального моніторингу в SDN з адаптивним інтервалом показано на рис.2.6.

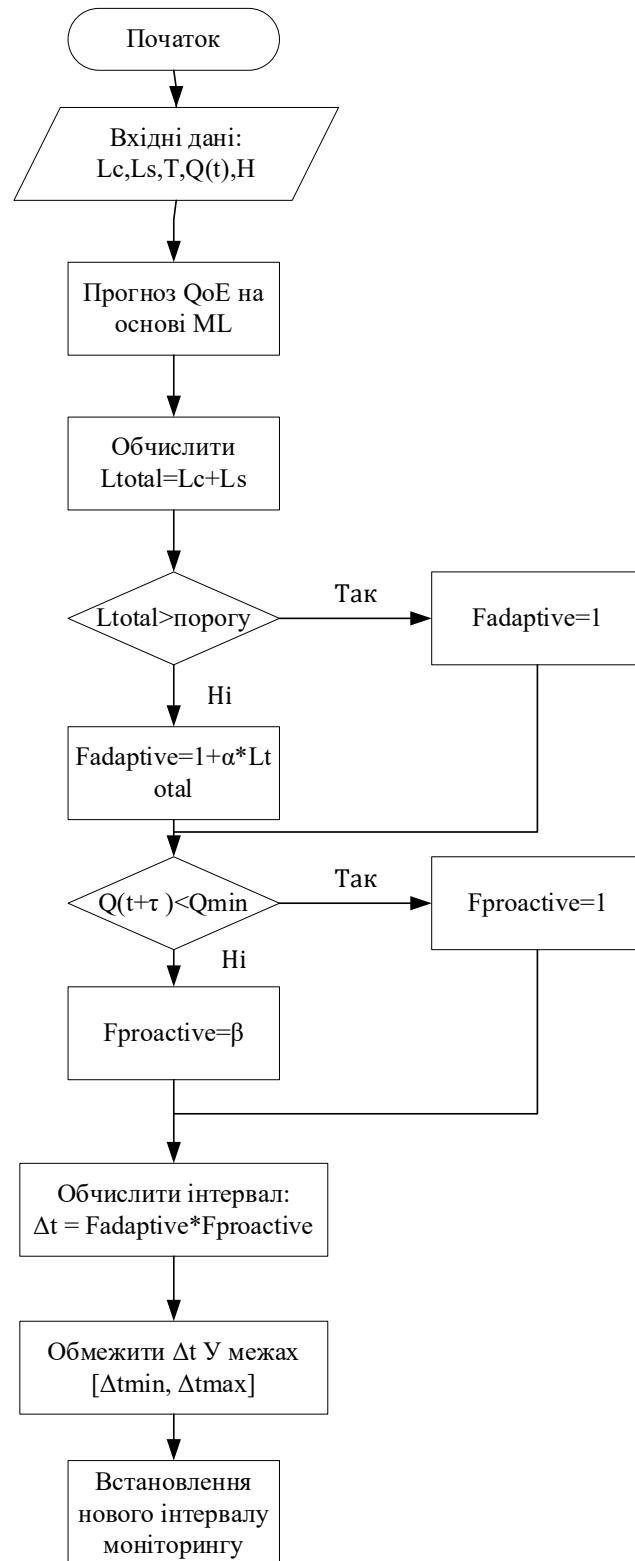


Рис.2.6. Блок схема методу інтелектуального моніторингу в SDN з адаптивним інтервалом

Для створення моделі прогнозування майбутньої якості сприйняття використовувались історичні дані, зібрані стандартною моніторинговою системою в симульованому середовищі Mininet. Упродовж експериментального періоду тривалістю 1 година контролер SDN здійснював регулярний збір параметрів каналів зв'язку: затримки, втрат пакетів, а також доступної пропускної здатності. Зібрані показники фіксувались щосекунди для кожного маршруту. Впродовж цього часу було симульовано типову поведінку мережі шляхом змін параметрів каналів зв'язку та передавання відеопотоку, що забезпечило динамічність набору даних.

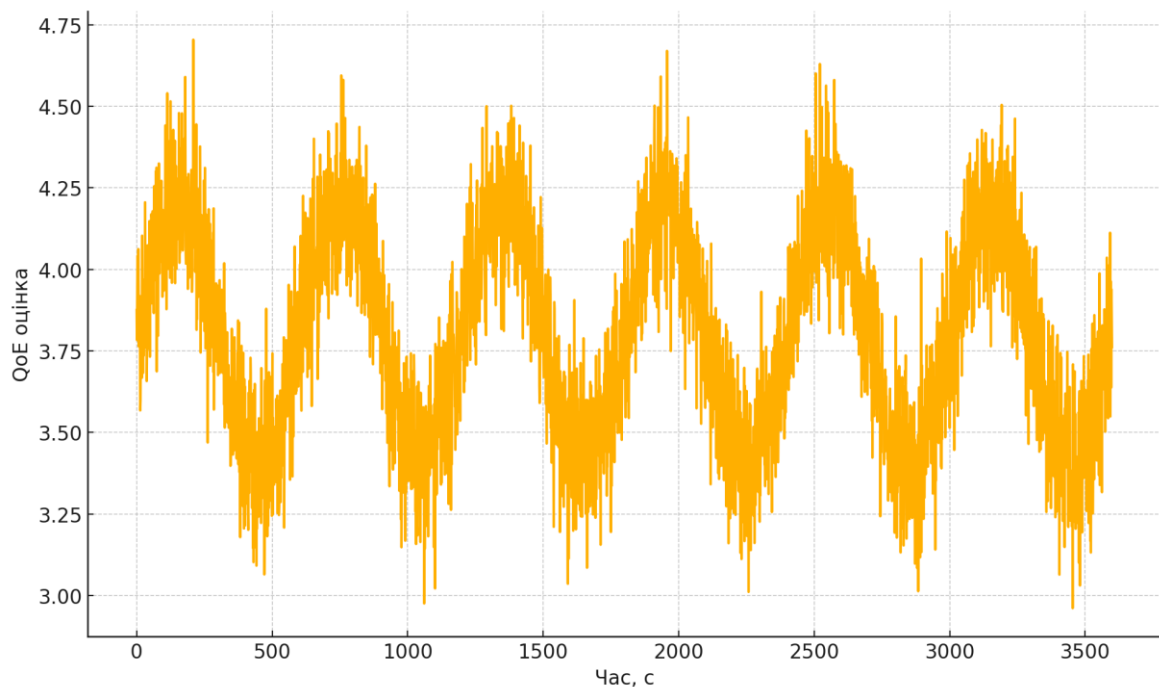


Рис.2.7. Зміна якості сприйняття на одному з маршрутів у середовищі Mininet

На основі отриманих параметрів каналів зв'язку, разом з оцінками QoE, які були отримані за допомогою іншої моделі машинного навчання, було сформовано повний набір даних. У процесі попередньої підготовки датасет був розділений на навчальну та тестову вибірки у співвідношенні 80% і 20% відповідно, із хронологічним розподілом для збереження часової структури.

Для реалізації прогнозування майбутніх значень QoE використовувалась модель градієнтного бустингу LightGBM, яка характеризується високою ефективністю та швидкістю навчання [65-66].

Оцінювання точності прогнозування виконувалось за допомогою метрик RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error) та коефіцієнта детермінації R^2 . За результатами тестування, було отримано наступні значення: RMSE = 0,48; MAE = 0,37; $R^2 = 0,67$.

Отримане значення $R^2=0,67$ вказує, що побудована модель відтворює приблизно 67 % дисперсії показника QoE, що відповідає прийнятному рівню точності для практичного застосування у адаптивній системі моніторингу SDN. Це дозволяє використовувати прогнозні дані для регулювання частоти моніторингу та оперативного реагування на можливу деградацію якості сприйняття послуг користувачами, зберігаючи баланс між точністю моніторингу і обчислювальним навантаженням контролера мережі.

2.3 Метод інтелектуальної QoE-маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах

Розвиток сучасних телекомунікаційних мереж та поява нових, мультимедійних та інтерактивних сервісів висувають підвищені вимоги не тільки до технічних параметрів мережі QoS, але й до суб'єктивного сприйняття якості цих сервісів кінцевим користувачем QoE. Для таких чутливих до якості застосунків, як відеострімінг, онлайн-ігри, віртуальна та доповнена реальність, успіх сервісу значною мірою залежить від забезпечення високого рівня QoE [67-68]. Традиційні підходи до маршрутизації, орієнтовані виключно на оптимізацію QoS-метрик (наприклад, мінімізація затримки або втрат пакетів), не завжди гарантують оптимальну QoE, оскільки зв'язок між QoS та QoE є складним, нелінійним і залежить від багатьох факторів, включаючи тип сервісу, характеристики пристрою користувача та його психофізіологічні особливості.

Мережі SDN надають централізований контроль та глобальне уявлення про стан мережі, що створює сприятливі умови для розробки та впровадження більш досконалих механізмів управління трафіком, зокрема, маршрутизації, орієнтованої безпосередньо на QoE. Використання можливостей SDN дозволяє реалізувати інтелектуальні алгоритми, здатні не просто обирати маршрут з найкращими технічними характеристиками, а прогнозувати, як ці характеристики вплинуть на сприйняття якості користувачем, і приймати рішення на основі цього прогнозу.

Стратегії маршрутизації QoE вимагають актуальної інформації про стан мережі для оптимізації шляхів проходження трафіку [69]. Хоча наскрізні метрики (E2E) часто використовуються при проектуванні мереж, вони мають певні обмеження [70]. Недоліки включають значний час, необхідний для налаштування шляху під час тестування, високу вартість процедур тестування, статичне визначення шляху, яке потребує повторного тестування для зміни, та відсутність доступності даних до повного завершення тесту. Тому існує потреба у більш ефективній метриці стану мережі.

Збір метрик каналів передбачає періодичну оцінку окремих каналів або обмін інформацією про лічильники комутаторів для відображення стану каналів менеджеру мережі. Цей метод має перевагу миттєвої доступності інформації про шлях, усуваючи недоліки збору наскрізних метрик.

Порівняно з наскрізними метриками, метрики каналів мережі надають більш актуальні дані, забезпечують швидше тестування, миттєву доступність даних. Для збору цих даних використовується моніторингова система представлена в попередньому підрозділі. Отже, у цій роботі вважається необхідним дослідити ефективність використання метрик каналів для побудови моделей QoE, що в подальшому впливатиме на рішення щодо маршрутизації QoE.

Проблема ефективного моделювання QoE з використанням наявних метрик залишається актуальною. Наприклад, модель E-model, що згадувалась у

1 розділі застосовує обчислювальні методи для поєднання таких факторів, як затримка мережі, втрата пакетів і шум, щоб прогнозувати якість VoIP. Ця модель обчислює R-фактор на основі зазначених параметрів, який згодом може бути співвіднесений із середньою оцінкою суб'єктивного сприйняття (MOS), що відображає оцінку QoE користувача. Проте E-model не враховує суб'єктивні метрики в межах мережі, що призводить до відсутності зворотного зв'язку в реальному часі та обмежує її здатність адаптуватися до динамічних умов, роблячи модель менш ефективною для сучасних вимог моделювання QoE.

У цьому контексті, застосування методів машинного навчання є надзвичайно перспективним. Моделі МН можуть бути навчені встановлювати складні залежності між вимірними показниками QoS (такими як затримка, втрати пакетів, пропускна здатність) та відповідними показниками QoE (такими як APSNR - Average Peak Signal-to-Noise Ratio для відео, PESQ - Perceptual Evaluation of Speech Quality для аудіо, або інші інтегральні QoE-оцінки)[71]. Це дозволяє прогнозувати рівень QoE, який буде забезпечений на певному маршруті, і використовувати цей прогноз для прийняття обґрунтованих рішень щодо маршрутизації.

Для формалізації задачі методу інтелектуальної QoE-маршрутизації та, як і раніше, розглянемо мережу як орієнтований граф $G=(V,E)$. Множина всіх можливих маршрутів між джерелом s та призначенням d позначимо через P_{sd} .

Для кожного маршруту $p_j \in P_{sd}$ доступний набір вимірних показників QoS. Ці метрики формують вхідний вектор M_j для моделі машинного навчання. Типові компоненти вектора M_j включають:

- $loss_j$: загальна кількість або відсоток втрачених пакетів на маршруті p_j .
- $delay_j$: загальна затримка передачі пакетів на маршруті p_j .
- bw_j : доступна пропускна здатність на маршруті p_j .

Задача полягає у виборі такого маршруту $\hat{p} \in P_{sd}$, який забезпечить

найкращу якість сприйняття з точки зору кінцевого користувача, тобто максимізує QoE. Оскільки пряме вимірювання QoE для всіх потенційних маршрутів у реальному часі є складним або неможливим, використовується підхід прогнозування QoE на основі доступних QoS-метрик.

Модель машинного навчання f_{ML} отримує на вхід вектор QoS-метрик M_j для маршруту p_j і повертає прогнозовану оцінку QoE для цього маршруту. Позначимо цю прогнозовану QoE-оцінку як $\hat{Q}_j$:

$$\hat{Q}_j = f_{ML}(M_j) \quad (2.12)$$

$\hat{Q}_j$ може бути скалярним значенням, що представляє інтегральну оцінку QoE (наприклад, MOS), або вектором специфічних QoE-метрик (таких як APSNR, PESQ). У загальному випадку, $\hat{Q}_j$ є прогнозованим рівнем QoE для маршруту p_j при поточних мережевих умовах, описаних вектором M_j .

Моделі машинного навчання (наприклад, XGBoost, LightGBM) навчаються на тренувальному наборі даних, що складається з пар $(M_i^{(k)}, QoE_i^{(k)})$, де $M_i^{(k)}$ - вектор QoS-метрик для маршруту i в момент часу k , а $QoE_i^{(k)}$ - відповідна виміряна (або суб'єктивно оцінена) QoE для цього маршруту в той же момент. Процес навчання полягає у мінімізації функції втрат $L(\hat{Q}_j, QoE_j)$, яка вимірює розбіжність між прогнозованою та фактичною QoE.

$$\theta = \arg \min_{\theta} \sum_i L(\hat{Q}_j, QoE_j) \quad (2.13)$$

Після навчання моделі машинного навчання, для нового запиту на маршрутизацію, для кожного можливого маршруту $p_j \in P_{sd}$ обчислюється вектор вхідних QoS-метрик M_j і за допомогою моделі f_{ML} прогнозується оцінка QoE $\hat{Q}_j$. Вибір оптимального маршруту $\hat{p}$ здійснюється на основі максимального значення прогнозованої QoE:

$$\hat{p} = \arg \max_{p_i \in P} \hat{Q}_j \quad (2.14)$$

Цей критерій означає, що обирається маршрут, який, за прогнозами моделі машинного навчання, забезпечить найкращу якість сприйняття для користувача.

Процес інтелектуальної QoE-маршрутизації в SDN реалізується за допомогою алгоритму, що виконується в контролері SDN, як показано на рисунку 2.8.

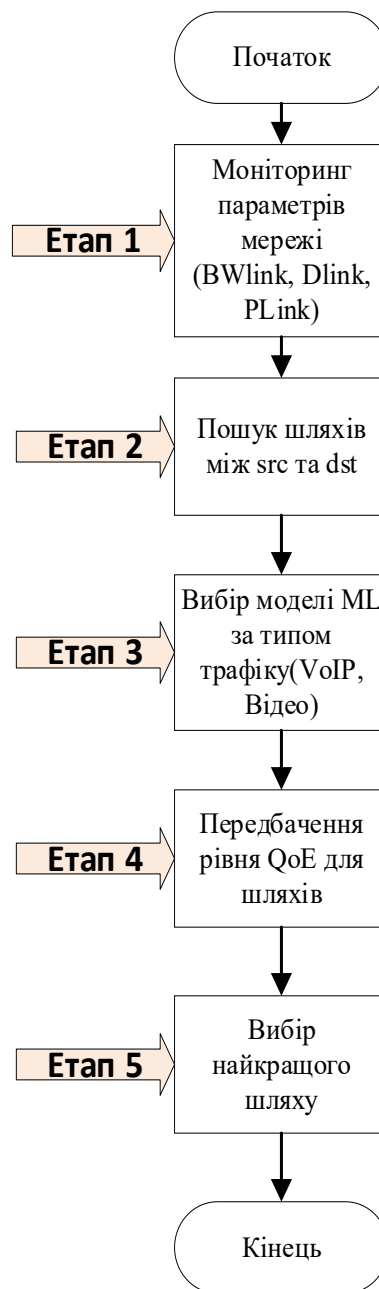


Рис.2.8. Етапи реалізації методу інтелектуальної QoE-маршрутизації

Етапи алгоритму включають:

Початок. Ініціалізація системи та модулів.

Етап 1. Моніторинг параметрів мережі. Збір даних про стан мережі та показники QoS (затримка, втрати пакетів, доступна пропускна здатність) від SDN комутаторів. Ці дані є основою для формування вхідних векторів для моделі машинного навчання.

Етап 2. Отримання поточного стану мережі та даних для машинного навчання. Зібрані QoS-метрики обробляються та формуються у вхідні вектори M_j для кожного потенційного маршруту. Дані зберігаються в базі даних статистики.

Етап 3. Вибір відповідної моделі машинного навчання для поточного типу трафіку/умов мережі. На цьому етапі може бути обрана або адаптована модель машинного навчання, яка найкраще підходить для прогнозування QoE конкретного типу трафіку (наприклад, окрема модель для VoIP, окрема для відео) або для поточних умов мережі.

Етап 4. Передбачення рівня QoE для кожного можливого шляху. Використовуючи обрану модель машинного навчання f_{ML} , для кожного маршруту p_j за його вхідним вектором QoS-метрик M_j обчислюється прогнозоване значення QoE $\hat{Q}_j$.

Етап 5. Вибір оптимального маршруту. На основі прогнозованих значень QoE $\hat{Q}_j$ для всіх можливих маршрутів обирається маршрут $\hat{p}$, який має найбільше значення прогнозованої QoE, згідно з критерієм $\hat{p} = \arg \max_{p_i \in P} \hat{Q}_j$.

Кінець. Алгоритм завершується, і обраний оптимальний маршрут передається для подальшого налаштування на SDN комутаторах.

Для реалізації методу інтелектуальної QoE-маршрутизації пропонується архітектура SDN, зображена на Рисунку 2.9. Ключовою відмінністю від традиційних архітектур SDN є інтеграція компонентів, відповідальних за

моніторинг QoE, машинне навчання та QoE-орієнтовану маршрутизацію [72].

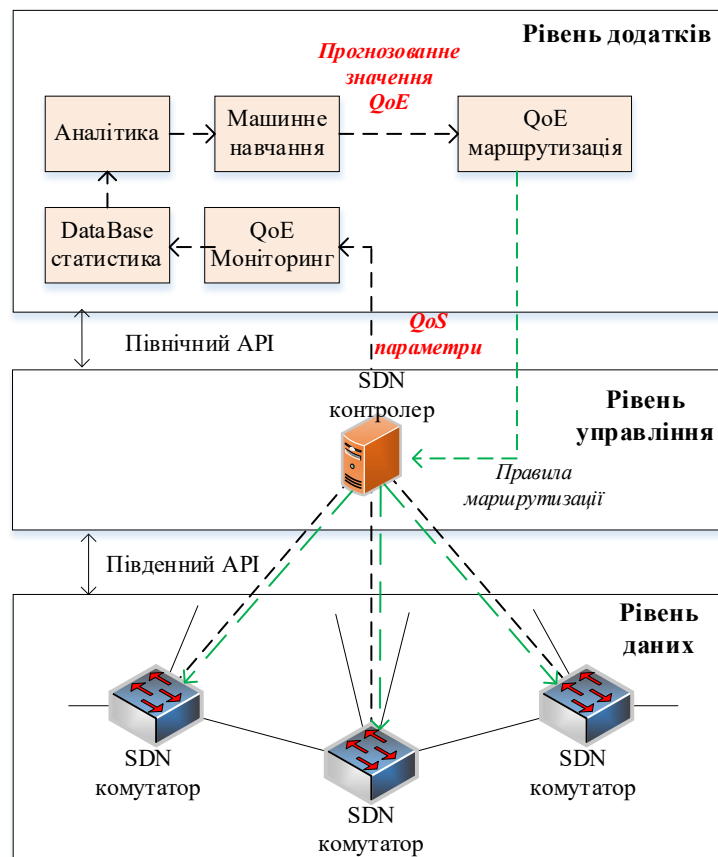


Рис.2.9. Запропонована архітектура SDN з інтегрованим модулем інтелектуальної QoE-маршрутизації

Основні компоненти архітектури:

- SDN контролер: Виконує функції централізованого управління мережею.
- Модуль моніторингу параметрів мережі: Збирає QoS-метрики з пристроїв площини даних.
- База даних статистики: Накопичує QoS-метрики та дані про фактичну QoE для навчання моделей машинного навчання.
- QoE Моніторинг: Модуль, який може бути відповідальним за збір або розрахунок показників QoE, або за формування вхідних даних для прогнозування QoE на основі QoS-метрик.
- Модуль машинного навчання: Містить треновані моделі, які за вхідними

QoS-метриками прогнозують рівень QoE.

- Модуль інтелектуальної QoE-маршрутизації: Реалізує логіку вибору оптимального маршруту на основі прогнозованої QoE. Він взаємодіє з модулями моніторингу, базою даних та модулем машинного навчання.

- Аналітика: Використовується для обробки та аналізу даних, для вдосконалення моделей машинного навчання або виявлення проблем з QoE.

Така архітектура дозволяє контролеру SDN не тільки реагувати на зміни в QoS, але й активно управляти маршрутизацією з метою максимізації QoE для користувачів різних сервісів, використовуючи інтелектуальні можливості машинного навчання.

Висновки до 2-го розділу

У другому розділі дисертації запропоновано комплексну концептуальну модель інтелектуального управління QoE у SDN, спрямовану на розв'язання актуального науково-практичного завдання підвищення QoE в умовах обмежених мережевих ресурсів та змінних вимог користувачів. Розроблена модель об'єднує три основні компоненти: метод інтелектуального моніторингу стану мережі, метод адаптивної QoE-маршрутизації на основі машинного навчання та метод багатошляхової маршрутизації відеопотоків, які взаємодіють у рамках централізованого SDN-контролера. Розглянута система моніторингу SDN дозволяє динамічно збирати інформацію про стан мережі у реальному часі, включаючи такі ключові параметри як затримка, втрати пакетів, пропускна здатність, а також завантаження CPU контролера і комутаторів. Показано, що саме ці показники забезпечують необхідні вихідні дані для ухвалення рішень щодо керування трафіком, і є базовими для подальшої оцінки QoE.

Оцінка QoE, у свою чергу, базується на використанні таких стандартних метрик як MOS (Mean Opinion Score), PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) та APSNR (Average Peak Signal-to-Noise Ratio). Встановлено, що

використання APSNR дозволяє точніше передбачити реальну якість сприйняття відео порівняно з традиційною метрикою PSNR, а алгоритм PESQ ефективно прогнозує якість голосового зв'язку. Отримані таким чином оцінки QoE забезпечують контролер інформацією, яка необхідна для більш обґрунтованого керування маршрутами трафіку відповідно до суб'єктивного сприйняття якості користувачами.

Особливу увагу приділено інтеграції методів ML для автоматизації та підвищення точності оцінки QoE. На основі зібраних мережових даних та суб'єктивних оцінок QoE було продемонстровано ефективність використання моделей ML (зокрема LightGBM) для прогнозування майбутніх показників QoE. Результати моделювання показали, що модель LightGBM дозволяє досягти прийняттого рівня точності (коефіцієнт детермінації), що підтверджує доцільність її використання у системі адаптивного моніторингу для оперативного реагування на можливе погіршення якості. Важливим результатом стало також обґрунтування гібридного підходу до визначення інтервалів моніторингу, який враховує як поточний стан ресурсів мережі (завантаженість CPU), так і прогноз QoE. Показано, що цей підхід дозволяє досягти балансу між точністю контролю стану мережі та мінімізацією навантаження на площину управління. Запропонований метод, дозволяє автоматично змінювати інтервали моніторингу відповідно до стану мережі.

Крім того, запропоновано метод інтелектуальної QoE-маршрутизації на основі прогнозування QoE за допомогою ML-моделей, який на відміну від традиційних підходів, дозволяє враховувати не тільки поточні параметри QoS, але й прогнозовані значення QoE, що істотно підвищує ефективність рішень щодо маршрутизації, зокрема для таких чутливих до якості сервісів як відеопередача та VoIP. Процес реалізації цього методу детально формалізовано й описано у вигляді алгоритмічних етапів з відповідною математичною моделлю вибору оптимального маршруту.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ ТА ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРОГРАМНО- КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Дослідження моделей оцінювання якості сприйняття голосових і відеосервісів користувачами

У контексті сучасних телекомунікаційних мереж, зокрема програмно-конфігурованих мереж, оцінка якості сприйняття становить ключове завдання, особливо для чутливих до параметрів мережі мультимедійних потоків, таких як відео та голосовий зв'язок (VoIP). Забезпечення високого рівня QoE є критичним фактором конкурентоспроможності сервіс-провайдерів у мережах реального часу.

Вибір адекватної моделі для кількісної оцінки QoE має вирішальне значення. Така модель повинна не лише точно відображати об'єктивні характеристики мережевих потоків, що визначаються параметрами QoS, але й забезпечувати високий ступінь кореляції з суб'єктивним сприйняттям користувачів. Об'єктивні моделі оцінки QoE дозволяють вимірювати якість переданого контенту на основі показників мережі (наприклад, затримки, втрати пакетів) та алгоритмів обробки сигналу.

Специфічні особливості різних типів трафіку, зокрема відео- та VoIP-потоків, зумовлюють необхідність застосування спеціалізованих метрик. На відміну від універсальних підходів, оцінка якості відеопотоків часто вимагає просторово-часового аналізу та зіставлення кадрів для виявлення спотворень, тоді як для голосового зв'язку критичним є психоакустичний аналіз спектро-темпоральних спотворень. Ця диференціація підкреслює відсутність єдиної універсальної метрики QoE, здатної адекватно оцінити якість всіх типів мультимедійного трафіку.

Вибір відповідної моделі оцінки QoE забезпечує коректну інтерпретацію отриманих результатів, що є основою для ефективного управління якістю сервісів. В контексті SDN, точна оцінка QoE дозволяє реалізовувати механізми адаптивного керування трафіком, проактивно реагувати на деградацію параметрів QoS та оптимізувати маршрутизацію, безпосередньо впливаючи на ефективність роботи SDN-контролера.

Натомість, некоректний вибір метрики QoE може призвести до хибних рішень щодо керування мережевими ресурсами. Це може виявлятися у неефективному перенаправленні трафіку, недостатньому чи надмірному реагуванні на зміни у якості, що потенційно збільшує навантаження на мережу, знижує загальну задоволеність користувачів та підриває ефективність систем управління якістю.

Для кількісного оцінювання QoE відеопотоку використано вдосконалену метрику Aligned Peak-Signal-to-Noise Ratio (APSNR), що корегує похибку класичного PSNR, спричинену зміщенням кадрів у мережах із втратою пакетів.

$$APSNR = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I_t(i, j) - K_{t+\Delta t}(i, j)]^2} \right) \right] \quad (3.1)$$

де $I_t(i, j)$ - інтенсивність пікселя (i, j) еталонного кадру розміром $m \times n$ у момент t , $K_{t+\Delta t}(i, j)$ - відповідний піксель отриманого кадру із затримкою Δt , MAX - максимальне значення яскравості (для 8-бітного відео - 255). Попереднє вирівнювання кадрів гарантує, що різниця обчислюється між коректними парами, тим самим підвищуючи чутливість метрики до спотворень, спричинених втратами або дублюванням кадрів.

На рис. 3.1 наведено схему дослідження у середовищі Mininet. Яка складається з хостів h1 (джерело) та h2 (приймач), які з'єднані через OpenFlow-комутатор s1, що керується контролером Ryu. Через канал зв'язку передається відеопотік H.264 зі сталою швидкістю 2 Мбіт/с, а характеристики

каналу зв'язку (пропускна здатність, затримка, втрати пакетів) змінюються скриптом Python.

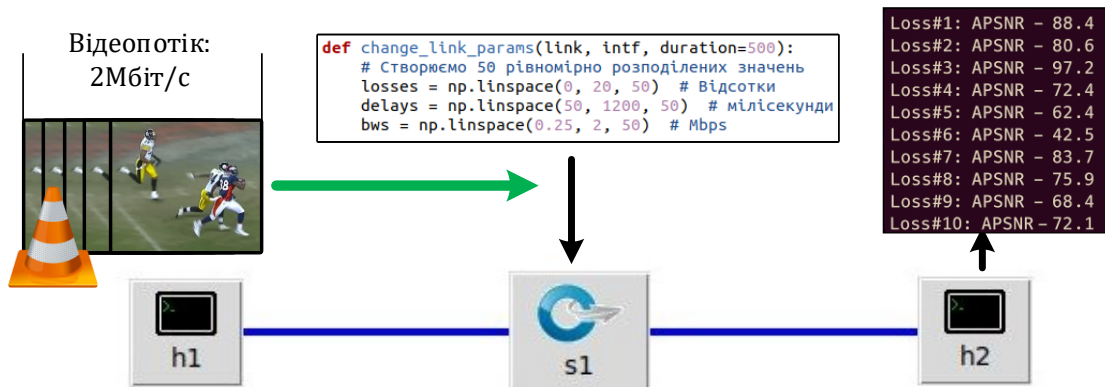


Рис.3.1. Схема дослідження якості сприйняття відеопотоку

У кожній конфігурації каналів зв'язку, протягом 50 с накопичуються відеофрагменти, за якими обчислюється середнє значення APSNR.

З отриманих даних сформовано графіки впливу параметрів QoS на показник APSNR.

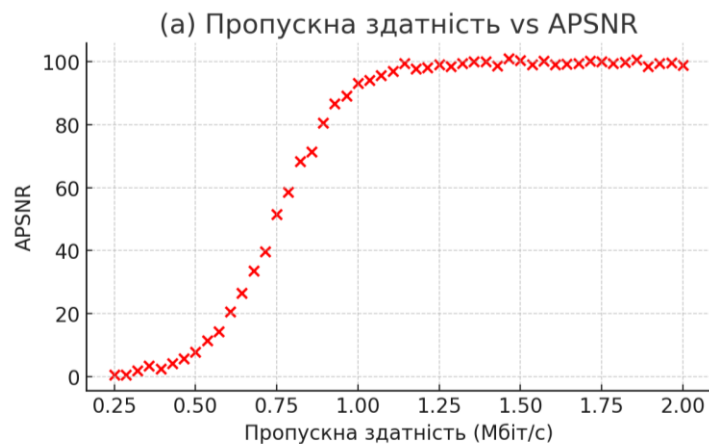


Рис.3.2. Вплив пропускної здатності на APSNR

Із збільшенням доступної пропускної здатності каналу від 0,25 до 2,0 Мбіт/с фіксується S-подібна залежність. Критичним виявився діапазон 0,7–1,0 Мбіт/с, де спостерігається різкий перехід APSNR від «Низького» (<30 дБ) до «Відмінного» (>100 дБ) рівня. Досягнувши пропускної здатності $\approx 1,5$ Мбіт/с, подальше зростання APSNR уповільнюється, що свідчить

про надлишковість ресурсу для потоку 2 Мбіт/с і відсутність додаткової користі щодо QoE.

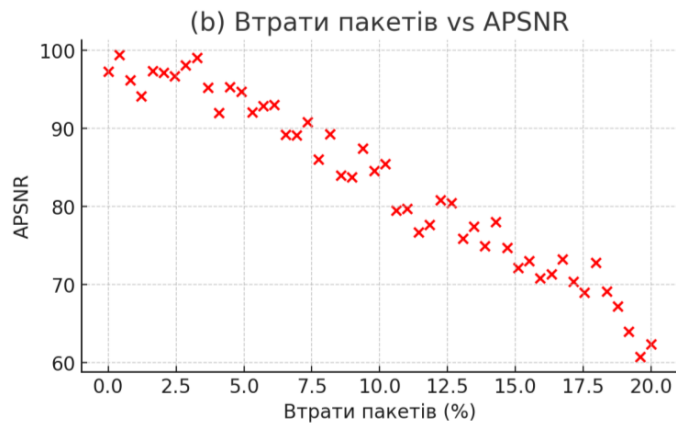


Рис.3.3. Вплив втрат пакетів на APSNR

Зростання втрат із 0 до 20 % зумовлює майже лінійне падіння APSNR з ≈ 100 дБ до 60 дБ. Навіть незначні втрати $< 2\%$ здатні знизити оцінку з «Відмінно» до «Добре», що підтверджує ключовий вплив на якість відео.

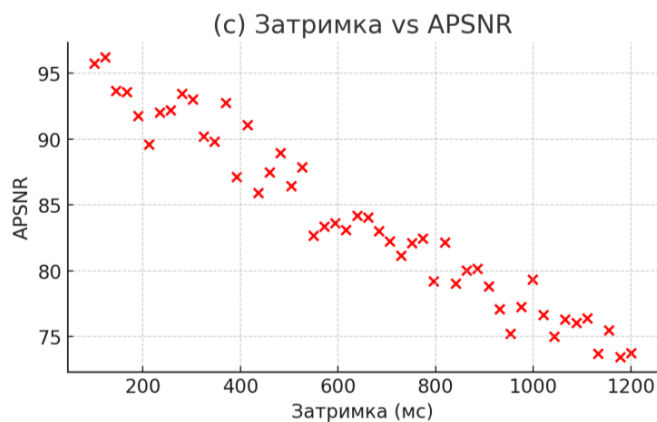


Рис.3.4. Вплив затримки на APSNR

В умовах збільшення затримки у діапазоні 100–1200 мс спостерігається помірне зниження APSNR (~ 20 дБ). Хоч ефект менше впливає, ніж у випадку втрат пакетів, перевищення ~ 800 мс переводить оцінку якості відео у категорію «Нормально» або «Низько», що критично для інтерактивних сервісів.

Відповідність об'єктивного показника APSNR суб'єктивним рівням QoE було встановлено за результатами попередніх тестів (таблиця 3.1).

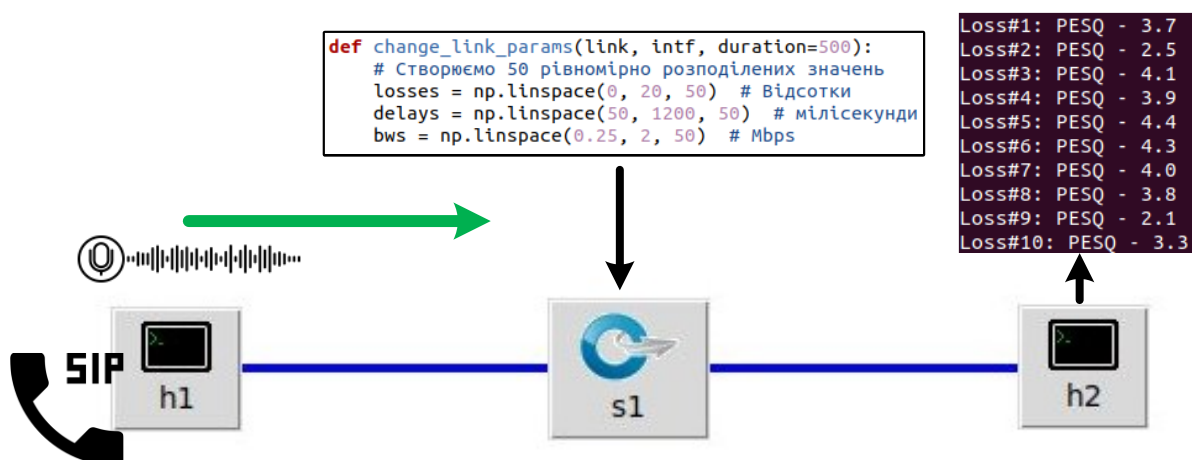
Таблиця 3.1

Оцінювання QoE за показником APSNR

Діапазон APSNR (дБ)	QoE-бал (1–5)	Категорія якості
$\geq 106,35$	5	Відмінно
80,84 – 106,35	4	Добре
55,33 – 80,84	3	Нормально
29,82 – 55,33	2	Низько
$< 29,82$	1	Погано

Застосування цієї шкали дозволяє автоматизувати прийняття рішень у контролері SDN, зокрема перемикати трафік на альтернативний маршрут у разі, якщо прогнозований рівень APSNR опускається нижче порогового значення.

У цьому експерименті було реалізовано алгоритм оцінювання якості сприйняття для VoIP на основі зовнішньої функції вимірювання PESQ, що виконувалась в умовах керованих змін QoS-параметрів в SDN-мережі. Рис. 3.5 ілюструє загальну схему дослідження: голосовий сигнал генерується на хості h1, передається через комутатор s1, де за допомогою скрипта періодично змінюються значення втрат пакетів, затримки та пропускної здатності, а потім надходить до хоста h2. Далі на обох вузлах записуються «чистий» та «зашумлений» WAV-файли, які передаються до функції *pesq()* з бібліотеки *rupesq* (рис. 3.6), яка обчислює значення PESQ відповідно до стандарту ITU-T P.862.



Рис

Рис.3.5. Схема дослідження якості сприйняття VoIP (голосового сервісу)

Якість сприйняття для голосового трафіку (VoIP) оцінювалася за допомогою метрики PESQ, що є стандартизованим методом для об'єктивної оцінки якості мови. PESQ генерує інтегральну оцінку, яка корелює з суб'єктивним сприйняттям якості користувачів.

```
from pesq import pesq
from scipy.io import wavfile

fs_ref, ref = wavfile.read("clean.wav")
fs_deg, deg = wavfile.read("noisy.wav")

score = pesq(fs_ref, ref, deg, 'nb') # 'nb' - narrow-band (8 kHz)
print("PESQ score:", score)
```

Рис.3.6. Фрагмент коду для вимірювання PESQ отриманого голосового потоку

Оцінка QoE для додатків здійснювалась відповідно до шкали, представленої в Табл. 3.2. Ця таблиця встановлює відповідність між діапазонами значень показника PESQ та якісною оцінкою сприйняття користувачем (QoE оцінка: від 1 - "Погано" до 5 - "Відмінно"), а також надає словесний опис якості.

Таблиця 3.2

Оцінювання QoE за показником PESQ

PESQ	QoE оцінка	Якість
4,3-4,5	5	Відмінно
3,6 – 4,2	4	Добре
2,6 – 3,5	3	Нормально
1,6 – 2,5	2	Низько
< 1,5	1	Погано

Для кількісної оцінки лінійного взаємозв'язку між параметрами QoS та оцінками QoE для VoIP та відеопотоку було застосовано кореляційний аналіз з використанням коефіцієнта кореляції Пірсона, який розраховується за формулою:

$$KKП = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.2)$$

де X_i, Y_i - окремі значення відповідних змінних (параметра QoS та оцінки QoE), а $\bar{X}, \bar{Y}$ - середні значення цих змінних відповідно.

Коефіцієнт Пірсона приймає значення від -1 до +1, де +1 означає повну позитивну лінійну кореляцію, -1 - повну негативну лінійну кореляцію, а 0 - відсутність лінійної кореляції.

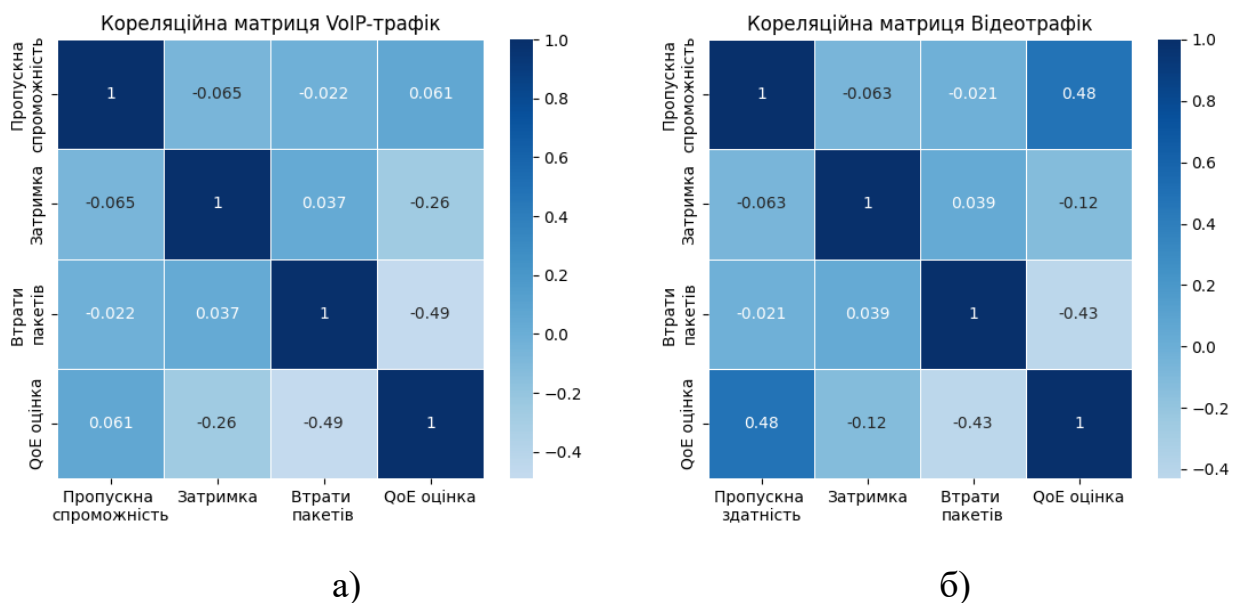


Рис.3.7. Кореляція QoS параметрів мережі та оцінки QoE за коефіцієнтом Пірсона

Результати кореляційного аналізу представлені у вигляді кореляційних матриць на рисунку. 3.7 (а) для VoIP та (б) для відеопотоку. Ці матриці візуалізують значення коефіцієнтів кореляції Пірсона між кожною парою досліджуваних параметрів (пропускна спроможність, затримка, втрати пакетів,

оцінка QoE). Колір та інтенсивність клітинки матриці відображають силу та напрямок кореляції.

Для визначення статистичної значущості виявлених кореляцій було обчислено р-значення для кожної пари параметрів. Результати аналізу значущості кореляцій представлені в Таблиці 3.3. У таблиці наведено значення коефіцієнтів кореляції Пірсона (ККП) та відповідні р-значення для взаємозв'язків між параметрами мережі (пропускна здатність, затримка, втрати пакетів) й оцінками QoE для VoIP і відеопотоку. Традиційно, р-значення менше 0.05 вважається порогом для визначення статистично значущої кореляції.

Таблиця 3.3

Значущість кореляції між параметрами мережі та QoE оцінкою

	VoIP-трафік		Відеотрафік	
	ККП	р-значення	ККП	р-значення
Пропускна здатність	0,061	0,091 >0,005	0,48	$8,73 \cdot 10^{-47}$ <0,005
Затримка	-0,26	$3,14 \cdot 10^{-14}$ <0,005	-0,12	0,0012 <0,005
Втрати пакетів	-0,49	$6,89 \cdot 10^{-55}$ <0,005	-0,43	$1,05 \cdot 10^{-40}$ <0,005

Аналіз кореляційних матриць (Рис. 3.7) та Таблиці 3.3 дозволяє зробити висновки про вплив різних параметрів QoS на якість сприйняття голосового потоку та відеопотоку в SDN-мережі:

Для VoIP-трафіку:

Пропускна здатність: Кореляція між пропускною здатністю та оцінкою QoE для VoIP становить 0.061 з р-значенням 0.091. Це свідчить про дуже слабку позитивну кореляцію, яка, до того ж, не є статистично значущою на рівні 0.05. Це може вказувати на те, що в умовах, де мінімальні вимоги до

пропускної спроможності для голосового трафіку задовольняються, подальше її збільшення не призводить до суттєвого покращення сприйняття якості.

Затримка: Кореляція між затримкою та оцінкою QoE для VoIP становить -0,26 з р-значенням $3,14 \cdot 10^{-14}$. Це помірна негативна кореляція, яка є високо статистично значущою. Негативна кореляція означає, що зі збільшенням затримки якість сприйняття голосового трафіку суттєво погіршується. Це очікуваний результат, оскільки значні затримки вносять дискомфорт у розмову.

Втрати пакетів: Кореляція між втратами пакетів та оцінкою QoE для VoIP становить -0.49 з р-значенням $6,89 \cdot 10^{-55}$. Це сильна негативна кореляція, яка є надзвичайно статистично значущою. Втрата голосових пакетів призводить до пропусків у мові та значно знижує якість сприйняття, що повністю підтверджується отриманими даними.

Для відеотрафіку:

Пропускна здатність: Кореляція між пропускною здатністю та оцінкою QoE для відеотрафіку становить 0,48 з р-значенням менше 0.005 ($8,73 \cdot 10^{-47}$). Це помірна позитивна кореляція, яка є високо статистично значущою. Для відео, особливо високої якості, пропускна спроможність є критичним параметром, і її збільшення безпосередньо впливає на якість зображення та плавність відтворення.

Затримка: Кореляція між затримкою та оцінкою QoE для відеотрафіку становить -0,12 з р-значенням 0.0012. Це слабка негативна кореляція, яка є статистично значущою. Хоча вплив затримки на відео може бути менш критичним, ніж для голосу (до певної межі), значні затримки можуть призводити до буферизації та переривань відтворення, що негативно впливає на QoE.

Втрати пакетів: Кореляція між втратами пакетів та оцінкою QoE для Video становить -0.43 з р-значенням менше 0.005 ($1,05 \cdot 10^{-40}$). Це помірна негативна кореляція, яка є високо статистично значущою. Втрата відеопакетів може

призводити до артефактів зображення, розрив цілісності зображення або повної зупинки відтворення, що суттєво погіршує сприйняття.

Результати кореляційного аналізу чітко демонструють, що різні параметри QoS мають різний ступінь впливу на якість сприйняття для різних типів трафіку реального часу. Для VoIP найбільш критичним параметром є втрата пакетів, за якою йде затримка. Пропускна спроможність, за умови її достатності, має менший вплив. Для відеосервісу значущими є всі три параметри, причому пропускна спроможність та втрата пакетів мають більш виражений вплив порівняно із затримкою.

3.2 Моделювання та дослідження інтелектуальної системи моніторингу стану функціонування програмно-конфігурованої мережі з прогнозуванням змін показників якості сприйняття

У сучасних програмно-конфігурованих мережах ефективність управління якістю обслуговування та якістю сприйняття дедалі більше залежить від здатності контролера своєчасно й точно отримувати телеметричні дані про стан каналів зв'язку. Розроблена в попередньому розділі інтелектуальна моніторингова система передбачає поєднання активних (Вимірювання затримки на основі LLDP, Echo/PortStats опитування) та пасивних (аналіз статистики портів) методів, а також адаптивне регулювання частоти вимірювань. Це дозволяє не лише виявляти аномалії в реальному часі, але й оптимізувати управління ресурсами мережі [73].

Запропонована інтелектуальна моніторингова система реалізована у вигляді спеціалізованого додатку для контролера Ryu, написаного мовою програмування Python [74-75]. Реалізація інтегрована безпосередньо в логіку контролера, що дозволяє ефективно використовувати механізм обробки подій контролера для опрацювання мережеских повідомлень протоколу OpenFlow.

У якості програмної платформи для розгортання застосовано операційну систему Linux Ubuntu 22.04 LTS, яка забезпечує необхідну стабільність і

сумісність з обраними бібліотеками та компонентами. Для забезпечення контрольованого та ізолюваного середовища виконання було створено віртуальне Python-оточення (virtualenv), що дозволяє уникнути конфліктів залежностей між системними та прикладними бібліотеками. Серед основних компонентів середовища слід зазначити: контролер Ryu (версія 4.34), бібліотеку eventlet (версія 0.30.2), а також допоміжні модулі (scapy, psutil), які забезпечують мережеві вимірювання та оцінку продуктивності контролера.

Моніторинговий додаток побудовано за модульним принципом, що передбачає виокремлення функціональних блоків, які відповідають за вимірювання затримки (рис.3.8), оцінювання втрат пакетів і залишкової пропускної здатності (рис.3.9), а також адаптивне регулювання частоти моніторингу на основі методів машинного навчання. Кожен модуль використовує асинхронні події механізми бібліотеки eventlet для паралельного та неблокуючого виконання задач, що знижує навантаження на ресурси центрального процесора контролера та забезпечує ефективне управління мережею.

```
raw_delay = (recv_time - sent_time) * 1000
ctrl_to_src = self.ctrl_latencies.get(src_dp_id, 0)
ctrl_to_dst = self.ctrl_latencies.get(dp_id, 0)
adjusted_delay = raw_delay - (ctrl_to_src / 2) - (ctrl_to_dst / 2)
```

Рис.3.8. Фрагмент програмного коду для вимірювання затримки в каналах зв'язку

```
key_bw = (src_dp_id, port)
prev_tx = self.prev_tx_bytes.get(key_bw, tx_bytes)
used_bw = (tx_bytes - prev_tx) * 8 / 5 / 1_000_000
self.prev_tx_bytes[key_bw] = tx_bytes
max_bw = 100
residual_bw = max_bw - used_bw

key_tx = (src_dp_id, port, 'tx')
key_rx = (dst_dp_id, port, 'rx')

prev_tx_pkts = self.prev_tx_bytes.get(key_tx, tx_pkts)
prev_rx_pkts = self.prev_tx_bytes.get(key_rx, rx_pkts)

delta_tx = tx_pkts - prev_tx_pkts
delta_rx = rx_pkts - prev_rx_pkts

self.prev_tx_bytes[key_tx] = tx_pkts
self.prev_tx_bytes[key_rx] = rx_pkts

loss_pct = 0.0
if delta_tx > 0:
    loss_pct = max(0, delta_tx - delta_rx) / delta_tx * 100
```

Рис.3.9. Фрагмент програмного коду для вимірювання втрат пакетів та залишкової пропускної здатності в каналах зв'язку

Після впровадження моніторингової системи у віртуальне середовище SDN важливим наступним кроком є оцінювання точності її роботи. Це необхідно для підтвердження коректності отриманих результатів, виявлення похибок вимірювання та визначення ступеня надійності запропонованого рішення. Для здійснення такої оцінки порівнюються значення параметрів мережі (затримки, втрати пакетів, пропускну здатність), отримані за допомогою моніторингової системи, з еталонними показниками, визначеними загальноприйнятими інструментами та методиками активних вимірювань.

Для проведення експериментальних досліджень використано середовище Mininet 2.3.0, яке дозволяє створювати віртуальні SDN-топології з високим ступенем достовірності емульованої мережевої поведінки [76]. Завдяки підтримці протоколу OpenFlow 1.3, Mininet забезпечує повноцінну взаємодію між програмним комутатором (Open vSwitch) і контролером Ryu, що дозволяє дослідити запроповану систему у реалістичних умовах. У середовищі Mininet дослідження проводилося на топології, що складалася з двох хостів (H1, H2) і двох комутаторів (S1, S2), з'єднаних послідовно.

Упродовж дослідження параметри каналу зв'язку між S1 і S2 (затримка, пропускну здатність, ймовірність втрати пакетів) динамічно змінювались відповідно до заздалегідь визначених сценаріїв, щоб відтворити умови реальної мережі. Це дозволяло оцінити стійкість і адаптивність розробленої моніторингової системи до флуктуацій стану каналу, а також виміряти вплив різних режимів роботи каналу зв'язку на точність отриманих метрик. На рисунку 3.10 зображено приклад роботи моніторингової системи у мережі з динамічною зміною параметрів каналів зв'язку [77].

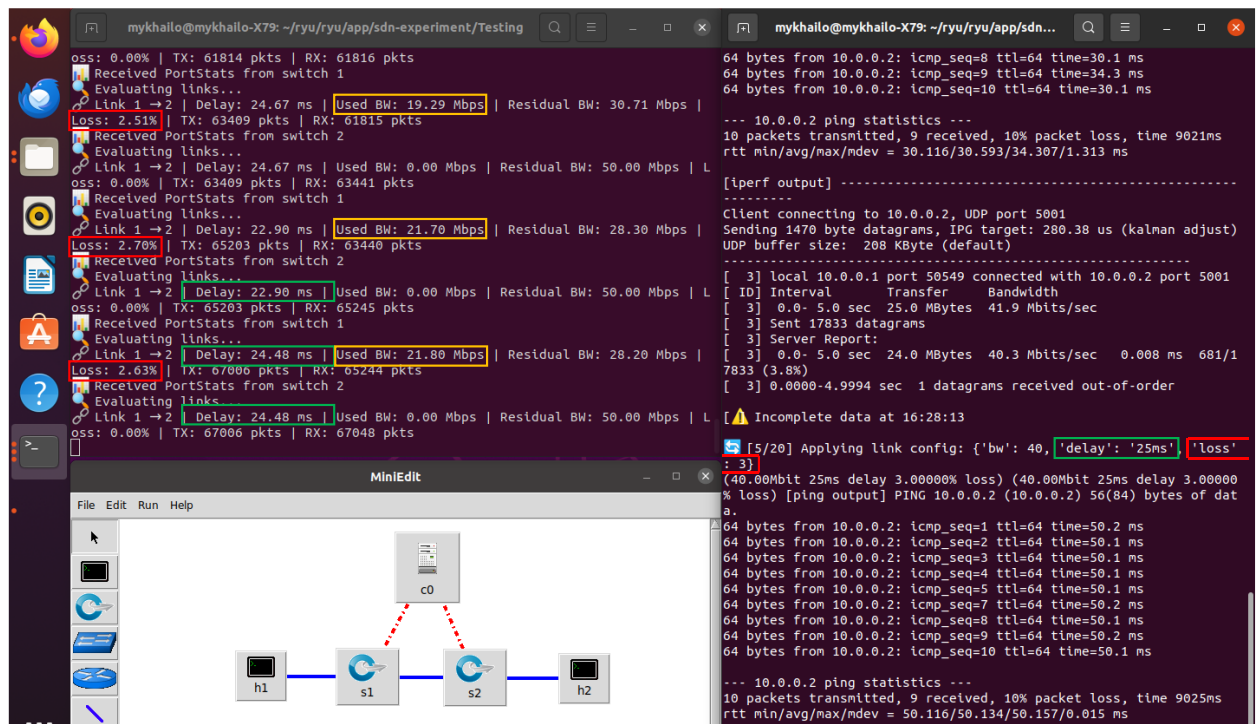


Рис.3.10. Реалізація методів вимірювання параметрів каналів зв'язку в SDN

Для оцінки точності вимірювання затримки між комутаторами порівнюються результати, отримані моніторинговою системою за допомогою LLDP-пакетів, із результатами утиліти ping, що є загальноприйнятим стандартом для активного вимірювання затримок у мережі.

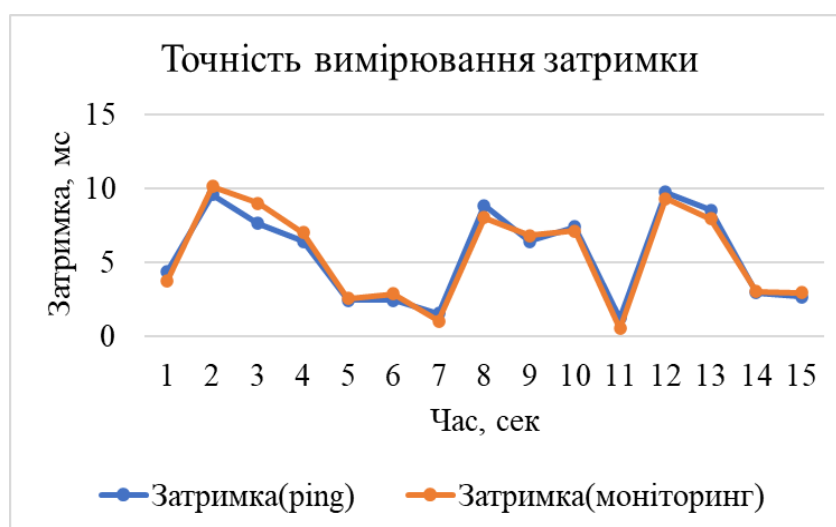


Рис.3.11. Порівняння методів вимірювання затримки

Аналогічно, для оцінки точності визначення втрат пакетів використовується порівняння результатів моніторингової системи на основі повідомлень PortStats із результатами утиліти iperf, що генерує потоки трафіку заданої інтенсивності й фіксує кількість втрачених пакетів.

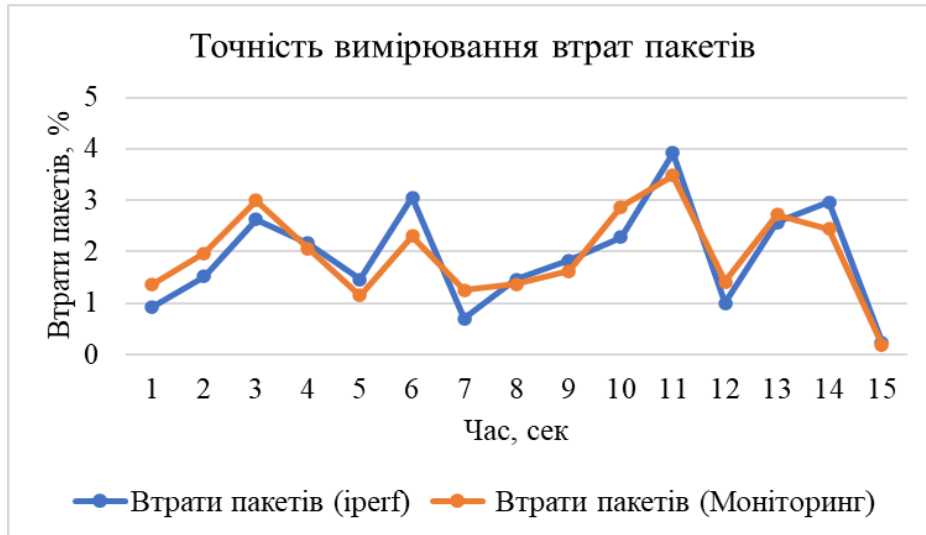


Рис.3.12. Порівняння методів вимірювання втрат пакетів

Точність оцінювання пропускної здатності каналів зв'язку оцінюється за допомогою порівняння значень, отриманих моніторинговою системою через статистику портів, із результатами вимірювання пропускної здатності, одержаними за допомогою iperf у режимі активного тестування.

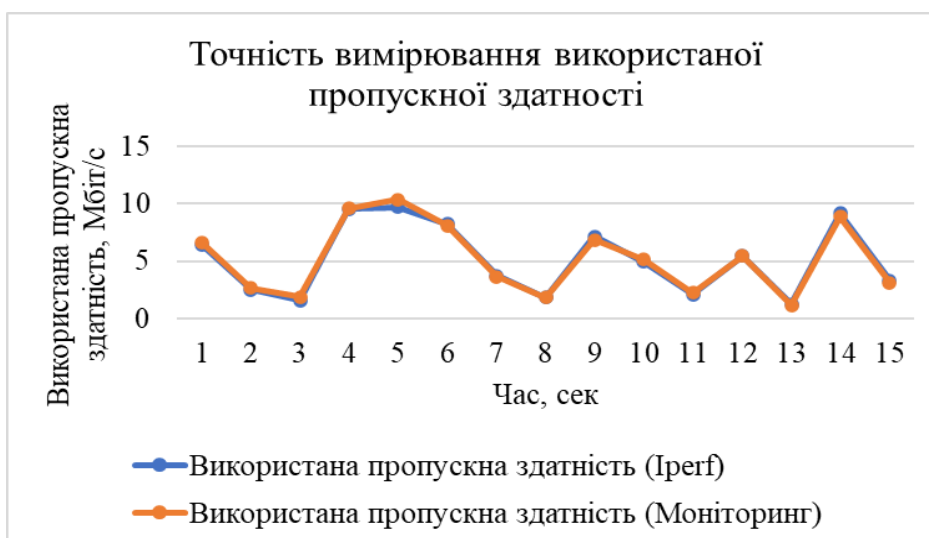


Рис.3.13. Порівняння методів вимірювання використаної пропускної здатності

Результати оцінювання точності моніторингової системи, отримані за допомогою середньої абсолютної похибки (MAE), представлено в таблиці 3.4:

- Затримка: Середня абсолютна похибка вимірювання затримки склала 0,513 мс, що підтверджує високу точність методу визначення затримки за допомогою LLDP-пакетів, порівняно з еталонними значеннями, отриманими за допомогою ping.
- Втрати пакетів: Вимірювання втрат пакетів має середню абсолютну похибку 0,362%, що свідчить про високу точність методу, реалізованого на основі повідомлень PortStats, порівняно з результатами активних вимірювань через утиліту iperf.
- Пропускна здатність: Середня абсолютна похибка визначення пропускної здатності становить 0,194 Мбіт/с, що також є задовільним результатом, підтверджуючи ефективність запропонованого підходу в порівнянні з еталонними вимірюваннями iperf.

Таким чином, кількісні показники точності підтверджують високу ефективність і практичну придатність розробленої моніторингової системи для використання в програмно-конфігурованих мережах.

Таблиця 3.4

Оцінка точності моніторингу QoS

Метрика	MAE
Затримка, мс	0,513
Втрати пакетів, %	0,362
Використана пропускна здатність, Мбіт/с	0,194

У програмно-конфігурованих мережах обмін службовими повідомленнями, такими як LLDP, Echo та Port/Flow Stats, між контролером і комутаторами є фундаментальним для забезпечення глобальної видимості та керованості мережі. Проте саме ці службові пакети формують додаткове навантаження на площину управління, використовуючи пропускну здатність і

обчислювальні ресурси обладнання. Критичними чинниками, що визначають масштаб цього навантаження, є інтервал моніторингу та розмір мережі. Зі зменшенням інтервалу моніторингу зростає точність детектування аномалій і швидкість реакції на збій, однак кількість службових пакетів зростає обернено пропорційно до інтервалу моніторингу. Збільшення розміру мережі підсилює цей ефект, оскільки трафік LLDP масштабується квадратично, а Echo/Stats - лінійно. В результаті, у великих дата-центрах або 5G/6G-RAN-топологіях навіть незначне скорочення інтервалу може призвести до перенавантаження площини управління, підвищення затримки Flow Rule Instance і деградації обслуговування URLLC-додатків. Отже, оцінювання впливу інтервалу моніторингу та розміру мережі на зростання обсягу службового трафіку є ключовою передумовою для проєктування ефективних, масштабованих і адаптивних систем моніторингу. Такий аналіз дозволяє обґрунтувати межі допустимого інтервалу моніторингу, визначити критичний розмір мережі, за якого виникає потреба в ML-керованому динамічному регулюванні інтервалу, а також збалансувати вимоги до точності вимірювання із ресурсними обмеженнями площини управління.

Спершу для кожного повідомлення (LLDP, EchoRequest/Reply, PortStatsRequest/Reply) визначено середній розмір пакета S_i а базову частоту генерації подій на вузол. Це дало змогу одразу оцінити індивідуальне навантаження $N_i \cdot S_i$ байтах за секунду.

Таблиця 3.5

Розміри пакетів моніторингової системи

Тип повідомлення	Розмір пакету (байт)	Подій/сек	Навантаження(байт/сек)
LLDP	100	40	4000
EchoRequest/Reply	64	10	640
PortStats Request/Reply	300	10	3000
PacketIn (LLDP)	120	40	4800

Сумарне навантаження службовим трафіком згенероване моніторинговою системою:

$$E_{\text{служ.траф.}} = \sum_{i=1}^n (N_i \cdot S_i) \quad (3.3)$$

де N_i кількість повідомлень типу i за секунду та S_i середній розмір пакета типу i .

Кількість пакетів для кожного типу повідомлення задається як функція числа комутаторів N_{sw} кількості їхніх портів N_{port} а частоти моніторингу $f = 1 / T$ Наприклад, для LLDP:

$$N_{LLDP} = 2 \cdot N_{sw} \cdot N_{ports} \cdot f \quad (3.4)$$

$$E_{LLDP} = N_{LLDP} \cdot S_{LLDP} \quad (3.5)$$

а для Echo і PortStats – відповідно рівняння (3.6)–(3.9).

$$N_{Echo} = 2 \cdot N_{sw} \cdot f \quad (3.6)$$

$$E_{Echo} = N_{Echo} \cdot S_{Echo} \quad (3.7)$$

$$N_{Stats} = 2 \cdot N_{sw} \cdot f \quad (3.8)$$

$$E_{Stats} = N_{Stats} \cdot S_{Stats} \quad (3.9)$$

На підставі моделі обчислено $E_{\text{служ. траф.}}$ для трьох масштабів топології (5, 10 і 20 комутаторів) та трьох інтервалів моніторингу (100мс, 1с, 5с). Результати зведено в Табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Приклад службового навантаження

Кількість комутаторів	Частота вимірювань	Загальне навантаження(кбіт/сек)
5	100мс	497,6
5	1с	49,76
5	5с	9,952
10	100мс	995,2
10	1с	99,52
10	5с	19,9
20	100мс	1990,4
20	1с	199,04
20	5с	39,8

Отримані дані перенесено на логарифмічну стовпчикову діаграму (Рис. 3.14). На графіку чітко видно, що зменшення інтервалу моніторингу в 10 разів (1 с $\rightarrow$ 100 мс) збільшує службовий трафік у ~ 10 разів, а перехід від 5 с до 100 мс – у 50 разів. А подвоєння кількості комутаторів збільшує навантаження більш ніж утричі через LLDP, що масштабується як $O(N_{sw}^2)$

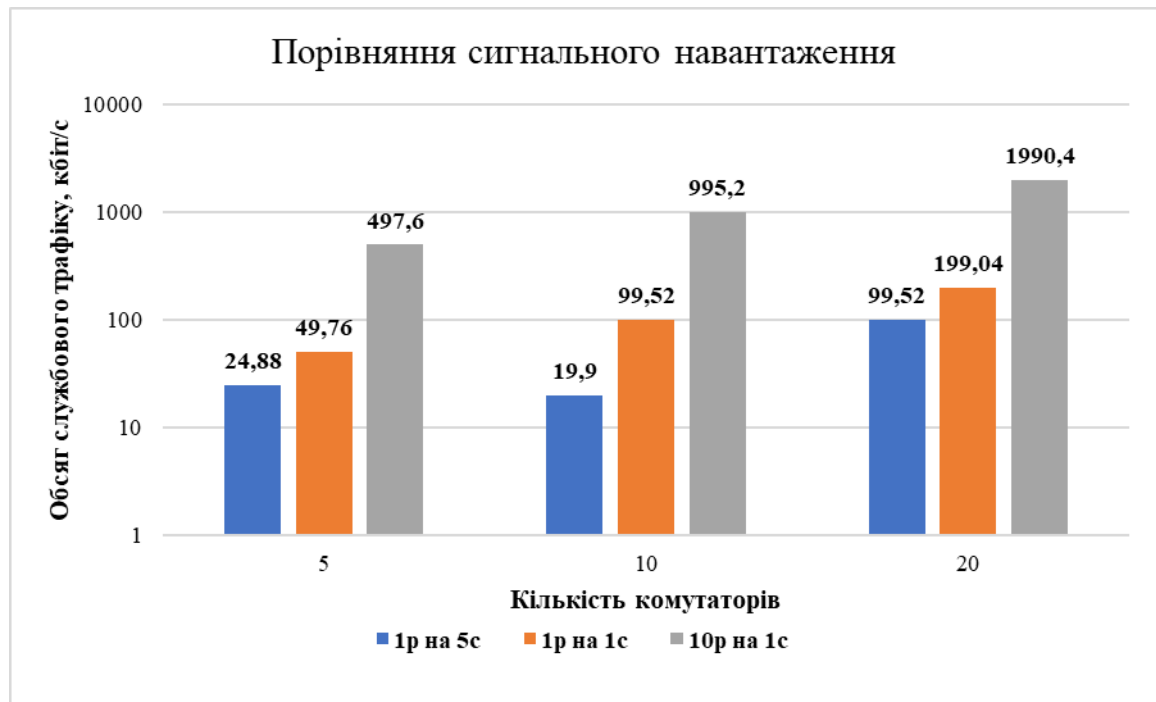


Рис.3.14. Вплив інтервалу моніторингу та розміру мережі на зростання службового трафіку

При 20 комутаторах та інтервалу моніторингу 100 мс, загальне навантаження пропускної здатності ≈ 2 Мбіт/с, що для каналів 1 Gb/s видається незначним, але при зростанні до сотень вузлів чи в безпроводних мережах перетворюється на вузьке місце. Для URLLC-сервісів потрібні вимірювання значно менші секунди, але вони можливі лише у поєднанні з адаптивним регулюванням частоти (динамічне збільшення інтервалу моніторингу там, де канали зв'язку стабільні) та ML-прогнозуванням потенційних деградацій, щоб не перевантажувати площину управління.

Таким чином, запропонована методика – від емпіричного вимірювання розмірів пакетів до аналітичної екстраполяції та графічного аналізу – дає змогу кількісно встановити оптимальну зону роботи моніторингу й обґрунтувати необхідність інтелектуальних, самоадаптивних механізмів у великих або критичних за затримкою SDN-мережах.

Ефективність роботи SDN значною мірою залежить від стабільності та продуктивності її головного керуючого елементу – SDN контролера. У процесі моніторингу стану мережі контролер періодично обмінюється службовими повідомленнями з комутаторами, аналізує отримані дані, оновлює таблиці маршрутизації, реагує на події PacketIn, та за необхідності перебудовує шляхи для забезпечення якості обслуговування (QoS/QoE). Однак зі зменшенням інтервалу моніторингу (тобто зі збільшенням частоти вимірювань) навантаження на CPU контролера зростає експоненційно – не лише через збільшення кількості оброблюваних повідомлень, а й через частіше оновлення внутрішніх структур, обробку статистики, прийняття рішень у реальному часі. Особливо критично це проявляється в умовах масштабних або високонавантажених мереж, де навіть незначне скорочення інтервалу може викликати перевантаження CPU, затримку у встановленні правил, втрату контролю над трафіком і, як наслідок, погіршення якості надання послуг.

Саме тому оцінка впливу інтервалу моніторингу на завантаження процесора SDN контролера є ключовим етапом у проектуванні надійних та масштабованих систем керування. Такий аналіз дозволяє визначити оптимальний інтервал моніторингу для заданої кількості мережевих пристроїв, виявити залежність між глибиною моніторингу та обчислювальними витратами, а також сформулювати рекомендації щодо необхідності впровадження адаптивного моніторингу, балансування навантаження між кількома контролерами або використання методів прогнозування на основі машинного навчання для зменшення частоти вимірювань без втрати точності спостереження.

Мета експерименту - кількісно визначити, яку частку обчислювальних ресурсів SDN-контролера (у нашому випадку Ryu 4.34) споживає модуль моніторингу залежно від інтервалу моніторингу мережевих пристроїв.

Експериментальний стенд складається з контролера Ryu 4.34 для обробки OpenFlow-подій та реалізованим модулем моніторингу. Контролер встановлено на операційну систему Ubuntu 22.04 LTS. Комп'ютер на якому запущено контролер мав наступні параметри: Intel Xeon E5-2630L 2.4ГГц 6 ядер/12 потоків, 64 ГБ RAM. Симулятор Mininet 2.3.0 нативно встановлено на цю ж операційну систему.

Щоб виключити сторонні впливи, процес ryu-manager було закріплено до одного ядра, фрагмент коду на Рис. 3.15.

```
7 # Налаштування
8 RYU_PROCESS_NAME = "ryu-manager"
9 LOG_FILE = "ryu_cpu_monitor_log.csv"
10 MONITOR_INTERVAL = 1 # сек
11 PINNED_CPU = 2 # ядро, до якого закріпити ryu (нумерація з 0)
12
13 def find_ryu_pid():
14     """Знайти PID процесу ryu-manager"""
15     for proc in psutil.process_iter(attrs=['pid', 'name', 'cmdline']):
16         try:
17             if RYU_PROCESS_NAME in ' '.join(proc.info['cmdline']):
18                 return proc.info['pid']
19         except (psutil.NoSuchProcess, psutil.AccessDenied):
20             continue
21     return None
22
23 def pin_to_cpu(proc, cpu_id):
24     """Закріпити процес до одного ядра"""
25     try:
26         proc.cpu_affinity([cpu_id])
27         print(f"Процес PID {proc.pid} закріплено до CPU{cpu_id}")
28     except Exception as e:
29         print(f"Не вдалося закріпити процес до ядра: {e}")
30
31 def main():
32     pid = find_ryu_pid()
33     if pid is None:
34         print(f"[!] Не знайдено процесу '{RYU_PROCESS_NAME}'")
35         return
36
37     proc = psutil.Process(pid)
38     pin_to_cpu(proc, PINNED_CPU)
39
40     print(f"Моніторинг процесу PID {pid} ({RYU_PROCESS_NAME})")
41
```

Рис.3.15. Фрагмент коду для вимірювання завантаженості ЦП контролера

Пошук PID процесу Ryu через `psutil.process_iter`. Pin-to-CPU – викликає `proc.cpu_affinity([id])`, гарантуючи, що усі цикли моніторингу працюють на одному ядрі, тому результати коректно порівнюються.

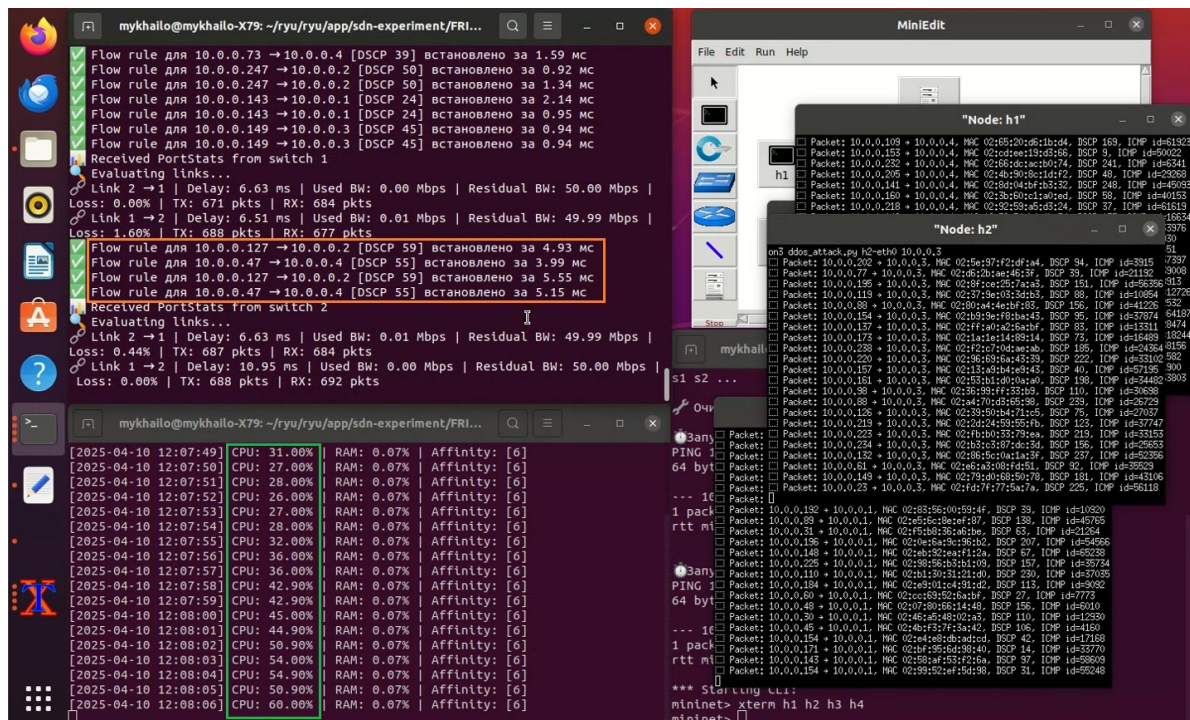


Рис.3.16. Процес вимірювання завантаженості ЦП контролера під час роботи моніторингової системи

На рисунку 3.16 проілюстровано динаміку зміни завантаження процесорного ядра, до якого було прив'язано процес контролера. Згідно з виведеною в термінальному вікні інформацією, спостерігається поступове зростання навантаження на ядро. Це зумовлено як збільшенням інтенсивності генерації пакетів на кінцевих пристроях, так і підвищенням частоти моніторингу параметрів каналів зв'язку з боку контролера. Такий ріст навантаження може свідчити про збільшення обчислювального навантаження на контролер, що є критичним фактором для забезпечення своєчасної обробки подій у мережі SDN.

Крім того, на рисунку 3.16 також показано часові характеристики встановлення правила OpenFlow, яке визначає дію комутатора при отриманні відповідного пакета (наприклад, передати його на певний порт). Час встановлення правила є ключовим показником продуктивності системи, оскільки до моменту встановлення flow-правила комутатор змушений

надсилати пакет до контролера для отримання подальших інструкцій, що значно підвищує затримку обробки трафіку. Таким чином, підвищене навантаження на процесор контролера може безпосередньо впливати на швидкість реагування динамічних змін у мережі та якість обслуговування користувачів.

Результати вимірювань наведено на Рис. 3.17, зокрема показано зростання середнього навантаження ЦП у залежності від зменшення інтервалу моніторингу. Перехід від вимірювання 1 раз на 5 хв до періоду 1с збільшує навантаження з $\approx 2\%$ до $\approx 8\%$. Подальше зменшення інтервалу до 150мс та 100мс призводить до експоненційного росту: 46% та 92,4% відповідно, що практично вичерпує обчислювальні ресурси контролера.

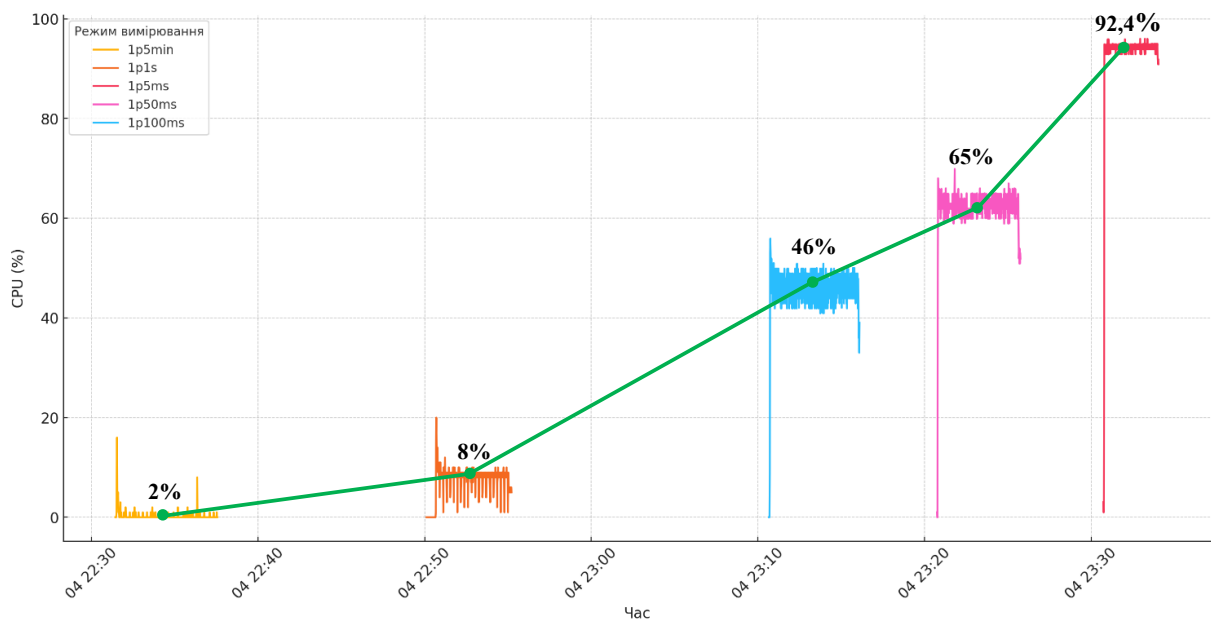


Рис.3.17. Завантаженість процесора контролера при різному інтервалі моніторингу

На основі цих результатів було побудовано криву залежності CPU-завантаження від інтервалу моніторингу (Рис. 3.18) та визначено рекомендовані межі частоти опитування для різних категорій QoE-чутливих сервісів:

- Ультранизькі затримки (< 10 мс): максимальна частота опитування ≈ 200 Hz (5 мс), однак завантаження ЦП ≈ 92 % може призводити до виснаження ресурсів.
- Хмарні ігри (< 50 мс): інтервал ≈ 50 мс забезпечує адекватну точність моніторингу при середньому завантаженні ≈ 65 %.
- Відеоконференції (< 250 мс): інтервали до 100 мс гарантують достатню деталізацію без надмірного навантаження ($\lesssim 46$ %).

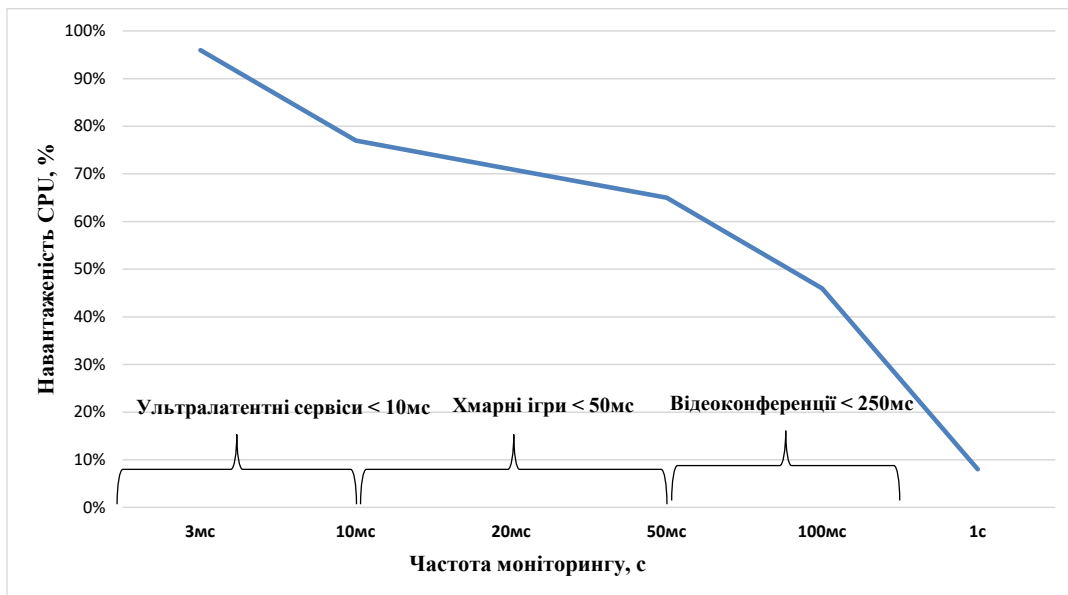


Рис.3.18. Встановленні межі інтервалів моніторингу для різних сервісів щодо гарантування QoE

Таким чином, вибір оптимального інтервалу моніторингу слід здійснювати з урахуванням вимог до затримки обслуговування та допустимого рівня CPU-завантаження контролера. Занадто висока частота опитувань призводить до деградації продуктивності самої системи моніторингу, тоді як надто рідкі інтервали можуть зменшити точність відображення поточного стану мережі й, як наслідок, погіршити QoE кінцевих користувачів.

З наближенням програмно-конфігурованих мереж до областей застосування з ультранизькою затримкою, таких як URLLC, XR-середовища та детерміновані індустріальні системи, спостерігається зростаюча потреба

операторів у зменшенні періоду збору телеметричних даних до мілі- або мікросекундного діапазону. Зазначена стратегія спрямована на забезпечення актуального відображення стану топології мережі, що дозволяє контролеру здійснювати миттєве реагування на будь-які порушення функціонування. Водночас наднизький період опитування створює подвійне навантаження: з одного боку, істотно зростає споживання процесорного часу на самому контролері, а з іншого – істотно збільшується кількість службового трафіку у комутаторах, що веде до затримок Flow-Rule Instance та загального погіршення якості обслуговування. Щоби кількісно визначити порогові значення, за яких контрольна площа переходить у стан перевантаження, було проведено серію експериментів з моніторинговими інтервалами 10 мс, 7 мс і 5 мс.

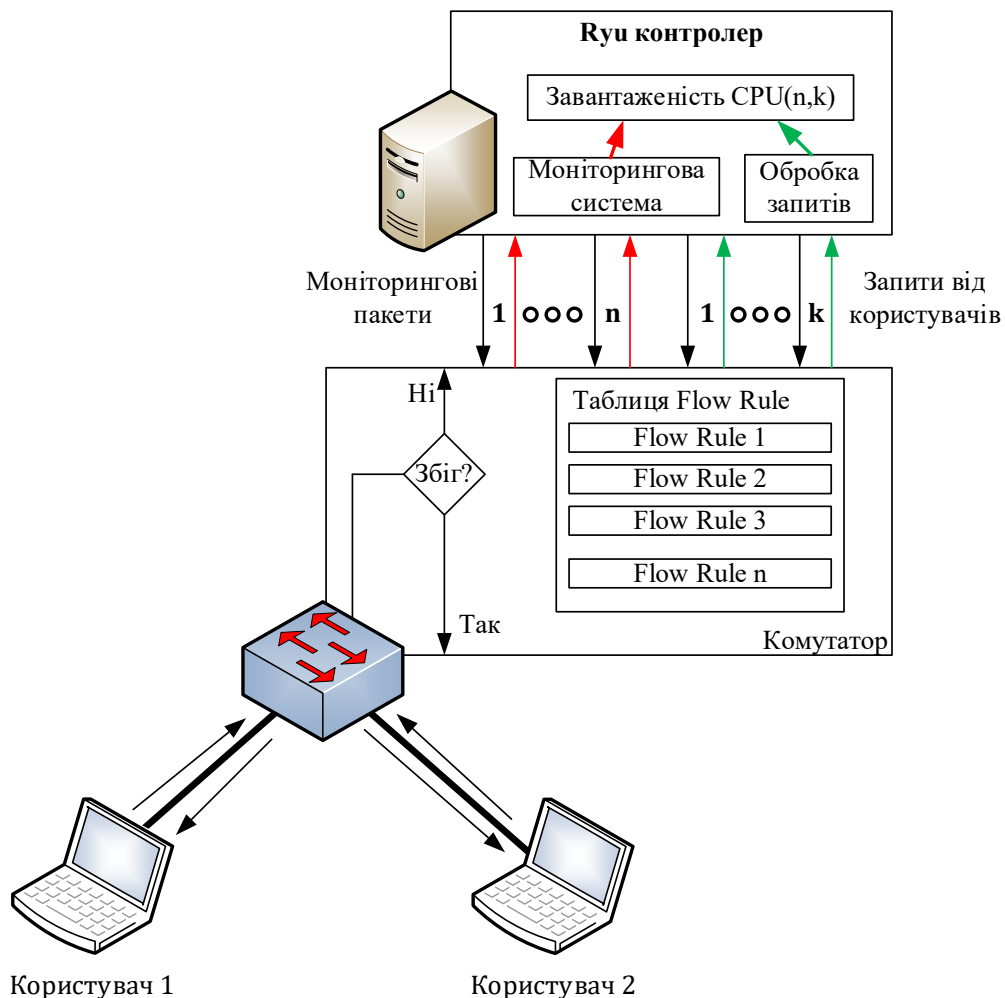


Рис.3.19. Схема дослідження впливу наднизького інтервалу моніторингу на завантаженість ЦП

Експериментальна схема (Рис. 3.19) складається з контролера Ryu, OpenFlow-комутатора та пари кінцевих вузлів, що генерують трафік для імітації реального навантаження.

```
def _monitor(self):  
    while True:  
        for dp in self.datapaths.values():  
            self.send_echo_request(dp)  
            self.request_stats(dp)  
            self.send_lldp(dp)  
        self.log_ctrl_latencies()  
        hub.sleep(0.010)
```

Рис.3.20. Фрагмент коду для зміни інтервалу моніторингу

Кожен експеримент тривав 600 секунд. Перші 120с, моніторингова система вимкнена, щоб зафіксувати базові значення навантаження ЦП та затримок.

На стороні контролера щосекунди логуються показники завантаження процесора та внутрішні часові мітки відправлення/отримання Barrier-Reply, із яких обчислюється затримка встановлення правил. Вимірювання затримки між комутаторами, а також контролером і комутатором відбуваються описаними раніше методами.

При використанні інтервалу моніторингу 10 мс середнє навантаження ЦП зростає з чотирьох до сімдесяти восьми відсотків, а затримка в каналі між комутаторами збільшується у 22 рази – з 3,7 мс до ~82 мс; Flow-Rule Latency майже подвоюється. При переході до 7 мс завантаження ЦП перевищує 89 %, затримка в каналі зв'язку сягає 157 мс, а час встановлення правил у комутаторі збільшується до 5,2 мс. Найінтенсивніший інтервал 5 мс демонструє максимальне навантаження: завантаження ЦП зростає до 97 %, затримка в каналі зв'язку перевищує 300 мс, а час встановлення правил зростає в сімнадцять разів порівняно з вихідною. Також у кожному експерименті спостерігався збій у роботі контролера. Ці моменти позначено на графіках зеленою лінією. Причому зі зменшенням інтервалу моніторингу збій у роботі контролера відбувався щоразу швидше.



Рис.3.21. Виміряні метрики при частоті моніторингу 10мс

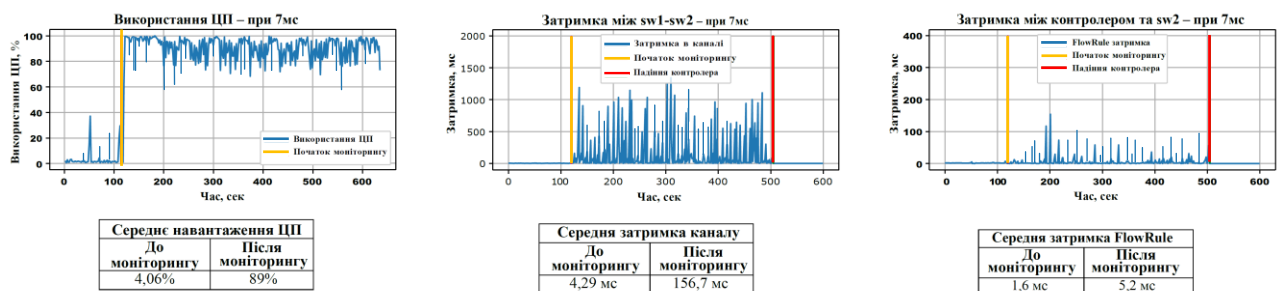


Рис.3.22. Виміряні метрики при частоті моніторингу 7мс

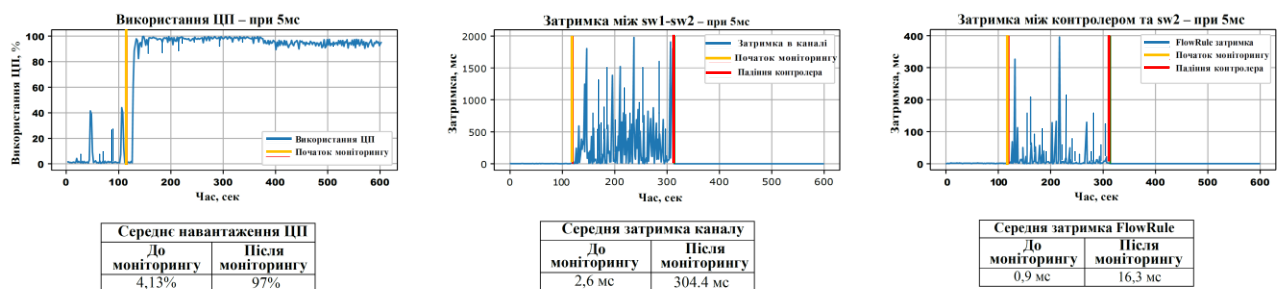


Рис.3.23. Виміряні метрики при частоті моніторингу 5мс

Таким чином, аналіз отриманих даних виявив нелінійний стрибок затримок уже в інтервалі між 10 мс і 7 мс та підтвердив, що інтервали менші за 5 мс є неприйнятними без масштабування контролерів або суттєвої оптимізації процесів площини управління. Отримані результати слугують основою для подальшої розробки адаптивного алгоритму, який динамічно змінюватиме параметр `hub.sleep()` відповідно до поточного завантаження CPU та показників затримки, зберігаючи баланс між точністю моніторингу та стабільністю мережевої інфраструктури.

Інтелектуальна адаптивна система моніторингу є важливою складовою сучасних SDN. Основна мета такої системи полягає в забезпеченні оптимального балансу між точністю вимірювань параметрів мережі та мінімізацією службового навантаження на контролер і мережеві пристрої.

На відміну від звичайної системи, інтелектуальна адаптивна система застосовує комбіновану модель управління інтервалом моніторингу, яка базується на поточних показниках навантаження контролера та мережі, а також прогнозованому рівні якості послуг (QoE). Даний підхід дозволяє динамічно адаптувати частоту моніторингу залежно від поточних умов.

Для проведення порівняльного аналізу була змодельована мережева топологія, що складається з 10 комутаторів з 8 портами кожен та 15 з'єднань(каналів зв'язку) між комутаторами. Така конфігурація дозволяє імітувати типову структуру локальної або корпоративної мережі середнього масштабу та дослідити поведінку систем моніторингу в умовах, наближених до реальних. Звичайна система моніторингу здійснює опитування всіх елементів мережі з фіксованою частотою. У даному сценарії прийнято, що кожную секунду виконуються наступні операції: LLDP пакети надсилається по всіх 15 з'єднаннях, статистика портів запитується з усіх 10 комутаторів та всіх їх 8 портів, а Echo-запити надсилаються до всіх 10 комутаторів. Загальне службове навантаження у цьому сценарії становить 78 560 біт/с.

Адаптивна система моніторингу класифікує вузли та з'єднання на критичні, з великим об'ємом трафіку та стабільні. Моніторинг здійснюється з різною інтенсивністю залежно від класу елемента. До прикладу, для критичних з'єднань: моніторинг 5 з'єднань за протоколом LLDP з частотою 1 раз на секунду, моніторинг 4 комутаторів за допомогою запитів статистики (Stats) з частотою 1 раз на секунду та Echo-запитів з частотою 0.2 раз на секунду. Загальне службове навантаження у цьому сценарії становить 78 560 біт/с.

Для стабільних з'єднань: моніторинг 10 з'єднань за протоколом LLDP з частотою 1 раз на 5 секунд. Моніторинг 6 комутаторів за допомогою запитів

статистики (Stats) з частотою 1 раз на 10 секунд (0.1/сек). Загальне службове навантаження у цьому сценарії становить 34 272 біт/с.

Таблиця 3.7

Приклад службового навантаження

Метрика	Звичайний моніторинг(біт/с)	Адаптивний моніторинг(біт/с)
LLDP	12 000	5 600
Статистика портів	61 440	28 262
Echo-запити	5 120	409,6
Загальний службовий трафік	78 560	34 272

Як видно з таблиці 3.7 та графічного представлення, адаптивна система моніторингу демонструє суттєве зменшення обсягу генерованого службового трафіку порівняно зі звичайною системою. Розрахована економія службового трафіку становить приблизно 56.4%, що забезпечує ефективніше використання пропускної здатності каналів зв'язку та зниження навантаження на SDN-контролер і мережеві комутатори.

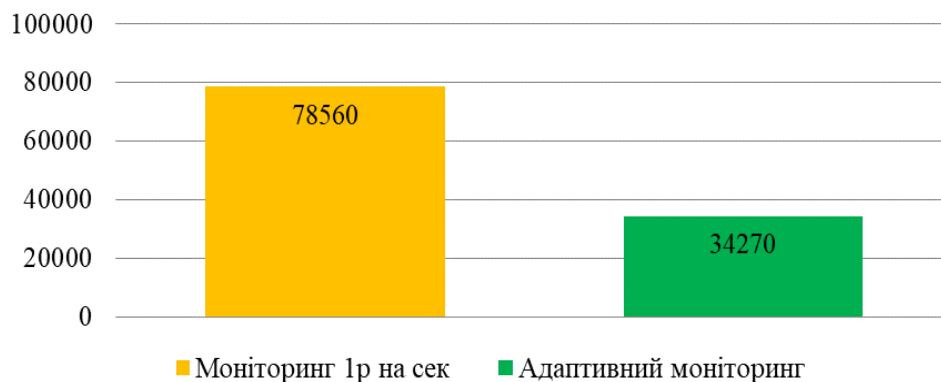


Рис.3.24. Порівняння ефективності використання ресурсів за критерієм обсягу генерованого службового трафіку використанні традиційного та запропонованого методу моніторингу

Зменшення службового навантаження адаптивною системою відбувається за рахунок того, що вона реагує на динамічні умови в мережі, прогнозує навантаження та вимірює лише ті канали зв'язку, які дійсно потребують контролю в поточний момент часу. На противагу цьому, звичайна система не

розрізняє активність комутаторів та лінків, постійно витрачаючи ресурси на їхнє опитування, навіть коли це не є необхідним.



Рис.3.25. Оцінка QoE в умовах використання стандартної та інтелектуальної моніторингової системи

Проте, високий рівень QoE не завжди є достатнім для забезпечення якості сприйняття, важливу роль також відіграє стабільність QoE в часі. Рисунок 3.25 показує часову динаміку оцінки QoE, демонструючи різницю між системою, чутливою до флуктуацій, та запропонованою системою з інтелектуальною системою моніторингу. На відміну від системи, схильної до реагування на різкі коливання рівня QoE, запропонована система з прогнозуванням демонструє значно стабільніший і плавніший рівень QoE. Така стабільність є прямим результатом реалізації запропонованого методу інтелектуального моніторингу з можливістю передбачати майбутні стани каналів зв'язку. Прогнозуючі можливості дозволяють системі ідентифікувати короткотривалі деградації QoE та уникати зайвих, потенційно деструктивних перемикань маршрутів, якщо прогнозується швидке відновлення оцінки QoE каналу зв'язку. Це дозволяє підтримувати оцінку QoE на достатньому рівні без перемикання маршруту протягом більшого часу, зменшуючи негативний вплив частих змін маршрутів на якість сприйняття.

3.3 Моделювання та дослідження методу інтелектуальної QoE маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах

Якість сприйняття є критичним показником успішності сучасних мережевих сервісів, відображаючи суб'єктивне сприйняття якості користувачем. На відміну від технічних метрик якості обслуговування, таких як втрати пакетів, затримка та пропускна здатність, QoE є багатограним і залежить від складних, часто нелінійних взаємозв'язків між технічними параметрами, характеристиками застосунку та суб'єктивними факторами користувача. Ефективна QoE-орієнтована маршрутизація вимагає точного і своєчасного передбачення QoE на основі доступних моніторингових даних про стан мережевих каналів. У зв'язку з цим, методи машинного навчання набувають ключового значення для побудови моделей, здатних відобразити ці складні залежності та передбачити рівень QoE.

Забезпечення високої якості сприйняття послуг в сучасних програмно-конфігурованих мережах потребує використання адаптивних підходів до маршрутизації трафіку. Традиційні методи QoE-маршрутизації, як правило, базуються на статичних правилах або евристичних алгоритмах, що не завжди здатні ефективно реагувати на зміну характеристик каналів зв'язку в реальному часі. Запропонований метод передбачає застосування моделі машинного навчання, яка дозволяє інтелектуально оцінювати поточний рівень QoE на основі вимірюваних метрик, таких як затримка, втрати пакетів і пропускна здатність каналів зв'язку.

Головною відмінністю розробленого підходу від існуючих методів, які не використовують машинне навчання, є здатність автоматично враховувати взаємозв'язки між мережевими параметрами і суб'єктивною якістю сприйняття послуг. Завдяки цьому забезпечується більш точний і гнучкий вибір оптимального шляху передачі даних залежно від поточних умов мережі. Перевагами такого підходу є підвищення ефективності управління мережевими

ресурсами, швидка адаптація до змін навантаження та стабілізація QoE, що позитивно впливає на загальну якість послуг для кінцевих користувачів.

Завдання передбачення QoE на основі вимірюваних параметрів мережі формалізують як задачу контрольованого машинного навчання [78]. Це означає, що для навчання моделі використовується набір даних, у якому для кожного вектора вхідних мережевих метрик задано відповідне значення QoE.

Залежно від того, чи має змінна QoE дискретну чи неперервну природу, задача контрольованого навчання формулюється як класифікаційна або регресійна відповідно. Якщо QoE представлено як неперервне числове значення, наприклад, за загальноприйнятою шкалою середньої оцінки думок MOS від 1 до 5 або за шкалою APSNR чи PESQ, йдеться про задачу регресії. Метою регресійної моделі є побудова функції, яка відображає простір вхідних мережевих метрик у простір дійсних чисел, що відповідають значенню QoE. Такий підхід дає змогу отримувати детальніші передбачення якості сприйняття, що є корисним для гнучкого налаштування маршрутизації.

З огляду на нелінійний і часто неочевидний характер взаємозв'язку між технічними параметрами мережі та суб'єктивним сприйняттям користувача, прості лінійні регресійні моделі можуть виявитися недостатньо ефективними. Складність залежностей, взаємодії між різними мережевими метриками та потенційна зашумленість даних зумовлюють потребу у використанні потужніших моделей, здатних виявляти складні закономірності.

Ансамблеві методи машинного навчання, зокрема Random Forest та градієнтний бустинг, продемонстрували високу ефективність у розв'язанні регресійних задач на структурованих даних, властивих мережевим метрикам. Їхня ефективність зумовлена здатністю моделювати складні нелінійні залежності та вищою стійкістю до перенавчання порівняно з окремими моделями [79].

Для задачі регресійного передбачення QoE на основі мережевих параметрів розглядаються наступні моделі:

CatBoost (Categorical Boosting) – алгоритм градієнтного бустингу, оптимізований для роботи з категоріальними та змішаними типами даних, що забезпечує високу точність прогнозування та ефективно долає проблеми перенавчання. Особливістю CatBoost є вбудована обробка категоріальних ознак, що робить його особливо придатним для задач, де присутні неоднорідні типи ознак.

XGBoost (Extreme Gradient Boosting) – один із найефективніших і найпопулярніших алгоритмів градієнтного бустингу, який застосовує регуляризацію та техніки обрізки дерев, що забезпечує високу точність і стабільність результатів. XGBoost характеризується високою швидкістю навчання, ефективною обробкою пропущених значень та здатністю до ефективного масштабування на великих наборах даних.

LightGBM (Light Gradient Boosting Machine) – модель градієнтного бустингу з високою ефективністю навчання за рахунок використання алгоритму побудови дерев на основі гістограм, що дозволяє значно зменшити обчислювальні витрати. LightGBM є особливо ефективним при роботі з великими масивами даних завдяки швидкому навчанню та високій точності прогнозування.

Random Forest – ансамблевий алгоритм, що будує численні дерева рішень на різних підмножинах даних і ознак та визначає результат шляхом голосування (для класифікації) або усереднення (для регресії). Random Forest забезпечує стабільну продуктивність і стійкість до перенавчання, що робить його надійним інструментом для прогнозування QoE у неоднорідних умовах мережі.

Для отримання набору даних, необхідних для побудови та навчання моделей передбачення QoE, було розгорнуто середовище в симуляторі Mininet (рис.3.26). Використана топологія складається з трьох шляхів, які в свою чергу мають різні довжини. Зокрема, перший шлях складається з двох з'єднань,

другий – із трьох, а третій – із чотирьох. Така конфігурація дозволяє зімітувати типові сценарії маршрутизації у реальних мережах з різною довжиною шляхів.

В дослідженні здійснювалось передавання двох основних типів мережевого трафіку: відеотрафік та VoIP-трафік. Для вимірювання параметрів каналів зв'язку застосовувалася розроблена раніше моніторингова система, яка послідовно фіксувала параметри каналів зв'язку.

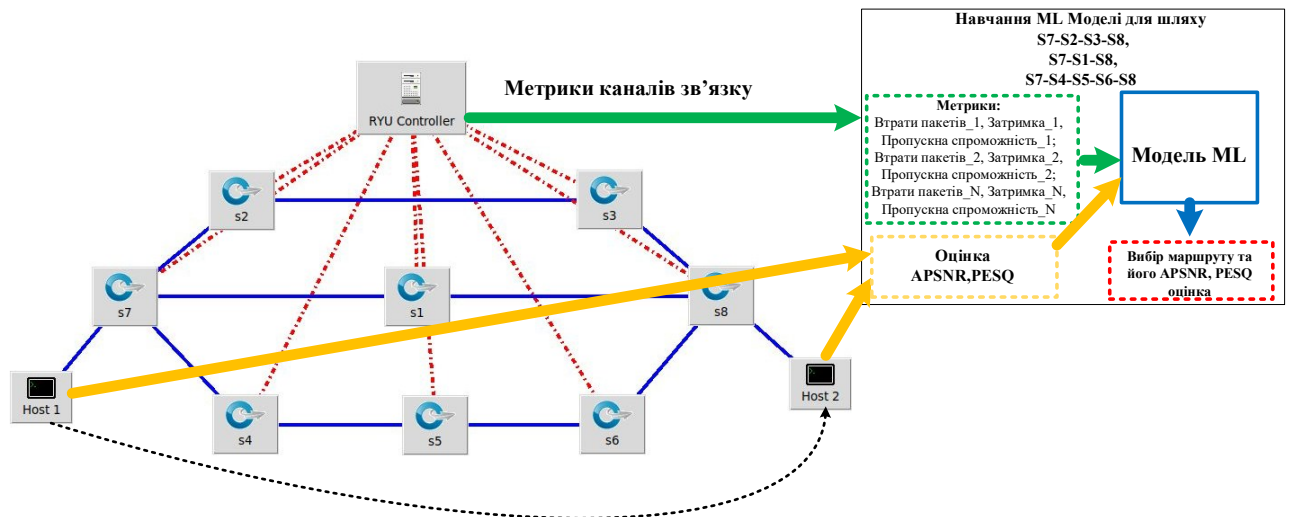


Рис.3.26. Топологія досліджуваної SDN з інтегрованим модулем інтелектуальної QoE-маршрутизації

Параметри каналів зв'язку змінювалися рівномірно з такими діапазонами та кроками: затримка варіювалася від 0 до 210 мс з кроком у 30 мс; втрати пакетів – від 0% до 10% з кроком 1.43%; залишкова пропускна здатність – від 0% до 90% з кроком 12.86%. Таким чином, було проведено 512 експериментів для кожного з типів трафіку, що забезпечило формування початкового набору даних розміром 1024 записи. Кожен запис містив виміряні значення параметрів каналів зв'язку та відповідну оцінку якості сприйняття (QoE), представлену метриками APSNR для відеотрафіку та PESQ для VoIP-трафіку. Такий набір даних створювався для трьох шляхів та відповідно для кожного типу трафіку.

Параметри каналів зв'язку змінювалися рівномірно з такими діапазонами та кроками що вказано в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Діапазон використаних параметрів каналів зв'язку

Параметр	Діапазон	Крок зміни
Затримка, мс	0-210мс	30мс
Втрати пакетів, %	0-10%	1,43%
Залишкова пропускна здатність, %	0-90%	12,86%

Обсяг у 512 записів, отриманий шляхом безпосередніх вимірювань, є цінним для розуміння реальних залежностей, однак є недостатнім для ефективного навчання складних ансамблевих моделей машинного навчання, які вимагають більшого обсягу даних для досягнення високої точності та узагальнюючої здатності.

З метою підвищення достовірності навчання моделей прогнозування QoE та забезпечення їхньої здатності до узагальнення на широкий діапазон мережових умов, було здійснено генерацію великого синтетичного набору даних обсягом 10 000 записів для кожного типу трафіку. Генерація виконувалась на основі апроксимаційної моделі, навченої на емпіричних даних, отриманих у процесі попереднього експерименту.

На основі цього набору було побудовано регресійну модель машинного навчання Random Forest Regressor, яка апроксимує функцію залежності QoE від параметрів каналів зв'язку. Модель будувалась для метрики APSNR та PESQ.

Модель було навчено на 80% від початкового набору, а на решті виконувалась контрольне тестування. Результати оцінювання точності апроксимації наведено у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Точність апроксимації моделі машинного навчання

	R^2	RMSE
APSNR	0,937	1,24
PESQ	0,926	0,18

Отримані значення свідчать про високу точність моделі та її здатність відображати емпіричні залежності між мережевими параметрами та QoE. Таким чином, застосування апроксимуючої моделі є обґрунтованим як метод генерації додаткового навчального набору даних.

Після навчання моделі було згенеровано 10 000 нових значень, які рівномірно розподілили у відповідних допустимих інтервалах. Для кожного згенерованого набору параметрів обчислено передбачене значення QoE. В результаті чого сформовано узгоджений синтетичний набір даних, який зберіг властивості початкового набору даних та дозволив кардинально розширити можливість для навчання моделей машинного навчання.

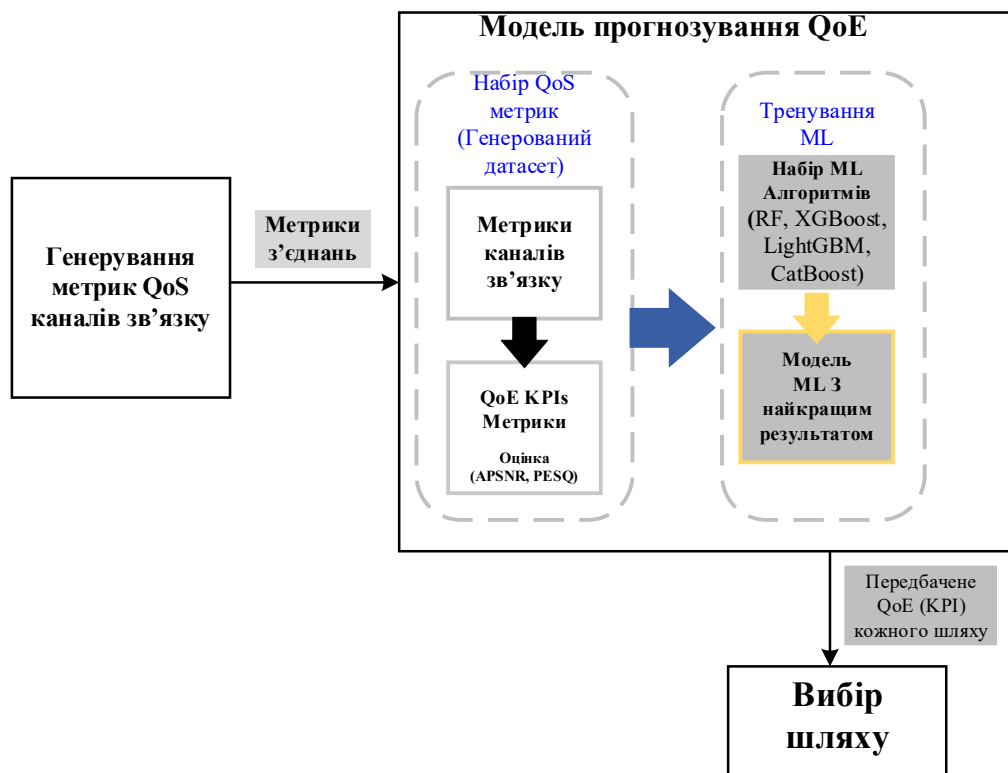


Рис.3.27. Процес навчання моделей машинного навчання

Перед початком навчання, кожен з датасетів був розділений на дві ключові частини: навчальну вибірку та тестову вибірку. Такий розподіл є стандартною практикою у машинному навчанні та має критичне значення для об'єктивної оцінки узагальнюючої здатності моделі. Навчальна вибірка (зазвичай 70-80%

від загального обсягу даних) використовується безпосередньо для процесу тренування моделі, де алгоритм вивчає залежності між вхідними ознаками та цільовою змінною. Тестова вибірка (зазвичай 20-30% даних) залишається недоступною для моделі під час навчання і використовується лише один раз, на фінальному етапі, для отримання неупередженої оцінки того, наскільки добре навчена модель здатна передбачати результати на нових, раніше невідомих даних. Це дає змогу виявити перенавчання – ситуацію, коли модель надто добре запам'ятовує навчальні дані, але втрачає здатність робити точні передбачення на нових.

Загальний принцип навчання регресійної моделі полягає у знаходженні такого набору внутрішніх параметрів моделі, який мінімізує функцію втрат на навчальних даних. Для регресійних задач типовими функціями втрат є, наприклад, середньоквадратична помилка (MSE) або корінь з середньоквадратичної помилки (RMSE), які вимірюють середню величину відхилення передбачених значень від реальних. Процес мінімізації здійснюється за допомогою різних алгоритмів оптимізації.

Ефективність моделей машинного навчання значною мірою залежить від вибору їхніх гіперпараметрів – параметрів, які встановлюються до початку процесу навчання і не навчаються безпосередньо з даних (наприклад, кількість дерев в ансамблі, максимальна глибина дерев, швидкість навчання, параметри регуляризації тощо). Для досягнення оптимальної продуктивності та уникнення перенавчання було проведено налаштування гіперпараметрів для кожної моделі. Даний підхід реалізовувався за допомогою таких технік, як пошук по сітці (Grid Search) або випадковий пошук (Random Search), часто в поєднанні з перехресною валідацією (Cross-Validation) на навчальній вибірці (або використанні окремої валідаційної вибірки, виділеної з навчальної). Налаштування гіперпараметрів дозволяє знайти комбінацію параметрів, яка забезпечує найкращу узагальнюючу здатність моделі.

Після завершення процесу навчання та налаштування гіперпараметрів, фінальна оцінка ефективності кожної навченої моделі була проведена на тестовій вибірці. Такий підхід гарантує, що отримана оцінка є об'єктивним показником того, як модель поведе себе на нових, раніше невідомих даних.

Для оцінки якості регресійних передбачень якості сприйняття використовувалися стандартні метрики:

Середня абсолютна помилка (MAE): Вимірює середню абсолютну різницю між фактичними та передбаченими значеннями. MAE легко інтерпретується, оскільки вона виражається в тих самих одиницях, що й цільова змінна.

Корінь з середньоквадратичної помилки (RMSE): Є однією з найпоширеніших метрик, чутлива до великих помилок завдяки квадратичному члену. Також виражається в одиницях цільової змінної.

Коефіцієнт детермінації (R^2): Показує частку дисперсії цільової змінної, яка пояснюється моделлю. Значення R^2 близьке до 1 свідчить про високу якість моделі.

Результати порівняння ефективності алгоритмів ML для прогнозування QoE представлені в Таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Порівняння ефективності алгоритмів машинного навчання

		2-зв'язковий шлях			3-зв'язковий шлях			4-зв'язковий шлях			Середні значення		
Тип трафіку	ML-алгоритм	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2
VoIP	RF	0,35	0,48	0,72	0,453	0,585	0,54	0,522	0,68	0,51	0,442	0,58	0,59
	XGBoost	0,31	0,45	0,75	0,415	0,55	0,58	0,485	0,65	0,54	0,405	0,55	0,63
	LightGBM	0,29	0,43	0,77	0,395	0,53	0,6	0,46	0,62	0,57	0,38	0,53	0,65
	CatBoost	0,28	0,42	0,78	0,38	0,52	0,61	0,45	0,61	0,58	0,37	0,52	0,66
Відеотрафік	RF	0,25	0,42	0,79	0,203	0,296	0,85	0,229	0,322	0,78	0,226	0,35	0,81
	XGBoost	0,22	0,40	0,82	0,185	0,28	0,87	0,21	0,31	0,8	0,205	0,33	0,83
	LightGBM	0,21	0,39	0,83	0,175	0,27	0,88	0,2	0,3	0,82	0,195	0,32	0,84
	CatBoost	0,2	0,38	0,84	0,17	0,26	0,89	0,195	0,29	0,83	0,188	0,31	0,85

Для VoIP-трафіку, усі розглянуті алгоритми демонструють порівняно високу точність прогнозування, про що свідчать низькі значення MAE та RMSE, а також високі значення R^2 . Алгоритми XGBoost, LightGBM та CatBoost показують дещо кращі результати порівняно з Random Forest. Зокрема, CatBoost продемонстрував найменші значення MAE та RMSE та найвище значення R^2 для VoIP-трафіку, що вказує на його високу прогнозну здатність.

Для відеотрафіку, прогнозування QoE є більш складним завданням через вищу чутливість до змін параметрів QoS. Проте, розглянуті ML-алгоритми також показали прийнятні результати. Як і у випадку з VoIP, ансамблеві методи (XGBoost, LightGBM, CatBoost) перевершують Random Forest за точністю прогнозування. CatBoost знову ж таки виступає лідером за показниками MAE та RMSE, демонструючи найкращі результати для відеотрафіку.

У межах проведеного дослідження було здійснено порівняння ефективності маршрутизації, орієнтованої на забезпечення високого рівня якості сприйняття, з вісьмома альтернативними підходами до вибору маршруту, одним із яких є метод, запропонований іншими дослідниками у роботі [80]. Такий аналіз мав на меті не лише визначити переваги запропонованого інтелектуального підходу, а й оцінити його ефективність у порівнянні з іншими загальноновживаними стратегіями маршрутизації, що ґрунтуються як на традиційних евристичних правилах, так і на алгоритмах машинного навчання.

До цих алгоритмів належали: маршрутизація за критерієм максимальної пропускної здатності, маршрутизація за критерієм мінімальної затримки, маршрутизація за критерієм мінімальної втрати пакетів, а також два алгоритми з урахуванням пропускної здатності та затримкою, та за пропускною здатністю і втратою пакетів. Також до порівняння було включено ще одну стратегію, розроблену іншими дослідниками в межах окремого дослідження, у якій реалізовано підхід на основі машинного навчання. Вказаний метод

використовує алгоритм ансамблевого навчання Random Forest для прогнозування рівня QoE на кожному з можливих маршрутів. На основі цього прогнозу система приймає рішення про вибір маршруту з очікувано найвищою якістю сприйняття. Відповідно останні два алгоритми маршрутизації є запропоновані рішення в дисертаційній роботі. А саме інтелектуальний метод QoE-маршрутизації з використанням алгоритму CatBoost. Та комплексне використання інтелектуальної моніторингової системи та QoE-маршрутизації.

Експериментальна частина дослідження передбачала масштабну емпіричну перевірку всіх шести стратегій маршрутизації. Для цього було проведено по 300 незалежних тестових передавань для кожного з двох типів трафіку (VoIP, відеотрафік), що дозволило забезпечити репрезентативність результатів та статистичну достовірність висновків. Кожне випробування здійснювалося в однакових умовах мережевої інфраструктури, з ідентичними конфігураціями трафіку, топології та початкових характеристик каналів зв'язку, що гарантувало справедливе порівняння усіх алгоритмів.

Спершу до застосування будь-якого алгоритму маршрутизації кожен з типів трафіку послідовно передавався через усі наявні маршрути в мережі (три доступні шляхи). Для кожного маршруту фіксувалися фактичні значення параметрів каналів зв'язку, зокрема затримка, втрати пакетів та використання пропускної здатності. На основі цих вимірювань обчислювалась оцінка QoE для кожного маршруту. Після цього визначався маршрут з найвищим рівнем QoE, який позначався як еталонний і використовувався як критерій для порівняння з результатами прогнозованої маршрутизації.

Далі застосовувалися досліджувані стратегії маршрутизації. Кожен алгоритм розраховував прогнозовані значення QoE для кожного з трьох доступних маршрутів, спираючись на власні правила чи модель вибору. На підставі цих прогнозних оцінок обирався маршрут, що, згідно з припущенням алгоритму, мав забезпечити найкращий результат за визначеними метриками.

На завершальному етапі здійснювалася оцінка успішності стратегії маршрутизації. Для цього перевірялося, чи збігається обраний алгоритмом маршрут із маршрутом, що показав найвищу фактичну якість сприйняття. Таким чином, на основі сукупності результатів для всіх тестів визначалась загальна точність кожного алгоритму маршрутизації.

Для оцінки ефективності кожної стратегії маршрутизації було обчислено відсоток випадків, коли обраний алгоритмом шлях відповідав шляху з найвищим фактичним показником QoE. На Рисунку 3.28 представлено ймовірність вибору найкращого шляху досліджуваних типів трафіку при застосуванні різних стратегій маршрутизації. Чим вище значення ймовірності, тим точніше стратегія маршрутизації здатна передбачити та обрати шлях, який фактично забезпечить найкращу якість сприйняття користувачем.

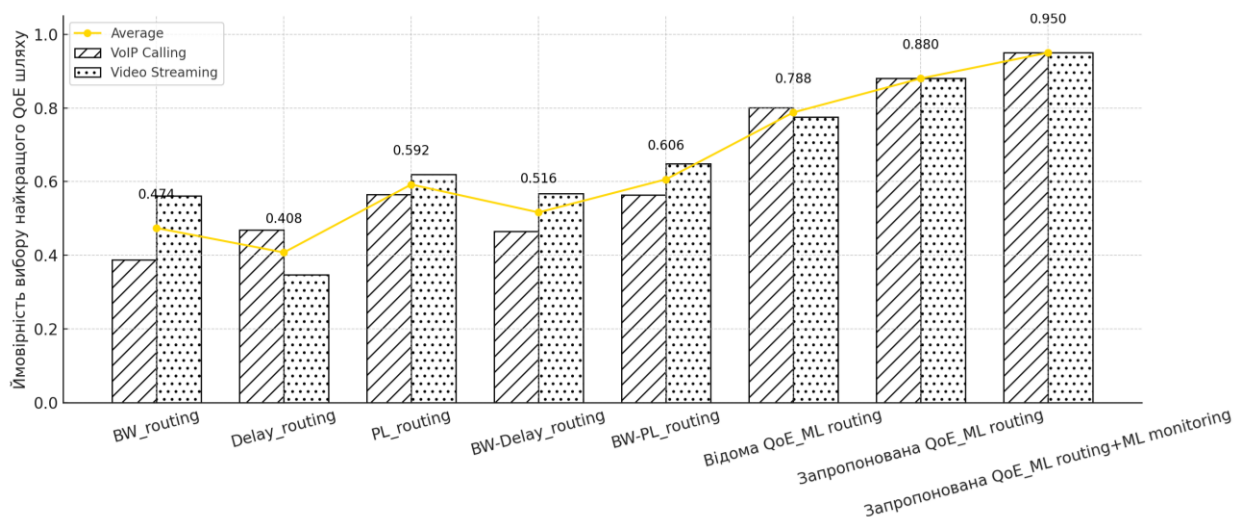


Рис.3.28. Ймовірність вибору найкращого маршруту за критерієм рівня QoE

З рисунку видно, що традиційні евристичні стратегії демонструють нижчі результати, з середніми значеннями 0.474, 0.408 та 0.592 відповідно. Стратегії, які враховують декілька параметрів одночасно забезпечують дещо кращу продуктивність, досягаючи середніх показників на рівні 0.516 та 0.606 відповідно.

Помітне зростання точності спостерігається при використанні алгоритмів, заснованих на машинному навчанні. Так, відома реалізація досягає середнього

значення 0.788, що перевищує результати будь-якої з традиційних стратегій. Запропонований у цій роботі метод демонструє ще вищу точність - 0.880, а його розширена версія з інтеграцією інтелектуального моніторингу досягає максимального значення - 0.950, що відповідає найвищому рівню відповідності обраного шляху реальному найкращому маршруту.

Також варто відзначити різницю в ефективності алгоритмів для VoIP і відеостримінгу. Для VoIP чітко видно перевагу стратегій, орієнтованих на втрати пакетів, тоді як для відеопотоку ключову роль відіграє пропускна здатність. Така різниця підтверджує висновки попередніх розділів щодо диференційованого впливу параметрів мережі на різні типи трафіку.

Для кількісної ілюстрації суттєвого покращення показників якості сприйняття, досягнутого за допомогою запропонованого підходу маршрутизації, орієнтованої на QoE, порівняно з альтернативними методами, на рисунку 3.29 представлено порівняльний аналіз із застосуванням кумулятивних функцій розподілу (CDF) вибору оптимальних шляхів для семи різних стратегій маршрутизації. Як визначено у формулі 3.10, $F_X(X)$ являє собою ймовірність того, що випадкова змінна X , яка в цьому контексті відображає значення метрики QoE, не перевищуватиме певного порогового значення x , де R область значень QoE-показника.

$$F_X(X) = P(X \leq x), x \in R \quad (3.10)$$

На рисунку 3.29, вісь абсцис відповідає виміряним значенням показників QoE, тоді як вісь ординат указує на ймовірність того, що показник QoE обраного шляху є меншим або дорівнює заданому значенню на осі x . Таким чином, графіки CDF надають повну характеристику розподілу значень QoE для маршрутів, обраних кожною стратегією. Крива CDF, зміщена праворуч, свідчить про те, що відповідна стратегія маршрутизації послідовно забезпечує вищі значення показників QoE.

Рисунок 3.29 оцінює продуктивність для VoIP-трафіку з використанням показника PESQ як метрики QoE. Як це прийнято для VoIP, вищі значення PESQ вказують на кращу продуктивність. На рисунку 3.29 представлено CDF для семи різних стратегій маршрутизації: п'яти стандартних ("BW_routing", "Packet_loss_routing", "Delay_routing", "BW-Delay_routing", "BW-PL_routing"), однієї відомої стратегії маршрутизації, орієнтованої на QoE на основі машинного навчання ("Відома_QoE ML_routing"), та запропонованої стратегії ("Запропонована_QoE ML_routing"). Дві стратегії, засновані на машинному навчанні для QoE ("Запропонована_QoE ML_routing" та "Відома_QoE ML_routing"), демонструють значно кращі розподіли PESQ порівняно з п'ятьма стандартними стратегіями. Зокрема, суцільна синя крива (запропонована стратегія) та пунктирна фіолетова крива (відома стратегія) розташовані значно правіше від кривих усіх стандартних підходів. Це свідчить про те, що обидва підходи, засновані на машинному навчанні, ефективніше обирають шляхи з вищим PESQ. При цьому, запропонована стратегія ("Запропонована_QoE ML_routing") показує невелике, але послідовне зміщення праворуч порівняно з "Відома_QoE ML_routing". Це означає, що для будь-якого заданого рівня ймовірності запропонований підхід з більшою ймовірністю досягне вищих значень PESQ. Наприклад, при кумулятивній ймовірності 0.5 запропонована стратегія досягає PESQ близько 2.9, тоді як "Відома_QoE ML_routing" знаходиться трохи лівіше, а стандартні стратегії, такі як "BW_routing", дають PESQ нижче 2.7.

Рисунок 3.30 представляє CDF для APSNR, відповідного ключового показника продуктивності. Аналогічно до попереднього рисунку, криві CDF для обох стратегій, заснованих на машинному навчанні ("Запропонована_QoE ML_routing" та "Відома_QoE ML_routing"), чітко розташовані праворуч від кривих усіх п'яти стандартних стратегій. Це вказує на їхню перевагу у виборі шляхів, що максимізують APSNR. Як і для PESQ, крива запропонованої стратегії "Запропонована_QoE ML_routing" розташована трохи правіше, ніж

крива "Відома_QoE ML_routing", що свідчить про дещо кращий розподіл APSNR.

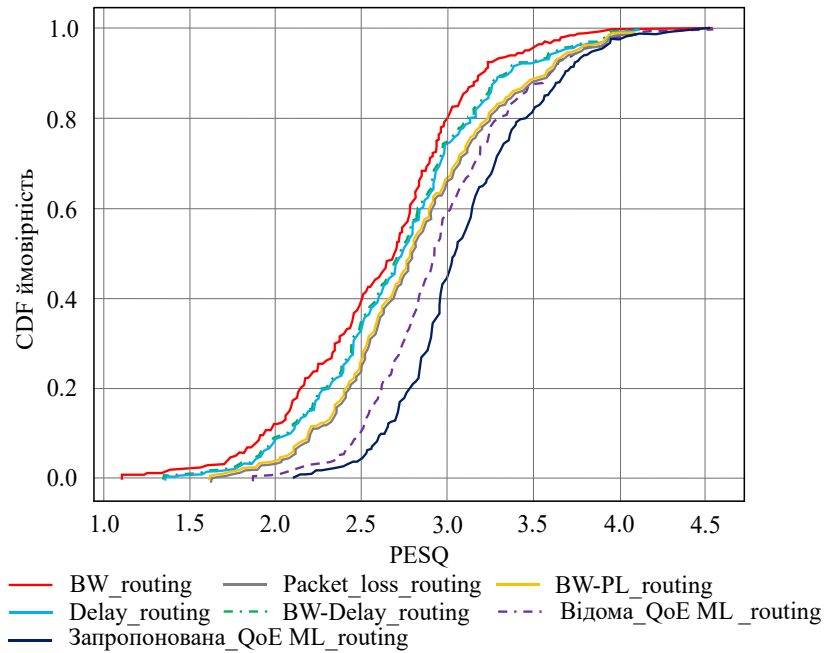


Рис.3.29. Аналіз кумулятивних функцій CDF для порівняння найкращого шляху, обраного за різними методами маршрутизації для VoIP-трафіку

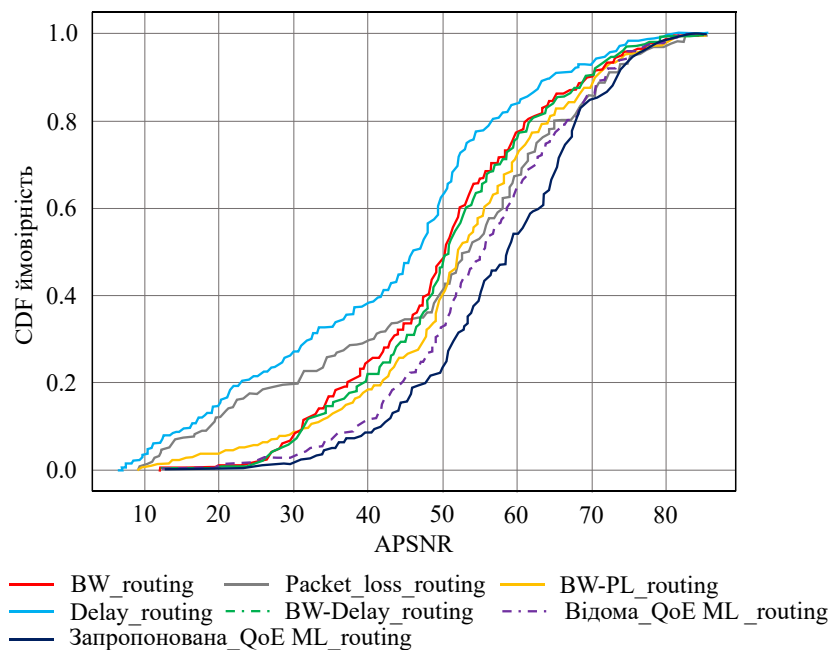


Рис.3.30. Аналіз кумулятивних функцій CDF для порівняння найкращого шляху, обраного за різними методами маршрутизації для відеотрафіку

Вибір оптимального шляху лише на основі максимального значення QoE не завжди надає вичерпне уявлення про ефективність прийнятого рішення. У випадках, коли декілька маршрутів демонструють схожі значення ключових показників якості та рівнів QoE, перевага одного маршруту над іншим може бути незначною. Наприклад, якщо для відеотрафіку значення APSNR для трьох шляхів становить 76, 75 та 40 відповідно, то хоча шлях з APSNR = 76 буде обраний як найкращий, різниця з другим шляхом є мінімальною і практично не впливає на якість сприйняття послуг. У такому випадку оцінювання лише абсолютних значень QoE не відображає усієї картини.

Більш об'єктивну оцінку ефективності стратегії маршрутизації забезпечує аналіз різниці QoE між обраним маршрутом і маршрутом з найвищим можливим значенням QoE, тобто використання показника $QoE_{\text{різниця}}$, що визначається за формулою 3.11. Чим меншою є ця різниця, тим ближчим до оптимального вважається вибір маршруту. Для кількісного аналізу цієї різниці використовується функція кумулятивного розподілу.

$$QoE_{\text{різниця}} = QoE_{\text{найкраще}} - QoE_{\text{обране}} \quad (3.11)$$

На рисунках 3.31 та 3.32 проілюстровано порівняння CDF функцій різниці QoE для двох типів трафіку: VoIP (рис. 3.31) та відеотрафік (рис. 3.32). По осі абсцис відкладено значення різниці QoE, а по осі ординат, ймовірність того, що ця різниця менша або дорівнює відповідному значенню. Крива CDF, зміщена далі ліворуч, вказує на менше значення різниці QoE, що свідчить про більш оптимальну стратегію маршрутизації.

На рисунку 3.31 представлено CDF різниці PESQ для різних стратегій маршрутизації у випадку VoIP трафіку. Як проілюстровано, наявні сім кривих CDF, що представляють п'ять стандартних стратегій, одну відому стратегію маршрутизації, орієнтовану на QoE на основі машинного навчання ("Відома_QoE ML_routing"), та запропоновану стратегію ("Запропонована_QoE ML_routing"). Запропонована стратегія ("Запропонована_QoE ML_routing")

демонструє найбільше зміщення ліворуч, що вказує на найменшу різницю PESQ. Це означає, що запропонована стратегія найчастіше вибирає шляхи, показник PESQ яких максимально близький до найкращого можливого. Запропонована маршрутизація, орієнтована на QoE, послідовно забезпечує оптимальну продуктивність для VoIP з точки зору мінімізації різниці PESQ.

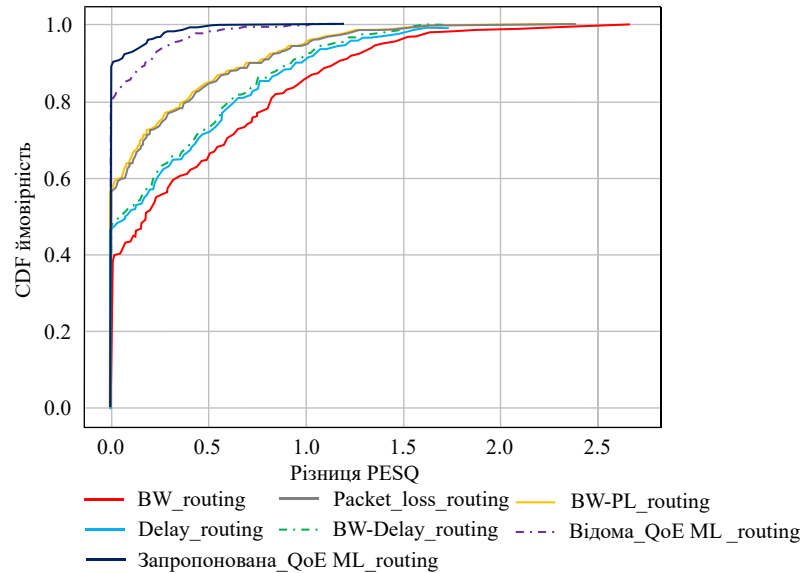


Рис.3.31. Різниця QoE між вибраним шляхом і шляхом з найвищим QoE за різними методами маршрутизації для VoIP-трафіку

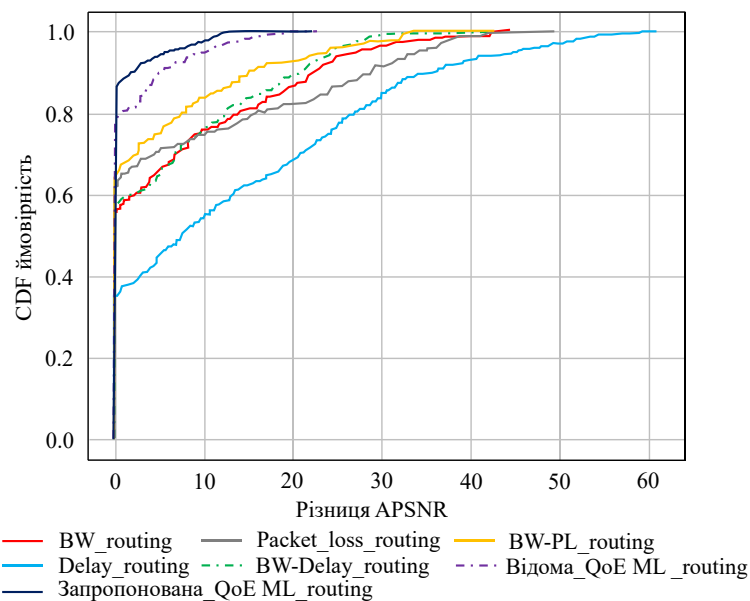


Рис.3.32. Різниця QoE між вибраним шляхом і шляхом з найвищим QoE за різними методами маршрутизації для відеотрафіку

На рисунку 3.32 представлено CDF різниці APSNR для відеотрафіку. Тут також запропонована стратегія "Запропонована_QoE ML_routing" забезпечує найменшу різницю APSNR, демонструючи найбільше зміщення кривої CDF ліворуч. За нею слідує "Відома_QoE ML_routing". Стандартні стратегії мають більші значення різниці APSNR. Узагальнюючи, рисунки 3.31 та 3.32 підтверджують, що різниця QoE демонструє найменшу варіативність для запропонованої маршрутизації, орієнтованої на QoE, порівняно з іншими стратегіями маршрутизації, включаючи відомий підхід на основі машинного навчання. У випадку VoIP-трафіку, порядок кривих CDF різниці QoE точно відображає зворотний порядок кривих CDF вибору найкращого шляху. Це вказує на послідовний рейтинг продуктивності для всіх стратегій за обома аспектами оцінки. Подібні результати спостерігаються і для відеотрафіку, що підкреслює послідовність результатів оцінки. Таким чином, як за критерієм ймовірності вибору найкращого шляху, так і за критерієм мінімізації QoE-різниці, стратегія QoE маршрутизації впевнено перевершує інші розглянуті підходи демонструючи, що запропонована маршрутизація, орієнтована на QoE, перевершує як п'ять стандартних стратегій, так і відомий підхід на основі машинного навчання.

Після детального аналізу порівняльної ефективності семи різних стратегій маршрутизації, було чітко продемонстровано, що стратегії, які використовують підходи машинного навчання для оптимізації QoE, суттєво перевершують традиційні методи маршрутизації. Зокрема, було виявлено, що як відоме рішення маршрутизації QoE на основі ML, так і запропоноване рішення забезпечують вищі значення показників QoE та мінімізують різницю між досягнутим і оптимальним QoE порівняно зі стандартними підходами. Однак, продуктивність методів маршрутизації на основі ML може значно відрізнятись залежно від специфіки їх реалізації, зокрема від використовуваних алгоритмів ML та стратегій моніторингу стану мережі. Подальший аналіз зосереджується на прямому порівнянні двох ключових ML-орієнтованих підходів: існуючого

рішення маршрутизації QoE на основі ML та запропонованого методу маршрутизації QoE, який вирізняється інтеграцією адаптивного моніторингу з функцією прогнозування майбутніх станів каналів.

Рисунок 3.33 представляє порівняння кумулятивних функцій розподілу показника QoE (APSNR) для двох підходів: існуючого рішення маршрутизації на основі машинного навчання (Random Forest) та запропонованого рішення з адаптивним моніторингом (CatBoost).

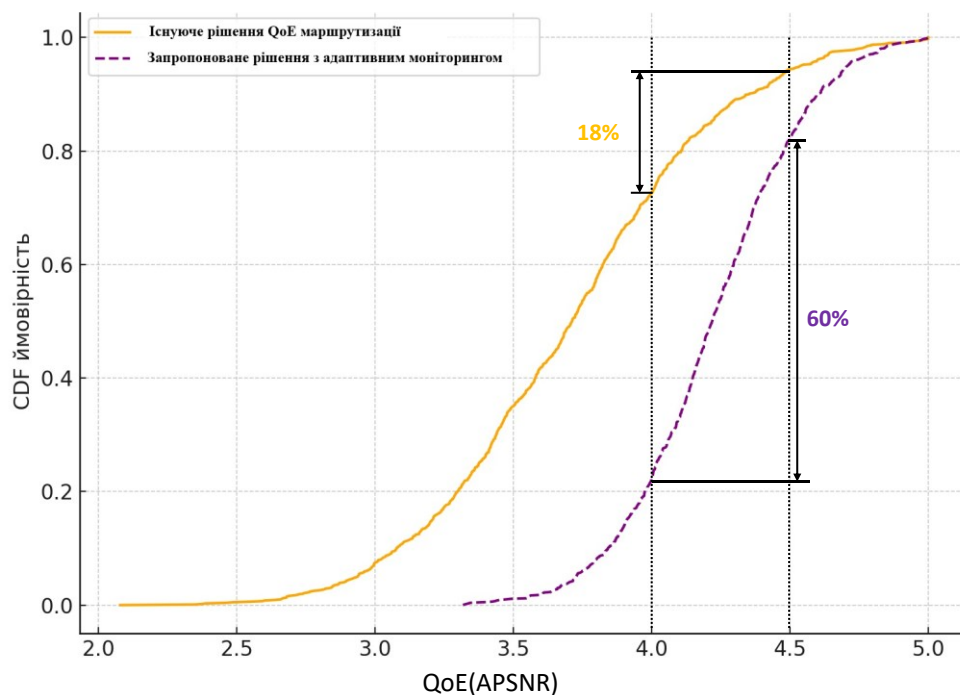


Рис.3.33. Аналіз кумулятивної функцій CDF для порівняння ефективності відомого методу QoE-маршрутизації та запропонованого методу QoE-маршрутизації з використанням адаптивного моніторингу

Як видно на графіку, крива CDF для запропонованого рішення значно зміщена праворуч порівняно з існуючим методом. Це зміщення свідчить про те, що запропонована стратегія послідовно забезпечує вищі значення APSNR, що відповідає кращому рівню QoE для відповідних додатків (наприклад, відео). Зокрема, в інтервалі QoE значень від 4.0 до 4.5 запропонована система забезпечує такий рівень обслуговування приблизно в 60% випадків, тоді як для існуючої системи частка таких маршрутів становить лише 18%, що дає

перевагу запропонованої QoE-маршрутизації з використанням адаптивного моніторингу у 42%. Перевага в розподілі APSNR досягається завдяки використанню більш ефективної моделі машинного навчання (CatBoost) та здатності системи враховувати адаптивні дані моніторингу при виборі шляхів.

Висновки до 3-го розділу

У третьому розділі здійснено комплексне моделювання та дослідження методів підвищення QoE і ефективності використання ресурсів в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах. Важливим аспектом дослідження став аналіз моделей кількісного оцінювання QoE для різних типів трафіку, зокрема VoIP і відеопотоків, за допомогою спеціалізованих метрик, таких як APSNR для відео та PESQ для голосового трафіку.

Результати експериментального дослідження чітко вказують на те, що різні параметри QoS (затримка, втрати пакетів, пропускна здатність) мають суттєво відмінний вплив на якість сприйняття в залежності від типу трафіку. Зокрема, для голосового трафіку критичною є втрата пакетів, тоді як для відеопотоків ключове значення мають як пропускна здатність, так і втрати. Це підтверджується статистично значущими результатами кореляційного аналізу, що дозволяє точно визначити пріоритети в управлінні якістю сервісів у мережах SDN.

В рамках розробленої інтелектуальної системи моніторингу успішно реалізована методика, яка поєднує активні й пасивні методи вимірювання, зокрема LLDP, Echo-запити та PortStats, з адаптивним регулюванням частоти моніторингу на основі машинного навчання. Результати експериментів підтвердили високу точність запропонованої системи, з середньою абсолютною похибкою (MAE) вимірювання затримки 0,513 мс, втрат пакетів 0,362%, і пропускної здатності 0,194 Мбіт/с порівняно з еталонними інструментами.

Проведено кількісний аналіз впливу частоти моніторингу та розміру мережі на службовий трафік. З'ясовано, що зменшення інтервалу моніторингу

істотно збільшує службове навантаження, що може призводити до перевантаження площини управління в масштабних мережах. Це підтверджує необхідність впровадження адаптивних алгоритмів моніторингу, здатних динамічно змінювати частоту опитувань на основі стану мережі.

Експериментально підтверджено значне зростання навантаження на процесор контролера при зменшенні інтервалу моніторингу. Визначено оптимальні інтервали моніторингу для різних типів сервісів з урахуванням балансу між деталізацією моніторингу та завантаженням контролера. Це дозволяє уникнути виснаження ресурсів і зберегти стабільність роботи мережі.

В ході моделювання інтелектуальної QoE маршрутизації продемонстровано ефективність застосування машинного навчання для прогнозування рівня QoE на основі реальних метрик каналів зв'язку. Отримані моделі CatBoost, XGBoost, LightGBM та Random Forest забезпечують високу точність прогнозування, що підтверджено значеннями метрик MAE та RMSE. Встановлено, що інтеграція моделі машинного навчання у систему маршрутизації дозволяє досягти не лише високого, але й стабільного рівня QoE, зменшуючи кількість небажаних перемикань маршрутів.

Таким чином, результати досліджень підтверджують практичну придатність розроблених методів і моделей для використання в програмно-конфігурованих мережах, забезпечуючи значне покращення якості обслуговування користувачів та ефективніше використання мережевих ресурсів.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ

4.1 Моделювання та дослідження впливу процесу одночасного обслуговування користувача кількома точками доступу на якість сприйняття послуг у безпроводних програмно-конфігурованих мережах

Зростання кількості користувачів, які переглядають відеоконтент в інтернеті з мобільних пристроїв, таких як смартфони, планшети та ноутбуки, зумовлює підвищений інтерес науковців до покращення якості сприйняття відеосервісів та ефективного використання мережевих ресурсів [81]. Попри наявність численних підходів до вирішення цього завдання, більшість із них орієнтовані переважно на провідні мережі [82]. Це пояснюється тим, що у провідних мережах, як правило, існує можливість вибору між кількома маршрутами передавання даних, тоді як у безпроводних мережах передача зазвичай відбувається лише через один доступний канал зв'язку [83].

Сьогодні щільність покриття безпроводних локальних мереж (WLAN) надзвичайно висока у густозаселених містах. Отже, гіпотетично мобільний пристрій можна підключити до кількох точок доступу. Одночасне обслуговування декількома точками доступу – це технологія, яка дає змогу одному пристрою використовувати одночасно кілька інтерфейсів або з'єднань для передавання даних чи отримання доступу до мережі [84]. Припустимо, якщо мобільний пристрій має кілька фізичних безпроводних модулів, підключених до різних точок доступу, може існувати кілька шляхів передавання даних на мобільний пристрій через кілька точок доступу. Як показано на рис.4.1, фізичний мережевий адаптер 1 підключений до точки доступу 1, а адаптер 2 – до точки доступу 2. У цьому випадку мобільний пристрій має два безпроводних канали для багатоканального передавання. Щоб уникнути проблеми, пов'язаної з обробкою з'єднання з двома безпроводними

мережевими модулями відеоприймача, можна використовувати мережевий бондинг для інтеграції цих двох фізичних мережевих адаптерів (або більшої кількості адаптерів у загальному випадку) у комбінований пристрій, об'єднання потоку. Отже, плеєр може сприймати об'єднаний пристрій як один модуль безпроводної мережі, а відеопровайдер надсилатиме всі відео на об'єднаний пристрій.

Також у роботі запропоновано ідею використання віртуальних мережевих адаптерів, якщо мобільний пристрій має лише один фізичний мережевий адаптер. У фізичному адаптері безпроводної мережі створюється віртуальна мережева карта з парою віртуальних мережевих адаптерів. Ці адаптери можуть бути пов'язані з різними точками доступу, а для об'єднання віртуальних мережевих адаптерів у комбінований пристрій можна застосувати мережевий бондинг.

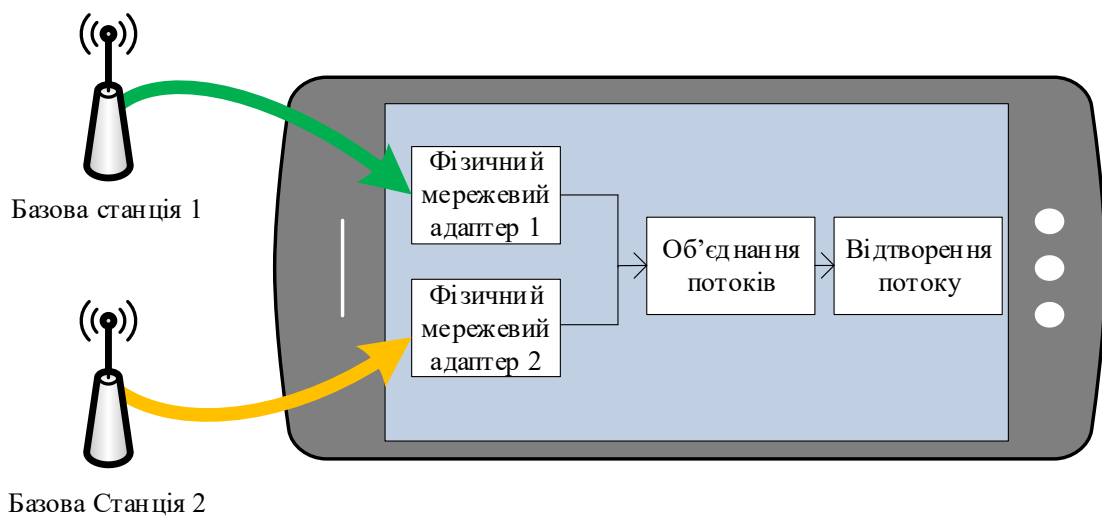


Рис.4.1. Одночасне обслуговування декількома точками доступу у SDN з використанням кількох фізичних мережевих адаптерів

Отже, розроблення нових методів та технологій, що спрямовані на покращення якості сприйняття відео в безпроводних програмно-конфігурованих мережах за допомогою одночасного обслуговування кількома точками доступу, має велике практичне значення і є актуальним завданням у сучасному

інформаційному суспільстві. У роботі запропоновано метод багатошляхового передавання відеопотоку через безпроводний Wi-Fi канал програмно-конфігурованої мережі із використанням технології мультипідключення. Для перевірки ефективності запропонованого методу передавання відеопотоку виконано експерименти із використанням Mininet.

У цій роботі як метрику якості QoE використано PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), що є широковизнаною метрикою для оцінювання якості стиснення цифрового відео та зображень [85]. Цей параметр порівнює вихідний нестиснутий сигнал зі стисненим, обчислюючи відношення максимально можливої потужності вихідного сигналу до потужності шуму, який вводиться стисненням. Іншими словами, PSNR вимірює, наскільки сильно стиснений сигнал відрізняється від оригіналу з погляду шуму або спотворень. PSNR визначають через середньоквадратичну похибку (MSE). Математичне подання PSNR таке:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{MSE}} \right), \quad (4.1)$$

MSE (середньоквадратична похибка) визначається за допомогою наступним математичним типом:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - F(i,j)]^2}{MN}, \quad (4.2)$$

де $f(i,j)$ - вихідний сигнал, $F(i,j)$ - відновлений, $M \times N$ - розмір зображення, 255 - максимальне значення яскравості. PSNR виражається в децибелах, і значення в діапазоні від 30 до 40 дБ характеризує відео середньої та високої якості відео.

Втрата пакетів є поширеною проблемою в цифрових мережах зв'язку, де пакети даних можуть бути втрачені або пошкоджені під час передачі. Це може статися з різних причин, таких як перевантаження мережі, несправність обладнання або перешкоди. Втрата пакетів може мати значний вплив на якість передачі цифрового відео та зображень, оскільки може спричинити значні

спотворення або артефакти в стисненому сигналі. В роботі проведено дослідження в якому порівняно вплив параметрів каналу зв'язку, такі як втрати пакетів, затримка та пропускна спроможність на якість сприйняття відео сервісу за критерієм PSNR. Результати дослідження наведені в наступних таблицях.

Дослідження проводилось в симуляторі Mininet, топологія мережі виглядає наступним чином та складається з двох користувачів (h1,h2) та одного комутатора (s1).



Рис.4.2. Топологія досліджуваної мережі

Таблиця 4.1

Вимірювання значень PSNR при внесенні затримки в канал зв'язку

Затримка, мс	50мс	100мс	150мс	250мс	450мс
PSNR	35,9058	35,9058	35,9058	35,9058	35,9058

Під час дослідження виявлено, що зміна затримки в каналі зв'язку не впливала на значення PSNR, проте призводила до збільшення часу доставки відеопотоку. Відсутність змін показника PSNR зумовлена тим, що ця метрика не враховує часові затримки, а оцінює лише рівень спотворення зображення. Крім того, сучасні відеоплеєри здійснюють буферизацію кадрів та забезпечують їх відтворення у правильній послідовності, що зменшує негативний ефект затримок.

У дослідженні впливу пропускної спроможності каналу зв'язку попередньо було визначено необхідну пропускну спроможність для передавання відеопотоку за допомогою інструменту WireShark. Для

використаного відеопотоку максимальна виміряна пропускна спроможність становить 850 кбіт/с. Під час експерименту параметр пропускної спроможності змінювався за наступними фіксованими значеннями: 850 кбіт/с, 400 кбіт/с, 300 кбіт/с та 200 кбіт/с.

Таблиця 4.2

Вимірювання значень PSNR в залежності від доступної пропускної
спроможності

Пропускна спроможність	0,850 кбіт/с	0,4 кбіт/с	0,3 кбіт/с	0,2 кбіт/с
Rx/Tx	905/905	905/664	905/556	905/377
Втрати пакетів, %	0%	26,62%	38,56%	58,34%
PSNR, дБ	35,9058	33,3108	26,8220	19,7618

В таблиці 4.2 також наведено співвідношення загальної кількості відправлених пакетів медіасервером до кількості прийнятих клієнтом. На основі цього співвідношення легко можна оцінити вплив недостачі пропускної спроможності на відеопотік. У випадку встановлення пропускної спроможності на рівні 0,4 кбіт/с, що становить 47% від максимально необхідної, втрати пакетів досягають 26,62%. Загальний рівень PSNR при цьому складає 33,31 дБ.

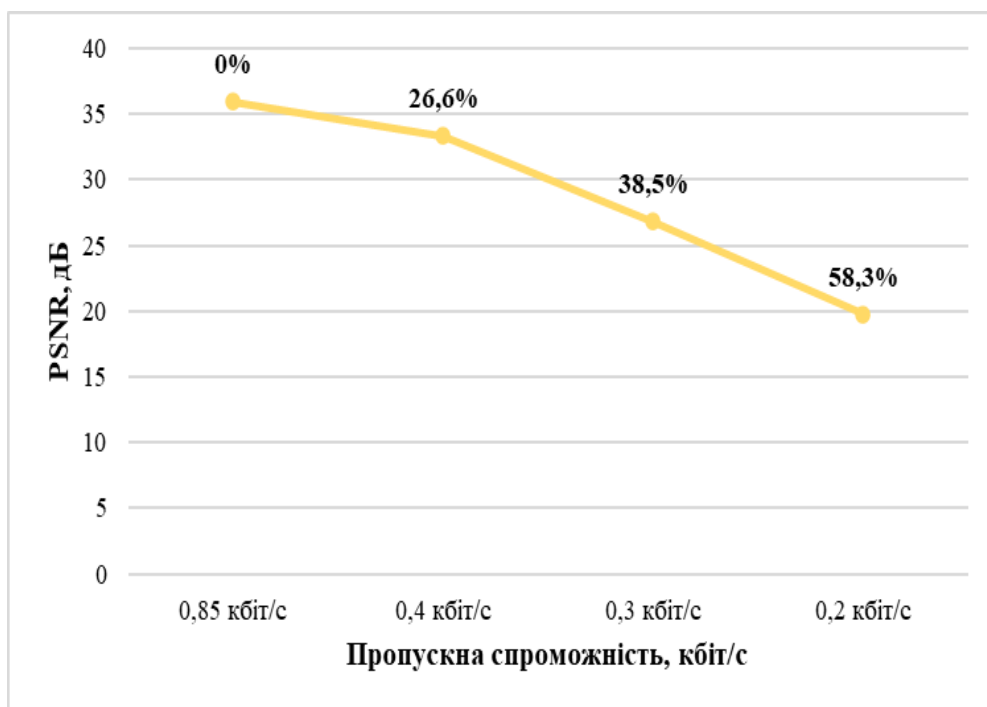


Рис.4.3. Графік залежності рівня PSNR від пропускної спроможності

Додатково проведено дослідження з визначенням затримки з кінця в кінець, при відповідних значеннях пропускної спроможності каналів зв'язку. Результати наведені на рисунку 4.4. З графіків можна зробити висновок, що при зменшенні пропускної спроможності пакети буферизуються, відповідно збільшується затримка пакетів.

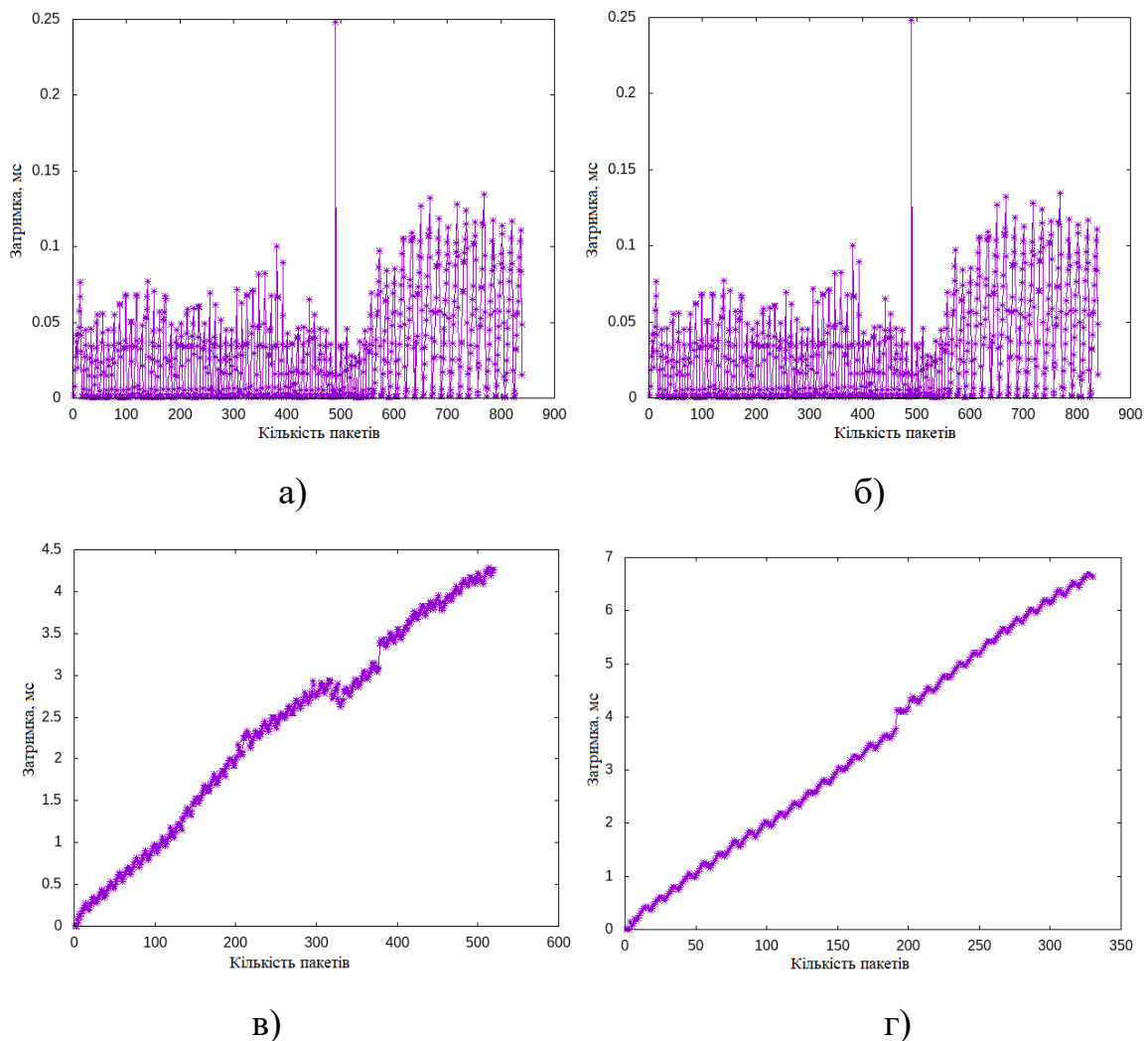


Рис.4.4. Затримка з кінця в кінець при заданій пропускній спроможності: а) 0,850 кбіт/с; б) 0,4 кбіт/с; в) 0,3 кбіт/с; г) 0,2 кбіт/с

Також проведено дослідження із оцінюванням впливу втрат пакетів на оцінку PSNR без змін у пропускній спроможності каналів.

Зв'язок між показником PSNR і втратою пакетів полягає в тому, що зі збільшенням втрат зменшується значення PSNR. Втрата пакетів призводить до

виникнення помилок у стисненому відеосигналі, що знижує його подібність до оригінального зображення і, відповідно, свідчить про погіршення якості відео. Результати дослідження наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Вимірювання значень PSNR в залежності від втрат пакетів

Задані втрати пакетів	0%	2%	5%	15%
Rx/Tx	905/905	912/899	905/872	905/793
Втрати пакетів, %	0%	1,42%	3,64%	12,37%
PSNR, дБ	35,9058	32,2635	26,6342	20,0374

Аналогічно з дослідженням пропускної спроможності, в таблиці 4.3 наведено співвідношення загальної кількості відправлених пакетів медіасервером до кількості прийнятих клієнтом. Згідно цього відношення обчислено втрати пакетів та отримане значення PSNR.

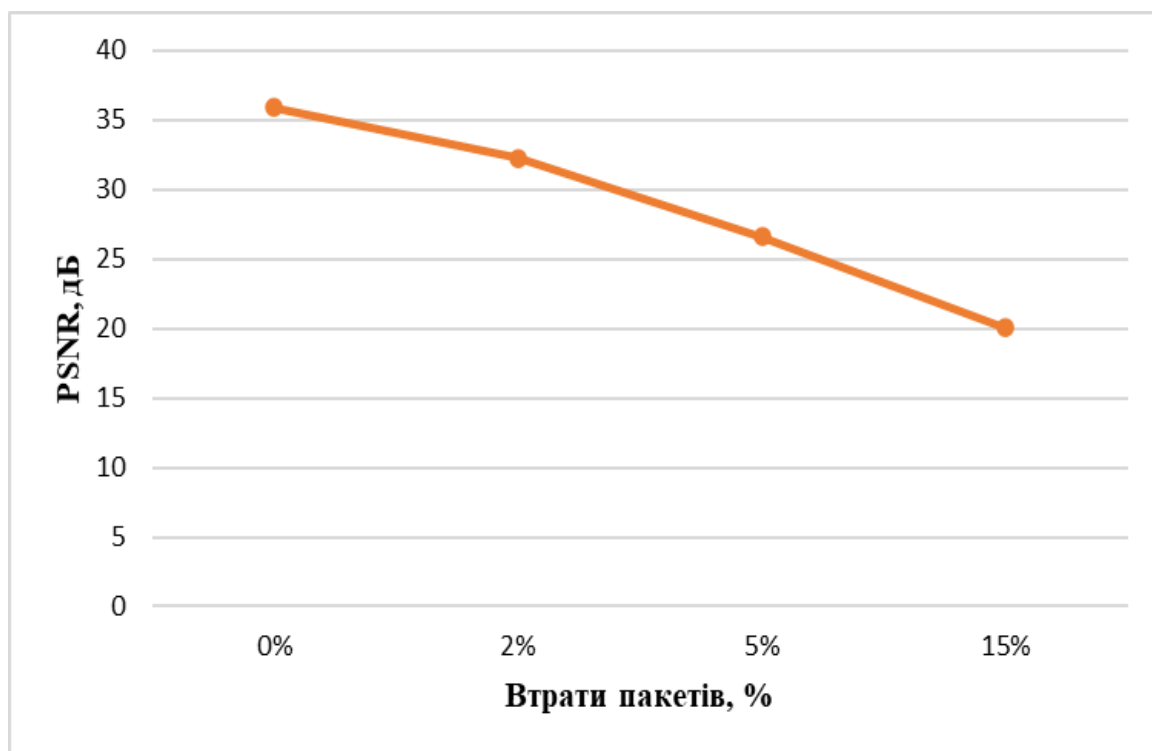


Рис.4.5. Графік залежності рівня PSNR від втрат пакетів

Наприклад, за даними таблиці №2, для відеопотоку, стисненого за допомогою певного кодека, початкове значення PSNR становить 35 дБ, що вказує на високу якість відеосигналу. Із підвищенням рівня втрат пакетів

спостерігається поступове зниження значення PSNR. Зокрема, при втраті 5% пакетів цей показник може знизитися до 25 дБ або нижче, що свідчить про суттєве погіршення якості стисненого відео.

Додатково проведено дослідження з вимірюванням затримки з кінця в кінець при зазначених втратах каналів зв'язку. Результати наведено на рисунку 4.6. З них можна зробити висновок, що внесення штучних втрат не призводить до збільшення затримки в каналах зв'язку.

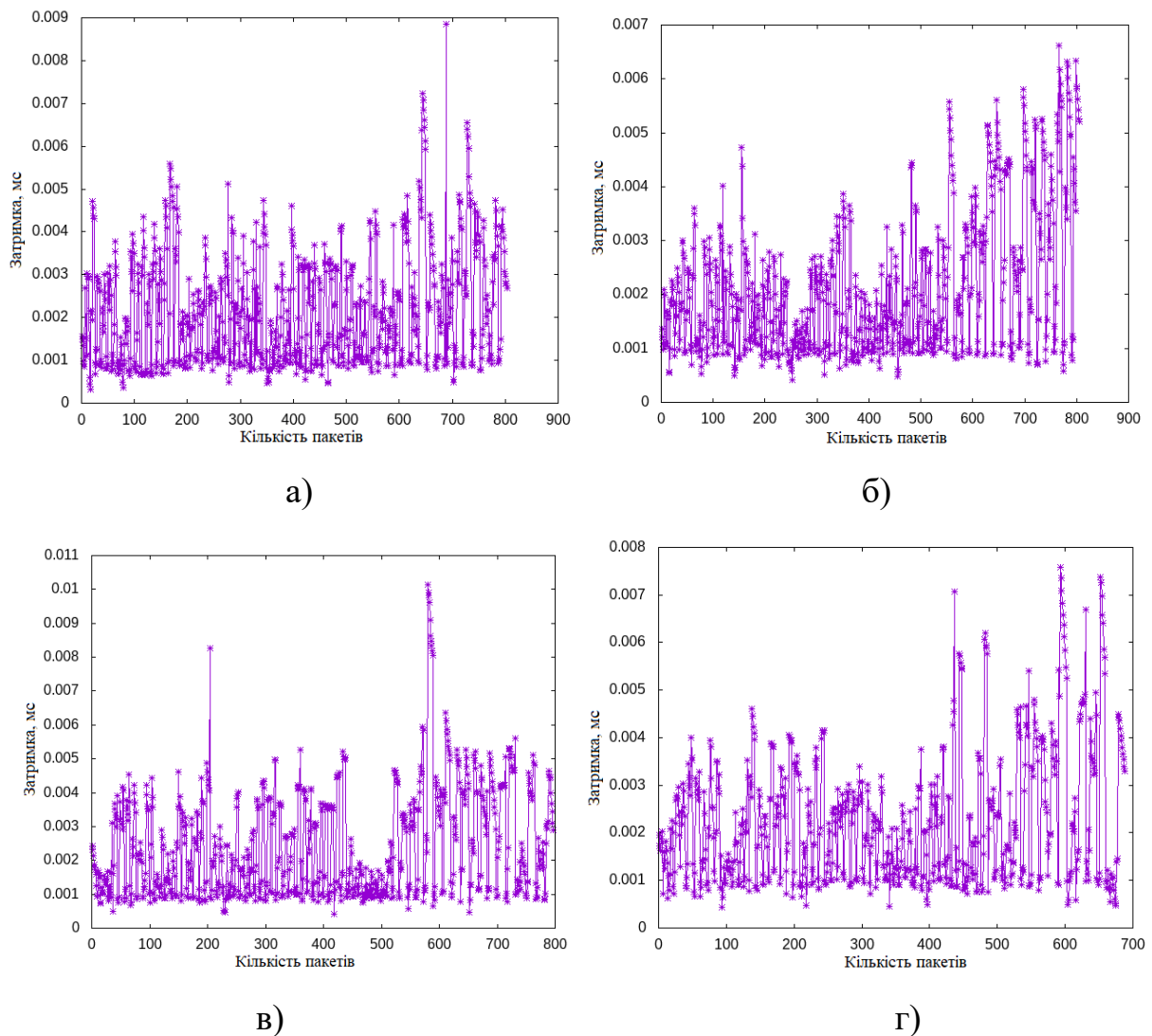


Рис.4.6. Затримка з кінця в кінець при заданих втратах пакетів: а) 0%; б) 2%; в) 5%; г) 15%

Таблиця 4.4

Відношення рівня PSNR та шкали оцінювання якості сприйняття

PSNR	Оцінка
>37	5 Відмінно
31-35	4 Добре
25-31	3 Нормально
20-25	2 Низько
<20	1 Погано

Згідно проведених досліджень сформовано таблицю 4.4, де показано відношення рівня PSNR та шкали від 1 до 5.



Рис.4.7. Порівняння кадру без втрат (а) та отриманого кадру (б) за втрат пакетів 2 %

Отже, PSNR є важливою метрикою для вимірювання якості цифрового відео та стиснення зображень, і втрати пакетів можуть суттєво вплинути на його значення. Тому в наступних дослідженнях, будуть вноситись штучні втрати та обмеження пропускної спроможності у каналах зв'язку.

Запропонований у роботі метод багатошляхової передачі відеопотоку в провідних та безпроводних програмно-конфігурованих мережах передбачає одночасне обслуговування мобільного пристрою кількома точками доступу з метою паралельного передавання даних через декілька маршрутів. Зазначений підхід рекомендується використовувати у поєднанні з системою адаптивного

хендоверу [86], що забезпечує динамічне перемикання між точками доступу з урахуванням показників якості з'єднання.

Архітектура такої мережі показана на рисунку 4.8. Як і класична архітектура програмно-конфігурованих мереж, запропонована архітектура складається з трьох рівнів: рівень додатків, рівень управління та рівень даних.

Загальний алгоритм роботи наступний:

1. При з'єднанні мобільного пристрою абонента, передається службова інформація, де вказано точку доступу з якою з'єднано пристрій, рівень сигналу, доступність функції одночасного обслуговування декількома точками доступу та доступні точки доступу для абонента.

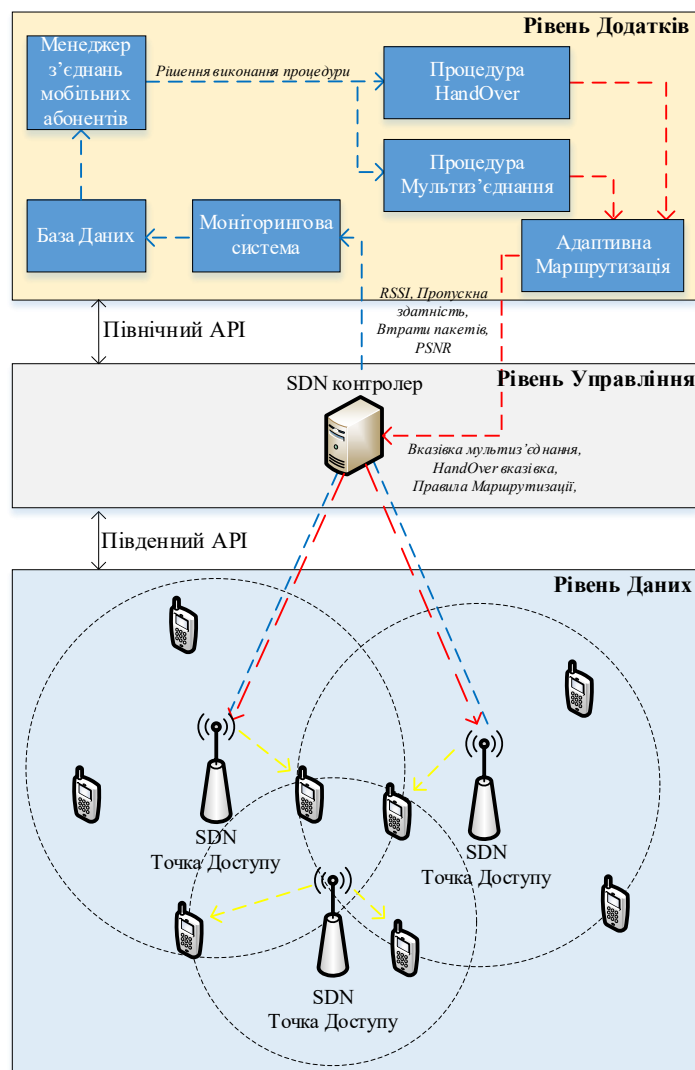


Рис.4.8. Запропонована архітектура безпроводних програмно-конфігурованих мереж

2. SDN контролер періодично вимірює параметри мережі, серед яких: RSSI, втрати пакетів, залишкова пропускна спроможність та PSNR при передаванні відеопотоку. Ці дані обробляються моніторинговою системою та зберігаються у базі даних для можливого подальшого використання.

3. У випадку погіршення рівня PSNR, Менеджер з'єднань мобільних пристроїв приймає рішення про проведення процедури HandOver або ж мультиз'єднання, беручи до уваги отримані дані від абонента.

4. В залежності від обраної процедури, застосовуються відповідні правила адаптивної маршрутизації. Ці правила SDN контролер встановлює на відповідних мережевих пристроях. А у випадку з мультиз'єднанням, надсилає правила для підключення мобільного пристрою до додаткових точок доступу.

У межах дослідження виконано серію експериментів у середовищі Mininet-WiFi з використанням SDN-контролера ONOS для моделювання програмно-конфігурованої мережі. Топологія експериментального середовища, наведена на рисунку 4.9, складається з медіа-сервера, комутатора, трьох точок доступу та одного мобільного клієнтського пристрою, що забезпечує умови для аналізу багатопляхової передачі відеопотоку в динамічному мережевому середовищі..

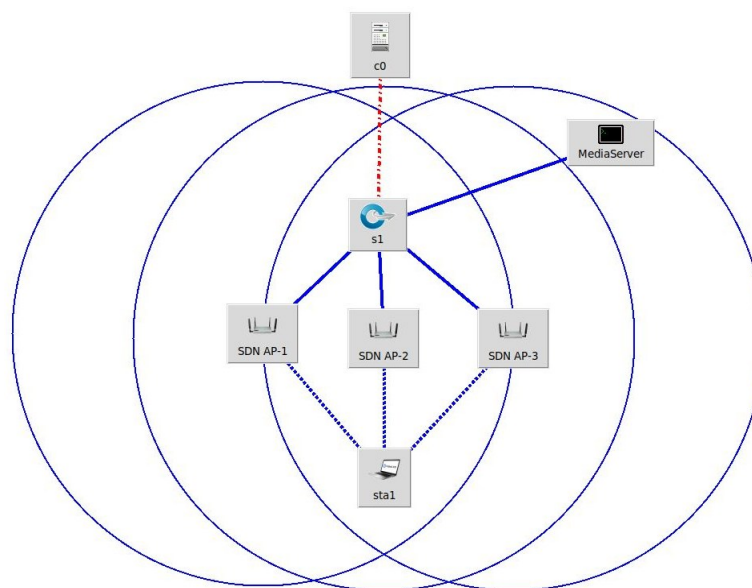


Рис.4.9. Топологія досліджуваної безпроводної програмно-конфігурованої мережі

Сценарії №1 використання одночасного обслуговування декількома точками доступу мобільного пристрою.

В цьому випадку, приведено ситуацію, де мобільний пристрій підключений до AP1. Канал зв'язку між точкою доступу та мобільним пристроєм завантажений та не може забезпечити необхідну пропускну здатність для відеопотоку. В цьому випадку контролер визначає альтернативні точки доступу для проведення хендоверу та проводить вимірювання параметрів каналів зв'язку потенційних маршрутів. Згідно алгоритму контролер обирає застосування одночасного обслуговування декількома точками доступу мобільного пристрою з AP1 та AP2. В такому випадку з необхідних 84Мбіт/с, AP1 дозволяє передати 50Мбіт/с, а AP2 – 34Мбіт/с. Отриманий рівень сигналу PSNR становить 35,9 дБ. Такий спосіб дозволив ефективно використати ресурси каналів зв'язку та забезпечити хороший рівень сприйняття.

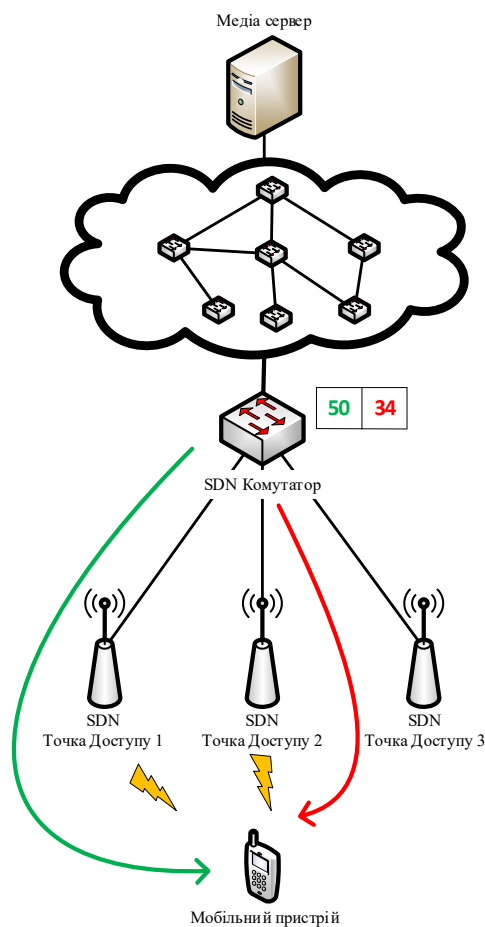


Рис.4.10. Схема мережі досліджуваного сценарію №1

Сценарій №2. Використання одночасного обслуговування мобільного пристрою декількома точками доступу в умовах обмеженої пропускної здатності.

Проте не завжди є можливість розподілити відеопотік між точками доступу без втрат. В цьому випадку проведено експеримент. В якому контролер не може провести хендовер, а також забезпечити можливість передавання відеопотоку через одночасне обслуговування декількома точками доступу без втрат якості сприйняття. В такому випадку пропонується використовувати одночасного обслуговування декількома точками доступу та розподіляти відеопотік між точками доступу відповідно до залишкової пропускної здатності.

В дослідженні задано обмеження пропускної здатності каналу зв'язку між точками доступу та мобільним пристроєм на рівні – 34Мбіт/с, з необхідних 84Мбіт/с. Одночасне обслуговування декількома точками доступу мобільного пристрою з точками доступу AP1, AP2, дозволить збільшити загальну пропускну здатність для відеопотоку до 68Мбіт/с, що в результаті забезпечить оцінку якості сприйняття на рівні 4 балів, ніж використання одиночного передавання по завантаженому каналу зв'язку.

Сценарій №3 використання одночасного обслуговування 3-ма доступними точками доступу.

Доповненням цього випадку є ситуація коли для мобільного пристрою доступна AP3. В такому випадку можна розподілити частину відеопотоку між трьома точками доступу, як показано на рисунку 4.11, до прикладу наступним чином – AP1=34Мбіт/с; AP2=34Мбіт/с; AP3=16Мбіт/с.

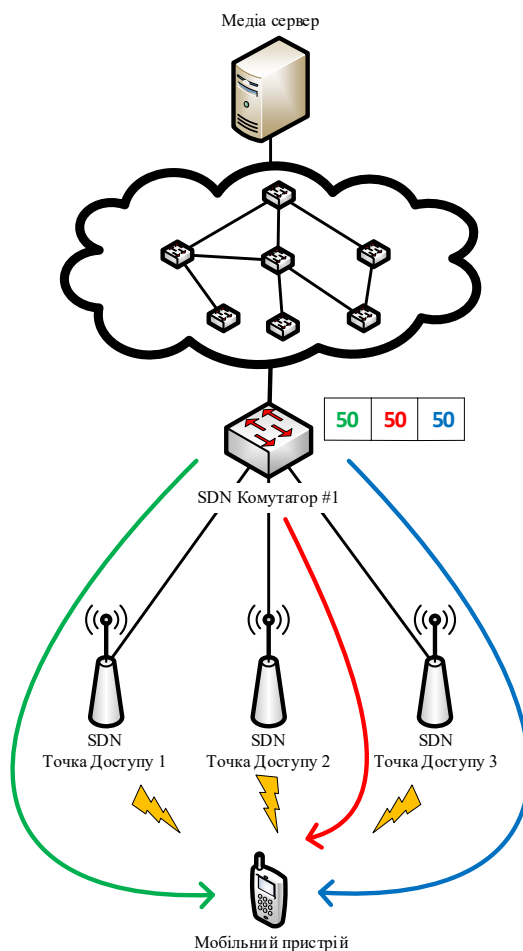


Рис.4.11. Зображення шляхів передачі та їх пропускна спроможність за сценарію №3

Сценарій №4 використання одночасного обслуговування декількома точками доступу мобільного пристрою з врахуванням втрат пакетів.

Згідно наведених попередньо результатів, необхідно також брати до уваги втрати пакетів, що виникають у безпроводних мережах, що можуть бути спричинені різними фізичними чинниками. В даному випадку наведено ситуацію, де мобільному пристрою доступні 3 точки доступу (AP1, AP2, AP3). Канали зв'язку мають наступні параметри: AP1 – 50 Мбіт/с; AP2 – 34 Мбіт/с, Втрати пакетів=2%; AP3 – 34 Мбіт/с, Втрати пакетів=5%. Тепер контролер із врахуванням додаткового параметру втрат пакетів розподіляє відеопотік через AP1 та AP2, для забезпечення найкращого рівня якості сприйняття. Отримані значення PSNR зведено у рисунку 4.12.

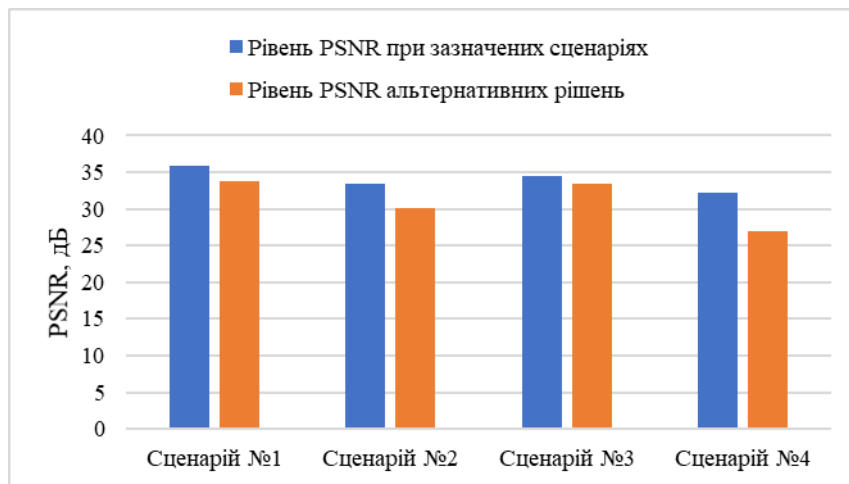


Рис.4.12. Графічне представлення отриманих рівнів PSNR при вказаних сценаріях та їх порівняння з альтернативними рішеннями

На рисунку 4.12 зображено отримані результати проведених сценаріїв досліджень. Також приведено результати альтернативних рішень у відповідних сценаріях.

Сценарій №1 аналізується у порівнянні зі стандартним рішенням передачі відеопотоку через єдину точку доступу AP1, яка забезпечує пропускну здатність на рівні 50 Мбіт/с. За таких умов отримано показник якості відео $PSNR = 33,8$ дБ.

Сценарій №2 порівнюється з альтернативним варіантом, у якому відеопотік передається через одну точку доступу з пропускну здатністю 34 Мбіт/с, що забезпечує $PSNR = 30,6$ дБ.

Сценарій №3 співставляється з рішенням, де відеопотік передається через дві точки доступу з обмеженою загальною пропускну здатністю, без можливості підключення до третьої точки доступу. У цьому випадку отриманий рівень PSNR є нижчим, ніж у запропонованому методі, що використовує одночасне підключення до трьох точок доступу, завдяки чому досягається вища якість відеопередачі.

Сценарій №4 порівнюється з альтернативним рішенням, у якому контролер приймає рішення щодо одночасного підключення до кількох точок доступу,

орієнтуючись лише на рівень сигналу та доступну пропускну здатність, без урахування втрат пакетів у каналах зв'язку.

Такий метод дозволяє ефективно передавати відеопотік в програмно-конфігурованих мережах та забезпечувати необхідний рівень якості сприйняття. В якості QoE метрики, метод використовує PSNR, згідно отриманих даних, можна зробити висновок про доцільність використання такої метрики. Адже на рівень сигналу PSNR впливає як низька пропускну спроможність так і втрати пакетів у мережі.

Запропонований метод здатний динамічно реагувати на погіршення параметрів каналу зв'язку та, за необхідності, ініціювати одночасне використання кількох точок доступу для передачі відеопотоку. Такий підхід забезпечує ефективне використання наявних мережевих ресурсів, що дозволяє суттєво підвищити рівень QoE без залучення додаткових інфраструктурних або обчислювальних ресурсів [88].

4.2 Розроблення та дослідження методу доставки відеоконтенту в програмно-конфігурованих мереж

Експоненціальне зростання відеотрафіку, зумовлене збільшенням попиту на контент високої чіткості, додатки доповненої і віртуальної реальності (AR/VR) та нові технології, такі як Інтернет речей (IoT), розширюють межі мережевої інфраструктури [89]. З переходом до ери 6G досягнення високої швидкості, низької затримки і наднадійної доставки відеоконтенту стає критично важливим завданням [90]. Традиційні мережеві архітектури та протоколи часто не можуть задовольнити ці високі вимоги через обмежену пропускну здатність, підвищену перевантаженість і затримки, особливо в складних середовищах з мінливими умовами роботи мережі [91-95].

SDN стала багатообіцяючою парадигмою, яка пропонує розширену мережеву програмованість, гнучкість і централізоване керування, що робить її

ключовим фактором для наступного покоління систем доставки відеоконтенту [96]. Завдяки роз'єднанню площини керування та даних SDN дозволяє динамічно керувати трафіком і розподіляти ресурси, що є важливим для ефективного розподілу високоякісних відеопотоків у гетерогенних та високодинамічних мережах 6G [97-99].

У цьому розділі пропонується метод доставки відеоконтенту в мережах 6G на основі SDN, яка використовує багатошляхову маршрутизацію, багатосерверну архітектуру і одночасне обслуговування декількома точками доступу для підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг. Багатошляхова маршрутизація дозволяє розподіляти відеопотоки по декількох мережевих каналах, підвищуючи пропускну здатність і забезпечуючи резервування для безперебійної роботи сервісу. Мультисерверна архітектура забезпечує розподілене зберігання та багатопотокове завантаження контенту, зменшуючи затримки та збалансовуючи навантаження на мережу, а одночасне обслуговування декількома точками доступу дозволяє пристроям одночасно використовувати різні технології доступу, такі як Wi-Fi, 5G та супутниковий зв'язок, для підвищення надійності та зменшення часу простою. Запропонований підхід вирішує ключові проблеми обмеження пропускну здатності, перевантаження мережі та необхідності доставки даних з низькою затримкою в середовищах 6G.

У контексті доставки відеоконтенту, забезпечення високого QoE має важливе значення для задоволення очікувань користувачів. QoE - це загальне задоволення, яке користувач отримує від послуги, на яке, зокрема, впливають такі фактори, як якість відео, час буферизації та затримки [100]. Оскільки очікується, що мережі 6G будуть передавати контент надвисокої чіткості (UHD), 8K і контент з ефектом присутності, наприклад, AR/VR, точне вимірювання та оптимізація QoE набуває вирішального значення. Однією з ключових метрик, що використовуються для оцінки якості відео, яка безпосередньо впливає на QoE, є пікове співвідношення сигнал/шум (PSNR).

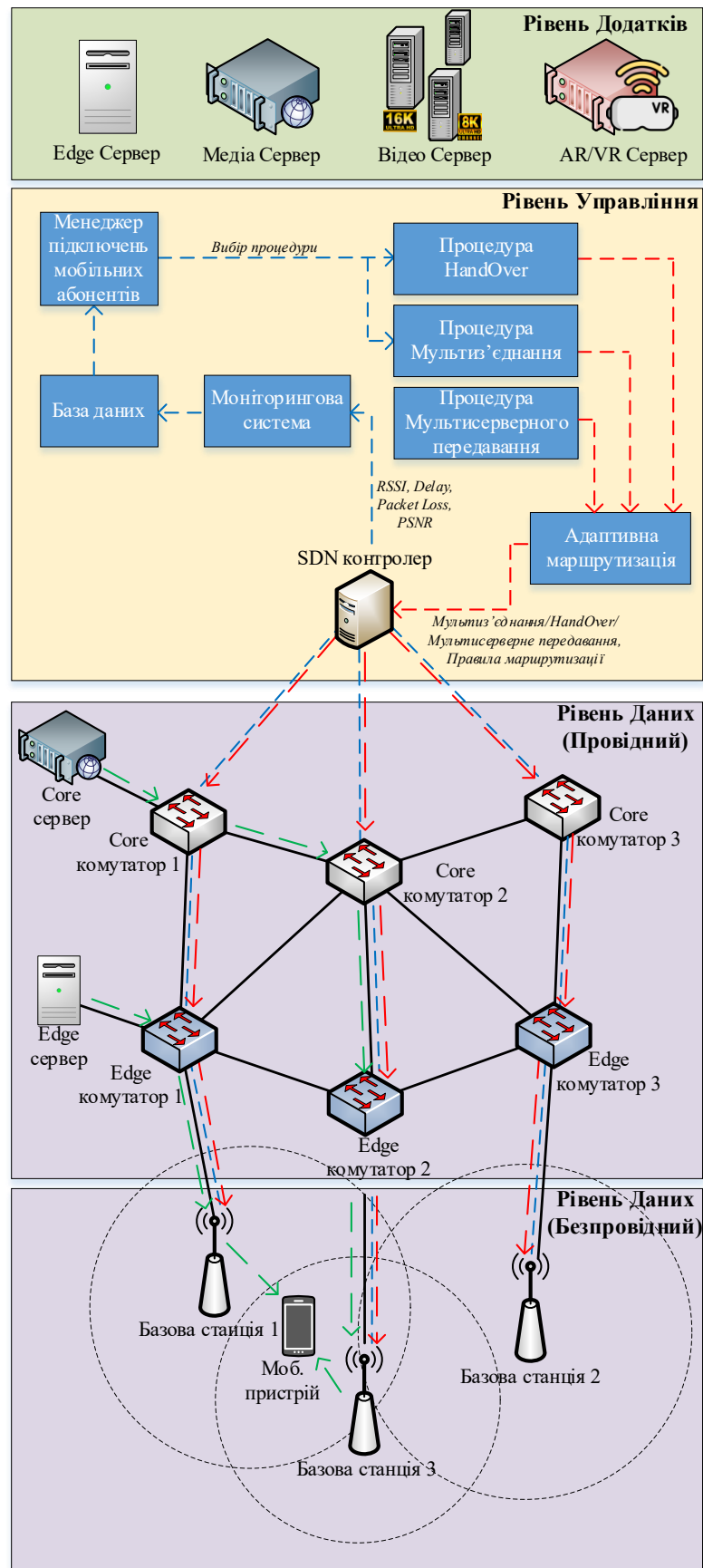


Рис.4.13. Концепція доставки відеоконтенту на основі SDN [101]

Основні етапи застосування методу в програмно-конфігурованій мережі 6G.

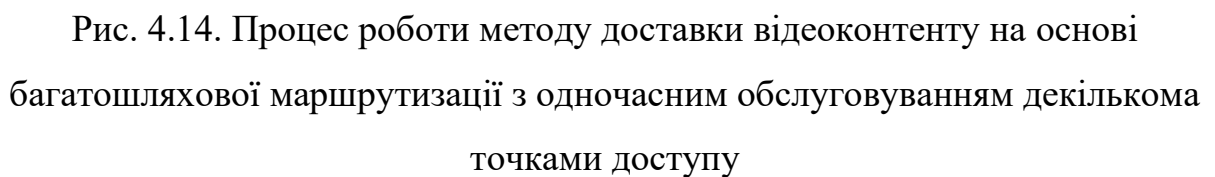
1. Після встановлення з'єднання між мобільним пристроєм абонента і базовою станцією передається ряд службових даних. Сюди входить інформація про конкретну базову станцію, з якою з'єднано пристрій, потужність сигналу, наявність функції одночасного обслуговування декількома точками доступу та діапазон базових станцій, доступних для абонента.

2. Контролер SDN виконує періодичні вимірювання параметрів мережі. До них відносяться індикатор рівня сигналу (RSSI), наявність втрат пакетів, залишкова пропускна спроможність і пікове співвідношення сигнал/шум (PSNR) під час передачі відеопотоку. Ці дані обробляються системою моніторингу та зберігаються в базі даних для подальшого використання [102-104].

3. Погіршення рівня PSNR під час передачі відеопотоку відстежується контролером, який потім визначає конкретну ділянку маршруту, де відбувається погіршення. Якщо канал зв'язку між сервером і мережею завантажений, контролер ініціює використання багатосерверної передачі відеопотоку. Крім того, менеджер мобільних з'єднань визначає, чи потрібно виконувати процедуру хендовера або використовувати одночасне обслуговування декількома точками доступу, беручи до уваги дані, отримані від абонента.

4. Вибір відповідних правил адаптивної маршрутизації залежить від обраної процедури. Потім контролер SDN встановлює ці правила на відповідних мережевих пристроях. У випадку багатосерверної процедури, надсилання пакетів синхронізується та буферизується, наприклад, за допомогою протоколу RTCP або MPTCP [105]. Кожен відеосегмент завантажувється окремим потоком, причому потоки отримують свої частини з різних серверів паралельно. Після завершення завантаження всі сегменти

Більш детально взаємодія описана на схемі взаємодії елементів системи на рис.4.14.



У контексті оптимізації доставки мультимедійного трафіку в SDN, особливе значення має реалізація ефективного механізму багатошляхового розподілу відеопотоку з декількох серверів [106]. Для цього розглянуто математичну модель, яка дозволяє адаптивно розподіляти потік даних відповідно до доступної пропускної спроможності маршрутів та забезпечувати синхронізовану доставку пакетів до клієнта.

Нехай C - загальна необхідна пропускна здатність для передавання відеопотоку, B_{core} - вільна пропускна здатність маршруту до центрального медіасерверу, а B_{edge} - відповідно до периферійного серверу. Тоді частки трафіку, які мають передаватися кожним сервером, визначаються як:

$$P_{core} = \frac{B_{core}}{B_{core} + B_{edge}} \quad (4.3)$$

$$P_{edge} = \frac{B_{edge}}{B_{core} + B_{edge}} \quad (4.4)$$

$$P_{edge} = \frac{B_{edge}}{B_{core} + B_{edge}} \quad (4.5)$$

$$P_{core} + P_{edge} = 1 \quad (4.6)$$

Ці співвідношення забезпечують динамічний баланс навантаження між серверами залежно від поточного стану мережі, що узгоджується з принципами адаптивної маршрутизації в SDN.

Для забезпечення стабільності та безперервності відеопотоку, а також для компенсації можливих втрат пакетів та затримок, використовується механізм надлишкової передачі даних. Коефіцієнт надлишковості α визначає відсоток додаткових пакетів, що передаються (наприклад, $\alpha = 0,1$ для 10% надлишковості). Фактичний обсяг даних, що передається від кожного сервера з урахуванням надлишковості, розраховується як:

$$D' = D \cdot (1 + \alpha) \quad (4.7)$$

де D - обсяг трафіку, що відповідає частці сервера, а D' - фактичний обсяг з урахуванням надлишкових пакетів. Наприклад, при $\alpha = 0,1$ реалізується 10% надлишкової передачі для підвищення ймовірності своєчасної доставки всіх необхідних пакетів.

Однією з ключових вимог для отримання якісного відеопотоку є синхронізація пакетів, що надходять з різних джерел. З цією метою встановлюється обмеження на часовий розрив між відповідними пакетами:

$$|T_{core} - T_{edge}| \leq \Delta t \quad (4.8)$$

де T_{core} та T_{edge} - часові мітки надходження пакетів від центрального та периферійного серверів, відповідно, а Δt - максимально допустима затримка, наприклад 50 мс. Це гарантує узгоджену обробку потоків на клієнтському боці та мінімізує ризики деградації QoE.

Під час дослідження було проведено серію експериментів у середовищі Mininet з використанням контролера ONOS для програмно-конфігурованої мережі. Слід зазначити, що Mininet-Wi-Fi не є симулятором мобільного зв'язку, але дозволяє провести практичну оцінку запропонованого рішення, про що свідчать роботи [107-109]. Враховуючи той факт, що 6G використовує в своїй архітектурі рішення SDN, для оцінки QoE було використано PSNR. Результати Топологія, використана у моделюванні, представлена на рисунку 4.15. Вона включає два медіа-сервери, SDN-контролер, сім програмно-конфігурованих комутаторів (три комутатори ядра та чотири комутатори доступу), три точки безпроводного доступу (базові станції) та один мобільний вузол, що імітує кінцевого користувача. Така топологія дозволяє реалізувати сценарії з балансуванням навантаження, перемиканням між точками доступу (хендовером), а також моделюванням багатошляхової передачі відеопотоку в умовах змінної якості каналу.

Запропонована конфігурація дає змогу адекватно протестувати функціонування розробленого методу в умовах, наближених до реальних, і

оцінити його здатність забезпечувати високу якість обслуговування при варіативних параметрах мережевого середовища.

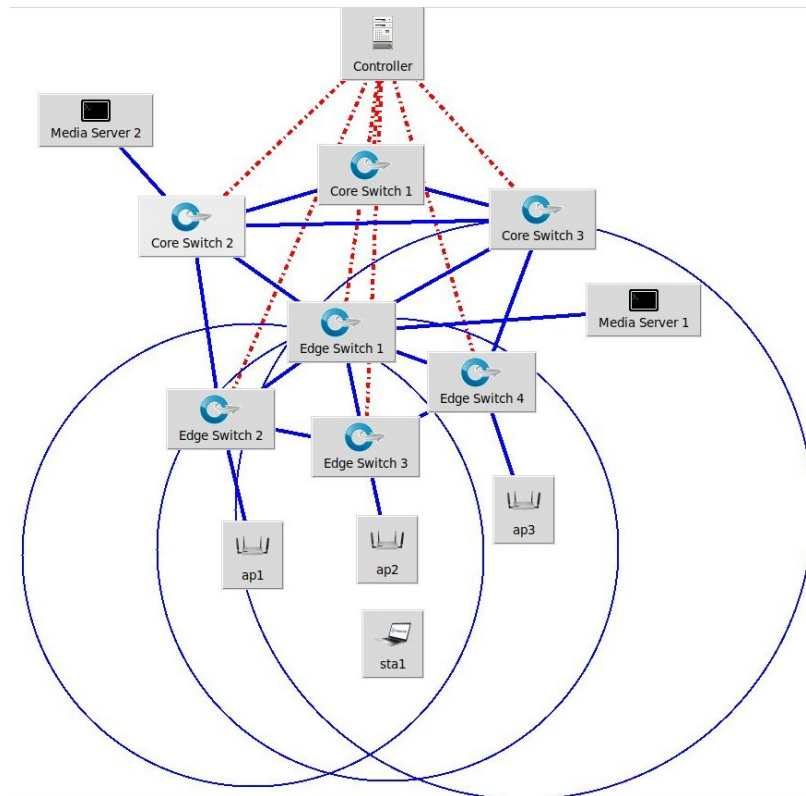


Рис. 4.15. Експериментальна топологія програмно-конфігурованої безпроводної мережі для оцінки ефективності функціонування методів доставки відеосервісів

Сценарій №1: Використання мультисерверного підходу та одночасного обслуговування декількома точками доступу для мобільного пристрою.

Цей сценарій демонструє ситуацію, коли канал зв'язку між комутатором і медіасервером перевантажений і не може повністю підтримувати передавання відеопотоку. У таких випадках контролер виявить зниження рівня PSNR та ініціює алгоритм реагування, описаний попередньо. Згідно з алгоритмом, після визначення необхідної смуги пропускання, контролер визначає альтернативні базові станції для одночасного обслуговування декількома точками доступу і вимірює параметри каналів зв'язку потенційних маршрутів. Встановлюється одночасне обслуговування між мобільним пристроєм і двома базовими

станціями, БС1 і БС2 [110]. Починається передавання відеопотоку з медіасервера №2 відповідно до розподілу каналів зв'язку. В даному випадку маршрут від медіасервера №1 до БС2 забезпечує пропускну здатність 68 Мбіт/с, а маршрут від медіасервера №2 до БС1 - 32 Мбіт/с (рис. 4.16). В результаті рівень PSNR становить 36,2 дБ. Даний метод ефективно використовує ресурси каналу зв'язку та забезпечує необхідну оцінку QoE під час перевантаження каналу від медіасервера.

Сценарій №2: використання мультисерверного підходу та одночасного обслуговування декількома точками доступу для мобільних пристроїв з недостатньою пропускну здатністю.

У реальних мережах передавання великих потоків даних все одно може відбуватися з певним рівнем втрат. Тому в цьому сценарії запропонований алгоритм після невдалого пошуку маршруту з необхідними параметрами обирає маршрут з незначним зниженням рівня PSNR. Таким чином, при виникненні перевантаження в каналі зв'язку між медіасервером №1 та мережевим комутатором, контролер встановить одночасне обслуговування мобільного пристрою з двома базовими станціями. Обраний маршрут між медіасервером №2 та БС1 забезпечує пропускну здатність 20 Мбіт/с, а загальна пропускна здатність з використанням одночасного обслуговування декількома точками доступу становить 68 Мбіт/с. Такий підхід дозволяє досягти показника MOS на рівні 4, що краще, ніж використання одного перевантаженого маршруту.

Сценарій №3: використання мультисерверного підходу та одночасного обслуговування трьома доступними базовими станціями.

Загалом, запропонована система може працювати не тільки з двома базовими станціями, але й з трьома, чотирма і так далі. Обмеження на кількість одночасних підключень в реальних фізичних мережах буде залежати як від мобільного пристрою, так і від мережевого обладнання. Тому для спрощення в

цьому сценарії ми обмежилися використанням трьох точок доступу для мобільного пристрою.

Таким чином, при наявності трьох базових станцій відеопотоки можна розподіляти між ними для більш гнучкого використання ресурсів: $BC1 = 32$ Мбіт/с, $BC2 = 40$ Мбіт/с і $BC3 = 28$ Мбіт/с (рис. 4.16 (б)).

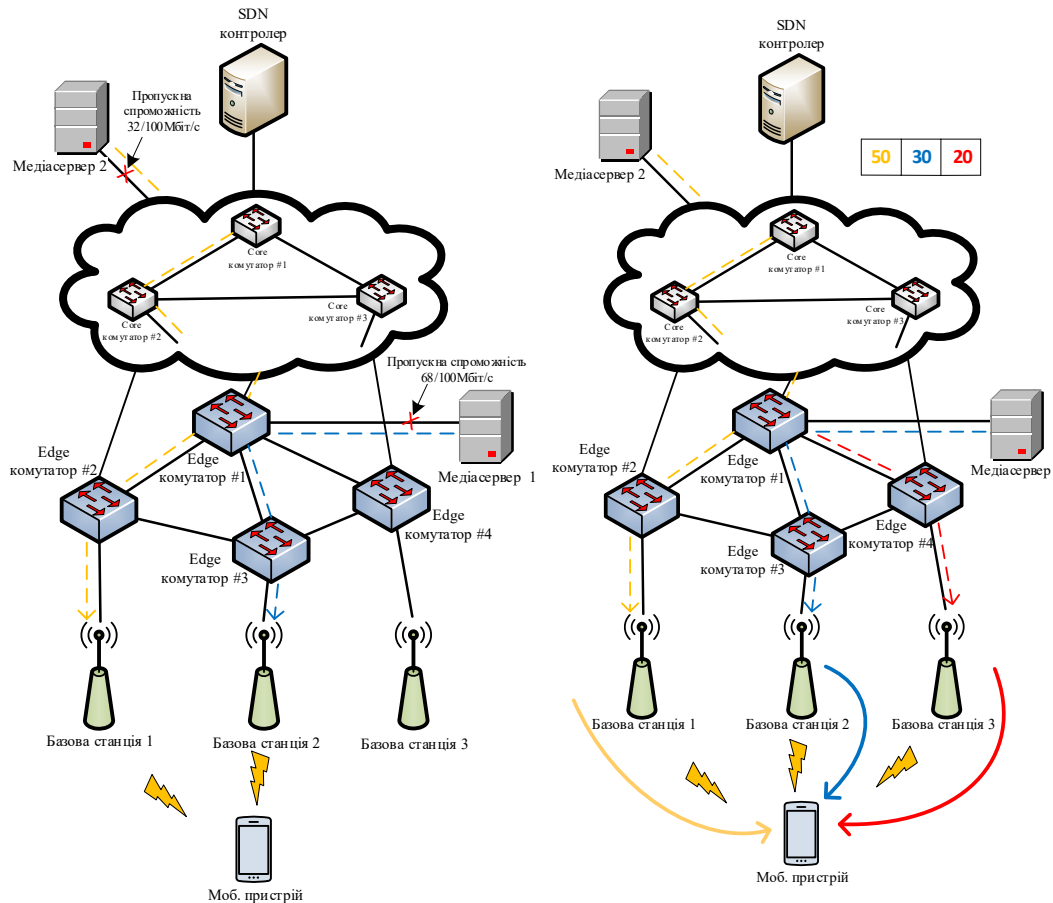


Рис. 4.16. Графічне зображення для сценаріїв 1(а) та 3(б).

Сценарій №4: використання мультисерверного підходу та одночасного обслуговування декількома точками доступу для мобільних пристроїв з урахуванням втрати пакетів.

Згідно з результатами, існують різні фактори, які впливають на канал зв'язку. Ці фактори можуть спричинити втрату пакетів як в провідній, так і в безпроводній частині мережі. У цьому контексті розглянемо сценарій, коли за попередніх умов канал зв'язку між мережею та медіасервером 1 не забезпечує

необхідної пропускної здатності. Параметри, виміряні контролером для відповідних шляхів, такі: BC1 - 60 Мбіт/с; BC2 - 40 Мбіт/с, з втратою пакетів 2%; BC3 - 50 Мбіт/с, з втратою пакетів 5%. Згідно з алгоритмом, контролер вибирає два маршрути для передачі відеопотоку через BC1 і BC2.

Сценарій №5: використання мультисерверного підходу та одночасного обслуговування декількома точками доступу для мобільних пристроїв з динамічною маршрутизацією.

З огляду на те, що в реальних мережах параметри каналів зв'язку можуть динамічно змінюватися, виникає необхідність швидкого реагування на ці зміни і динамічної маршрутизації шляхів. У цьому сценарії ми розглянемо випадок з динамічною зміною маршруту. Параметри каналів зв'язку такі ж, як і в попередньому сценарії. Виявивши зниження PSNR, контролер спочатку розподіляє відеопотік через BC1 і BC2, але значення PSNR продовжує погіршуватися. Після повторного вимірювання параметрів контролер змінює маршрут на медіасервер 2 - BC1, як показано на рис. 4.17.

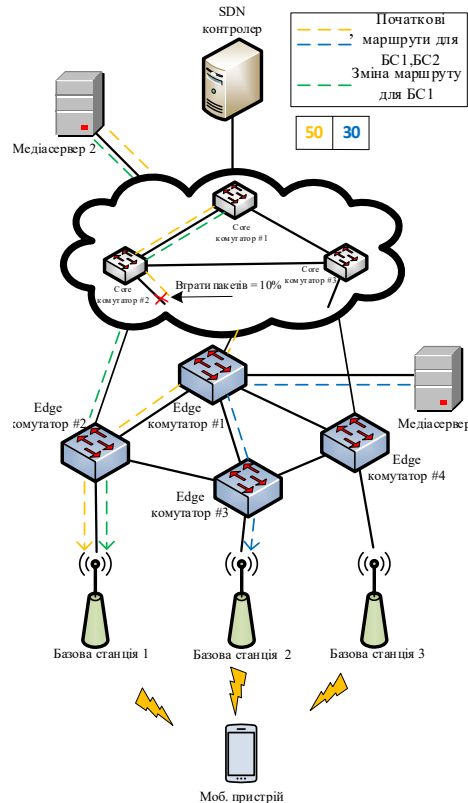


Рис. 4.17. Графічне зображення для сценарію 5

Рисунок 4.18 демонструє динаміку показників PSNR для п'яти експериментальних сценаріїв, що дає змогу здійснити порівняльний аналіз впливу стратегій маршрутизації та характеристик каналів зв'язку на якість сприйняття відеопотоку.

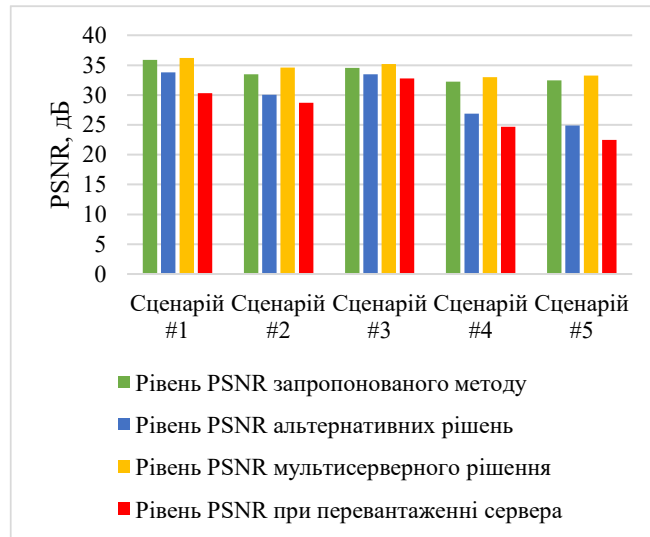


Рис. 4.18. Значення PSNR у досліджуваних сценаріях

Аналіз отриманих результатів доводить, що найвищий рівень PSNR (36,2дБ) зафіксовано у сценарії №1, де реалізовано одночасне підключення до двох базових станцій із сукупною пропускнуою здатністю 100 Мбіт/с, що вказує на ефективність запропонованої архітектури у забезпеченні високої якості обслуговування за рахунок оптимального розподілу трафіку.

У сценаріях №2 та №4, що моделюють умови обмеженої пропускнуої здатності та підвищеного рівня втрат пакетів відповідно, спостерігається незначне зниження значень PSNR. Попри це, рівень якості залишається в межах прийнятного діапазону, що забезпечує ($QoE \approx 4$).

Сценарій №5 демонструє адаптивні властивості системи: початкове погіршення значення PSNR компенсується завдяки перебудові маршруту, що свідчить про доцільність застосування механізмів динамічної маршрутизації у змінних мережових умовах.

Натомість у сценарії №3, де здійснено розподіл трафіку між трьома точками доступу, зафіксовано зниження рівня PSNR порівняно зі сценарієм, що може обумовлено неоднорідністю параметрів каналів зв'язку та збільшенням варіативності затримок і втрат в умовах багатошляхової маршрутизації.

4.3 Практична реалізація методу доставки відеоконтенту на основі SDN-комутаторів Zodiac GX та Zodiac FX

У попередніх розділах дисертації було обґрунтовано доцільність використання SDN для підвищення QoE, а також розроблено інтелектуальний метод моніторингу, багатошляхової та QoE-орієнтованої маршрутизації. Разом із тим теоретичні результати не можуть бути повною мірою верифіковані без їхньої апробації в реальному мережевому оточенні, оскільки емуляційні середовища (наприклад, Mininet) абстрагують низку апаратних особливостей, насамперед взаємодію контролера з фізичними комутаторами, обмеження обчислювальних ресурсів пристроїв і часові затримки, притаманні реальному мережевому обладнанню. Саме тому розділ 4 присвячено практичній імплементації напрацьованих алгоритмів у фізичній SDN-мережі, побудованій на комутаторах Zodiac GX та Zodiac FX виробництва Northbound Networks і керованій контролером Ryu.

Комутатори серії Zodiac обрано виходячи з трьох ключових міркувань. По-перше, це апаратна підтримка протоколу OpenFlow (версії 1.0/1.3), що забезпечує необхідний рівень програмного керування потоками трафіку. По-друге, відкритість апаратної та програмної архітектур, зокрема наявність вихідного коду прошивки Zodiac FX і використання Open vSwitch у Zodiac GX, надає можливість глибокого доступу до внутрішніх структур даних, а отже – точного вимірювання експлуатаційних параметрів мережі. По-третє, ці пристрої характеризуються низькою вартістю, компактними габаритами та безвентиляторною конструкцією, що робить їх придатними для розгортання лабораторного стенда, зручного для багаторазового відтворення експериментів.

Метою даного розділу є демонстрація працездатності запропонованих методів у реальних умовах і кількісна оцінка їхнього впливу на продуктивність мережі.

Zodiac FX – це компактний 4-портовий SDN-комутатор Fast Ethernet (100 Мбіт/с на порт) із підтримкою протоколу OpenFlow. Пристрій орієнтований на дослідників, студентів та розробників, яким потрібна недорога апаратна платформа для експериментів з програмно-конфігурованими мережами (SDN). Zodiac FX побудовано на базі мікроконтролера Atmel з використанням відкритого програмного забезпечення власної розробки Northbound Networks. В якості комутаційного чіпа використовується інтегрований п'ятипортовий комутатор другого рівня: чотири його порти підключені до зовнішніх Ethernet-роз'ємів, а п'ятий порт з'єднаний з мікроконтролером. Така архітектура забезпечує розподіл трафіку між даними та керуванням за допомогою VLAN: за замовчуванням порти 1–3 призначені для трафіку OpenFlow, а порт 4 виділено для підключення контролера. Подібне розділення означає, що порт 4 використовується як канал зв'язку з контролером, тоді як порти 1–3 призначені для передачі даних між кінцевими пристроями в мережі SDN.

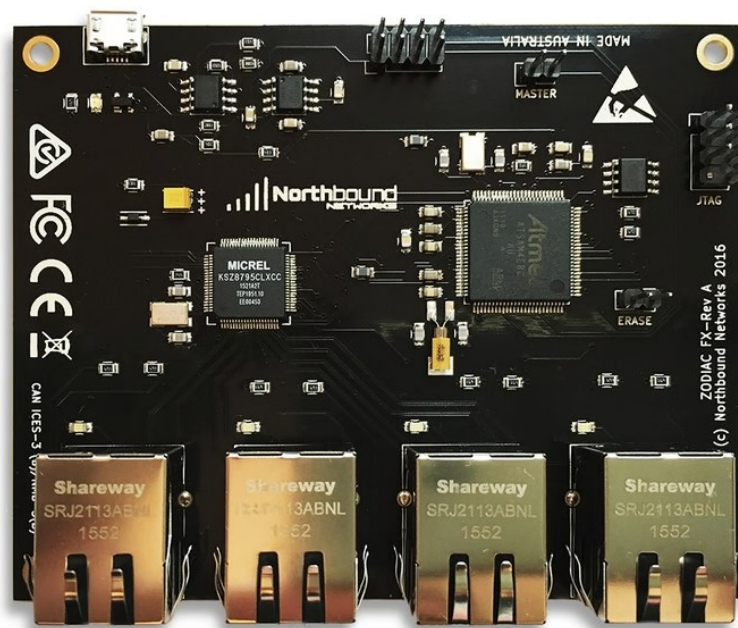


Рис.4.19. Комутатор Zodiac FX

Основні технічні характеристики Zodiac FX включають: 4 порти Fast Ethernet (10/100 Мбіт/с), живлення від micro-USB (5 В), обчислювальне ядро ARM Cortex-M4 (120 МГц) зі спеціалізованою прошивкою, відкритий вихідний код прошивки та підтримку OpenFlow версій 1.0 і 1.3. Комутатор підтримує базові функції комутації на рівні L2 з можливістю програмного керування потоками через контролер OpenFlow. Це дозволяє Zodiac FX обробляти розширений набір параметрів потоків, зокрема ідентифікувати трафік за MAC-та IP-адресами, VLAN-мітками тощо. Обсяг пам'яті мікроконтролера визначає відносно невелику місткість таблиці потоків (придатну для десятків активних Flow-правил), тому Zodiac FX призначений передусім для невеликих мереж або тестових стендів, а не для магістрального трафіку.

Zodiac FX працює у режимі керованого OpenFlow-комутатора. Він не виконує комутацію трафіку за замовчуванням, доки не під'єднаний до зовнішнього SDN-контролера, який встановлює на нього правила (Flow Entries). Пристрій підтримує режим відмовостійкості (fail-state) для випадків втрати зв'язку з контролером. За потреби користувач може перемкнути режим у "safe", що дозволяє комутатору продовжувати обробку наявних потоків навіть без зв'язку з контролером. Це важливо для забезпечення базової працездатності мережі при збоях контролера. До інших можливостей Zodiac FX належать підтримка VLAN, базова фільтрація Ethertype і лічильники (метрики) OpenFlow для вимірювання трафіку. Комутатор дозволяє переглядати встановлені потоки (через CLI або веб-інтерфейс) та очищувати таблицю потоків вручну при необхідності.

Перевагою Zodiac FX є його низька вартість та відкритість. Компанія-виробник надала відкритий вихідний код прошивки та SDK, що дозволяє спільноті розробників розширювати функціональність пристрою або створювати власні варіанти прошивки під специфічні задачі. Пристрій не має активного охолодження і споживає мало енергії, що робить його зручним для настільного використання або розгортання у віддалених вузлах. Завдяки

підтримці стандартного протоколу OpenFlow даний комутатор сумісний з більшістю популярних SDN-контролерів (POX, Ryu, ONOS, OpenDaylight тощо) без потреби у власних протоколах. Призначення та сценарії використання: Zodiac FX зазвичай застосовується в навчальних та лабораторних мережах, демонстраційних стендах SDN, а також у наукових дослідженнях мережевих алгоритмів. Він дає можливість відпрацьовувати концепції SDN на реальному апаратному пристрої, а не лише в емуляторах (наприклад Mininet), що підвищує реалізм експериментів. Типові сценарії – навчальні лабораторні роботи з SDN, розробка та відлагодження застосунків контролера (з можливістю фізично комутувати трафік між декількома пристроями), невеликі стенди для випробування протоколів керування трафіком (маршрутизація, балансування навантаження, VLAN-сегментація тощо). У таких умовах пропускна здатність 100 Мбіт/с не є критичним обмеженням, натомість важливою є гнучкість програмного керування мережевою інфраструктурою, яку і забезпечує Zodiac FX.

Zodiac GX – це старша модель SDN-комутатора від Northbound Networks, представлена пізніше (близько 2018 року). На відміну від FX, комутатор Zodiac GX має 5 портів Gigabit Ethernet (10/100/1000 Мбіт/с), більш продуктивний процесор та працює під керуванням вбудованої ОС Linux. Фактично, Zodiac GX являє собою невеликий програмно-визначений комутатор на базі OpenWrt/LEDE (форк OpenWrt, адаптований виробником), що використовує програмний комутаційний модуль Open vSwitch (OVS) для обробки трафіку. Така архітектура означає, що всередині пристрою працює повноцінна ОС з підтримкою мережевих стеків, що дозволяє реалізувати розширені можливості OpenFlow (включаючи специфікації 1.3 і вище) і запускати допоміжні сервіси. Комутатор також є безвентиляторним і малогабаритним, придатним для настільного використання. Zodiac GX позиціонується як недорогий програмно реалізований гігабітний комутатор OpenFlow, оптимальний для побудови фізичних SDN-стендів та плавного переходу від емуляції до реального

обладнання. За функціоналом він заповнює нішу між простими експериментальними рішеннями (такими як Zodiac FX) та дорогими комерційними OpenFlow-комутаторами від великих виробників.



Рис.4.20. Комутатор Zodiac GX

Комутатор має п'ять фізичних гігабітних портів, які згруповані в один логічний міст (bridge) Open vSwitch (за замовчуванням він називається ovslan) всередині ОС. Одна з п'яти фізичних ліній використовується для зв'язку з процесором SoC (тобто є внутрішнім портом CPU), а решта утворюють зовнішні інтерфейси для підключення мережевих вузлів, аналогічно до типового комутатора. Таким чином, структура портів подібна до домашнього маршрутизатора: 4-5 портів LAN, з'єднаних через внутрішній комутатор із процесором. На відміну від Zodiac FX, модель GX не вимагає апаратного поділу VLAN для контролера – замість цього програмний міст OVS може обробляти трафік контролера як окремий інтерфейс (наприклад, через віртуальний інтерфейс tap або призначення одного з портів під контролер). Проте у типовій конфігурації Zodiac GX усі порти можуть використовуватися для трафіку даних, а зв'язок з контролером здійснюється через той самий мережевий інтерфейс (управління за IP-адресою). Це означає, що контролер SDN підключається до Zodiac GX логічно (по IP), а не через окремий виділений фізичний порт, що зручно для гнучкого розміщення контролера (він може бути як у тій самій локальній мережі, так і віддаленим).

Завдяки використанню Open vSwitch, Zodiac GX підтримує OpenFlow 1.3+ з багатотабличною обробкою потоків, груповими таблицями, лічильниками, QoS та іншими розширеними функціями, притаманними OVS. Комутатор може

працювати як повноцінний керований комутатор L2/L3 (оскільки OpenWrt дозволяє налаштувати маршрутизацію, NAT, DHCP тощо), але основне його призначення – бути програмно керованим OpenFlow-пристроєм. За відсутності контролера, Zodiac GX може бути налаштований у режимі автономної роботи (standalone), при якому він поводить себе як звичайний L2-комутатор (наприклад, за допомогою конфігурації fail-mode у OVS можна встановити режим standalone для мосту, що дозволить передавати трафік без контролера). За замовчуванням, як і в Zodiac FX, встановлено fail-secure режим (аналог “secure”), тобто при втраті зв’язку з контролером комутатор зберігає поточні правила і не пропускає новий трафік доки зв’язок не відновиться або не будуть вручну змінені налаштування. Завдяки ОС Linux, користувач має доступ до системних журналів, може використовувати утиліти моніторингу (наприклад, tcpdump для аналізу трафіку на портах, ovs-ofctl для перегляду стану OpenFlow, sFlow агенти тощо). Зокрема, Zodiac GX підтримує технологію моніторингу sFlow: достатньо увімкнути відповідний агент командою OVS і трафік статистики може надсилатися на зовнішній сервер моніторингу. Це робить пристрій привабливим для дослідників, які потребують збирати телеметрію з мережі в реальному часі.

Оскільки комутація здійснюється програмно (Open vSwitch працює на CPU), продуктивність Zodiac GX залежить від потужності процесора та оптимізації ОС. Хоча гігабітні інтерфейси дозволяють обробляти більшу пропускну здатність, ніж у Zodiac FX, слід очікувати, що максимальна швидкість комутації буде нижчою за номінальні 1 Гбіт/с на порт при насиченні трафіком (особливо, якщо встановлено багато правил або обробляються дрібні пакети). Тим не менш, для більшості експериментальних та лабораторних сценаріїв продуктивності Zodiac GX цілком достатньо. Його велика перевага – гнучкість: користувач може встановлювати оновлення OpenWrt, додавати пакети, змінювати конфігурації як у звичайному Linux-середовищі. Northbound Networks надав спільноті вихідний код прошивки GX на GitHub, завдяки чому

досвідчені користувачі можуть зібрати власний образ системи або внести зміни до роботи Open vSwitch на пристрої.

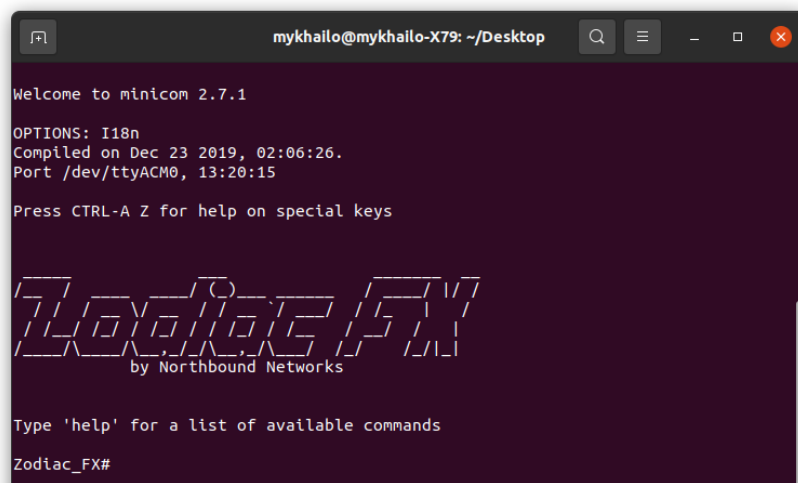
Zodiac GX добре підходить для побудови реальних SDN-мереж малих розмірів – наприклад, для тестування SDN-рішень у кампусній мережі або невеликому датацентрі, де потрібен контроль трафіку засобами OpenFlow, але обсяг трафіку не надто високий. Пристрій використовується в дослідницьких проектах, пов'язаних з розробкою контролерів (наприклад, для тестування контролера Faucet, Ryu тощо у фізичній мережі). Завдяки тому, що Zodiac GX працює на OVS, можна легко перенести напрацювання з емулятора Mininet на реальну мережу. Типовий випадок – підключення Zodiac GX до SDN-контролера (розгорнутого на окремому ПК або сервері) і керування декількома такими комутаторами одночасно, створюючи багатокомутаторну SDN-топологію для експериментів. Наприклад, кілька Zodiac GX можуть утворити фізичний аналог топології, яка раніше відпрацьовувалась у Mininet, що дозволяє вивчати поведінку алгоритмів маршрутизації, балансування навантаження, відмовостійкості протоколів у реальних умовах. Пристрій також може слугувати навчальним інструментом на курсах з мережевих технологій, демонструючи принципи SDN на гігабітних з'єднаннях.

Після ознайомлення з технічними особливостями перейдемо до практичних аспектів. Нижче представлено покрокову інструкцію з початкового налаштування мережевих параметрів Zodiac FX, зокрема призначення IP-адреси комутатора. Це необхідно для того, щоб мати можливість керувати комутатором та підключити його до контролера SDN у мережі.

Перед зміною налаштувань необхідно під'єднатися до інтерфейсу керування Zodiac FX. Існує два основні способи: через послідовну консоль CLI або через веб-інтерфейс. Найбільш зручним, є використання послідовного інтерфейсу CLI, оскільки він не залежить від початкової IP-конфігурації. Для цього потрібно підключити комутатор до комп'ютера за допомогою micro-USB кабелю (який одночасно забезпечує живлення пристрою та, через емуляцію

COM-порту, консольний доступ). На комп'ютері повинно визначитися новий послідовний порт, після цього потрібно запустити термінальну програму (наприклад, PuTTY) і відкрити відповідний COM-порт із параметрами 115200 8N1. Щоб підключитись до комутатора через послідовну консоль CLI використано команду *minicom --device /dev/ttyACM0*.

Після з'єднання – має з'явитися вітання командного рядка комутатора, наприклад:



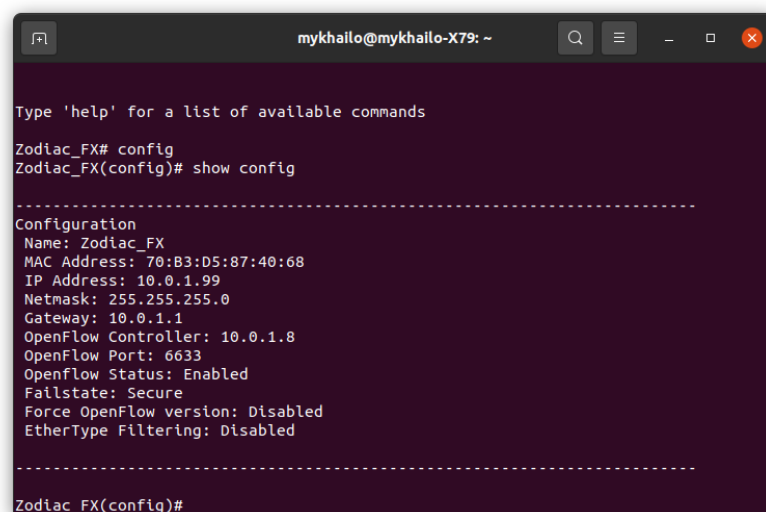
```
mykhailo@mykhailo-X79: ~/Desktop
Welcome to minicom 2.7.1
OPTIONS: I18n
Compiled on Dec 23 2019, 02:06:26.
Port /dev/ttyACM0, 13:20:15
Press CTRL-A Z for help on special keys

  ZODIAC FX
  by Northbound Networks

Type 'help' for a list of available commands
Zodiac_FX#
```

Рис.4.21. Консольне вікно комутатора Zodiac FX

Для перегляду поточної конфігурації комутатора, в консолі можна ввести команду *show config*.

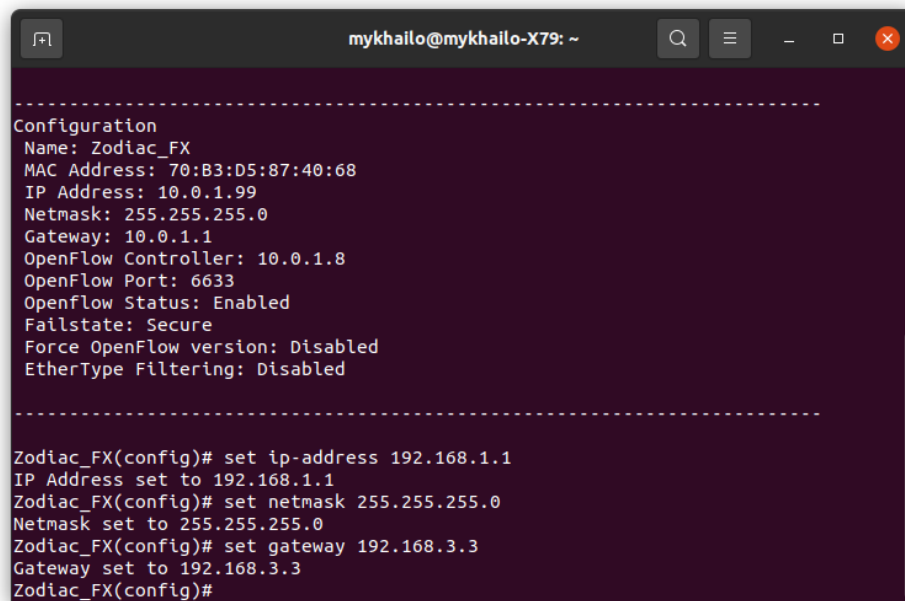


```
mykhailo@mykhailo-X79: ~
Type 'help' for a list of available commands
Zodiac_FX# config
Zodiac_FX(config)# show config
-----
Configuration
Name: Zodiac_FX
MAC Address: 70:B3:D5:87:40:68
IP Address: 10.0.1.99
Netmask: 255.255.255.0
Gateway: 10.0.1.1
OpenFlow Controller: 10.0.1.8
OpenFlow Port: 6633
OpenFlow Status: Enabled
Failstate: Secure
Force OpenFlow version: Disabled
EtherType Filtering: Disabled
-----
Zodiac_FX(config)#
```

Рис.4.22. Результат виконання команди *show config* за базовою конфігурацією

Дана команда відображає поточні налаштування пристрою, зокрема встановлену IP-адресу, маску підмережі, шлюз та адресу контролера. За замовчуванням IP-адреса комутатора – 10.0.1.99, маска – 255.255.255.0, шлюз – 10.0.1.1.

Для створення власної програмно-конфігурованої мережі, потрібно змінити базові налаштування комутатора. Зокрема встановити IP-адресу комутатора, маску підмережі та шлюзу за замовчуванням.



```
-----
Configuration
Name: Zodiac_FX
MAC Address: 70:B3:D5:87:40:68
IP Address: 10.0.1.99
Netmask: 255.255.255.0
Gateway: 10.0.1.1
OpenFlow Controller: 10.0.1.8
OpenFlow Port: 6633
Openflow Status: Enabled
Failstate: Secure
Force OpenFlow version: Disabled
EtherType Filtering: Disabled
-----

Zodiac_FX(config)# set ip-address 192.168.1.1
IP Address set to 192.168.1.1
Zodiac_FX(config)# set netmask 255.255.255.0
Netmask set to 255.255.255.0
Zodiac_FX(config)# set gateway 192.168.3.3
Gateway set to 192.168.3.3
Zodiac_FX(config)#
```

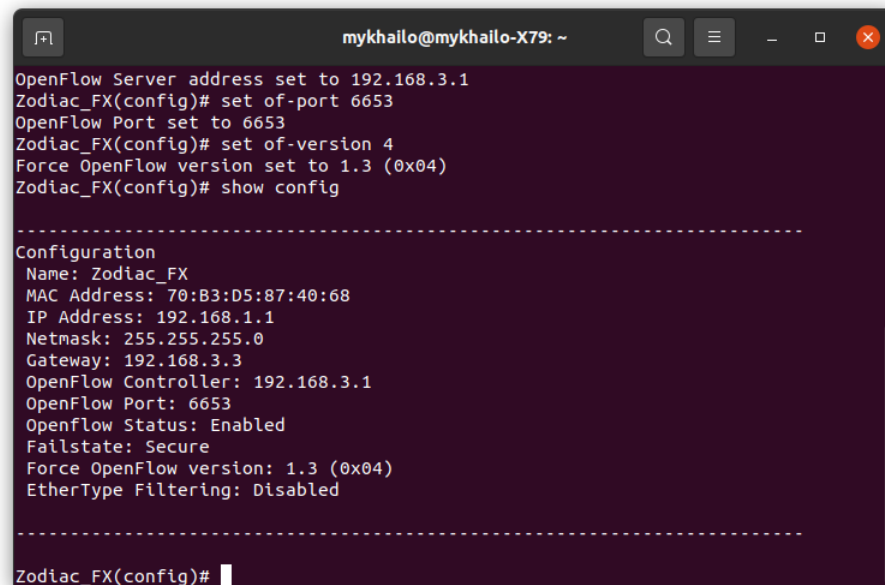
Рис.4.23. Зміна налаштувань комутатора Zodiac FX

До цього моменту зміни внесені в поточну пам'ять і діятимуть до перезавантаження. Щоб зробити їх постійними потрібно виконати команду *save*. Вона збереже поточні налаштування до енергонезалежної пам'яті.

Після базового налаштування комутатора, наступним кроком є конфігурація параметрів SDN-контролера, до якого має підключатися Zodiac FX. Потрібно вказати IP-адресу контролера та TCP-порт для OpenFlow-з'єднання. За замовчуванням в заводських налаштуваннях Zodiac FX контролер встановлено на 10.0.1.8:6633.

Для встановлення IP-адреси контролера, потрібно ввести команду: *set of-controller <IP_контролера>*. Якщо контролер слухає на нестандартному порту, його потрібно вказати наступною командою: *set of-port <номер_порту>*.

Як і раніше, потрібно зберегти внесені зміни, командою *save*. Після чого, можна перевірити стан командою *show status*.



```
mykhailo@mykhailo-X79: ~  
OpenFlow Server address set to 192.168.3.1  
Zodiac_FX(config)# set of-port 6653  
OpenFlow Port set to 6653  
Zodiac_FX(config)# set of-version 4  
Force OpenFlow version set to 1.3 (0x04)  
Zodiac_FX(config)# show config  
  
-----  
Configuration  
Name: Zodiac_FX  
MAC Address: 70:B3:D5:87:40:68  
IP Address: 192.168.1.1  
Netmask: 255.255.255.0  
Gateway: 192.168.3.3  
OpenFlow Controller: 192.168.3.1  
OpenFlow Port: 6653  
Openflow Status: Enabled  
Failstate: Secure  
Force OpenFlow version: 1.3 (0x04)  
EtherType Filtering: Disabled  
-----  
Zodiac_FX(config)#
```

Рис.4.24. Зміни налаштувань для підключення до контролера Ryu

Таким чином, Zodiac FX після виконання наведених кроків отримує необхідні параметри для роботи в SDN-мережі: власну IP-адресу для управління та адресу/порт контролера. Комутатор автоматично ініціюватиме OpenFlow-сесію до контролера при кожному завантаженні пристрою (або при відновленні зв'язку).

Зростання обсягів відеоконтенту та підвищення вимог користувачів до якості його споживання ставлять нові виклики перед традиційними мережевими архітектурами. SDN пропонують гнучкий та централізований підхід до управління мережевими ресурсами, що відкриває можливості для впровадження інтелектуальних механізмів оптимізації трафіку з огляду на показники QoS та QoE. Дане дослідження зосереджено на застосуванні SDN для QoE-орієнтованого розподілу відеопотоків, який дозволяє динамічно

скеровувати трафік кількома паралельними шляхами з різними ваговими коефіцієнтами [111]. Загальна структура мережі представлена на рисунку 4.25 і складається з: трьох комутаторів Zodiac GX в якості Core комутаторів, двох Zodiac FX в якості Edge комутаторів, Ryu контролера, одного медіа сервера і двох хостів.

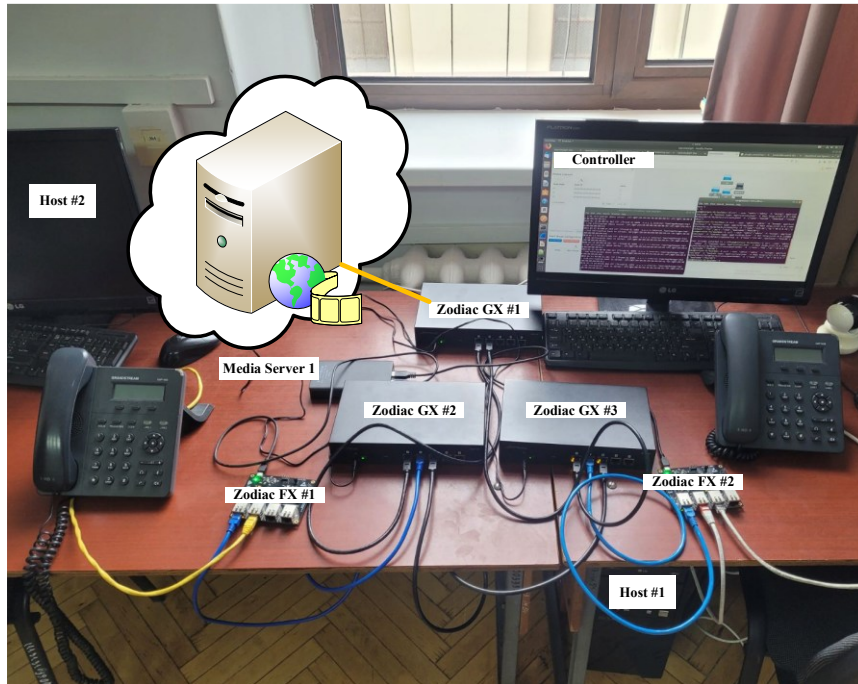
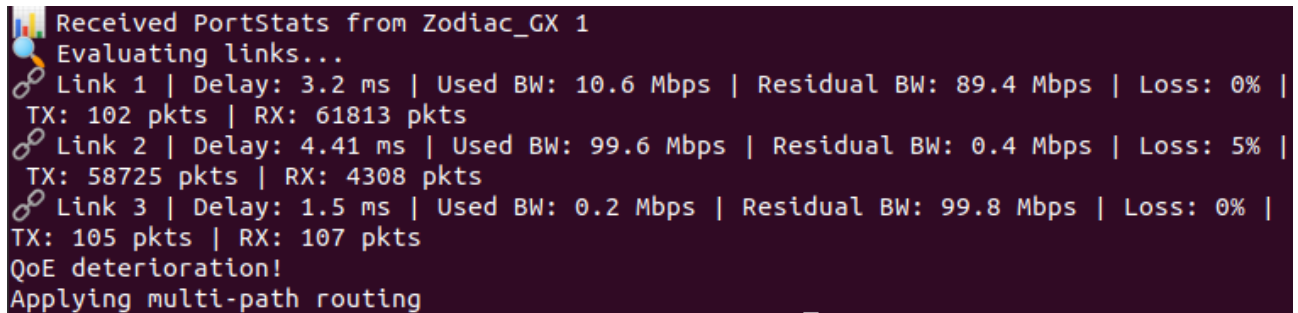


Рис.4.25. Тестове середовище з комутаторами Zodiac

Експеримент був спрямований на оцінку здатності SDN-контролера забезпечувати стабільно високий рівень QoE для відеопотоку за умов виникнення недостатньої пропускної здатності. Початковий етап експерименту передбачав запит відеоконтенту Хостом 2 з Медіасервера. Відеопотік з пропускною здатністю 10 Мбіт/с передавався маршрутом: Медіасервер → Zodiac GX 1 → Zodiac GX 2 → Zodiac FX 1 → Хост 2. Протягом перших 5 секунд спостерігалася стабільна якість відеопотоку та високі значення QoE.

На 5-й секунді експерименту було штучно створено перевантаження каналу зв'язку між комутаторами Zodiac GX 1 та Zodiac GX 2. Це призвело до значного зниження доступної пропускної здатності на даній ділянці, що виявилось недостатнім для повноцінної передачі відеопотоку обсягом 10 Мбіт/с

(рис. 4.26). Наслідком цього стало суттєве погіршення показників QoE та візуальне погіршення якості зображення.



```
Received PortStats from Zodiac_GX 1
Evaluating links...
Link 1 | Delay: 3.2 ms | Used BW: 10.6 Mbps | Residual BW: 89.4 Mbps | Loss: 0% |
TX: 102 pkts | RX: 61813 pkts
Link 2 | Delay: 4.41 ms | Used BW: 99.6 Mbps | Residual BW: 0.4 Mbps | Loss: 5% |
TX: 58725 pkts | RX: 4308 pkts
Link 3 | Delay: 1.5 ms | Used BW: 0.2 Mbps | Residual BW: 99.8 Mbps | Loss: 0% |
TX: 105 pkts | RX: 107 pkts
QoE deterioration!
Applying multi-path routing
```

Рис.4.26. Виявлення контролером погіршення оцінки QoE

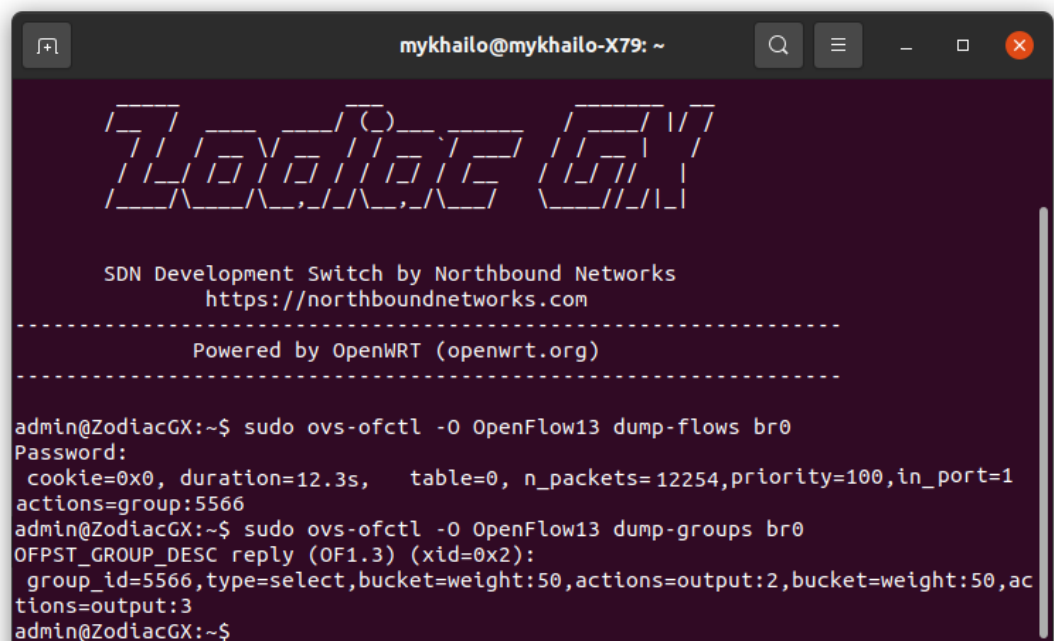
SDN-контролер, здійснюючи безперервний моніторинг параметрів мережі, оперативно виявив деградацію оцінки QoE. У відповідь на виявлене погіршення контролер активував механізм багатошляхової маршрутизації, використовуючи функціонал протоколу OpenFlow. На комутаторі Zodiac GX 1 було застосовано метод балансування навантаження, за якого вхідний відеопотік з порта 1 був розподілений між двома комутаторами через порт 2 та 3.

Зокрема, половина трафіку (5 Мбіт/с) продовжувала передаватися через початковий маршрут: Zodiac GX 1 → Zodiac GX 2 → Zodiac FX 1 → Хост 2. Друга половина трафіку (також 5 Мбіт/с) була скерована альтернативним маршрутом через комутатор Zodiac GX 3: Zodiac GX 1 → Zodiac GX 3 → Zodiac FX 1 → Хост 2.

У рамках архітектури OpenFlow, групові таблиці (group tables) відіграють ключову роль у реалізації складних сценаріїв обробки трафіку, зокрема мультикасту, резервування та балансування навантаження. На відміну від звичайної таблиці потоків, яка відповідає за маршрутизацію пакетів за визначеними правилами відповідності (match-action), групова таблиця дозволяє застосовувати набір дій до одного або кількох потоків одночасно, надаючи механізм агрегованої обробки. Наприклад, в даній ситуації контролер використав команду `sudo ovs-ofctl -O OpenFlow13 add-group br0`

"group_id=5566,type=select,bucket=weight=50,output:2,bucket=weight=50,output:3".

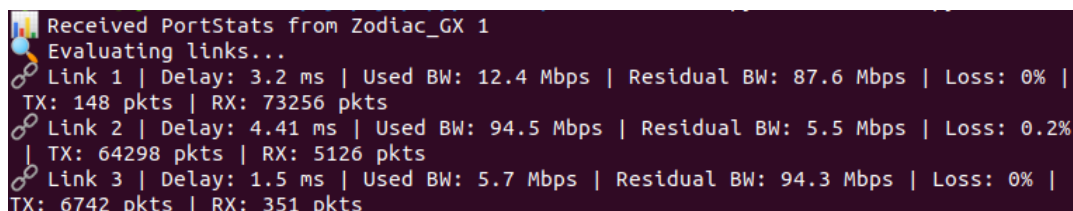
Завдяки параметру weight можна точно налаштовувати пропорції розподілу трафіку між вихідними портами, що є критично важливим для досягнення QoS та оптимального використання ресурсів мережі. У даному випадку коефіцієнти були рівними, що забезпечило ефективне використання ресурсів мережі.



```
mykhailo@mykhailo-X79: ~  
  
SDN Development Switch by Northbound Networks  
https://northboundnetworks.com  
-----  
Powered by OpenWRT (openwrt.org)  
-----  
  
admin@ZodiacGX:~$ sudo ovs-ofctl -O OpenFlow13 dump-flows br0  
Password:  
 cookie=0x0, duration=12.3s, table=0, n_packets=12254,priority=100,in_port=1  
 actions=group:5566  
admin@ZodiacGX:~$ sudo ovs-ofctl -O OpenFlow13 dump-groups br0  
OFPST_GROUP_DESC reply (OF1.3) (xid=0x2):  
 group_id=5566,type=select,bucket=weight:50,actions=output:2,bucket=weight:50,ac  
 tions=output:3  
admin@ZodiacGX:~$
```

Рис.4.27. Встановлені записи групової таблиці та таблиці потоків

Після застосування механізму балансування трафіку та перерозподілу потоків через альтернативні маршрути, сукупна пропускна здатність, доступна для передачі відеопотоку, була відновлена до необхідних 10 Мбіт/с. Це дозволило досягти стабілізації та відновлення якості сприйняття.



```
Received PortStats from Zodiac_GX 1  
Evaluating links...  
Link 1 | Delay: 3.2 ms | Used BW: 12.4 Mbps | Residual BW: 87.6 Mbps | Loss: 0% |  
TX: 148 pkts | RX: 73256 pkts  
Link 2 | Delay: 4.41 ms | Used BW: 94.5 Mbps | Residual BW: 5.5 Mbps | Loss: 0.2%  
TX: 64298 pkts | RX: 5126 pkts  
Link 3 | Delay: 1.5 ms | Used BW: 5.7 Mbps | Residual BW: 94.3 Mbps | Loss: 0% |  
TX: 6742 pkts | RX: 351 pkts
```

Рис.4.28. Статистика каналів зв'язку після розподілу відеопотоку між двома маршрутами

На рис. 4.29 наведено приклад зображення, отриманого при погіршенні оцінки QoE (а) та після реалізації багатошляхової передачі відеопотоку (б).



а)



б)

Рис. 4.29. Порівняння кадру до застосування багатошляхової передачі (а) та після (б)

Розроблений метод доставки відеоконтенту в безпроводних програмно-конфігурованих мережах, що базується на використанні багатошляхової маршрутизації із застосуванням групових таблиць OpenFlow, забезпечує підвищену стійкість і адаптивність передачі в умовах нестабільних або перевантажених каналів зв'язку. У процесі моделювання підтверджено здатність контролера SDN (на прикладі Ryu) динамічно реагувати на погіршення параметрів QoE шляхом оперативного переналаштування маршрутів і балансування трафіку між кількома шляхами.

Застосування механізму рівномірного розподілу навантаження між альтернативними маршрутами дозволило досягти відновлення цільової пропускної здатності та вирівнювання навантаження в мережі, що в сукупності сприяло покращенню якості сприйняття послуг (QoE). Метод демонструє ефективність у сценаріях, де традиційні одношляхові підходи не здатні забезпечити належну якість обслуговування.

Разом з тим, встановлено, що надмірна частота оновлення маршрутів і правила формування нових flow-записів створюють додаткове навантаження на контролер і можуть впливати на реактивність системи. У свою чергу це визначає доцільність подальшого розвитку методу шляхом впровадження адаптивного управління частотою оновлень та використання прогностичних моделей на основі машинного навчання для динамічного налаштування вагових коефіцієнтів у групових таблицях.

Таким чином, запропонований метод підтвердив свою ефективність для QoE-орієнтованої доставки відеоконтенту в умовах високої динаміки та обмежених ресурсів безпроводних SDN-мереж і є перспективним напрямом для подальших досліджень і впровадження в інтелектуальних комунікаційних системах нового покоління.

Висновки до 4-го розділу

У розділі здійснено практичну реалізацію розроблених методів управління якістю сприйняття послуг (QoE) в програмно-конфігурованих мережах (SDN). Дослідження було спрямовано на оцінювання ефективності використання одночасного обслуговування декількома точками доступу і багатошляхової маршрутизації у безпроводних та провідних SDN мережах, зокрема з використанням комутаторів Zodiac GX та Zodiac FX.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність використання багатошляхової передачі відеопотоку, що дало змогу значно підвищити рівень якості сприйняття кінцевими користувачами.

Запропонований метод одночасного обслуговування декількома точками доступу дозволив суттєво збільшити доступну пропускну здатність каналів зв'язку, зменшити втрати пакетів і покращити показники QoE, зокрема, рівень PSNR, у порівнянні з традиційними підходами.

У розділі описано низку сценаріїв, що демонструють гнучкість і адаптивність запропонованого підходу. Сценарії включали ситуації з різною доступністю пропускну спроможності, наявністю втрат пакетів і необхідністю динамічної зміни маршрутів. Експерименти показали, що використання одночасного обслуговування декількома точками доступу і мультисерверної архітектури дозволяє досягти стабільної QoE оцінки навіть за умов перевантаження каналів зв'язку та інших негативних факторів. Також у роботі детально розглянуто технічні аспекти використання SDN-комутаторів Zodiac GX та Zodiac FX. Встановлено, що ці пристрої, завдяки своїй відкритій архітектурі, підтримці протоколу OpenFlow і компактним розмірам, є оптимальними для практичного впровадження та досліджень мереж SDN у лабораторних умовах. Проведено налаштування комутаторів для забезпечення ефективного керування потоками трафіку, що підтвердило можливість плавного переходу від емуляційного середовища до реального обладнання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, становить розв'язок науково-практичного завдання підвищення якості сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах шляхом розроблення інтелектуальних методів моніторингу стану мережі, маршрутизації трафіку та ефективної доставки відеоконтенту в умовах обмежених ресурсів і змінних вимог користувачів.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз сучасного стану телекомунікаційних мереж і виявлено ключові обмеження традиційних підходів до забезпечення QoS і QoE. Доведено, що високий рівень QoE є критично важливим для ефективності мереж і конкурентоспроможності операторів, особливо в умовах мультимедійного трафіку. Показано, що статична архітектура традиційних мереж обмежує адаптивність та масштабованість, що обґрунтовує доцільність переходу до SDN. Архітектура SDN створює умови для реалізації гнучкого QoE-орієнтованого управління, однак наявні реалізації потребують удосконалення, зокрема впровадження адаптивного моніторингу, багатошляхової маршрутизації та одночасного обслуговування через кілька точок доступу. Вказані обмеження підкреслюють необхідність в інтелектуальних методах управління трафіком, здатних прогнозувати зміни QoE та забезпечувати ефективне реагування на динаміку мережевого середовища.

2. Розроблено систему інтелектуального моніторингу SDN, яка забезпечує адаптивний інтервал моніторингу параметрів мережі залежно від поточного стану мережі та прогнозованої якості сприйняття. Запропонована система в режимі реального часу здійснює збір критичних мережевих метрик, зокрема затримки, рівня втрат пакетів, пропускну здатності між мережевими вузлами, а також моніторинг завантаженості ЦП SDN-контролера та комутаторів. Ключовим нововведенням є метод адаптивного моніторингу, що динамічно

змінює інтервал моніторингу відповідно до поточного навантаження в мережі та очікуваного рівня QoE. Такий підхід забезпечує збереження актуальності даних при істотному зниженні обсягу службового трафіку. Експериментальні результати підтвердили, що використання адаптивного інтервалу моніторингу дає змогу скоротити об'єм службового трафіку на 56,4% порівняно зі статичним інтервалом моніторингу, що суттєво зменшує навантаження на контролер та канали зв'язку. При цьому точність вимірювання залишається на високому рівні: середня похибка визначення затримки становить близько 0,5 мс, втрат пакетів – приблизно 0,36%, а похибка оцінки пропускної здатності не перевищує 0,2 Мбіт/с. Отримані результати підтверджують ефективність і практичну доцільність запропонованого методу у динамічному мережевому середовищі, де необхідне своєчасне реагування на зміни трафіку без перевантаження площини управління.

3. У межах запропонованої концепції інтелектуальної програмно-конфігурованої мережі реалізовано алгоритм оцінювання якості сприйняття, заснований на використанні сучасних об'єктивних метрик, що забезпечують високу кореляцію з суб'єктивними оцінками користувачів. Зокрема, для аналізу відеотрафіку використано показник APSNR, який, на відміну від класичного PSNR, враховує кадрові зміщення між оригінальним та отриманим відео, що особливо актуально в умовах спотворень, викликаних втратою пакетів або нестабільними каналами зв'язку. Проведені дослідження показали, що APSNR демонструє значно вищу кореляцію з середнім суб'єктивним балом MOS, ніж традиційні методи оцінки якості зображення, що дозволяє точніше відображати сприйняту якість відео. Для VoIP-трафіку застосовано метрику PESQ, яка зарекомендувала себе як надійний засіб об'єктивного оцінювання якості мовлення. Результати експериментів підтвердили, що PESQ забезпечує кореляцію між об'єктивною оцінкою та суб'єктивним сприйняттям користувачів щодо якості голосового зв'язку. Таким чином, використання метрик APSNR і PESQ забезпечило можливість наближеної, але достовірної

оцінки QoE в реальному часі. Інтеграція цих показників у систему прийняття рішень SDN-контролера дала змогу ефективно реагувати на зміни мережевих умов і здійснювати адаптивне управління трафіком з урахуванням очікувань кінцевих користувачів.

4. Розроблено моделі машинного навчання для прогнозування QoE та визначення оптимального інтервалу моніторингу в умовах змінного навантаження. Для передбачення рівня QoE використано ансамблеві алгоритми (Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost), які навчалися на синтетичному датасеті обсягом 20 000 записів, сформованому на основі експериментальних даних. Найкращу точність демонстрували CatBoost та LightGBM. Також реалізовано метод оцінки впливу частоти моніторингу на завантаження SDN-контролера. Встановлено, що зменшення інтервалу опитування до 5–10 мс призводить до 92–97% завантаження CPU та зростання затримок у мережі. На основі цього визначено рекомендовані межі частоти опитування для QoE-чутливих сервісів. Інтеграція ML-моделей з адаптивною моніторинговою системою дозволила зменшити службове навантаження на 56,4%, зберігаючи при цьому стабільний рівень QoE. Результати доводять доцільність використання машинного навчання для інтелектуального управління моніторингом і маршрутизацією в SDN-мережах.

5. Розроблено метод QoE-маршрутизації трафіку, який при виборі шляху враховує не лише поточні параметри QoS, але й прогнозовані значення QoE серед потенційних маршрутів. На відміну від традиційних QoS-методів, підхід орієнтований на максимальну якість сприйняття користувача. Моделювання показало суттєву ефективність такого рішення. Зокрема, при порівнянні 7 стратегій маршрутизації (5 типових схем на основі пропускної здатності, затримки, втрат пакетів тощо, одна відома ML-стратегія QoE-маршрутизації та запропонований в роботі метод) встановлено, що запропоноване рішення забезпечує найвищі показники QoE для різних типів трафіку. Криві кумулятивного розподілу отриманих значень QoE змістилися максимально

вправо для запропонованого підходу, що означає послідовно вищу якість на всіх квантилях порівняно з альтернативами. Наприклад, для VoIP-трафіку медіанний рівень QoE $\sim 2,9$ за запропонованому методі маршрутизації, тоді як при стандартній маршрутизації за параметром пропускної здатності $QoE < 2,9$. Крім того, запропонований метод продемонстрував на 42 % кращі результати забезпечення необхідної якості сприйняття порівняно з відомою ML-стратегією QoE-маршрутизації, що підтверджується аналізом кривих CDF. Аналогічно для відеопотоків: запропонований метод забезпечив вищі значення APSNR (якість відео) на всьому діапазоні розподілу. Таким чином, розроблена QoE-маршрутизація на основі прогнозів ML продемонструвала виграш у показниках якості порівняно зі стандартними рішеннями, особливо в умовах перевантаження або нестабільності мережі.

6. Для ресурсоемних потокових сервісів (відео 4K/8K, VR тощо) запропоновано рішення, що поєднує багатошляхову маршрутизацію в SDN та одночасне підключення мобільного пристрою до кількох точок доступу. Реалізований механізм багатошляхової маршрутизації дає змогу розподіляти відеотрафік між кількома маршрутами й інтерфейсами, а підтримка мультисерверної доставки дозволяє паралельно отримувати сегменти контенту з різних серверів. Така архітектура підвищує сумарну пропускну здатність, забезпечує резервування каналів і балансування навантаження, а також зменшує ризик переривання сервісу в гетерогенних мережах. Експерименти в Mininet-Wi-Fi підтвердили ефективність методу. У сценарії перевантаження основного каналу запропоновані рішення з двома точками доступу та двома серверами збільшила середній PSNR із $\approx 33,8$ дБ до $\approx 36,2$ дБ (приріст $\approx 2,4$ дБ, що помітно покращує якість зображення). За умов сумарного обмеження пропускної здатності до ≈ 68 Мбіт/с досягнуто $MOS \approx 4,0$ («добре»), тоді як одноканальна передача зі швидкістю 34 Мбіт/с забезпечила лише $\approx 30,6$ дБ PSNR. Під час введення штучних втрат алгоритм автоматично використовував канали з мінімальними втратами, підвищуючи середній PSNR.

7. Усі запропоновані компоненти концептуальної моделі пройшли комплексну валідацію та продемонстрували переваги над традиційними рішеннями. Модуль моніторингу підтверджено шляхом порівняння показників затримки (LLDP vs ping) та втрат пакетів (PortStats vs iperf): абсолютні похибки не перевищили 1 % і декількох мілісекунд. Адаптивний алгоритм опитування зменшив обсяг службових повідомлень на 56,7% порівняно з фіксованим інтервалом, водночас зберігаючи необхідну точність вимірювань навіть за різких змін трафіку. Розроблені ML-моделі (Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost) протестовано на незалежних вибірках: значення MAE, RMSE та R^2 свідчать про високу кореляцію прогнозів із фактичними значеннями QoE. Завдяки прогнозуванню створено проактивну стратегію керування, здатну попереджувати погіршення якості ще до його настання. Ефективність QoE-маршрутизації підтверджена серією емуляційних сценаріїв: контролер у середньому обирає шлях із QoE, наближеним до теоретично оптимального (мінімальна різниця між фактичним і максимально можливим QoE), що забезпечує зростання PESQ та APSNR порівняно з маршрутами на основі QoS-метрик. Таким чином, інтеграція адаптивного моніторингу, прогнозування QoE, QoE-маршрутизація та метод доставки відеоконтенту забезпечує значне підвищення якості сприйняття послуг, ефективніше використання мережевих ресурсів і у порівнянні з класичними підходами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. Agiwal, H. Kwon, S. Park and H. Jin, "A Survey on 4G-5G Dual Connectivity: Road to 5G Implementation," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 16193-16210, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052462.
2. F. Karniavoura and K. Magoutis, "Decision-Making Approaches for Performance QoS in Distributed Storage Systems: A Survey," in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 30, no. 8, pp. 1906-1919, 1 Aug. 2019, doi: 10.1109/TPDS.2019.2893940.
3. P. Fazio, F. De Rango and M. Tropea, "Prediction and QoS Enhancement in New Generation Cellular Networks With Mobile Hosts: A Survey on Different Protocols and Conventional/Unconventional Approaches," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1822-1841, thirdquarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2684778.
4. M. D. Arienzo, "Precise QoS Metrics Monitoring in Self-Aware Networks," *2010 Second International Conference on Advances in System Testing and Validation Lifecycle*, 2010, pp. 120-124, doi: 10.1109/VALID.2010.25.
5. N. Seitz, "ITU-T QoS standards for IP-based networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 6, pp. 82-89, June 2003, doi: 10.1109/MCOM.2003.1204752.
6. S. Jun, K. Przystupa, M. Beshley, O. Kochan, H. Beshley, M. Klymash, J. Wang, D. Pieniak, "A Cost-Efficient Software Based Router and Traffic Generator for Simulation and Testing of IP Network," *Electronics*, vol. 9, no. 1, p. 40, Jan. 2020, doi: 10.3390/electronics9010040.
7. A. Kirpichnikov and A. Titovtsev, "Practical Recommendations On The Application Of Markov Queuing Models With A Restricted Queue," *2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR)*, 2019, pp. 81-82, doi: 10.1109/DCNAIR.2019.8875563
8. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and

controller," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 282-286.

9. R. Simmonds and B. W. Unger, "Towards scalable network emulation", *Denver, CO*, Jul. 2001, pp. 252–262, doi: 10.1117/12.434401.

10. U. Shirwadkar and N. Chilamkurti, "A Reliable Mechanism to guarantee QoS Over DiffServ using video Differentiator," *TENCON 2006 - 2006 IEEE Region 10 Conference*, 2006, pp. 1-4, doi: 10.1109/TENCON.2006.343859.

11. M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Beshley, T. Maksymyuk, "Research and Development the Methods of Quality of Service Provision in Mobile Cloud Systems", *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking - 2014, Odessa, Ukraine - Chisinau, Moldova*, May 27-30, 2014, P. 165-169.

12. D. Doherty, T. Morawski, R. Sackett, B. Tang, Carlos-Urrutia-Valdes and J. Zhao, "Next generation networks - multi-service network design," *Networks 2008 - The 13th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium*, 2008, pp. 1-14, doi: 10.1109/NETWKS.2008.4763684.

13. L. L. Zhang, B. Beacham, M. R. Hashemi, P. Chow and A. Leon-Garcia, "A scheduler ASIC for a programmable packet switch," in *IEEE Micro*, vol. 20, no. 1, pp. 42-48, Jan.-Feb. 2000, doi: 10.1109/40.820052.

14. Minghai Xu, Zhengkun Mi, Xiaofang Feng and Wenke Xie, "Implementation techniques of IntServ/DiffServ integrated network," *International Conference on Communication Technology Proceedings, 2003. ICCT 2003.*, Beijing, China, 2003, pp. 231-234 vol.1.

15. Y. Bernet et al., "A Framework for Integrated Services Operation over DiffServ Networks", *RFC*, vol. 2998, November 2000.

16. R. Braden, L. Zbarsky, S. Berson, S. Herzog and S. Jamin, "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) - Functional Specification", *RFC*, vol. 2205, September 1997.

17. N. Rouhana and E. Horlait, "Differentiated services and integrated services use of MPLS," *Proceedings ISCC 2000. Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications*, Antibes-Juan Les Pins, France, 2000, pp. 194-199.
18. М. М. Климаш, О. В. Корецький, М. І. Бешлей, В. Б. Янишин, "Дослідження побудови технологічних ресурсів у конвергентній мережі на базі мобільного оператора для надання послуги Triple Play", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, серія "Радіoeлектроніка та телекомунікації", №. 705, с. 176–183, 2011.
19. B. Moon and H. Aghvami, "RSVP extensions for real-time services in wireless mobile networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 12, pp. 52-59, Dec. 2001.
20. A. Abella, V. Friderikos and H. Aghvami, "Differentiated services versus over-provisioned best-effort for pure-IP mobile networks," *4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*, Stockholm, Sweden, 2002, pp. 450-457
21. N. Wang and J. Jiang, "Extending RSVP for QOS Support in Heterogeneous Wireless Networks," *2006 10th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, 2006, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCS.2006.301481.
22. М. М. Климаш, М. І. Бешлей, Ю. Д. Дещинський, О. М. Панченко, "Розробка методу балансування навантаження в SDN мережах на основі модифікованого протоколу STP," *Комп'ютерні технології друкарства*, № 2, с. 146-155, 2015.
23. I. Nedyalkov and G. Georgiev, "Performance Comparison of IP Network Using MPLS and MPLS TE," *2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513712.

24. А. А. Терешкевич, А. Н. Зубалов, "Обзор технологии "программно-конфигурируемые сети ПКС/sdn", " *Газовая промышленность*. №12 (746), с. 64-71, 2016.
25. M. Hayes, B. Ng, A. Pekar and W. K. G. Seah, "Scalable Architecture for SDN Traffic Classification," in *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3203-3214, Dec. 2018.
26. M. Karakus and A. Durresi, "A survey: Control plane scalability issues and approaches in software-defined networking (SDN)", *Comput. Netw.*, vol. 112, pp. 279-293, Jan. 2017.
27. K. Phemius, M. Bouet and J. Leguay, "Disco: Distributed multi-domain SDN controllers", *Proc. IEEE Netw. Oper. Manage. Symp. (NOMS)*, pp. 1-4, May 2014
28. P. Berde, M. Gerola, J. Hart, Y. Higuchi, M. Kobayashi, T. Koide, et al., "ONOS: Towards an open distributed SDN OS", *Proc. 3rd Workshop Hot Topics Softw. Defined Netw. (HotSDN)*, pp. 1-6, 2014.
29. J. Medved, R. Varga, A. Tkacik and K. Gray, "OpenDaylight: Towards a model-driven SDN controller architecture", *Proc. IEEE Int. Symp. World Wireless Mobile Multimedia Netw. (WoWMoM)*, pp. 1-6, Jun. 2014.
30. S. Lange, S. Gebert, J. Spoerhase, P. Rygielski, T. Zinner, S. Kounev, et al., "Specialized heuristics for the controller placement problem in large scale SDN networks", *Proc. 27th Int. Teletraffic Congr. (ITCs)*, vol. 12, no. 1, pp. 210-218, 2015.
31. Nightingale, J., Salva-Garcia, P., Calero, J. M. A., & Wang, Q. (2018). 5G-QoE: QoE Modelling for Ultra-HD Video Streaming in 5G Networks. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 64(2), 621–634. <https://doi.org/10.1109/tbc.2018.2816786>
32. Lemesko, O., Yevdokymenko, M., Yeremenko, O., Al-Dulaimi, A. M. K., Segec, P., & Papan, J. (2020). QoE-centric adaptive multipath routing under R-factor

with load balancing in SDN. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*.

33. H. Nam, K. -H. Kim, J. Y. Kim and H. Schulzrinne, "Towards QoE-aware video streaming using SDN," *2014 IEEE Global Communications Conference*, Austin, TX, USA, 2014, pp. 1317-1322, doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7036990.

34. S. V. Krishna, A. Shrivastava and S. J. Wagh, "SDN in High Performance Computing for Scientific and Business Environment (SBE)," *2017 International Conference on Computational Intelligence in Data Science (ICCIDS)*, Chennai, 2017.

35. W. Wang, Q. Qi, X. Gong, Y. Hu and X. Que, "Autonomic QoS Management Mechanism in Software Defined Network," in *China Communications*, vol. 11, no. 7, pp. 13-23, July 2014.

36. H. Zhou *et al.*, "Improving QoS in SDN with Lossless Multi-Domain Reconfigurations," *2015 IEEE 23rd International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, Portland, OR, 2015, pp. 77-78.

37. Ardiansyah, Y. Choi, M. R. K. Aziz and D. Choi, "Latency Minimization for Energy Internet Communications with SDN Virtualization Infrastructure," *2019 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Beijing, China, 2019, pp. 1-7.

38. D. Erickson, "The beacon OpenFlow controller", *Proc. 2nd ACM SIGCOMM Workshop Hot Topics Softw. Defined Netw.*, pp. 13-18, 2013.

39. A. Tootoonchian, S. Gorbunov, Y. Ganjali, M. Casado and R. Sherwood, "On controller performance in software-defined networks", *2nd USENIX Workshop Hot Topics Manage. Internet Cloud Enterprise Netw. Services*, 2012.

40. M. Alsaedi, M. M. Mohamad and A. A. Al-Roubaiey, "Toward Adaptive and Scalable OpenFlow-SDN Flow Control: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107346-107379, 2019.

41. W. Braun and M. Menth, "Software-defined networking using OpenFlow: Protocols applications and architectural design choices", *Future Internet*, vol. 6, no. 2, pp. 302-336, 2014.

42. Nam, H., Kim, K.-H., Kim, J. Y., & Schulzrinne, H. (2014). Towards QoE-aware video streaming using SDN. *2014 IEEE Global Communications Conference*.
43. Medvetskyi, M., Beshley, M., & Klymash, M. (2021). A quality of experience management method for intent-based software-defined networks. *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*.
44. Daengsi, T., & Wuttidittachotti, P. (2023). QoE modeling for voice over IP: Simplified E-model enhancement utilizing the subjective MOS prediction model. In *arXiv [cs.MM]*. <http://arxiv.org/abs/2312.15239>
45. *Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ): An objective method for end to end speech quality assessment of narrow band telephone networks and speech codecs*. (n.d.).
46. Shang, X., Liang, J., Wang, G., Zhao, H., Wu, C., & Lin, C. (2019). Color-sensitivity-based combined PSNR for objective video quality assessment. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology: A Publication of the Circuits and Systems Society*, 29(5), 1239–1250. <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2018.2836974>
47. Nithin, G. D., Yathis Kumar, D., Nithin, S., Sree Hari Nathan, K. S., & Gandhiraj, R. (2024). Network provisioning in SDN: Optimizing network resources for enhanced performance. *2024 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)*.
48. Shi, M., Huang, Y., Zhang, L., Jin, Z., & Zhang, Y. (2024). Wordle user prediction and analysis based on SARIMA algorithm, LSTM recurrent neural network, and XGBoost model. *2024 2nd International Conference on Mechatronics, IoT and Industrial Informatics (ICMIII)*, 616–620.
49. Deeban, N., & Bharathi, P. S. (2023). A robust and efficient traffic analysis for 5G network based on hybrid LSTM comparing with XGBoost to improve accuracy. *2023 International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Discovery in Concurrent Engineering (ICECONF)*.

50. Wassie, G., Ding, J., & Wondie, Y. (2023). Traffic prediction in SDN for explainable QoS using deep learning approach. *Scientific Reports*, 13(1), 20607. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46471-8>
51. Wumian, W., Saha, S., Haque, A., & Sidebottom, G. (2024). Intelligent routing algorithm over SDN: Reusable reinforcement learning approach. In *arXiv [cs.NI]*. <http://arxiv.org/abs/2409.15226>
52. Pencheva, E., Atanasov, I., & Asenov, I. (2020). Toward Network Intellectualization in 6G. *2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*.
53. Medha N Kulkarni Jagdish W Bakal. (2025). Quality of service in software defined network: Leveraging OpenFlow protocol. *Journal of Information Systems Engineering & Management*, 10(30s), 309–315. <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i30s.4836>
54. Valuiskyi, S. V., Lysenko, O. I., & Hiruk, D. O. (2025). Load balancing method in sdn networks based on openflow. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 1(1), 51–58. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/08>
55. Al Ahmad, M., Diab, M., & Patra, S. S. (2023). Analysis and performance evaluation of OpenFlow controller in SDN using N-policy. *2023 International Conference on Recent Advances in Science and Engineering Technology (ICRASET)*.
56. Luay, M., Layeghy, S., Hosseininoorbin, S., Sarhan, M., Moustafa, N., & Portmann, M. (2025). Temporal analysis of NetFlow datasets for network intrusion detection systems. In *arXiv [cs.LG]*. <http://arxiv.org/abs/2503.04404>
57. Shin, K. S., Jung, J. H., Cheon, J. Y., & Choi, S. B. (2007). Real-time network monitoring scheme based on SNMP for dynamic information. *Journal of Network and Computer Applications*, 30(1), 331–353. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2005.07.002>

58. Pandey, S., Choi, M.-J., Won, Y. J., & Won-Ki Hong, J. (2011). SNMP-based enterprise IP network topology discovery. *International Journal Network Management*, 21(3), 169–184. <https://doi.org/10.1002/nem.756>
59. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, А.І. Прислупський “Метод управління якістю сприйняття послуг для програмно-конфігурованих мереж заснованих на намірах,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 1, № 1, P. 76–85, 2021.
60. Su Khin, C., Thandar Kyaw, A., Myint Maw, M., & Zin Oo, M. (2022). Reducing packet-in messages in OpenFlow networks. *ECTI Transactions on Electrical Eng. / Electronics and Communications*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.37936/ecti-eee.2022201.244944>
61. Liao, L., & Leung, V. C. M. (2016). LLDP based link latency monitoring in software defined networks. *2016 12th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*.
62. Lancaric, V., Galinski, M., & Kotuliak, I. (2020). Direct data flow bandwidth evaluation in SDN environment. *2020 International Symposium ELMAR*.
63. Wang, H., Mi, H., Lv, H., Zhang, Z., & Chen, C. (2024). ReDL: Universal representation of time delay in URLLC scenarios. *2024 IEEE International Conference on Machine Learning for Communication and Networking (ICMLCN)*, 421–427.
64. Zeng, W., Fan, J., Li, J., & Xiao, R. (2024). 5G uRLLC service delay analysis and wireless network deployment scheme. In *Lecture Notes in Electrical Engineering* (pp. 417–424). Springer Nature Singapore.
65. Zhang, Y., Wang, S., Zio, E., Zhang, C., Dui, H., & Chen, R. (2025). Model-guided system operational reliability assessment based on gradient boosting decision trees and dynamic Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 259(110949), 110949. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110949>

66. Xu, F., Huang, Y., Wang, H., & Fan, Z. (2025). A novel heterogeneous data classification approach combining gradient boosting decision trees and hybrid structure model. *Pattern Recognition*, 165(111614), 111614. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2025.111614>
67. Wang, M.-H., Hsieh, T.-S., Tseng, Y.-Y., & Chi, P.-W. (2024). An SDN-driven reliable transmission architecture for enhancing real-time video streaming quality. *IEEE Multimedia*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/mmul.2023.3326835>
68. An, C., Zhang, H., Kang, J., Liu, Z., Zhou, A., Liu, L., & Ma, H. (2025). Enhancing QoE of adaptive video streaming by generating fine-grained throughput. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology: A Publication of the Circuits and Systems Society*, 35(4), 3853–3866. <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2024.3508262>
69. Beshley, M., Kryvinska, N., Beshley, H., Medvetskyi, M., & Barolli, L. (2021). Centralized QoS routing model for delay/loss sensitive flows at the SDN-IoT infrastructure. *Computers, Materials & Continua*, 69(3), 3727–3748. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.018625>
70. Wang, L., Durning, A., & Delaney, D. T. (2022). ML-based video streaming QoE modeling with E2E and link metrics. *2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*.
71. APSNR) for Objective Video Quality Measurement (VQM) in video stream over wireless and mobile network. (n.d.).
72. Y. A. Syahbana, Herman, A. A. Rahman and K. A. Bakar, "Aligned-PSNR (APSNR) for Objective Video Quality Measurement (VQM) in video stream over wireless and mobile network," *2011 World Congress on Information and Communication Technologies*, Mumbai, India, 2011, pp. 330-335, doi: 10.1109/WICT.2011.6141267.
73. Wang, C., Yuan, L., Medvetskyi, M., Beshley, M., Pryslupskyi, A., & Beshley, H. (2021). Machine learning-enabled software-defined networks for QoE

management. *2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*.

74. М.І. Бешлей, А.І. Прислупський, М.Б. Медвецький, Г.В. Бешлей “Інтелектуальна система моніторингу та аналізу трафіку для виявлення атак у програмно-конфігурованих мережах,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 2, № 1, P. 1–11, 2022.

75. Ram, A., Dutta, M. P., & Chakraborty, S. K. (2024). A flow-based performance evaluation on RYU SDN controller. *Journal of The Institution of Engineers (India) Series B*, 105(2), 203–215. <https://doi.org/10.1007/s40031-023-00982-0>

76. Romanov, O. I., & Burlaka, H. Y. (2023). SDN NETWORK MANAGEMENT USING RYU CONTROLLER. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 5, 59–69. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/11>

77. Naik, D. R., Ghonge, V. D., Thube, S. M., Khadke, A., Mali, Y. K., & Borate, V. K. (2024). Software-defined-storage performance testing using mininet. *2024 IEEE International Conference on Information Technology, Electronics and Intelligent Communication Systems (ICITEICS)*, 8, 1–5.

78. Sahu, H., Tiwari, R., & Kumar, S. (2022). SDN-based traffic monitoring in data center network using floodlight controller. *International journal of intelligent information technologies*, 18(3), 1–13. <https://doi.org/10.4018/ijit.309590>

79. Beshley, M., Kryvinska, N., Beshley, H., Panchenko, O., & Medvetskyi, M. (2024). Traffic engineering and QoS/QoE supporting techniques for emerging service-oriented software-defined network. *Journal of Communications and Networks*, 26(1), 99–114. <https://doi.org/10.23919/jcn.2023.000065>

80. Brito-Pacheco, C., Brito-Loeza, C., & Martin-Gonzalez, A. (2020). A regularized logistic regression based model for supervised learning. *Journal of*

Algorithms & Computational Technology, 14, 174830262097153.
<https://doi.org/10.1177/1748302620971535>

81. Wang, L., Wu, X., & Delaney, D. T. (2024). QoE-oriented routing mixing application KPIs and link metrics through machine learning. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 12, 101066–101080.
<https://doi.org/10.1109/access.2024.3390577>

82. Beshley, M., Kryvinska, N., & Beshley, H. (2023). Quality of service management method in a heterogeneous wireless network using Big Data technology and mobile QoE application. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 127(102771), 102771. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102771>

83. Beshley, M., Kryvinska, N., Seliuchenko, M., Beshley, H., Shakshuki, E. M., & Yasar, A.-U.-H. (2020). End-to-end QoS “smart queue” management algorithms and traffic prioritization mechanisms for narrow-band Internet of Things services in 4G/5G networks. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(8), 2324.
<https://doi.org/10.3390/s20082324>

84. Zhang, X., Dong, P., Du, X., Zhang, Y., Zhang, H., & Guizan, M. (2021). Study on characteristics of metric-aware multipath algorithms in real heterogeneous networks. *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*.

85. Ke, C.-H., Chen, Y.-S., & Yu, Y.-S. (2017). Improving video transmission in software defined wired and wireless networks using multi-path transmission. *Journal of Communications and Networks*, 19(6), 587–595.
<https://doi.org/10.1109/jcn.2017.000099>

86. M. Beshley, M. Medvetskyi, S. Jun, A. Pryslupskyi, Y. Bobalo and H. Beshley, "QoE-Aware Intelligent Handover Method for Intent-Based Software-Defined Wireless Network," *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 534-538, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767075.

87. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, А.І. Прислупський, Г.В. Бешлей “Метод ініціації хендоверу в програмно-конфігурованій безпроводній мережі на основі показника якості сприйняття послуг,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 1, № 2, P. 1–10, 2021.

88. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, Г.В. Бешлей “Підвищення якості сприйняття відео в безпроводних програмно-конфігурованих мережах з використанням мультипідключення,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 3, № 2, P. 1–10, 2023.

89. Nguyen, D. C., Ding, M., Pathirana, P. N., Seneviratne, A., Li, J., Niyato, D., Dobre, O., & Poor, H. V. (2022). 6G internet of things: A comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(1), 359–383. <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3103320>

90. H. Yu, M. Shokrnezhad, T. Taleb, R. Li and J. Song, "Toward 6G-Based Metaverse: Supporting Highly-Dynamic Deterministic Multi-User Extended Reality Services," in *IEEE Network*, vol. 37, no. 4, pp. 30-38, July/August 2023, doi: 10.1109/MNET.004.2300101.

91. Klymash, M., Lavriv, O., Maksymyuk, T., & Beshley, M. (2016). State of the art and further development of information and communication systems. *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*.

92. Beshley, H., Kyryk, M., Beshley, M., & Panchenko, O. (2018). Method of information flows engineering and resource distribution in 4G/5G heterogeneous network for M2M service provisioning. *2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*.

93. Klymash, M., Seliuchenko, M., Beshley, M., & Redchuk, S. (2015). Increasing wavelengths utilization efficiency in OTNoDWDM network based on

local resource distribution method. *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*.

94. M. Klymash, R. Savchuk, P. Pozdnyakov and M. Beshley, "The researching and modeling of structures of mobile networks for providing of multiservice radio access," *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv, UKraine, 2012, pp. 281-282.

95. M. Klymash, M. Beshley and V. Koval, "The model of prioritization of services for efficient usage of multiservice network resources," *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv, UKraine, 2012, pp. 320-321.

96. Beshley, M., Romanchuk, V., Chervenets, V., & Masiuk, A. (2016). Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization. *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*.

97. Beshley, M., Klymash, M., Scherm, I., Beshley, H., Shkoropad, Y. (2023). Emerging Network Technologies for Digital Transformation: 5G/6G, IoT, SDN/IBN, Cloud Computing, and Blockchain. In: Klymash, M., Luntovskyy, A., Beshley, M., Melnyk, I., Schill, A. (eds) *Emerging Networking in the Digital Transformation Age*. TCSET 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 965. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_1

98. Bhat, J. R., & Alqahtani, S. A. (2021). 6G ecosystem: Current status and future perspective. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 9, 43134–43167. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3054833>

99. Abdulqadder, I. H., & Zhou, S. (2022). SliceBlock: Context-aware authentication handover and secure network slicing using DAG-blockchain in edge-assisted SDN/NFV-6G environment. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(18), 18079–18097. <https://doi.org/10.1109/jiot.2022.3161838>

100. H. Beshley, M. Beshley, M. Medvetskyi, and J. Pyrih, "QoS-Aware Optimal Radio Resource Allocation Method for Machine-Type Communications in 5G LTE and beyond Cellular Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1–18, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/9966366>.

101. M. Medvetskyi, M. Beshley, I. Scherm, O. Urikova, H. Beshley and T. Dierkes, "SDN-Based 6G Video Content Delivery Technique via Multi-Path Routing, Multi-Server Architecture and Multi-Connectivity," *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2024, pp. 169-173, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755875.

102. "7 6G QoE for Video and TV Applications," in *6G Enabling Technologies New Dimensions to Wireless Communication*, River Publishers, 2022, pp.131-154.

103. Lan, Y., Geng, Y., Rui, L., & Xiong, A. (2012). Video quality assessment and QoE-driven adjustment scheme in wireless networks. *2012 IEEE 14th International Conference on Communication Technology*.

104. Anand, D., Togou, M. A., & Muntean, G.-M. (2022). A machine learning solution to mitigate co-tier interference and improve QoE for video delivery in 5G HetNets. *2022 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*.

105. Imaduddin, M. F., Putrada, A. G., & Karimah, S. A. (2021). Multipath TCP scheduling performance analysis and congestion control on video streaming on the MPTCP network. *2021 International Conference on Software Engineering & Computer Systems and 4th International Conference on Computational Science and Information Management (ICSECS-ICOCSIM)*.

106. M. Beshley, V. Kochan, H. Beshley, M. Medvetskyi, I. Kahalo and Y. Shkoropad, "QoS-Coordinated Adaptive Spectrum Management Method for Coexistence 5G-U and Wi-Fi Networks with Short-Term Channel Failures," *2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of*

CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland, 2023, pp. 22-26, doi: 10.1109/CADSM58174.2023.10076520.

107. Fontes, R. R., Afzal, S., Brito, S. H. B., Santos, M. A. S., & Rothenberg, C. E. (2015). Mininet-WiFi: Emulating software-defined wireless networks. *2015 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*.

108. Vujošević, D., Bojović, P. D., Šuh, J., Martić, G., & Bojović, Ž. (2022). The course on modern 5G/6G networks: A step toward understanding a flexible network core. *Computer Applications in Engineering Education*. <https://doi.org/10.1002/cae.22584>

109. Huo, L., Jiang, D., & Lv, Z. (2022). A software-defined networks-based measurement method of network traffic for 6G technologies. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33(4). <https://doi.org/10.1002/ett.4172>

110. A.Lozynsky, I. Romanyshyn, B. Rusyn, M. Beshley, Mykhailo Medvetskyi, and Danylo Ivantyshyn, "Advances in Data Reduction Techniques to Solve Power Spectrum Estimation Problems for Emerging Wireless Networks," *Lecture notes in electrical engineering*, pp. 585–601, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_34.

111. Z. Mingming, M. Medvetskyi, M. Beshley and H. Beshley, "QoE-Aware Fusion Technique of Multi-Path Video Transmission and Multi-Connection for Software-Defined 5G/6G Networks," *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2023, pp. 52-57, doi: 10.1109/AICT61584.2023.10452705.

Додаток А. Акти впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор
ТзОВ «Телекомунікаційна компанія»
Пентак І.М.
«04» квітня 2025 р.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Медвецького Михайла Богдановича
«Підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття
послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах»

Даний акт складений про те, що у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» для підвищення рівня якості сприйняття відеоконтенту в телекомунікаційній мережі використала результати дисертаційної роботи Медвецького М.Б. «Підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме:

- метод доставки відеоконтенту в програмно-конфігурованих мережах, який, на відміну від відомих, забезпечує адаптивний розподіл потоків між декількома маршрутами з урахуванням QoS-параметрів каналів, прогнозування пропускної здатності та замовленого рівня QoE сервісу, а також реалізує одночасне підключення до кількох точок доступу або серверів доставки контенту, що дало змогу підвищити ефективність використання ресурсів та якість сприйняття послуг.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ «Телекомунікаційна компанія», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 2%.

Головний інженер



Рубаха І.М.



ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

доц. Олег ДАВИДЧАК

04 " 03 2021р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів
дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Медвецького Михайла Богдановича

Цей акт складений комісією у складі завідувача кафедри ІКТ, д.т.н., проф. Михайла КЛИМАША, д.т.н., доц., доцент кафедри ІКТ Тараса МАКСИМЮКА, д.т.н., проф., професора кафедри ІКТ Мар'яна КИРИКА, д.т.н., доц., професора кафедри ІКТ Миколи БЕШЛЕЯ, про те, що результати дисертаційної роботи Медвецького Михайла Богдановича на тему «Підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах», представлені на здобуття наукового ступеня доктора філософії, використовуються у навчальному процесі кафедри «Інформаційно-комунікаційних технологій» Національного університету «Львівська політехніка».

Матеріали дисертаційного дослідження використовуються під час викладання дисципліни «Мережеві інформаційно-комунікаційні технології» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології». Зокрема, модернізовано лабораторну роботу №4 «Дослідження якості передачі відеопотоку у віртуальних SDN мережах», у якій використано запропоновані у роботі алгоритми оцінки QoE на основі показників PSNR, APSNR, PESQ, MOS, що дало змогу об'єктивно оцінити якість сприйняття відео- й аудіопотоків кінцевими користувачами в програмно-конфігурованих мережах

Також матеріали дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес під час викладання навчальної дисципліни «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» освітньо-наукової програми «Телекомунікації та радіотехніка». Зокрема, було модернізовано лабораторну роботу №9 «Експериментальне дослідження якості голосового зв'язку гетерогенної мережі VoLTE/VoWi-Fi в Україні», у якій впроваджено моделі машинного навчання для прогнозування показників QoE та адаптивного вибору інтервалу моніторингу. Застосування зазначених моделей дозволило зменшити службове навантаження на мережу та підвищити чутливість до змін у якості сприйняття послуг.

Голова комісії:
завідувач кафедри ІКТ, д.т.н., проф.

Михайло КЛИМАШ

Члени комісії:

доцент кафедри ІКТ, д.т.н., доц.

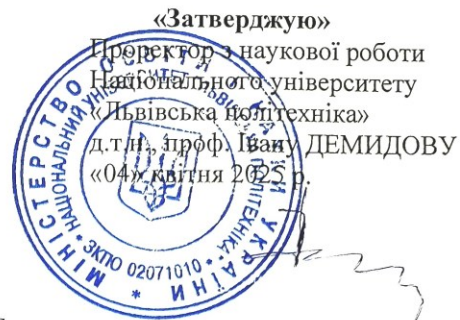
Тарас МАКСИМЮК

професор кафедри ІКТ, д.т.н., проф.

Мар'ян КИРИК

професор кафедри ІКТ, д.т.н., доц.

Микола БЕШЛЕЙ



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Медвецького Михайла Богдановича на тему «Підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах».

Комісія у складі начальника науково-дослідної частини, д.т.н., Небесного Р.В., В.О. начальника планово-фінансового відділу Фаст І.І., завідувача кафедри інформаційно-комунікаційних технологій, д.т.н., проф. Климаша М.М., склала цей акт у тому, що у держбюджетних науково-дослідних роботах:

- «Розроблення інноваційних методів та моделей побудови індустріально-орієнтованих інформаційно-комунікаційних систем для модернізації цифрових інфраструктур промисловості» (№ держреєстрації 0122U000817) (2022-2024 рр.) – основний виконавець;
- «Стратегічні напрямки, методи і засоби цифровізації та інтелектуалізації енергетичних систем з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій» (2023-2025 рр.) – учасник; (№держреєстрації 0123U101692);
- «Розробка методів і засобів побудови мобільних кіберфізичних систем із штучним інтелектом для соціальних, безпекових та оборонних завдань» (№держреєстрації 0125U000645) (2025-2027 рр.). – основний виконавець.

Використано наступні результати дисертаційної роботи Медвецького Михайла Богдановича на тему «Підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах»:

- метод інтелектуального моніторингу стану програмно-конфігурованої мережі, що забезпечує адаптацію інтервалу моніторингу з урахуванням навантаження мережі;
- метод інтелектуальної QoE-маршрутизації, що забезпечує вибір оптимального шляху передавання даних з урахуванням прогнозованої якості сприйняття послуг;
- метод доставки відеоконтенту на основі багатошляхової маршрутизації для покращення показників QoE сервісу.

Члени комісії:


Роман НЕБЕСНИЙ

Ірина ФАСТ

Михайло КЛИМАШ

**Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості
про апробацію результатів дисертації**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. H. Beshley, M. Beshley, M. Medvetskyi, and J. Pyrih, “QoS-Aware Optimal Radio Resource Allocation Method for Machine-Type Communications in 5G LTE and beyond Cellular Networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1–18, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/9966366>. (Scopus/Web of Science Q2).

2. M. Beshley, N. Kryvinska, H. Beshley, M. Medvetskyi, and L. Barolli, “Centralized QoS Routing Model for Delay/Loss Sensitive Flows at the SDN-IoT Infrastructure,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 69, no. 3, pp. 3727–3748, 2021. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.018625>. (Scopus/Web of Science Q1).

3. M. Beshley, N. Kryvinska, H. Beshley, O. Panchenko and M. Medvetskyi, "Traffic engineering and QoS/QoE supporting techniques for emerging service-oriented software-defined network," in *Journal of Communications and Networks*, vol. 26, no. 1, pp. 99-114, Feb. 2024, doi: 10.23919/JCN.2023.000065. (Scopus/Web of Science Q1).

4. A. Lozynsky, I. Romanyshyn, B. Rusyn, M. Beshley, Mykhailo Medvetskyi, and Danylo Ivantyshyn, “Advances in Data Reduction Techniques to Solve Power Spectrum Estimation Problems for Emerging Wireless Networks,” *Lecture notes in electrical engineering*, pp. 585–601, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_34. (Scopus Q4).

5. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, А.І. Прислупський, Г.В. Бешлей “Метод ініціації хендоверу в програмно-конфігурованій безпроводній мережі на основі показника якості сприйняття послуг,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 1, № 2, P. 1–10, 2021.

6. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, А.І. Прислупський “Метод управління якістю сприйняття послуг для програмно-конфігурованих мереж заснованих на намірах,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 1, № 1, P. 76–85, 2021.

7. М.І. Бешлей, А.І. Прислупський, М.Б. Медвецький, Г.В. Бешлей “Інтелектуальна система моніторингу та аналізу трафіку для виявлення атак у програмно-конфігурованих мережах,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 2, № 1, P. 1–11, 2022.

8. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, Г.В. Бешлей “Підвищення якості сприйняття відео в безпроводних програмно-конфігурованих мережах з використанням мультипідключення,” *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, Vol. 3, № 2, P. 1–10, 2023.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. M. Medvetskyi, M. Beshley and M. Klymash, "A Quality of Experience Management Method For Intent-Based Software-Defined Networks," *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Lviv, Ukraine, 2021, pp. 59-62, doi: 10.1109/CADSM52681.2021.9385250.

10. C. Wang, L. Yuan, M. Medvetskyi, M. Beshley, A. Pryslupskyi and H. Beshley, "Machine Learning-Enabled Software-Defined Networks for QoE Management," *2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, 2021, pp. 234-238, doi: 10.1109/AICT52120.2021.9628961.

11. M. Beshley, M. Medvetskyi, S. Jun, A. Pryslupskyi, Y. Bobalo and H. Beshley, "QoE-Aware Intelligent Handover Method for Intent-Based Software-

Defined Wireless Network," *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 534-538, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767075.

12. M. Beshley, V. Kochan, H. Beshley, M. Medvetskyi, I. Kahalo and Y. Shkoropad, "QoS-Coordinated Adaptive Spectrum Management Method for Coexistence 5G-U and Wi-Fi Networks with Short-Term Channel Failures," *2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Jaroslaw, Poland, 2023, pp. 22-26, doi: 10.1109/CADSM58174.2023.10076520.

13. Z. Mingming, M. Medvetskyi, M. Beshley and H. Beshley, "QoE-Aware Fusion Technique of Multi-Path Video Transmission and Multi-Connection for Software-Defined 5G/6G Networks," *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2023, pp. 52-57, doi: 10.1109/AICT61584.2023.10452705.

14. M. Medvetskyi, M. Beshley, I. Scherm, O. Urikova, H. Beshley and T. Dierkes, "SDN-Based 6G Video Content Delivery Technique via Multi-Path Routing, Multi-Server Architecture and Multi-Connectivity," *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine