

Голові разової спеціалізованої
вченої ради
Національного університету
«Львівська політехніка»
д. т. н., проф. Кочану О.В.

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора Політанського Руслана Леонідовича
на дисертаційну роботу Медвецького Михайла Богдановича

***" Підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття
послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах ",***
подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

1. Оцінка актуальності теми дисертаційної роботи

У сучасних умовах стрімкого розвитку цифрових послуг та широкомасштабного розгортання телекомунікаційних мереж нового покоління (5G і 6G) надзвичайної актуальності набувають питання забезпечення стабільної та високої якості обслуговування кінцевих користувачів. Класичні підходи до управління якістю в мережах, які базуються на параметрах QoS (Quality of Service), не завжди здатні адекватно відображати задоволеність користувачів. Це особливо критично в умовах сервісів реального часу (відеоконференції, VoIP, стрімінгове відео), де навіть незначні затримки, втрати або зміни пропускну здатності можуть призвести до суттєвого зниження якості досвіду (QoE, Quality of Experience).

Збільшення кількості мобільних пристроїв, мультисервісних додатків та кількості одночасно активних з'єднань викликає необхідність у динамічному, адаптивному управлінні мережею. Водночас традиційні телекомунікаційні інфраструктури не мають достатньої гнучкості, а їхнє управління переважно виконується вручну або на основі заздалегідь налаштованих політик. Програмно-конфігуровані мережі (SDN), у свою чергу, відкривають можливості централізованого управління мережею з доступом до глобального стану, що дозволяє реалізувати інтелектуальні механізми маршрутизації, моніторингу і розподілу ресурсів.

У цьому контексті особливу цінність має інтеграція сучасних методів машинного навчання (ML) у процеси управління SDN, зокрема – прогнозування QoE та адаптивне коригування маршрутів або інтервалів телеметрії. Проте питання комплексної побудови таких систем, які одночасно враховують обмеженість ресурсів, тип сервісу, навантаження на контролер та динамічність середовища, досі залишаються відкритими. Саме на вирішення цієї проблеми спрямовано дисертаційне дослідження М. Б. Медвецького, в якому розглянуто підвищення ефективності використання мережевих ресурсів та якості сприйняття послуг у програмно-конфігурованих мережах за допомогою адаптивного інтелектуального моніторингу та QoE-орієнтованої маршрутизації. Таким чином, тематика

дисертаційної роботи є надзвичайно актуальною як з теоретичної, так і з прикладної точки зору, та повною мірою відповідає сучасним науково-технічним викликам у сфері телекомунікацій і комп'ютерних мереж.

2. Аналіз змісту роботи.

Дисертаційна робота пропонує комплекс інтелектуальних методів для підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах, що має значне практичне значення.

У вступі наведено загальну характеристику теми дослідження, в якій обґрунтовано актуальність задачі підвищення якості сприйняття (QoE) в сучасних програмно-конфігурованих мережах з урахуванням обмежених ресурсів та динамічних умов функціонування. Описано проблеми традиційних підходів до управління якістю обслуговування, які базуються на статичних QoS-механізмах, і визначено необхідність переходу до адаптивних моделей із використанням інтелектуальних технологій.

У **першому розділі** виявлено, що традиційні мережі зі статичною архітектурою та ручним конфігуруванням обмежують адаптивність та здатність до оперативного реагування на зміну мережових умов. Обґрунтовано перехід до SDN як технологічного підґрунтя для реалізації гнучких, адаптивних моделей управління мережовим трафіком. Підкреслено, що існуючі SDN-реалізації часто використовують фіксовані інтервали збору телеметрії, що призводить до затримок у реакції на деградацію сервісу або надмірного навантаження, а також мають обмежені механізми багатошляхової маршрутизації та одночасного обслуговування користувача декількома точками доступу. Розділ ефективно висвітлює практичні недоліки існуючих мережових архітектур, створюючи чітке обґрунтування для розробки нових, більш адаптивних та інтелектуальних рішень, що є критично важливим для практичного застосування.

У **другому розділі** запропоновано концептуальну модель інтелектуального управління QoE, що базується на централізованому SDN-контролері та інтегрує три основні методи: інтелектуальний моніторинг, адаптивну QoE-маршрутизацію та багатошляхову маршрутизацію. Метод інтелектуального моніторингу дозволяє динамічно змінювати інтервал збору мережових параметрів, що знижує навантаження на контролер та канали управління, не втрачаючи актуальності даних. 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. Запропоновані методи є чітко орієнтованими на практичне застосування, пропонуючи конкретні механізми (динамічний моніторинг, QoE-маршрутизація) для вирішення реальних проблем мережевого управління та підвищення задоволеності користувачів. Концептуальна модель є не просто теоретичною схемою, а дорожньою картою для реалізації, де кожен запропонований метод має чітку необхідність.

У **третьому розділі** проведено об'єктивне оцінювання якості відео (APSNR) та VoIP (PESQ) трафіку, виявлено сильну залежність QoE від параметрів QoS (затримки, втрат пакетів, пропускної здатності). Досліджено 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%). Це підкреслює

необхідність балансування між точністю моніторингу та стабільністю мережевої інфраструктури. Реалізовано регресійні моделі машинного навчання (Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost) для прогнозування QoE, з високою точністю. Експериментально показано, що метод інтелектуальної QoE-маршрутизації на 42% перевищує ефективність відомого методу, що підтверджується аналізом кумулятивної функції розподілу (CDF).

У **четвертому розділі** 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). Впроваджено механізм балансування навантаження на фізичних комутаторах Zodiac GX та Zodiac FX за допомогою групових таблиць OpenFlow, забезпечивши рівномірний розподіл відеопотоку зі швидкістю 10 Мбіт/с двома маршрутами. Перехід від моделювання в Mininet до практичної реалізації на фізичних SDN-комутаторах Zodiac GX та FX є значним досягненням, що підтверджує життєздатність та масштабованість запропонованих рішень у реальному апаратному середовищі. Це свідчить про глибоку проробку імплементаційних аспектів та готовність рішень до реального застосування.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, наданих в дисертації, їхня достовірність

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, представлених у дисертації, забезпечуються ретельним та багатогранним підходом до дослідження. Дисертантом використано широкий спектр методів, що охоплюють як теоретичні основи (теорія ймовірностей, математична статистика, теорія систем масового обслуговування, комбінаторний аналіз), так і сучасні інженерні підходи (імітаційне моделювання, об'єктно-орієнтоване програмування, машинне навчання, експертне оцінювання, аналіз часових рядів). Такий комплексний методологічний апарат дозволяє всебічно дослідити проблему та забезпечити високий рівень довіри до отриманих результатів.

Достовірність отриманих результатів підтверджена кількома ключовими аспектами. По-перше, здійснено ретельну експериментальну валідацію, яка включала як моделювання в емуляційних середовищах (Mininet, Mininet-Wi-Fi), так і практичну реалізацію та тестування на реальному мережевому обладнанні – SDN-комутаторах Zodiac GX та Zodiac FX. Ця двоступенева валідація, що включає перехід від симуляції до реального апаратного забезпечення, є критично важливою для підтвердження життєздатності та масштабованості запропонованих рішень у реальних умовах. По-друге, практична цінність та достовірність результатів додатково засвідчені актами впровадження у навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» та в телекомунікаційній мережі ТОВ «Телекомунікаційна компанія». По-третє,

матеріали дисертації пройшли апробацію на 5 міжнародних науково-технічних конференціях, що свідчить про їх обговорення та визнання в широкій науковій спільноті.

4. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Наукова новизна роботи полягає у розробці та вдосконаленні методів, що дозволяють підвищити ефективність використання ресурсів та якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах:

1. Вперше розроблено метод інтелектуального моніторингу стану функціонування програмно-конфігурованих мереж, який використовує машинне навчання для прогнозування змін показників QoE та адаптивного коригування частоти моніторингу. Це дозволяє підвищити точність оцінки QoE, зменшити обсяг службового трафіку на 56,4% та своєчасно виявляти погіршення якості обслуговування.

2. Удосконалено метод інтелектуальної QoE-маршрутизації, який застосовує моделі машинного навчання для прогнозування значень QoE залежно від типу трафіку та параметрів QoS. Це забезпечує адаптивний вибір маршруту з урахуванням динаміки мережевого середовища, що призводить до 42% вищої ефективності порівняно з відомими підходами.

3. Набув подальшого розвитку метод доставки відеоконтенту в програмно-конфігурованих мережах, який забезпечує адаптивний розподіл потоків між декількома маршрутами з урахуванням QoS-параметрів каналів та прогнозування пропускної здатності, а також реалізує одночасне підключення до кількох точок доступу або серверів доставки контенту. Це дозволило підвищити ефективність використання ресурсів та якості сприйняття послуг, забезпечуючи стабільну якість відеопотоку із середнім значенням PSNR у межах 33–35 дБ, що на 4-8 дБ перевищує показники альтернативних підходів.

5. Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації повною мірою викладені у 14 наукових працях здобувача, опублікованих у провідних міжнародних та вітчизняних виданнях. Зокрема, наявність статей у високореєтингових наукометричних базах Scopus/Web of Science (Q1-Q2) свідчить про високий рівень наукової роботи та її визнання міжнародною спільнотою.

6. Відсутність порушення академічної доброчесності

Дисертація містить результати власних досліджень здобувача. Всі використані ідеї, результати та текстові фрагменти інших авторів належним чином посилаються на відповідні джерела. Підстав для сумнівів у науковій доброчесності здобувача під час детального ознайомлення з дисертаційною роботою не виявлено. Текст дисертації узгоджений з опублікованими науковими працями дисертанта, що свідчить про відсутність ознак фальсифікації.

7. Практичне значення результатів дисертаційного дослідження

1. Реалізація системи інтелектуального моніторингу QoS-параметрів дозволила зменшити обсяг службового трафіку на 56,4%. Це є значним досягненням, оскільки знижує навантаження на контролер та канали зв'язку, дозволяючи системі своєчасно виявляти погіршення QoE без перевантаження площини управління.

2. Запропонований метод інтелектуальної QoE-маршрутизації продемонстрував на 42% вищу ефективність порівняно з відомою ML-стратегією QoE-маршрутизації. Це означає, що система з більшою ймовірністю обирає маршрути, які забезпечують оптимальну якість сприйняття для кінцевого користувача, що є критично важливим для мультимедійних та інтерактивних сервісів.

3. Застосування моделей машинного навчання для прогнозування QoE та адаптивного вибору інтервалу моніторингу забезпечило до 17% виграшу у виборі найкращого шляху. Це дозволяє мережі проактивно реагувати на зміни, забезпечуючи стабільний та високий рівень QoE.

4. Розроблений метод доставки відеоконтенту, заснований на багатошляховій маршрутизації з одночасним обслуговуванням кількома точками доступу, забезпечив стабільну якість відеопотоку із середнім значенням PSNR у межах 33–35 дБ, що на 4-8 дБ перевищує показники альтернативних підходів. Це має прямий вплив на задоволеність користувачів відеосервісами.

8. Зауваження до дисертаційної роботи

1. У другому розділі, де пропонується концептуальна модель інтелектуальної мережі, дисертантом описано, що система збиратиме індивідуальні оцінки QoE користувачів конкретних сервісів. Проте у роботі недостатньо деталізовано, з якою частотою відбуватиметься такий збір індивідуальних оцінок QoE і чи не призведе такий підхід до значного зростання сигналізаційного навантаження на мережу, особливо для великої кількості користувачів.

2. Хоча дисертація успішно демонструє практичну реалізацію на комутаторах Zodiac GX та FX, було б корисно детальніше обговорити потенційні обмеження цих пристроїв у високопродуктивних реальних сценаріях. Зокрема, їхня максимальна пропускна здатність та обчислювальні можливості порівняно з комерційними SDN-рішеннями від великих виробників, що дозволило б краще оцінити масштабованість запропонованих методів для великих операторських мереж.

3. Дисертація надає порівняльний аналіз ефективності алгоритмів машинного навчання для прогнозування QoE (Таблиця 3.10). Було б корисно додатково проаналізувати, чому CatBoost та LightGBM демонструють кращі результати для VoIP та відео трафіку порівняно з Random Forest та XGBoost. Глибоке пояснення архітектурних особливостей цих моделей та їхньої взаємодії з характеристиками мережевих даних могло б посилити теоретичне обґрунтування вибору.

4. У розділі 4, де розглядається використання одночасного обслуговування користувача кількома точками доступу, було б доцільно розширити обговорення механізмів синхронізації та агрегації трафіку, що надходить з різних точок доступу. Зокрема, як забезпечується узгоджена доставка частин відеопотоку та мінімізуються проблеми, пов'язані з різними затримками або втратами на паралельних шляхах, щоб уникнути деградації QoE через асинхронність.

Дисертаційна робота Медвецького Михайла Богдановича є завершеною науково-практичною працею, що містить нові науково обґрунтовані результати, які мають суттєве значення для розвитку теорії та практики побудови інтелектуальних програмно-конфігурованих мереж. Всі наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертації, є обґрунтованими та достовірними, а їх практична цінність підтверджена експериментальними дослідженнями та актами впровадження. Робота відповідає вимогам «Паспорту» спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та вимогам постанови Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення про присудження ступеня доктора філософії».

З огляду на актуальність теми, наукову новизну, теоретичну та практичну цінність отриманих результатів, дисертаційна робота Медвецького Михайла Богдановича повністю відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
доктор технічних наук, професор,
професор по кафедрі
радіотехніки та інформаційної безпеки
Чернівецького національного
Університету ім. Юрія Федьковича



Руслан ПОЛІТАНСЬКИЙ

