

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

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, доцента Михалевського Дмитра Валерійовича
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

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та значне зростання вимог до якості послуг та сервісів у сучасних мережах на базі технологій 5G/6G та Інтернету речей, зумовлюють нагальну потребу у фундаментальному перегляді принципів побудови та управління теле- і інфокомунікаційними системами. Традиційні мережеві архітектури, що базуються на жорстко визначених маршрутах передавання даних та децентралізованому управлінні, є малоефективними в умовах динамічного трафіку мультимедійних потоків, обмежених ресурсів та високих вимог користувачів. Це призводить до перевантажень, затримок і зниження рівня обслуговування, що негативно позначається на задоволеності кінцевих користувачів.

У сучасному мережевому середовищі попит кінцевих користувачів все більше орієнтується на отримання послуги з високою якістю сприйняття, яка відображає суб'єктивне задоволення від сервісу QoE, на відміну від технічних показників якості обслуговування QoS. Це вимагає не лише технічних удосконалень, а й впровадження інтелектуальних механізмів, здатних передбачати та адаптуватися до суб'єктивного сприйняття користувачів.

Саме такими механізмами і є програмно-конфігуровані мережі (SDN), які створюють технологічне середовище для реалізації гнучкого, адаптивного та централізованого управління мережевим трафіком завдяки архітектурному створенню окремих програмованих поверхонь управління та пересилання даних. Однак, більшість поточних реалізацій програмно-конфігурованих мереж все ще мають обмеження, зокрема у сфері QoE-орієнтованого управління, застосування фіксованих інтервалів збору телеметрії та відсутність реалізованих механізмів багатошляхової маршрутизації та одночасного обслуговування користувача декількома точками доступу. Ці недоліки призводять до затримок у реакції на деградацію сервісу або надмірного навантаження на мережеву інфраструктуру через надлишковий службовий трафік.

Таким чином, у контексті зростаючої складності мереж та зростаючого навантаження, зумовленого новими сервісами та пристроями, виникає потреба у розробленні

інтелектуальних методів моніторингу та управління ресурсами, здатних передбачати зміну якості сприйняття та адаптувати маршрутизацію відповідно до поточного та прогнозованого стану мережі.

Саме тому, дисертаційна робота Медвецького М.Б. є актуальною, оскільки розв'язує науково-технічне завдання підвищення показників якості сприйняття послуг в програмно-конфігурованих мережах враховуючи як технічні показники так і користувацько-орієнтовані. Це вимагає не лише технічних удосконалень, а й розробку інтелектуальних механізмів, здатних передбачати та адаптуватися до суб'єктивного сприйняття користувачів, що є ключовим для успіху сервісів нового покоління.

2. Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота Медвецького Михайла Богдановича виконувалась у відповідності до наукового напрямку кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка», а саме «Інфокомунікаційні системи та мережі». Зокрема робота виконувалась в межах 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.).

3. Аналіз змісту роботи.

Дисертаційна робота має загальний обсяг 218 аркушів, містить 4 розділи та 2 додатки. Всі подані матеріали цілком відповідають чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт.

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** проведено глибокий аналіз сучасного стану телекомунікаційних мереж, виявлено основні обмеження традиційних підходів до забезпечення якості обслуговування та якості сприйняття послуг. Дисертантом встановлено, що традиційні IP-мережі характеризуються статичною архітектурою з децентралізованою системою керування, жорсткою залежністю від фізичного мережевого обладнання та потребою в ручному конфігуруванні, що суттєво обмежує адаптивність, гнучкість масштабування та здатність до оперативного реагування. Обґрунтовано доцільність використання програмно-конфігурованих мереж, які, завдяки централізованому контролю та абстракції рівня управління, створюють технологічне підґрунтя для реалізації гнучких, адаптивних моделей управління мережевим трафіком і якістю обслуговування. Виявлено недоліки, які вказують що у більшості поточних реалізацій SDN 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 розділі визначено завдання вирішення проблем традиційних мереж та SDN та обґрунтовано необхідність розробки нових, гнучких та адаптивних моделей управління QoS/QoE, орієнтованих на кінцевого користувача та ефективне використання ресурсів, що демонструє зріле розуміння предметної області та обґрунтовує необхідність подальших наукових розробок.

У **другому розділі** 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 мережеских 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 та дозволяє мережі реагувати на погіршення якості сервісів. Застосування моделей машинного навчання, таких як LightGBM, продемонструвало високу точність прогнозування показників QoE на основі історичних даних мережі. Розроблено метод інтелектуальної QoE-маршрутизації, який передбачає використання прогнозованих значень QoE для вибору оптимальних маршрутів передачі трафіку.

У **третьому розділі** проведено об'єктивне оцінювання якості відео та VoIP-трафіку за метриками APSNR і PESQ відповідно. Встановлено залежність показників QoE від параметрів QoS. Зокрема, втрата навіть 2% пакетів знижувала оцінку відео з «Відмінно» до «Добре», а затримка понад 800 мс негативно впливала на кількість відновлених відеокадрів. 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%). Реалізовано регресійні моделі машинного навчання (Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost), здатні передбачати QoE на основі параметрів QoS, з найвищою точністю передбачення для VoIP та відео, продемонстрованою CatBoost і LightGBM ($MAE \approx 0,37$ для VoIP, $MAE \approx 0,21$ для Video). Експериментально показано, що метод інтелектуальної QoE-маршрутизації на 42% перевищує ефективність відомого рішення, що підтверджується аналізом кумулятивної функції розподілу (CDF).

У **четвертому розділі** 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). 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.

В додатку до роботи надано акти впровадження результатів та список наукових праць автора.

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

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, забезпечується коректним застосуванням широкого спектру методів дослідження. До них належать 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. Використання різноманітних методологічних підходів (від математичного моделювання до машинного навчання та реальних експериментів) забезпечує перехресну перевірку результатів та підвищує їхню надійність.

Достовірність отриманих результатів підтверджена результатами імітаційного моделювання, проведеного в середовищах Mininet та Mininet-Wi-Fi за допомогою експериментальних досліджень на реальному обладнанні – SDN-комутаторах Zodiac GX та Zodiac FX. Це є стандартом в інженерних дослідженнях та демонструє можливість застосування запропонованих рішень у реальному апаратному середовищі SDN мереж. Крім того, практична цінність та достовірність результатів засвідчені актами впровадження у навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» та в телекомунікаційній мережі ТОВ «Телекомунікаційна компанія». Матеріали дисертації пройшли апробацію на 5 міжнародних науково-технічних конференціях, що свідчить про їх визнання науковою спільнотою та обговорення на фахових заходах.

5. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Наукова новизна дисертаційної роботи чітко сформульована та обґрунтована, та полягає в наступному:

1. Вперше розроблено метод інтелектуального моніторингу стану функціонування програмно-конфігурованих мереж, який, на відміну від відомих 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. Це дозволило 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, пропускної здатності, затримки та втрат даних на маршрутах між джерелом і призначенням. Це дало змогу здійснювати адаптивний вибір маршруту з урахуванням нелінійних та комплексних взаємозв'язків між технічними

параметрами та суб'єктивним сприйняттям користувача, підвищуючи ефективність управління мережею та загальну задоволеність кінцевих користувачів.

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 пропускну здатності та замовленого рівня QoE сервісу, а також реалізує одночасне підключення до кількох точок доступу або серверів доставки контенту. Це дало змогу підвищити ефективність використання ресурсів та якість сприйняття послуг, особливо для ресурсоємних поточкових сервісів, забезпечуючи підвищену стійкість і адаптивність передачі в умовах нестабільних або перевантажених каналів зв'язку.

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

За результатами досліджень, викладених у дисертаційній роботі, опубліковано 14 наукових праць. З них 3 статті опубліковано 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 (Q4), 2 статті у наукових фахових виданнях України, та 2 статті у періодичному виданні України. Крім того, 6 праць опубліковано у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, індексованих у наукометричній базі Scopus та Web of Science. Публікаційна активність здобувача, особливо наявність статей у високореєтингових міжнародних наукометричних базах, свідчить про високий рівень наукової роботи та її визнання міжнародною спільнотою. Це підтверджує, що робота відповідає високим міжнародним стандартам, що є важливим показником її наукової новизни та значущості.

7. Відсутність порушення академічної доброчесності

Дисертація містить результати власних досліджень здобувача. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується посиланнями на відповідні джерела. Підстав для сумнівів у науковій доброчесності здобувача під час детального ознайомлення з дисертаційною роботою не виявлено. Узгодженість тексту дисертації з науковими працями дисертанта свідчить про відсутність ознак фальсифікації.

8. Практичне значення результатів дисертаційного дослідження

1. Реалізація системи інтелектуального моніторингу QoS-параметрів на всіх ділянках мережі, включно з навантаженням на CPU контролера та комутаторів, дозволила забезпечити гнучке управління мережею та зменшити обсяг службового трафіку на 56,4%. Це дає можливість своєчасному виявленню часових інтервалів погіршення QoE, що підвищило ефективність використання ресурсів та якість сприйняття послуг користувачами мережі.

2. Використання алгоритмів оцінки QoE на основі показників PSNR, APSNR, PESQ дозволило об'єктивно визначити рівень якості сприйняття мультимедійного трафіку кінцевими користувачами. Під час експериментальних досліджень, 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.

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. Це забезпечило точніше прийняття рішень щодо маршрутизації та дало змогу досягти до 17% виграшу у виборі найкращого шляху для забезпечення необхідного рівня QoE.

Результати дисертаційної роботи використано при формуванні навчальних дисциплін у Національному університеті «Львівська політехніка» та впроваджено з метою підвищення якості сприйняття послуг в телекомунікаційній мережі ТОВ «Телекомунікаційна компанія», що підтверджено актом впровадження.

9. Зауваження до дисертаційної роботи

1. У першому розділі, при аналізі сучасного стану телекомунікаційних мереж, було б доцільно розширити огляд архітектурних рішень, що пропонуються провідними виробниками (наприклад, Cisco, Juniper) для інтелектуальних мереж, зокрема в контексті Intent-Based Networking (IBN). Це дозволило б краще позиціонувати запропоновані рішення на тлі ширшого промислового ландшафту та показати їхні переваги та відмінності від традиційних мереж з точки зору якості надання послуг кінцевим користувачам.

2. Перший розділ, ст. 45. Поняття затримки, джиттер, втрата пакетів та пропускна здатність є загально відомими. Інформація про них є зайвою. Це ж саме стосується фрагментів програмного коду у розділі 3, що доцільно відобразити у додатках.

3. Розділ 2, ст. 84. З тексту не зовсім зрозуміло, що мається на увазі інтервали моніторингу від 10 хвилин до 1 години.

4. В розділі 2, було б корисно додатково проаналізувати масштабованість запропонованої інтелектуальної системи моніторингу для дуже великих мереж (наприклад, з сотнями або тисячами комутаторів). Зокрема, як адаптивний алгоритм поводитиметься в умовах, коли навіть рідкісне опитування може створювати значне навантаження на контролер або канали управління.

5. З тексту дисертації незрозуміло про проблему складності інтеграції штучного інтелекту на рівні контролера програмно-конфігурованої мережі та необхідної кількості обчислювальних ресурсів для якісного функціонування мережі.

6. При тестуванні впливу наднизького інтервалу моніторингу на завантаженість центрального процесора (Розділ 3), вказано інтервал для кожного експерименту 600 с. Чому саме таке значення і чим воно обґрунтоване? А також, яка достовірність отриманих даних при такому інтервалі? Можливо краще було встановити 1000 с.

7. При дослідженнях методу інтелектуальної QoE маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах використовувались ансамблеві методи машинного навчання. Чим обгрунтовано вибір саме цих методів нейронних мереж, зокрема на базі трансформера?

8. У розділі 4, при описі практичної реалізації методу доставки відеоконтенту, порівняння з "альтернативними рішеннями" (Рис. 4.12) є дещо узагальненим. Було б доцільно чітко вказати, які саме конкретні "альтернативні рішення" мають на увазі (наприклад, конкретні алгоритми маршрутизації або стратегії доставки), щоб забезпечити повну прозорість порівняльного аналізу.

9. У дисертації демонструється підвищення QoE для відео та VoIP трафіку та згадуються URLLC сервіси. Однак, було б доцільно розглянути застосування запропонованих методів до інших типів трафіку (наприклад, URLLC або доповненої/віртуальної реальності), де вимоги до затримки та надійності є більш жорсткими.

10. Загальні висновки

Дисертаційна робота Медвецького Михайла Богдановича є завершеною науково-практичною працею, що містить нові науково-обгрунтовані 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 обгрунтованими та достовірними, а їх практична цінність підтверджена експериментальними дослідженнями та актами впровадження.

Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», а також Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами), а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри інфокомунікаційних
систем і технологій
Вінницького національного
технічного університету



Дмитро МИХАЛЕВСЬКИЙ

Особистий підпис Дмитра МИХАЛЕВСЬКОГО засвідчую:
вчений секретар Вченої ради
Вінницького національного технічного університету,
к.т.н. доцент.



Інна ВІШТАК