



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Національного університету
"Львівська політехніка"

проф.

І.В. Демидов

" 04 " 2025 р.

Висновок

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації «Підвищення ефективності використання ресурсів та якості
сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих
мережах»**

здобувача ступеня доктора філософії за спеціальністю

172 Телекомунікації та радіотехніка

(галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації)

Михайла МЕДВЕЦЬКОГО

**міжкафедрального наукового семінару Інституту інформаційно-
комунікаційних технологій та електронної інженерії**

1. Актуальність теми дисертації

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, А. 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 пропускну 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.

2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Дисертаційна робота 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.).

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів .

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 авторові 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 зниження 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.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій підтверджуються коректним використанням апробованого математичного апарату, методів моделювання, різними способами виконання розрахунків; результатами проведених автором імітаційних комп'ютерних та реальних експериментів, відповідністю результатів моделювання (розрахунку) експериментальним результатам, їх зв'язком з існуючими результатами, отриманими із застосуванням відомих методів, а також порівняльним аналізом результатів дисертаційних досліджень із даними літературних джерел, результатами задокументованих апробацій.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

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.

6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

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>.
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>.
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.
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.
5. М.Б. Медвецький, М.І. Бешлей, А.І. Прислупський, Г.В. Бешлей "Метод ініціації хендверу 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, Р. 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, 2024, pp. 169-173, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755875.

7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

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 рр.). Крім того, дисертаційна робота в повному обсязі була представлена та обговорена на наукових семінарах кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню 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.

Наукове значення роботи полягає у розробленні методу інтелектуального моніторингу стану мережі в програмно-конфігурованих мережах; удосконаленні методу інтелектуальної QoE-маршрутизації та розвитку методу доставки відеоконтенту в програмно-конфігурованих мережах.

Результати дисертаційної роботи використано при формуванні навчальних дисциплін, що викладаються студентам (за навчальним планом) у навчальному процесі кафедри телекомунікацій 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».

9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані

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 кількох 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.

10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

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.

За структурою, мовою та стилем викладення дисертаційна робота відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України. Загалом дисертаційна робота написана грамотно, технічною мовою. Матеріали досліджень подано логічно, послідовно та доказово.

У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи

11. З урахуванням зазначеного, на міжкафедральному науковому семінарі Інституту інформаційно-комунікаційних технологій та електронної інженерії ухвалили:

11.1. Дисертація Медвецького Михайла Богдановича «Підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано конкретне 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, що має важливе значення для галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації.

11.2. У 14 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них 3 статті у науковому періодичному виданні інших держав, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science (віднесених до кuartилів (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.


11.3. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», 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).

11.4. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Медвецького Михайла Богдановича дисертація «Підвищення ефективності використання ресурсів та якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах» рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

За затвердження висновку проголосували:


за	25	<i>Двадцять п'ять</i>
проти	-	(немає)
утримались	-	(немає)

Головуючий на
засіданні наукового
семінару, зав. кафедри ІКТ
д.т.н., професор


Михайло КЛИМАШ

Рецензенти:

д.т.н., професор, професор
кафедри ІКТ

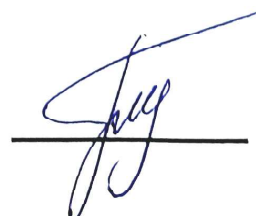

Мар'ян КИРИК

к.т.н., доцент кафедри ІКТ


Мар'ян СЕЛЮЧЕНКО

Відповідальний у ІКТЕ за
атестацію PhD

д.т.н., доцент, професор кафедри
ІКТ


Микола БЕШЛЕЙ

"14" квітня 2025 р.