

*Голові разової спеціалізованої
вченої ради
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., проф. Оресту КОЧАНУ*

РЕЦЕНЗІЯ

**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. Актуальність дисертаційної роботи

Стрімкий розвиток програмного забезпечення та технологій штучного інтелекту дає змогу створювати новітні інтелектуальні інформаційно-комунікаційні системи, які можуть вчитися та адаптуватися до зовнішніх факторів. Майбутнє мережевих та інформаційних технологій полягає в інтелектуальному управлінні фізичними ресурсами та об'єднанні різноманітних інформаційних систем для досягнення поставлених цілей, які зазвичай формуються на основі вимог споживачів інформаційних сервісів.

Стан розвитку сучасних телекомунікаційних мереж характеризується експоненційним зростанням обсягів трафіку, що обумовлено широким впровадженням мультимедійних послуг, мобільних застосунків, технологій п'ятого та шостого покоління (5G/6G), а також розвитком концепції Інтернету речей (IoT). За таких умов оператори телекомунікаційних систем стикаються з необхідністю не лише нарощування пропускної здатності мереж, а й забезпечення гарантованого рівня якості обслуговування (QoS) та якості сприйняття (QoE) з боку кінцевих користувачів. У свою чергу, традиційні мережеві архітектури з фіксованими політиками управління, обмеженим рівнем гнучкості та слабким зворотним зв'язком демонструють неспроможність ефективно адаптуватися до динамічних змін трафіку, що призводить до перевантаження мереж, зростання затримок та зниження загального рівня сервісу.

У цьому контексті програмно-конфігуровані мережі (SDN) стали фундаментом для побудови адаптивного та централізованого управління мережевою інфраструктурою. Проте базова концепція SDN не вирішує в повному обсязі задач, пов'язаних із забезпеченням QoE-орієнтованого управління. Дисертаційне дослідження Медвецького М.Б. присвячене підвищенню якості сприйняття

інформаційних послуг у сучасних інфокомунікаційних системах шляхом розробки нових методів інтелектуального моніторингу стану мережі, адаптивного управління ресурсами та оптимізації якості обслуговування з урахуванням мінливих вимог користувачів і обмежених ресурсів мережевої інфраструктури. Запропонований підхід є актуальним, відповідає провідним напрямкам розвитку галузі та спрямований на розв'язання важливого науково-практичного завдання у сфері інформаційно-комунікаційних технологій.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності

Обсяг дисертаційної роботи становить 218 аркушів, та складається із 4 розділів та 2 додатків. Робота відповідає вимогам до оформлення дисертаційних робіт.

У вступі дисертації комплексно обґрунтовано актуальність обраної теми, чітко сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження. Здобувачем детально викладено використані методи дослідження, які включають математичне моделювання, імітаційне моделювання, застосування методів машинного навчання, а також експериментальні дослідження. Особлива увага приділена науковій новизні отриманих результатів та їх практичному значенню, що підтверджується актами впровадження. Також у вступі надано інформацію про апробацію результатів, кількість та характер публікацій за темою дисертації, особистий внесок автора у спільно опубліковані праці, а також представлено загальну структуру та обсяг роботи.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану досліджень у сфері управління якістю послуг у телекомунікаційних мережах. Розглянуто переваги SDN, зокрема можливість централізованого управління, реалізації сервісно-орієнтованих політик та швидкої адаптації. Проте виявлено низку обмежень: статичні інтервали моніторингу, надмірне службове навантаження. Проведено критичний аналіз наукових джерел, який підтвердив недостатність досліджень у сфері адаптивного інтелектуального управління на основі QoE. Обґрунтовано доцільність побудови нових моделей, що враховують не лише поточні параметри, але й здатні прогнозувати зміни в мережевому середовищі. Розділ ефективно окреслює дослідницьку проблему, виявляючи недоліки існуючих SDN-рішень, що створює чітке підґрунтя для запропонованих наукових розробок.

У другому розділі запропоновано концептуальну модель інтелектуальної мережі, що базується на архітектурі програмно-конфігурованих мереж та дає змогу забезпечити індивідуалізацію обслуговування користувачів. Для цього запропоновано систему моніторингу QoE показників, який виступає в якості головного критерію адаптивного управління перерозподілом ресурсів. Для визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувачів оцінкою QoE розроблено математичну модель, що залежить від зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS, зокрема, для відео послуг реального часу. Формування математичної моделі QoS/QoE кореляції здійснюється на основі власних

експериментальних досліджень. Розроблено метод маршрутизації, метрика якого базується на інтегральному критерії якості обслуговування, що враховується у математичній моделі кореляції QoS/QoE. У цьому розділі також розроблено модель машинного навчання для інтеграції в програмно-конфігуровані мережі, що дає змогу прогнозувати рівень якості сприйняття послуги кінцевого користувача, враховуючи такі параметри мережі, як затримка та втрата пакетів.

У третьому розділі дисертації проведено об'єктивне оцінювання якості відео (APSNR) та VoIP (PESQ) трафіку, виявлено сильну залежність QoE від параметрів QoS. 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%). 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). Використання кумулятивних функцій розподілу для порівняльного аналізу ефективності маршрутизації є показником високої академічної строгості, що дозволяє оцінити не лише середню продуктивність, а й стабільність та надійність запропонованих рішень у широкому діапазоні умов.

У четвертому розділі дисертації доведено практичну ефективність багатошляхового передавання відеопотоків у безпроводних SDN-мережах з емулятором Mininet-Wi-Fi: одночасне підключення до кількох точок доступу підвищує сукупну пропускну здатність та покращує якість відео (PSNR > 35 дБ). Крім того, розроблено метод динамічного розподілу відеопотоку між кількома серверами з урахуванням залишкової пропускну здатності маршрутів і надлишковості, що забезпечило підвищення PSNR до ≈ 36 дБ, а також впроваджено балансування навантаження на комутаторах Zodiac GX/FX за допомогою групових таблиць OpenFlow із ваговими коефіцієнтами, що дозволило рівномірно розподілити трафік та забезпечити стабільну якість обслуговування в умовах обмежених апаратних ресурсів.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, впливають з коректного використання математичного апарату теорії ймовірності та математичної статистики, методів оптимізації, а також елементів штучного інтелекту. Отримані результати не суперечать фундаментальним основам інформаційних систем та відповідають існуючим стандартам ITU-T. Достовірність отриманих претендентом науково-практичних результатів засвідчено актами впровадження. Матеріали дисертації пройшли необхідну

апробацію, обговорювались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

4. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

У дисертаційній роботі отримано 3 пункти наукової новизни, зокрема дисертант:

- Розробив новий метод інтелектуального моніторингу SDN-мереж із використанням машинного навчання для прогнозування змін QoE та адаптивного регулювання частоти збору телеметрії. Порівняно з традиційними підходами, метод забезпечує зниження службового трафіку та своєчасне виявлення деградації якості;
- Удосконалив метод маршрутизації з урахуванням QoE, у якому реалізовано прогнозування якості залежно від типу трафіку, затримки, втрат і пропускної здатності. Запропоноване рішення дозволяє адаптивно обирати маршрути відповідно до змін у мережевому середовищі;
- Розвинув метод до доставки відеоконтенту з адаптивним багатошляховим передаванням потоків на основі прогнозу пропускної здатності та QoE. Передбачено паралельне підключення до кількох точок доступу або серверів, що підвищує ефективність використання ресурсів та якість сервісу.

5. Повнота викладу результатів досліджень у опублікованих працях

За результатами досліджень, які викладені 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 кuartилів Q1-Q2), 1 стаття у 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. У працях здобувача повністю висвітлені основні положення та результати дисертаційного дослідження.

6. Практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Практичне значення дослідження полягає у створенні інтелектуальної системи моніторингу якості обслуговування, що враховує навантаження на контролер і комутатори, що дозволило знизити обсяг службового трафіку на 56,4% та оперативно ідентифікувати періоди погіршення якості сприйняття послуг (QoE). Запроваджені об'єктивні показники якості (PSNR, APSNR, PESQ) дали змогу точно оцінювати мультимедійний сервіс, а розроблена на основі машинного навчання маршрутизація перевищила за ефективністю відомі методи на 42%. Застосування прогнозних моделей QoE та адаптивне регулювання інтервалів моніторингу

призвели до зменшення мережевого навантаження та збільшення до 17% ефективності вибору оптимального маршруту. Особливу увагу заслуговує багатошляхова доставка відеоконтенту з підтримкою одночасного підключення до кількох точок доступу, яка в динамічних сценаріях показала стабільну якість з PSNR у діапазоні 33–35 дБ, перевищуючи альтернативні рішення на 4–8 дБ.

7. Недоліки та зауваження щодо роботи

1. У роботі основна увага приділена регресійним моделям машинного навчання (LightGBM, CatBoost) для прогнозування QoE. Було б доцільно розширити дослідження, розглянувши можливість застосування інших парадигм, наприклад, навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning), для розробки ще більш динамічних та адаптивних алгоритмів маршрутизації в реальному часі.

2. В тексті роботи присутні незначні стилістичні та граматичні помилки.

3. В роботі відсутній аналіз масштабованості розроблених методів, зокрема механізмів моніторингу, в умовах великомасштабних операторських мереж з високою динамікою трафіку, значною кількістю вузлів та розподіленою інфраструктурою..

4. Дисертація зфокусується на підвищенні QoE, однак аспекти безпеки запропонованої інтелектуальної архітектури SDN розкрито недостатньо. Централізація управління створює нові вектори атак, і коротке обговорення потенційних загроз та механізмів захисту могло б доповнити роботу.

5. Практична реалізація у розділі 4 базується на обладнанні, призначеному для освітніх та дослідницьких цілей. Було б корисно додати обговорення можливих труднощів та необхідних адаптацій при перенесенні розроблених рішень на високопродуктивне обладнання операторського класу, яке може мати власні специфічні API та характеристики продуктивності.

6. У роботі недостатньо уваги приділено особливостям обробки відеоконтенту в умовах багатошляхової передачі. Зокрема, відсутній аналіз синхронізації потоків, компенсування джитеру та впливу асиметричності каналів на цілісність відеопотоку.

8. Загальні висновки

Аналіз дисертації та опублікованих праць дає підстави для висновку про те, що дисертація Прислупського Андрія Івановича на тему «Підвищення ефективності функціонування хмарних систем для інформаційно-комунікаційних сервісо-орієнтованих мереж» є завершеною, самостійно виконаною науковою працею, що має вагоме теоретичне і прикладне значення, у якій розв'язано конкретне наукове завдання підвищення якості сприйняття послуг в сучасних інфокомунікаційних системах шляхом розробки нових методів інтелектуального моніторингу стану мережі, розподілу мережевими ресурсами та управління якістю обслуговування в умовах адаптації до мінливих вимог користувачів та обмеженості мережеских ресурсів, що має важливе значення для галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації.

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 та доповненнями), а її автор Медвецький Михайло Богданович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Рецензент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційно-комунікаційних технологій
Національного університету
«Львівська політехніка»



Мар'ян КИРИК

Підпис д.т.н., професора Кирика М.І. засвідчую

Проректор



Микола ЛОГОЙДА