

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

РЕЦЕНЗІЯ

*доцента кафедри інформаційно-комунікаційних технологій інституту
інформаційно-комунікаційних технологій та електронної інженерії,
Національного університету «Львівська політехніка» к.т.н., Селюченка
Мар'яна Олександровича на дисертаційну роботу Медвецького Михайла
Богдановича "Підвищення ефективності використання ресурсів та
якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-
конфігурованих мережах", представлену на здобуття наукового ступеня
доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» зі
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»*

Актуальність теми

Незважаючи на досягнення в області телекомунікацій, проблеми забезпечення стабільної якості обслуговування та сприйняття (QoS/QoE) залишаються актуальними. Більшість операторів стикаються з труднощами в управлінні динамічними потоками трафіку, особливо в умовах пікового навантаження, відеострімінгу чи при підключенні тисяч IoT-пристроїв. Рішення, засновані лише на класичних QoS-метриках, уже не здатні відображати реальні очікування користувача щодо якості послуги.

Наявні системи моніторингу здебільшого функціонують із фіксованою періодичністю, що не дозволяє реагувати на зміну стану мережі у реальному часі без надмірного навантаження на контролери. Крім того, в існуючих SDN-мережах бракує гнучких механізмів прогнозування QoE, а реалізовані маршрутизатори часто працюють за простими метриками, не враховуючи кінцеву якість.

Дисертація Медвецького М.Б. спрямована на усунення цих критичних недоліків. Автор пропонує комплексне вирішення: динамічний моніторинг, здатний підлаштовувати частоту опитування до навантаження мережі; маршрутизацію, що враховує прогнозовану QoE; та метод доставки відео, що оптимізує використання кількох маршрутів одночасно. Такий підхід дозволяє як зменшити навантаження на контролери, так і підвищити задоволення користувачів якістю сервісу.

Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Медвецького Михайла Богдановича, забезпечуються коректним застосуванням широкого спектру методів дослідження:

1. у роботі коректно використано математичний апарат теорії ймовірності та математичної статистики, методів оптимізації, а також елементів штучного інтелекту;
2. отримані результати не суперечать фундаментальним основам інформаційних систем та відповідають існуючим стандартам ITU-T;
3. достовірність отриманих претендентом науково-практичних результатів засвідчено актами впровадження;
4. матеріали дисертації пройшли необхідну апробацію, обговорювались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

Наукова новизна дисертаційної роботи

Результати наукової новизни складаються із 3 пунктів, які чітко окреслюють що було запропоновано автором вперше, а що розвинуто із вже існуючого:

1. Вперше розроблено метод інтелектуального моніторингу програмно-конфігурованих мереж, який використовує алгоритми машинного навчання для прогнозування змін показників QoE. На відміну від існуючих рішень із фіксованими інтервалами збору даних, запропонований підхід передбачає адаптивне коригування частоти моніторингу залежно від характеру трафіку та навантаження на мережу. Це

забезпечує вищу точність оцінки якості, зменшення службового трафіку та підвищену ефективність реагування на зміни в мережі.

2. Удосконалено підхід до маршрутизації з урахуванням QoE, який передбачає використання ML-моделей для прогнозування якості обслуговування з огляду на тип трафіку та поточні параметри маршруту (затримку, втрати, пропускну здатність). Запропонований метод дозволяє здійснювати динамічний вибір найоптимальнішого маршруту, що позитивно впливає на рівень користувацького задоволення.

3. Подальшого розвитку набув метод доставки відеоконтенту, що реалізує адаптивний багатошляховий розподіл потоків між маршрутами на основі QoS і прогнозних моделей пропускну здатності. Передбачено також можливість паралельного підключення до кількох серверів або точок доступу, що забезпечує балансоване використання мережевих ресурсів та покращену якість відеосервісу відповідно до заданого рівня QoE.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях

За результатами досліджень, викладених у дисертаційній роботі, опубліковано 14 наукових праць, що повністю висвітлюють основні положення та результати дисертаційного дослідження. Серед них є публікації у високореєтингових міжнародних наукометричних базах Scopus/Web of Science (Q1-Q2), що свідчить про високий рівень наукової роботи та її визнання міжнародною спільнотою.

Важливість одержаних результатів для науки і народного господарства та перспективи їх використання

1. Розроблена інтелектуальна система моніторингу QoS, дозволила знизити службовий трафік на 56,4% і своєчасно виявляти погіршення якості сприйняття послуг (QoE), що підвищило ефективність управління мережею.

2. Використання об'єктивних метрик оцінки QoE (PSNR, APSNR, PESQ) забезпечило точний контроль якості мультимедійних сервісів, а запропонований метод машинного навчання для QoE-маршрутизації продемонстрував на 42% вищу ефективність у порівнянні з існуючими рішеннями.

3. Застосування моделей прогнозування QoE та адаптивне регулювання частоти моніторингу сприяли зниженню навантаження на мережу та дозволили досягти до 17% виграшу у виборі оптимального маршруту, що підвищило стабільність якості обслуговування.

4. Розроблений метод багатошляхової доставки відеоконтенту з одночасним обслуговуванням кількох точок доступу показав стабільну якість відеопотоку із середнім PSNR 33–35 дБ у динамічних сценаріях, перевищуючи альтернативні рішення на 4–8 дБ.

Запропоновані у дисертації методи інтелектуального моніторингу, прогнозування QoE та багатошляхової доставки відеоконтенту можуть бути ефективно впроваджені у практику науково-дослідних установ, телекомунікаційних компаній та операторів мобільного зв'язку. Їх застосування сприятиме підвищенню якості сприйняття послуг користувачами, оптимізації використання мережевих ресурсів і забезпеченню стабільності роботи програмно-конфігурованих мереж із централізованим управлінням.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

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

Дисертаційна робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (111 найменувань) і 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 218 сторінок, з яких 167 сторінок основного тексту. Робота містить 75 рисунків та 16 таблиць. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список праць автора.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету та завдання дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також подано зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У **першому розділі** дисертаційної роботи проведено аналіз методів і моделей управління якістю сприйняття послуг в SDN. Розглянуто обмеження традиційних

IP-мереж, зокрема їхню статичну архітектуру та децентралізоване керування. Обґрунтовано доцільність переходу до програмно-конфігурованих мереж, які завдяки централізованому контролю створюють підґрунтя для реалізації гнучких моделей управління трафіком. Визначено, що оцінювання QoE є ключовим фактором конкурентоспроможності операторів.

Другий розділ роботи присвячений розробці методів підвищення якості сприйняття послуг. Запропоновано концептуальну модель інтелектуальної програмно-конфігурованої мережі, що інтегрує три ключові методи: інтелектуального моніторингу, адаптивної QoE-маршрутизації та багатошляхової маршрутизації. Метод інтелектуального моніторингу дозволяє динамічно змінювати інтервал збору телеметрії, знижуючи навантаження на контролер. Метод інтелектуальної QoE-маршрутизації використовує прогнозовані за допомогою машинного навчання (зокрема, моделі LightGBM) значення QoE для вибору оптимальних шляхів передачі трафіку.

У третьому розділі проведено моделювання та дослідження розроблених методів. Виконано об'єктивне оцінювання якості відео- та VoIP-трафіку за метриками APSNR і PESQ, виявивши сильну залежність QoE від параметрів QoS (затримки, втрат пакетів). Досліджено навантаження на центральний процесор SDN-контролера залежно від інтервалу моніторингу. Реалізовано та порівняно регресійні моделі (Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost) для прогнозування QoE, де найкращу точність продемонстрували CatBoost і LightGBM. Експериментально доведено, що запропонований метод інтелектуальної QoE-маршрутизації на 42% ефективніший за відомі підходи.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено практичній реалізації запропонованих методів. Проведено експериментальну перевірку багатошляхового передавання відеопотоків у бездротових мережах за допомогою емулятора Mininet-Wi-Fi. Розроблено та реалізовано метод доставки відеоконтенту, що базується на динамічному розподілі потоку між кількома серверами. Впроваджено механізм балансування навантаження на фізичних комутаторах Zodiac GX та Zodiac FX з використанням групових таблиць OpenFlow, що дозволило усунути вузькі місця та ефективно використовувати мережеві ресурси.

Додатки містять акти впровадження отриманих результатів та список опублікованих праць автора з темою дисертації.

Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

1. Дисертація спирається на використання об'єктивних метрик APSNR та PESQ для оцінки якості сприйняття (QoE), стверджуючи їх високу кореляцію з суб'єктивними оцінками (MOS). Однак не надано власного експериментального підтвердження цієї кореляції в умовах, які моделюються у роботі.

2. У другому розділі роботи (ст. 92) вказано, що зв'язок між параметрами QoS (затримка, втрата пакетів тощо) та QoE є складним і нелінійним, але не подано прикладів або аналізу критичних точок, де цей зв'язок може змінюватися різко – наприклад, у вигляді порогових ефектів. У реальних умовах QoE може залишатися стабільним при зміні QoS до певного моменту, після чого незначне погіршення різко знижує якість сприйняття.

3. Попри те, що Mininet-WiFi є важливим інструментом для досліджень у сфері SDN і безпроводних мереж, він не є повноцінним симулятором мобільного зв'язку, особливо у контексті 5G/6G. Середовище не враховує ключові фізичні та протокольні особливості

4. У четвертому розділі роботи (ст. 191) зазначено, що у динамічному мережевому середовищі часті оновлення маршрутів та flow-таблиць можуть створювати суттєве навантаження на SDN-контролер. Проте у дисертації відсутні дослідження або моделювання, що демонструють вплив цього навантаження на продуктивність системи. Не представлено також детальної стратегії зниження навантаження. Навіть при використанні групових таблиць OpenFlow, зміна ваг маршрутів або перерозподіл трафіку потребують втручання контролера, що може призводити до затримок у прийнятті рішень та зниження стабільності системи в умовах масштабування.

5. Дисертація не розглядає складнощі інтеграції розроблених SDN та ML рішень у гібридні мережі, де значна частина обладнання не підтримує OpenFlow чи інші SDN-протоколи. Поступовий перехід операторів на SDN ускладнює практичне впровадження, адже сумісність із застарілими системами є важливим.

Загальний висновок

На підставі розгляду змісту дисертації, її анотації, праць здобувача та актів впровадження можна зробити висновок, що дисертаційна робота Медвецького Михайла Богдановича є завершеною науковою працею. У ній отримано нові наукові результати, що в сукупності забезпечили розв'язання актуального наукового завдання підвищення якості сприйняття послуг в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах шляхом розробки нових методів моніторингу стану мережі, маршрутизації трафіку та ефективної доставки відеоконтенту.

За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями, повнотою висновків і рекомендацій, дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р., №507 від 03.05.2024 р.), а її автор Медвецький Михайло Богданович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Рецензент:

кандидат технічних наук,

доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій

Національного університету

«Львівська політехніка»



Мар'ян СЕЛЮЧЕНКО

Підпис к.т.н., Селюченка М.О. засвідчую

Проректор



Микола ЛОГОЙДА