

*Голові разової спеціалізованої
вченої ради
Національного університету
«Львівська політехніка»
д. т. н., Стрихалюку Б.М.*

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Прислупського Андрія Івановича
**" Підвищення показників якості сприйняття інфокомунікаційних послуг в
інтелектуальних мережах нового покоління "**,
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 інформаційних сервісів у сучасному світі породжує нові вимоги щодо побудови перспективних інформаційно-комунікаційних мереж. Це пов'язано із тим, що попит кінцевих користувачів все більше орієнтується на отримання послуги з високою якістю обслуговування (QoS, Quality of Service). Сьогодні, зі збільшенням числа бізнес-користувачів та зміною їхніх вимог до якості обслуговування, для операторів телекомунікаційних мереж виникає проблема забезпечення індивідуальної якості обслуговування для своїх клієнтів через недостатню гнучкість, маневреність та масштабованість традиційних мереж. Такі проблеми обумовлені існуючими технологіями, які або не здатні адаптуватися до різноманітних умов мережі, або обмежені в доступних ресурсах. З цієї причини в останніх наукових роботах все більше уваги приділяється управлінню мережевими ресурсами з урахуванням показника (QoE, Quality of Experience), що характеризує кінцеву якість сприйняття користувачів, замінюючи традиційний системно-орієнтований підхід, що базується на QoS. Проте досі цю проблему не вирішено повністю, оскільки відсутні підходи, які враховують наміри користувача щодо індивідуалізації обслуговування у конкретний момент часу. Таким чином, оператори мереж прагнуть мати адаптивні моделі та методи, здатні оцінювати, передбачати та навіть керувати QoE на основі намірів користувача. Крім того, існуючі підходи до адаптації QoE обмежують здатність мережі надавати інтелектуальні та ефективні рішення, оскільки вони реагують лише при виникненні проблеми, що призводить до неоптимальної продуктивності мережі. Для вирішення таких проблем в умовах побудови мережевої інфраструктури нового покоління вимагається узгодження процесу інтеграції передових технологій програмно-конфігурованих мережах із розробкою інтелектуальних механізмів адаптивного управління ресурсами з

урахуванням показника QoE. Тому розвиток методів трафіку інжинірингу, що базуються на показнику QoE, такі як QoE-орієнтована маршрутизація, QoE моніторинг, розподіл ресурсів і механізми хендоверу в майбутніх мережах повинні бути адаптивними до умов мережі, що змінюються, для покращення QoE кінцевих користувачів.

У зв'язку з цим тематика дисертаційної роботи Прислупського Андрія Івановича, яка присвячена підвищенню 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 мережесих ресурсів є актуальною та своєчасною.

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

Дисертаційна робота Прислупського Андрія Івановича виконувалась у відповідності до наукового напряму кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка», а саме «Інфокомунікаційні системи та мережі». Зокрема робота виконувалась в межах держбюджетної науково-дослідної роботи: «Розробка методів та уніфікованих програмно-апаратних засобів для розгортання енергоефективних інтенційно - орієнтованих інфокомунікаційних мереж подвійного призначення» (№ держреєстрації 0120U102201, (2020-2022 рр.)). Окрім того, дисертація виконана в межах госпдоговірної роботи «Розроблення автоматизованої системи резервного копіювання, відновлення даних та доступності серверних інфраструктур» (ГД №0679) ТзОВ " МаксіТех " (04.11.2021 р. – 20.12.2021 р.).

3. Аналіз змісту роботи.

Дисертаційна робота має загальний обсяг 277 аркушів, містить 4 розділи та 2 додатки. Всі подані матеріали цілком відповідають чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт.

У вступі подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано всі процедурні положення та подано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено особистий внесок здобувача та відомості про апробацію.

У **першому розділі** розглянуто основні методи забезпечення якості обслуговування в сучасних інформаційно-комунікаційних мережах. Встановлено, що для кінцевих користувачів все більш важливим стає адаптивне надання сервісу, постійний зв'язок та індивідуалізація обслуговування, що у свою чергу вимагає використання показника QoE для управління якістю обслуговування в майбутніх мережах. Визначено, що для отримання адаптивного рівня якості надання сервісів необхідно розвивати методи трафіку інжинірингу, враховуючи як технічні показники якості функціонування мережі, так і користувацьку оцінку якості

надаваних сервісів, що, у свою чергу, вимагає розробки нових інтелектуальних методів та моделей управління якістю надання сервісів в інформаційно-комунікаційних мережах.

У **другому розділі** пропонується концептуальна модель інтелектуальної мережі, що базується на архітектурі програмно-конфігурованих мереж та дає змогу забезпечити індивідуалізацію обслуговування користувачів. Розроблено систему моніторингу показника QoE для майбутніх мереж, яка покращить якість обслуговування кінцевих користувачів і дасть змогу більш ефективно використовувати мережеві ресурси. Визначено та розроблено метод маршрутизації інформаційних потоків, що базується на математичній моделі кореляції параметрів QoS/QoE та дало змогу покращити якість сприйняття послуг в умовах адаптації до мінливих вимог користувачів. У даному розділі розроблено модуль машинного навчання мережі на рівні контролера програмно-конфігурованої мережі для реалізації інтелектуальної системи моніторингу, що дозволило зменшити обсяг сигнального трафіку в каналах зв'язку між мережевим обладнанням і контролером, а також забезпечити автоматизоване реагування деградації рівня якості обслуговування з метою адаптивного прогнозування моменту переконфігурації мережі. Модифіковано метод міграції комутаторів від одного контролера в умовах перевантаженості та зниження рівня QoE користувачів. Порівнюється ефективність технологій MPLS та MPLS з контролером щодо затримки мережі в процесі передачі пакетів.

У **третьому розділі** для майбутніх інтелектуальних мереж розроблено унікальний IBN – контролер, що забезпечує клієнтам надійне з'єднання. Досягнуто це шляхом створення намірів у мережі, які перетворюють зрозумілий набір команд від користувача код, який розуміє SDN. Розроблений контролер IBN використовує моделі штучного інтелекту, які дають змогу інтелектуально управляти ресурсами мережі. В роботі пропонується автоматизована система відновлення доступності серверів, на яких розгорнуто SDN/IBN-контролер, що дає змогу в умовах техногенних та природних катастроф автоматично керувати ресурсами, діагностувати та відновлювати дані серверної інфраструктури для забезпечення безперервності роботи та високої доступності бізнес-послуг в майбутніх інтелектуальних мережах.

У **четвертому розділі** запропоновано метод ініціації хендоверу в програмно-конфігурованій безпроводній Wi-Fi мережі, який базується на прогнозованому значенні інтегрального критерію QoE сформованого на основі вимірювання параметрів рівня сигналу, пропускної здатності, втрати даних та затримок у мережі Wi-Fi, що дало змогу покращити якість сприйняття послуг для кінцевих користувачів. Розроблено імітаційну модель на основі якої, доведено, що запропоновані рішення покращують якість надання мультимедійних послуг кінцевим користувачам. Зокрема, одночасне застосування QoE-орієнтованих методів маршрутизації та ініціації хендоверу підвищує показник якості сприйняття

послуг від 3.5 до 5, оціненого за п'ятибальною школою, де вище значення характеризує кращу якість обслуговування. З метою практичної реалізації інтелектуальної мережі нового покоління використано обладнання SDN Zodiac, що на відміну від пропрієтарного мережного обладнання виробників є відкритим для модифікації та дало змогу програмно реалізувати запропоновані рішення щодо управління ресурсами. Розроблено алгоритм виявлення та блокування мережевих атак для інтелектуальних мереж, що базується на статистичному аналізі та глибокому навчанні, який спрямований на розпізнаванні аномальної поведінки трафіку мережі. Доведено, що використання запропонованого алгоритму виявлення та блокування шкідливого трафіку дало змогу зменшити на 5% втрати даних в загальному каналі зв'язку, забезпечуючи кращу якість сприйняття послуг.

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 і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Прислупського Андрія Івановича, впливають з наступного:

- план роботи логічний і послідовний, структура роботи чітка та спрямована на досягнення поставленої мети;
- достовірність отриманих результатів обґрунтовано коректним застосуванням відомих методів досліджень, сучасних засобів моделювання програмно-конфігурованих мереж, відтворюваність результатів моделювання та практичною реалізацією на основі реального обладнання SDN ZODIAC FX/WX;
- достовірність отриманих здобувачем науково-практичних результатів засвідчено актами впровадження;
- отримані нові результати гармонійно доповнюють відомі; матеріали дисертації пройшли необхідну апробацію, обговорювались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

5. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Результати наукової новизни складаються із 4 пунктів, які чітко окреслюють що було запропоновано автором вперше, а що розвинуто із вже існуючого:

1. Розвинуто метод маршрутизації потоків даних для програмно-конфігурованих мереж, який, на відміну від відомих, базується на адаптивній QoS-орієнтованій метриці маршруту, що автоматизовано визначається контролером мережі на основі математичної моделі кореляції нормалізованого значення замовленого рівня якості сприйняття сервісу та прогнозованого інтегрального

адитивного критерію поточних показників QoS , що дозволило покращити якість сприйняття послуг для користувачів.

2. Удосконалено метод управління якістю сприйняття послуг в інтелектуальних мережах. Новизною методу є те, що забезпечення замовленої якості послуги базується на QoE-намірах користувачів. Внаслідок чого для мереж нового покоління появляється можливість проводити автоматизовано конфігурацію мережі для трафіку інжинірингу, а з допомогою алгоритму машинного навчання Random Forest прогнозувати деградацію якості сприйняття послуг для швидкої переконфігурації мережі та забезпечення замовленої згідно намірів користувачів якості обслуговування.

3. Розвинуто метод динамічного розгортання та міграції віртуальних комутаторів між мультиконтролерами SDN мережі на основі пріоритетного аналізу замовленої якості сприйняття послуг кінцевих користувачів, що забезпечило ефективне використання мережевих ресурсів в інтелектуальних програмно-конфігурованих мережах з метою гарантування клієнт-орієнтованої якості обслуговування.

4. Вперше розроблено метод ініціації хендоверу в програмно-конфігурованій безпроводній Wi-Fi мережі, який, на відміну від існуючих, в процесі прийняття керуючого рішення щодо вибору точки доступу обслуговування орієнтується на прогнозованому значенні інтегрального критерію QoE сформованого на основі вимірювання параметрів, рівня сигналу, пропускну здатності, втрати даних та затримок у мережі Wi-Fi, що дало змогу покращити якість сприйняття послуг для кінцевих користувачів.

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

За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 14 наукових праць, з них 3 статті у наукових фахових виданнях України, 3 статті у науковому періодичному виданні інших держав, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science (2 з них з індексом цитування (імпакт-фактором, квартиль Q1-Q2)), 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав 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. У працях здобувача повністю висвітлені основні положення та результати дисертаційного дослідження.

7. Відсутність порушення академічної доброчесності

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. Комплексне застосування QoE-орієнтованих методів маршрутизації та ініціації хендовера дало змогу підвищити від 3.5 до 5 показник якості сприйняття послуг.

2. Розроблений програмний модуль машинного навчання для системи моніторингу інтелектуальної мережі дозволив до 30% зменшити обсяг сигнального трафіку в каналах зв'язку між мережевим обладнанням і контролером.

3. Розроблений програмний контролер для інтенційно-орієнтованої інтелектуальної мережі, збільшує швидкість реагування у процесі переконфігурації мережі в умовах погіршення якості сприйняття послуг на 10 секунд у порівнянні із традиційними.

4. Використання розроблених алгоритмів в комунікаційній інфраструктурі дало змогу в умовах присутності шкідливого трафіку в каналах зв'язку зменшити втрати даних до 5%.

9. Зауваження до дисертаційної роботи

1. У першому розділі не приділено достатньої уваги існуючим методам побудови новітніх інтенційно-орієнтованих мереж, що розробляються компанією Cisco. Доцільно було б провести переваги та відмінності від традиційних мереж з точки зору якості надання послуг кінцевим користувачам. Навести, які саме досягнення отриманні компанією Cisco з точки зору практичного застосування.

2. У другому розділі роботи дисертант стверджує, що основним структурно-функціональним компонентом архітектури інтелектуальних мереж нового покоління є використання штучного інтелекту, проте у роботі не описано складності імплементації штучного інтелекту на рівні контролера програмно-конфігурованої мережі та не наведено, яку кількість обчислювальних ресурсів необхідно мати для якісно функціонування мережі.

3. У таблиці 2.3 дисертаційної роботи автор наводить рівень важливості параметрів QoS, проте не відомо, на основі яких специфікацій чи вимог вони формуються.

4. Автор у третьому розділі дисертаційної роботи розробляє унікальний контролер, який використовує QoE показники за шкалою від 1 до 3, де QoE-3 означає найкращу якість сприйняття послуг, проте в другому та четвертому розділі пропонувані методи та моделі базуються на показнику QoE за шкалою від 1 до 5, де QoE-5 означає найкращу якість сприйняття послуг. Таким чином, дисертантом не пояснено, у яких випадках використовується різні шкали вимірювання показника QoE.

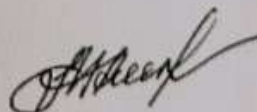
5. У четвертому розділі слід провести більшу кількість імітаційних та практичних досліджень, зокрема із іншою топологією SDN мережі, вхідним навантаженням та розподілом по QoE інтенціях, щоб вказати похибку оцінки

ефективності запропонованих рішень для різних ситуацій моментів функціонування мережі.

10. Загальні висновки

На підставі розгляду змісту дисертації, її анотації, праць здобувача, актів впровадження, аналізу ступеня новизни наукових положень та практичної значимості отриманих у роботі результатів, висновків та рекомендацій можна зробити висновок, що дисертаційна робота Прислупського Андрія Івановича є завершеною працею, в якій отримані нові наукові результати, що в сукупності забезпечило розв'язання актуального наукового 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 мережесих ресурсів. Сама робота достатньо повно опублікована та апробована, відповідає «Паспорту» заявленої спеціальності, 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), а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
професор кафедри інфокомунікаційної інженерії
імені В. В. Поповського
Харківського національного університету
радіоелектроніки
доктор технічних наук
професор



М. О. Євдокименко

Підпис доцента Євдокименко М.О. засвідчую

Учений секретар
Харківського національного
університету радіоелектроніки



І. В. Магдаліна