

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

## **РЕЦЕНЗІЯ**

**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. Актуальність дисертаційної роботи***

На сьогоднішній день збільшення кількості сервісів та користувачів в інфокомунікаційних мережах призводить до постійного погіршення якості сприйняття (QoE, Quality of Experience) послуг. Особливо гостро ця проблема стала помітна в процесі реалізації концепції повсюдного комп'ютингу, відповідно до якої інформаційні сервіси надаються в режимі реального часу, використовуючи високошвидкісні мережі мобільного зв'язку. З появою гетерогенних телекомунікаційних мереж виникла велика кількість нових сервісів. Кожен сервіс генерує потоки даних з особливими параметрами, при цьому кожен сервіс має свої вимоги до якості обслуговування, які диктують мережі, яким чином обслуговувати потоки трафіку того чи іншого додатку. Зміна парадигми в концепції надання послуг, виражається в першу чергу в тому, що ролі оператора і користувача значно змінилися. Тепер користувач і оператор виступають як союзники в єдиному процесі інформатизації, і таку взаємодію можна вважати еволюцією сучасних методів надання послуг. Отже, розробляючи нову телекомунікаційну систему управління ресурсами мережі раціонально використовувати системний підхід: проблему забезпечення якості потрібно вирішувати не ізольовано, а в єдності зв'язків із кінцевими користувачами, враховуючи їх індивідуалізацію обслуговування. В результаті чого виникає актуальне наукове завдання адаптивного управління ресурсами інфокомунікаційної мережі в умовах мінливих QoE вимог користувачів щодо якості надання сервісів, яку складно розв'язати за допомогою існуючих методів та мережних технологій, оскільки зміна критеріїв оптимальності керуючих рішень вимагає постійного експертного та адміністративного втручання.

Саме тому дисертаційна робота Прислупського А.І., що присвячується 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. Оцінка змісту дисертації, її завершеності**

Обсяг дисертаційної роботи становить 277 аркушів, та складається із 4 розділів та 2 додатків. Робота відповідає 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 1-му розділі автор розглядає основні методи побудови майбутніх інфокомунікаційних мереж на основі технологій SDN, штучного інтелекту та моніторингу параметрів QoE. Проводить огляд основних особливостей їх функціонування та наводить недоліки існуючих методів трафіку інжинірингу для реалізації адаптивного управління мережевими ресурсами та якістю обслуговування. Встановив, що низька міжсистемна узгодженість обслуговування із кінцевими користувачами вимагає перегляду побудови традиційних мереж та їх систем управління, з метою реалізації інтелектуальних стратегій управління здатних адаптуватися під зміни стану мережі та мінливі вимоги бізнес користувачів. Ґрунтуючись на проведеному аналізі тенденцій розвитку, особливостей побудови й функціонування сучасних інфокомунікаційних мереж, автором сформульовано ряд важливих вимог, яким мають задовольняти новітні технологічні рішення в галузі забезпечення гарантованої якості обслуговування.

В 2-у розділі автором запропоновано нові моделі та методи управління ресурсами на основі показника QoE з метою побудови інтелектуальної мережі, що розгортається на основі технології програмно-конфігурованих мереж (SDN, Software-Defined Network). Згідно запропонованої дисертантом концептуальної моделі інтелектуальної мережі для забезпечення необхідного рівня якості сприйняття сервісів використовуються QoE наміри користувачів. Для цього запропоновано систему моніторингу QoE показників, який виступає в якості головного критерію адаптивного управління перерозподілом ресурсів для майбутніх програмно-конфігурованих. Для визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувачів оцінкою QoE розроблено математичну модель, що залежить від зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS, які надаються в мережі IBN/SDN, зокрема, для відео послуг реального часу. Формування математичної моделі QoS/QoE кореляції здійснюється на основі власних експериментальних досліджень на реальному обладнанні SDN мережі. Розроблено метод маршрутизації, метрика якого базується на інтегральному критерії якості обслуговування, яка враховується у математичній моделі кореляції QoS/QoE. У даному розділі також розроблено модель машинного навчання для інтеграції в програмно-конфігуровані мережі. Це дає змогу

прогнозувати рівень якості сприйняття послуги кінцевого користувача, враховуючи такі параметри мережі, як затримка та втрата пакетів. Впровадження модуля машинного навчання в архітектуру IBN для системи моніторингу дало змогу до 30% зменшити обсяг сигнального трафіку в каналах зв'язку між мережевим обладнанням і контролером мережі. Розвинуто метод управління якістю сприйняття послуг в інтелектуальних мережах, що дає змогу на основі аналізу QoE намірів проводити автоматизовану конфігурацію мережі для трафіку інжинірингу, а з допомогою алгоритму машинного навчання прогнозувати моменти погіршення якості сприйняття послуг для швидкої переконфігурації мережі націленої на підвищення якості обслуговування користувачів. Розроблено модифікований метод для міграції комутаторів від одного контролера до іншого з врахуванням розподілу відповідно до QoE пріоритетів.

У 3-у розділі дисертації розроблено унікальний IBN – контролер який оснащений політиками та моделями штучного інтелекту (AI), які реалізують можливості, необхідні для аналізу стану системи та пошуку найкращих рішень щодо підвищення QoE показника. Обробник намірів також повідомляє про виконання та статус своїх намірів. Розроблений контролер надає велику перевагу та зменшує вплив людини на мережу, що збільшує швидкість реагування. Запропоновано автоматизовану систему відновлення доступності серверів на яких розгортаються SDN/IBN контролер та IoT брокер. Розроблено архітектуру системи відновлення доступності серверів. Створено систему моніторингу функціонування серверів. Для цього розроблено ряд алгоритмів функціонування, а саме блок схеми роботи Jenkins конвеєра, моніторинга за віддаленим сервером та скрипта моніторинга сервера.

У 4-у розділі дисертантом запропоновано метод ініціації хендоверу в програмно-конфігурованій безпроводній Wi-Fi мережі, що дав змогу покращити якість сприйняття послуг для кінцевих користувачів. Проведено імітаційне моделювання запропонованої інтелектуальної мережі та доведено, що запропоновані рішення дозволяють покращити якість надання мультимедійних послуг кінцевим користувачам. Зокрема, комплексне використання QoE-орієнтованих методів маршрутизації та ініціації хендовера дало змогу підвищити від 3.5 до 5 показник якості сприйняття послуг, оціненого за п'ятибальною школою, де вище значення характеризує кращу якість обслуговування. Використано обладнання технології SDN Zodiac для практичної реалізації. На основі експериментальних досліджень доведено, що запропоновані рішення дають змогу покращити якість надання мультимедійних послуг кінцевим користувачам. Сформовано стратегічні напрямки розвитку перспективних інформаційно-комунікаційних мереж подвійного призначення. Удосконалено метод виявлення аномалій мережевого трафіку та атак для майбутніх інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж, який відрізняється від відомих способом формування набору інформативних ознак, що формалізують нормальну та аномальну поведінку системи на основі оцінки

параметра Херста. Розроблено інтелектуальну DPI систему моніторингу та аналізу трафіку, яка дала змогу виявити складні атаки різного роду.

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

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів забезпечується коректним використанням засобів імітаційного моделювання. Крім того, достовірність результатів роботи підтверджена збігом результатів імітаційного моделювання із експериментальними дослідженнями, зокрема в процесі реалізації QoE-орієнтованої маршрутизації та хендовера безпроводної мережі. Акти про використання результатів підтверджують висновки і рекомендації, які представлені у дисертаційній роботі. Робота достатнім чином опублікована та апробована., обговорювались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

### ***4. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі***

У дисертаційній роботі отримано 4 пункти наукової новизни, зокрема дисертант:

- удосконалив метод QoE-маршрутизації для інтелектуальних мереж, який дав змогу покращити якість сприйняття послуг для користувачів;
- розробив метод управління якістю послуг для інтелектуальних мереж, який дав змогу кінцевим користувачам сервісів опосередковано впливати на функціональну конфігурацію мережі, а з допомогою машинного навчання реагувати на несприятливі поєднання значень показників якості і попереджати ситуації, коли користувач незадоволений якістю отриманих сервісів для адаптивного прогнозування моменту переконфігурації мережі;
- розвинув 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.
- вперше розробив 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, пропускної здатності, втрати даних та затримок у мережі Wi-Fi, що дало змогу покращити якість сприйняття послуг для кінцевих користувачів.

## ***5. Повнота викладу результатів досліджень у опублікованих працях***

За результатами досліджень, які повністю 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.

## ***6. Практичне значення результатів дисертаційного дослідження***

Здобувач достатньо повно обґрунтував практичне значення свого дослідження шляхом розроблення прототипів інтелектуальної мережі, достовірність яких підтверджують актами впровадження у виробництво та виконання госпдоговірних і держбюджетних тем. Видно, що автор оволодів науковими методами та термінологією з напрямку дослідження. Запропоновані методи дають змогу одержати позитивний приріст по продуктивності функціонування, показникам якості обслуговування, захищеності даних, забезпечити гнучкість управління ресурсами мережі без значних кошторисних затрат на модернізацію мережної інфраструктури. Зокрема комплексне застосування QoE-орієнтованих методів маршрутизації та ініціації хендовера дало змогу підвищити від 3.5 до 5 показник якості сприйняття послуг.

## ***7. Недоліки та зауваження щодо роботи***

1. В першому розділі дисертаційної роботи недостатньо наведено дослідження наукових робіт, присвячених побудові інтелектуальних інтенційно-орієнтованих мереж.

2. У другому розділі, де пропонується концептуальна модель інтелектуальної мережі, автором описано, що система збиратиме індивідуальні оцінки QoE користувачів конкретних сервісів, що характеризуватимуть їх замовлений рівень якості обслуговування. Проте з якою частотою та чи не призведе такий підхід до значного зростання сигналізаційного навантаження дисертант не наводить.

3. Не зрозуміло, як відбувається процес адаптивного розгортання сегментованих мереж різного призначення та різної продуктивності в межах однієї фізичної інфраструктури (розділ 4.4), враховуючи при цьому вимоги щодо якості надання послуг. Оскільки для реорганізації віртуальних машин, сама фізична машина повинна перезавантажитись, що може напряму вплинути на якість функціонування мережі та призвести до погіршення якості сприйняття послуг.

4. У процесі практичної реалізації інтелектуальної мережі відсутні початкові параметри, за яких здійснено дослідження, результати якого представлено, для прикладу, на рис. 4.44, де порівнюється якість надання відеопослуг в умовах

використання існуючого та запропонованого методу. Відповідно не зрозуміло, який метод розглядається у якості існуючого

5. У четвертому розділі (підрозділ 4.5) автором наведено алгоритм інтелектуальної системи моніторингу та аналізу трафіку для виявлення мережових атак, який базується на глибокому навчанні та використанні параметру Херста, проте приділено недостатньо уваги щодо швидкодії та складності обчислень для практичної реалізації такої системи.

### **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 сервісно-орієнтованих мереж» є завершеною, самостійно виконаною науковою працею, що має вагомe 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 мережових 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), і може бути подана до розгляду спеціалізованої вченої ради на предмет допуску до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри телекомунікацій  
Національного університету  
"Львівська політехніка",



М.М. Климаш

Підпис д.т.н., професора Климаша М.М. засвідчую

Вчений секретар

Національного університету  
«Львівська політехніка»

к.т.н., доцент



Р.Б. Брилинський