

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

## **РЕЦЕНЗІЯ**

*професора кафедри захисту інформації Навчально-наукового інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., проф. Опірського Романа Івановича на дисертаційну роботу Прислупського Андрія Івановича "Підвищення показників якості сприйняття інфокомунікаційних послуг в інтелектуальних мережах нового покоління", представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»*

### **Актуальність теми**

Рівень розвитку програмного забезпечення та технології штучного інтелекту на сьогодні дає змогу створювати новітні інтелектуальні інформаційно-комунікаційні системи, які можуть вчитися та адаптуватися до зовнішніх факторів. Без сумніву майбутнє як мережних так і інформаційних технологій полягає в інтелектуальному управлінні фізичними ресурсами та об'єднанні різноманітних інформаційних систем та технологій для досягнення поставлених цілей, які зазвичай формуються на основі вимог споживачів інформаційних сервісів. Розвиток технологій як програмних, так і апаратних засобів відбувається настільки стрімко, що в деяких випадках формалізація існуючих рішень, реалізованих на практиці, може наштовхнутися на факт того, що ці рішення уже не відповідають актуальним потребам користувачів. Сучасний стан і тенденції розвитку інформаційно-комунікаційних мереж показали, що потенціал росту продуктивності, пропускну здатності мереж на основі традиційних технологій практично вичерпаний. Це пов'язано з ростом затрат часу на маршрутизацію, з складнощами налаштування мережі і управління потоками в ній. Особливо з урахуванням нових потреб щодо якості сприйняття послуг для високошвидкісних глобальних мереж та мобільного зв'язку. Такий незадовільний стан традиційних мереж може змінитися через дві революційні події: перша, поява на ринку надзвичайному ускладненого, пропрієтарного, мережевого обладнання, і друга, поява принципово нового підходу, який називається програмно-конфігурованими інтенційно-орієнтованими мережами. Дотримання такого підходу дозволить прискорити маршрутизацію в мережах, зробити його зручнішим для конфігурації, віртуалізації, автоматизації та інтелектуалізації налаштування якості обслуговування, мережевої безпеки, що у свою чергу вимагає додаткових досліджень і

розробок. Зокрема, в області організації мережевих комутаторів, програмних додатків для управління мережею і платформ для їх виконання.

У своїй дисертаційній роботі Прислупський Андрій Іванович розв'язав актуальне науково-практичне 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 мережевих ресурсів є актуальною та своєчасною.

### **Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій**

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

1. у роботі використано новітні програмні засоби емуляції телекомунікаційних, а також засоби штучного інтелекту;
2. отримані результати не суперечать фундаментальним основам інформаційних систем та відповідають існуючим стандартам ІТУ-Т;
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 4 пунктів, які чітко окреслюють що було запропоновано автором вперше, а що розвинуто із вже існуючого:

1. Вперше запропоновано метод ініціації хендоверу в програмно-конфігурованій безпроводній Wi-Fi мережі, який, на відміну від відомих, під час 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.

2. Розвинуто метод маршрутизації потоків даних для програмно-конфігурованих мереж, який, на відміну від відомих, базується на адаптивній QoE-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.

3. Удосконалено метод управління якістю сприйняття послуг в інтелектуальних мережах, який, на відміну від відомих, для забезпечення замовленої якості послуги базується на намірах користувачів визначених у вигляді суб'єктивних QoE оцінок, що дає змогу на основі аналізу QoE намірів проводити автоматизовано конфігурацію мережі для трафіку інжинірингу та підвищити кінцеву якість сприйняття послуги.

4. 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.

### **Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях**

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 (імпаکت-фактором, квантиль 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.

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

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

2. Використання програмного модуля машинного навчання для системи моніторингу інтелектуальної мережі дало змогу до 30% зменшити обсяг сигнального трафіку в каналах зв'язку між мережевими обладнанням і контролером.

3. Використання розробленого програмного контролера для 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%.

Запропоновані рішення щодо управління мережевими ресурсами, процедури хендоверу на основі QoE критерію та якістю обслуговування зможуть на практиці застосовувати науково-дослідні організації, компанії, оператори мобільного зв'язку для покращення якості сприйняття послуг з боку користувачів у мережах із централізованим управлінням.

### **Загальна характеристика дисертаційної роботи**

В дисертаційній роботі розв'язано науково-практичне 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 мережевих ресурсів.

Дисертаційна робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 277 сторінок друкарського тексту, із них 8 сторінок вступу, 228 сторінок

основного тексту, 175 рисунків, 22 таблиці, список використаних джерел із 140 найменувань та 2 додатків. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список праць автора.

У вступі подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано всі процедурні положення та подано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У **першому розділі** дисертаційної роботи розглянуто основні принципи побудови, архітектури та процеси функціонування традиційних та програмно-конфігурованих мереж. Та вказані їх переваги у сфері управління якістю надання послуг. Визначено, що методи забезпечення якості обслуговування надзвичайно важливі для всіх організацій, які хочуть забезпечити для своїх додатків та послуг найкращу якість сприйняття. Представлено, що QoS спрямоване на покращення якості обслуговування за технічними параметрами на прикладному рівні, який недостатньо враховує фактичне сприйняття та відчуття користувача. 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.

**Другий розділ** роботи присвячений побудові концептуальної моделі інтелектуальної IBN мережі, що базується на архітектурі SDN. Згідно даної концепції мережеві адміністратори використовуючи IBN мережу забезпечують необхідне QoE дозволяючи програмному забезпеченню мережі автоматично досягати поставлених цілей, шляхом вираження бізнес-цілей. Для покращення якості обслуговування кінцевих користувачів та більш ефективного використання мережевих ресурсів запропоновано систему моніторингу QoE, яка базується на намірах для майбутніх програмно-конфігурованих мережах. Для інтеграції в програмно-конфігуровані мережі розроблено модуль машинного навчання та запропоновано модифікований метод для міграції комутаторів від одного контролера до іншого з врахуванням розподілу відповідно до QoE пріоритетів.

У **третьому розділі** розроблено контролер для розгортання інтелектуальних мереж, який забезпечує клієнтам індивідуалізацію обслуговування. Це досягається створенням інтенцій в мережі які перетворюють зрозумілий набір команд від користувача в код який розуміє мережа SDN. Даний контролер надає велику перевагу та зменшує вплив людини на мережу, що збільшує швидкість реагування у процесі переконфігурації мережі в умовах погіршення якості сприйняття послуг на 10 секунд у порівнянні із відомими. 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 віддаленого сервера.

**Четвертий розділ** дисертаційної роботи присвячений модулю для управління процедурою хендовера на основі параметра QoE для інтеграції у безпроводні програмно-конфігуровані мережі. Використання розробленого модуля дає змогу проводити процедуру НО не лише за рівнем потужності сигналу точки доступу, але й з врахуванням таких параметрів мережі, як затримка та втрати пакетів. Врахування цих параметрів дозволило

поєднати хендовер та динамічну QoE-маршрутизацію, для забезпечення високого рівня якості сприйняття. Зокрема 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. Розроблено алгоритми для системи виявлення вторгнень (IDS), заснованих на статистичному аналізі та глибокому навчанні, які спрямовані на виявлення підозрілої поведінки в сучасних та майбутніх програмно-конфігурованих мережах. У роботі для практичної реалізації інтелектуальної мережі нового покоління використано обладнання технології SDN Zodiac, яка, на відміну від пропрієтарних виробників мережевого обладнання є відкритою для модифікацій та дає змогу програмно реалізовувати власні рішення щодо управління ресурсами.

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

### **Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи**

1. Перший розділ роботи перенасичений аналізом існуючих моделей забезпечення якості обслуговування. Натомість питання інтелектуального управління якістю обслуговування в перспективних мережах нового покоління, що пропонуються іноземними науковцями описано поверхнево.

2. У таблиці 2.4а дисертаційної роботи автор наводить співвідношення між вартістю (метрикою маршруту) та рівнями MOS/QoE для відеопотоку реального часу, проте не відомо, на основі яких специфікацій чи вимог вони формуються.

3. У третьому розділі не наведено, основних обчислювальних характеристик для розробленого програмного контролера мережі в умовах використання модуля машинного навчання.

4. Окремі методи (QoE орієнтована маршрутизації та хендовер) потребують більш ґрунтовної перевірки їх адекватності в процесі практичної реалізації у розділі 4. Зокрема, це стосується досліджень, що проводять в імітаційній моделі з використанням середовища Mininet.

5. Не наведено пояснення стосовно отримання залежності представленої на рис.2.16.

6. Для вирішення проблеми виявлення мережевих аномалій та розпізнавання атак дисертант у розділі 4 (підрозділ 4.5) пропонує впровадження запропонованого ним методу формування набору інформативних ознак, що формалізують нормальну та аномальну поведінку системи на основі оцінки параметра Херста (H) мережевого трафіку, ґрунтуючись на віддаленості отриманих фактичних значень параметра Херста, від навчених значень еталонного трафіку без аномалії. Проте, залишається не зрозумілим на підставі чого визначається “еталонність” трафіку, оскільки для формування ряду контрольних вимірювань і заповнення таблиці по кожному трафіку користувача необхідна певна множина значень.

7. З роботи, не зрозуміло, чи матиме можливість запропонований алгоритм виявлення аномалій та мережевих атак ще на початковому етапі функціонування відслідковувати аномальність трафіку, оскільки зловмисник може маскуватися та атакувати мережу ще на етапі її розгортання.

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

### Загальний висновок

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 мережеских 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 рецензент  
доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри захисту інформації  
Національного університету  
«Львівська політехніка»

І.Р. Опірський

Підпис д.т.н., професора Опірського І.Р. засвідчую.

Вчений секретар  
Національного університету  
«Львівська політехніка»  
к.т.н., доцент



Р. Б. Брилинський