

**Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук,
Стрихалюку Б.М.**

**ВІДГУК
офіційного опонента**

**на дисертаційну роботу Прислупського Андрія Івановича
на тему " Підвищення показників якості сприйняття
інфокомунікаційних послуг в інтелектуальних мережах
нового покоління ", яка представлена на здобуття
наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»
та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

1. Актуальність теми дисертації

Сучасний етап розвитку інфокомунікаційних систем зумовлений постійним ростом потреб корпоративних і приватних користувачів. Основою таких систем є телекомунікаційні системи та мережі нового покоління, які передбачають конвергенцію фіксованих та мобільних технологій, створюючи одне середовище для створення і надання необмеженої кількості послуг. Таке середовище повинно забезпечити надання доступу до послуг користувачам із найкращою якістю, що передбачає створення систем інтелектуального керування мережевими ресурсами адаптуючись під мінливі потреби користувачів мереж нового покоління. Орієнтуючись на результати існуючих наукових досліджень, можна сказати, що існує ряд проблем інтелектуального керування ресурсами мережі, до яких можна віднести: ручне керування мережами, численні засоби централізованого керування, обробка великої кількості моніторингових даних та ін. Саме вирішення таких проблем пов'язано з необхідністю пошуку нових підходів до визначення їх фізичної та функціональної архітектури створення інтелектуальних мереж нового покоління для забезпечення кінцевих користувачів доступом до інфокомунікаційних послуг з високою якістю сприйняття у будь-який час та в будь-якому місці без обмежень за технологією та середовищем передавання. Для задоволення цих вимог необхідно розробити нові архітектури та інтелектуальні схеми для контролю та управління якістю послуг в майбутніх мережах.

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. Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота Прислупського Андрія Івановича містить перелік умовних скорочень, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та двох додатків. 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.

В роботі розв'язано 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 мережесих ресурсів.

Зміст дисертації належним чином відображає вирішення основних завдань та відповідає меті роботи, а також розкриває теоретичні та практичні дослідження.

У **вступі** подано загальну характеристику дисертаційної роботи та всі необхідні дані щодо актуальності проведених досліджень. Чітко подано мету і задачі дослідження для її досягнення, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також про особистий внесок здобувача. Наведено дані про впровадження результатів роботи, їх апробацію і публікації.

В **першому розділі** проведено аналіз існуючих методів та моделей управління якістю сприйняття послуг в сучасних телекомунікаційних мережах. Встановлено, що традиційні архітектури корпоративних мереж і центрів обробки даних важко адаптуються до вимог сучасного динамічного середовища інфокомунікаційних послуг до якого мають доступ значна кількість абонентських пристроїв незалежно від розташування, пристрою або часу. Крім того, бурхливий розвиток Інтернету речей передбачає підключення до мережі дедалі більше датчиків та автономних пристроїв. Виявлено, що SDN відіграє свою роль у реалізації IBN, які обіцяють дати мережесим адміністраторам більший контроль над мережами завдяки поєднанню автоматизації та машинного навчання. Такі мережі все ще знаходяться в стадії розробки та є закритими для відкритого тестування, що у свою чергу привертає особливу увагу в науковому товаристві щодо розвитку майбутніх інтелектуальних IBN мереж націлених на підвищення якості сприйняття послуг. В свою чергу, зростання різноманітності та обсягів інформаційних потоків в телекомунікаційних мережах, спонукають до підвищення якості сприйняття послуг в сучасних інфокомунікаційних системах.

У **другому розділі** представлено моделі та методи побудови інтелектуальних мереж з адаптивним керуванням ресурсами на основі показника якості сприйняття послуг. Зокрема, запропоновано концептуальну модель інтелектуальної IBN мережі на архітектурі SDN, що пропонує мережевим адміністраторам простий спосіб вираження бізнес-цілей для забезпечення необхідного рівня QoE використовуючи автоматизацію мережного програмного забезпечення. Розроблено систему моніторингу для майбутніх програмно-конфігурованих мереж на основі намірів, для покращення якості обслуговування кінцевих користувачів і дозволяє ефективніше використовувати мережеві ресурси. Представлено методи вимірювання затримки і втрати пакетів програмно-конфігурованої мережі. Також, проведено дослідження для оцінки ефективності запропонованої системи QoE-моніторингу шляхом генерації аудіо- та відеотрафіку в мережі Mininet. Визначено математичну функцію кореляції параметрів QoS/QoE та розроблено метод маршрутизації, який базується на інтегральному критерії якості обслуговування. Розроблено модуль машинного навчання для інтеграції в програмно-конфігуровані мережі з метою прогнозування рівня якості сприйняття послуги кінцевого користувача на основі затримки та втрат пакетів. Запропоновано модифікований метод для міграції комутаторів від одного контролера до іншого з врахуванням розподілу QoE пріоритетів. Проведено поступовий розрахунок міграційних коефіцієнтів та порівняльний аналіз звичайного міграційного методу із запропонованим. Представлено схему організації роботи мережі з використанням хмарних технологій. Запропоновано побудову централізованого контролера, який відповідатиме за побудову та підтримку існуючих шляхів MPLS-мережі, використовуючи актуальну інформацію про топологію мережі та завантаженість її сегментів, для максимально ефективного використання наявних ресурсів і, за необхідності забезпечити необхідний рівень QoS, перенаправляючи канали з перевантажених ділянок. Проаналізовано час побудови нового каналу для звичайної мережі MPLS та з використанням централізованого контролера, оцінено ефективність технологій MPLS та MPLS з контролером щодо тимчасової затримки мережі в процесі передачі пакетів.

У **третьому розділі** розроблено унікальний IBN-контролер який забезпечує клієнтам надійне з'єднання на основі створення інтенцій в мережі які перетворюють зрозумілий набір команд від користувача в код який розуміє мережа SDN. Такий контролер забезпечує деякі значення якостей зв'язку в залежності від потреб користувача, або його фінансової можливості. До переваг контролера IBN можна віднести: отримання намірів, які виражають усі види очікувань; наявність політик та моделей штучного інтелекту, які реалізують можливості, необхідні для аналізу стану системи та пошуку оптимізованих операційних дій на основі спостережень із керованого середовища; зменшує вплив людини на мережу, що збільшує швидкість реагування; повідомляє про виконання та статус своїх намірів; масштабованість нових функціональних можливостей, які можуть розвиватись паралельно розвитку самої мережі. 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, що дає змогу в умовах техногенних та природних катастроф автоматизовано керувати ресурсами, здійснювати діагностику та відновлювати дані серверної інфраструктури з метою забезпечення безперервності роботи і високої доступності бізнес сервісів.

У **четвертому** розділі представлено результати експериментальних досліджень на основі запропонованих моделей та методів у попередніх розділах. Зокрема, представлена побудова структурно-функціональної моделі інтелектуальної програмно-конфігурованої безпроводної мережі та методична база експериментальних досліджень. Розроблено модуль для управління процедурою хендовера на основі параметра QoE для інтеграції у безпроводні програмно-конфігуровані мережі. Розроблений модуль дає змогу врахувати рівень потужності сигналу точки доступу, затримку та втрати пакетів, хендовер і динамічну QoE-маршрутизацію для забезпечення високого рівня якості сприйняття послуг. Експериментальні дослідження показали, що запропонований алгоритм роботи контролера дозволяє швидко реагувати на раптові погіршення у мережі та забезпечувати необхідну якість сприйняття для кінцевого користувача. Проведено дослідження із зменшенням періодичності вимірювання параметрів каналів зв'язку та проведено інтеграцію модуля машинного навчання для передбачення рівня якості сприйняття на основі аналізу параметрів QoS. Встановлено, що запропоновані рішення для побудови інтелектуальних мереж дають змогу підвищити показник якості сприйняття послуги від QoE-3 до QoE-5. На основі використання обладнання технології SDN Zodiac для побудови інтелектуальної мережі нового покоління встановлено, що згідно стратегічного розвитку перспективних інформаційно-комунікаційних мереж створення національної системи зв'язку слід проводити з урахуванням можливості її подвійного призначення. Це дасть змогу використовувати її з метою надання послуг зв'язку для загального, відомчого та спеціального використання. Розроблено алгоритми для системи виявлення вторгнень, заснованих на статистичному аналізі та глибокому навчанні, які спрямовані на виявлення підозрілої поведінки в сучасних та майбутніх програмно-конфігурованих мережах. Запропонований підхід базується на вивченні часових рядів нормальної поведінки мережі та виявляє помітні аномалії мережі, одночасно зменшуючи час навчання на порядок. Використання запропонованого алгоритму виявлення та блокування шкідливого трафіку дало змогу зменшити на 5% втрати в загальному каналі зв'язку та відповідно для користувачів законного трафіку покращити якість обслуговування та сприйняття послуг.

Висновки до дисертації включають узагальнені результати дослідження та рекомендації щодо їх практичного застосування

В додатках до роботи подано акти впровадження її результатів та список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

3. 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 підтверджуються коректним використанням теоретичних та експериментальних методів досліджень, зокрема методів імітаційного моделювання, а також актами впровадження практичних результатів дисертаційних досліджень.

4. Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій.

У ході розв'язання поставленої наукової задачі здобувачем отримані наступні основні наукові результати:

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, пропускну здатності, втрати даних та затримок у мережі Wi-Fi, що дало змогу покращити якість сприйняття послуг для кінцевих користувачів.

2. 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, а з допомогою алгоритму машинного навчання Random Forest прогнозувати моменти погіршення якості сприйняття послуг для швидкої переконфігурації мережі націленої на підвищення якості обслуговування користувачів.

3. Розвинуто метод динамічного розгортання та міграції віртуальних комутаторів між мультиконтролерами SDN на основі пріоритетного аналізу замовленої якості сприйняття послуг кінцевих користувачів, що дало змогу забезпечити ефективне використання мережевих ресурсів в інтелектуальних мережах нового покоління для гарантування клієнт-орієнтованої якості обслуговування.

4. Удосконалено метод маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих інтелектуальних мережах, який, на відміну від класичних алгоритмів розв'язання задач маршрутизації, що оперують лише одним чи двома параметрами оптимізації для встановлення вартості шляху, використовує адаптивну QoE-орієнтовану метрику маршруту, що автоматизовано розраховується контролером мережі на основі математичної моделі кореляції нормалізованого значення замовленого рівня якості

сприйняття сервісу та прогнозованого інтегрального адитивного критерію поточних показників QoS, що дало змогу покращити якість сприйняття послуг в умовах адаптації до мінливих вимог користувачів та обмеженості мережевих ресурсів.

5. Практичне значення результатів роботи

Отримані в дисертаційній роботі науково-прикладні результати дозволяють значно підвищувати якість сприйняття послуг з боку користувачів у мережах із централізованим управлінням.

Зокрема:

1. Розроблено алгоритми моніторингу та аналізу мережевого трафіку, що дали змогу підвищити ефективність використання стандартних систем виявлення та запобігання вторгненню шляхом використання інтелектуальних мультифрактальних процесів аналізу вхідного трафіку. Експериментальним шляхом доведено, що використання розроблених алгоритмів в комунікаційній інфраструктурі дало змогу в умовах присутності шкідливого трафіку в каналах зв'язку зменшити втрати даних до 5%.

2. Розробка програмного модуля машинного навчання для системи моніторингу інтелектуальної мережі дозволило до 30% зменшити обсяг сигнального трафіку в каналах зв'язку між мережевим обладнанням і контролером, а також реагувати на несприятливі поєднання значень показників якості і попереджати ситуації, коли користувач незадоволений якістю отриманих сервісів для адаптивного прогнозування моменту переконфігурації мережі.

3. Комплексне використання QoE-орієнтованих методів маршрутизації та ініціації хендвера дало змогу підвищити від 3.5 до 5 показник якості сприйняття послуг, оціненого за п'ятибальною шкалою, де вище значення характеризує кращу якість обслуговування.

4. Розроблено програмний контролер для інтенційно-орієнтованої інтелектуальної мережі, який оснащений унікальними функціональними модулями аналізу QoE-інтенцій та моделями штучного інтелекту, використання якого дало змогу реалізувати можливості, необхідні для аналізу стану системи та пошуку оптимізованих операційних дій на основі спостережень із керованого середовища. 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.

5. Запропоновано автоматизовану систему відновлення доступності серверів на яких розгортаються SDN/IBN контролер та IoT брокер, що дало змогу в умовах техногенних та природних катастроф автоматизовано управляти ресурсами, здійснювати діагностику та відновлювати дані серверної інфраструктури з метою забезпечення безперервності роботи і високої доступності бізнес сервісів.

Важливість результатів дисертації підтверджена актами впровадження ТзОВ «МаксіТех» для підвищення показників якості сприйняття послуг та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційній корпоративній мережі.

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

Основні результати за напрямком роботи опубліковано в 14 наукових працях, із 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.

7. Відповідність теми дисертації профілю спеціальності

Дисертація Прислупського А.І. повністю відповідає стандарту спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

8. Зауваження до дисертаційної роботи

1. Загальне зауваження по розділу 2. Розділ є перевантаженим за науковою новизною, оскільки там представлені як окремі моделі, так і методи. На мою думку доцільніше було б їх розмежувати. Крім того, не до кінця зрозуміло поняття «модуля», «системи», «контролера» та їх взаємозв'язок із розробленими моделями та методами побудови та моніторингу параметрів мереж IBN.

2. Розділ 4, підрозділ 4.2. В підрозділі наголошується про розробку та дослідження методу ініціації хендовера в інтелектуальній IBSDWN на основі показника якості сприйняття послуг. Проте у висновках розділу 4 наголошується на розробленому модулі управління процедурою хендовера на основі параметра QoE для інтеграції у безпроводні програмно-конфігуровані мережі. Тому, тут недокінця зрозуміло, яким чином контролер пов'язаний із розробленням методу та алгоритмом його роботи.

3. В роботі розроблено моделі та методи розгортання інфраструктури, моніторингу, функціонування, маршрутизації та ініціації хендоверу в програмно-конфігурованих мережах на основі машинного навчання, проте у загальних висновках та висновках до кожного розділу не наведено показники адекватності та достовірності, а також міститься недостатньо інформації для порівняння їх із існуючими.

4. У другому розділі роботи (формула 2.4) формалізовано математичну модель кореляції параметрів QoS/QoE на основі апроксимуючої функції. Проте, не зовсім зрозуміло, що це за апроксимуюча функція та як вона отримана. Крім того, яким чином отримано визначенні та усередненні

експериментальним шляхом значення оцінок QoE в умовах поступової зміни нормалізованого значення інтегрального адитивного критерію якості представлення точками графічним методом, оскільки, як вказано у роботі, використовуються власні експериментальні дослідження на реальному SDN-обладнанні.

5. У розділі 4, для практичної реалізації розроблених методів запропоновано архітектуру інтенційно-орієнтованої програмно-конфігурованої безпроводної мережі на основі Wi-Fi та запропоновано метод ініціації хендовера в інтелектуальній IBSDWN на основі показника якості сприйняття послуг. Перевагою такого методу є врахування таких факторів як: затримка, втрати пакетів, джитер і т.д. Яким чином, вказані фактори впливають на показник якості сприйняття послуг? З тексту не зовсім зрозуміло чи враховуються вони комплексно або кожен окремо. А також, які параметри чи коефіцієнти врахування таких факторів взято за основу і як вони впливають на ефективність запропонованого методу хендоверу за критерієм QoE.

6. У другому розділі роботи, підрозділ 2.2. на рис 2.5 наведено процес вимірювання затримки пакетів в мережі, що відображено у формулі (2.1). Як відомо, при існуванні різного роду факторів впливу виникають помилки в пакетах, а також на фізичному рівні у кадрах при існуванні різного роду факторів впливу. В результаті чого, існує механізм повторної передачі, який збільшує затримку при передачі пакетів без помилок. Із вказаної формули незрозуміло де такий механізм враховується.

7. Не проведено порівняльного аналізу розробленої інтелектуальної мережі нового покоління на основі обладнання технології SDN Zodiac, із уже існуючими розробками. Це ставить під сумнів перевагу та ефективність розроблених дисертантом програмних компонентів, що реалізують нові методи управління якістю надання послуг

8. В загальному, в дисертаційній роботі зустрічається опис роботи пристроїв та програмних пакетів, а також їх параметри і характеристики. Це є довідниковим матеріалом, який знаходиться в технічній документації. Крім того, зустрічається повторне пояснення та розшифрування термінів, що є дублюванням переліку скорочень.

Зазначені недоліки не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

9. Достовірність і відповідність дисертації встановленим вимогам

Достовірність та обґрунтованість наукових досліджень та висновків Прислупського А.І., що відображені у дисертаційній роботі, забезпечується коректним використанням імітаційного моделювання та його підтвердження експериментальними дослідженнями.

Анотація дисертації ідентично та повністю розкриває зміст роботи, яка, в цілому, відповідає усім вимогам до робіт, що подаються на здобуття наукового ступеня доктора філософії, є завершеною, виконана та оформлена

на достатньо високому рівні. Стиль викладення матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх якісного сприйняття.

10. Загальні висновки

1. Виходячи із критичного розгляду дисертації, праць здобувача, актів впровадження, аналізу ступеня новизни наукових положень та практичної цінності отриманих у роботі результатів, висновків та рекомендацій можна зробити висновок, що дисертаційна робота Прислупського Андрія Івановича «Підвищення показників якості сприйняття інфокомунікаційних послуг в інтелектуальних мережах нового покоління» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові наукові результати, що, в сукупності, забезпечили розв'язання актуального науково-практичного 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 в галузі телекомунікацій та радіотехніки.

2. Дисертаційна робота за змістом та оформленням відповідають установленим вимогам. Результати дисертації достатньо повно опубліковані у фахових наукових виданнях та апробовані на конференціях і семінарах.

3. 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 розглянута спеціалізованою вченою радою на предмет допуску до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
доктор технічних наук, доцент,
доцент кафедри інфокомунікаційних
систем і технологій
Вінницького національного
технічного університету



Дмитро МИХАЛЕВСЬКИЙ

Підпис *Дмитро Михайлович Миколайчук*
ПОСВІДЧУЮ
Зав. канцелярією *ДМ*