Голові разової спеціалізованої вченої ради Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій
доктору технічних наук, професору
МЕЛЬНИКУ Юрію Віталійовичу
03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7

ВІДГУК
офіційного опонента
ХЛАПОНІНА Юрія Івановича,
доктора технічних наук, професора, професора кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки Державного торговельно-економічного університету
на дисертаційну роботу Табора Дениса Івановича на тему:
«**Методи і модель підвищення ефективності передавання багатоканальним пристроєм в мережах стандарту IEEE 802.11be**»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми дисертації. Зміна профілю навантаження у сучасних бездротових мережах ставить нові вимоги до якості обслуговування цифрових сервісів. Якщо раніше ключовим показником була максимальна пропускна здатність, то тепер для застосунків реального часу головним фактором стає забезпечення гарантовано низької затримки доставки пакетів. У цьому контексті технологія багатоканальної роботи (MLO) стандарту IEEE 802.11be пропонує механізми зниження затримок які дозволяють пристрою об'єднувати канали і динамічно перенаправляти трафік на найменш завантажений інтерфейс чи дублювати критичні дані на кількох каналах.

Проте як показує практика, управління окремими радіоінтерфейсами не дозволяє досягти заявлених стандартом показників продуктивності. Коли кожен канал функціонує окремо, без спільного управління, можуть виникати ситуації розбалансування передачі при яких пакети можуть очікувати доступу, тоді як інші доступні канали залишаються вільними. Що призводить до неоптимального використання сукупного ресурсу радіомережі.

Щоб задовольнити вимоги до якості обслуговування, мережа повинна відійти від ситуативного доступу і перейти до детермінованого планування ресурсів на рівні MAC.

З огляду на це, створення математичних моделей розподілу трафіку, які б формалізували міжлінкову взаємодію та дозволяли керувати

багатоканальним пристроєм як єдиною системою в стохастичному середовищі, є науковою задачею сьогодення.

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень. Теоретико-методологічна база дисертаційної роботи відзначається високим рівнем наукової аргументації. Автором поєднано фундаментальні принципи побудови бездротових мереж із математичним інструментарієм, зокрема теорією ймовірностей та методами прийняття рішень в умовах стохастичної невизначеності. Сформульовані висновки логічно випливають із проведеного аналізу апаратних обмежень багатоканальної роботи. Запропоновані алгоритмічні рішення є достовірними, оскільки вони пройшли перевірку шляхом моделювання. Кількісні показники ефективності, отримані під час тестування системи на здатність дотримуватися часових обмежень для трафіку реального часу, засвідчують дієвість запропонованих підходів, а логіка роботи алгоритмів повністю узгоджується з механізмами доступу до середовища стандарту IEEE 802.11be.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації розв'язано наукову задачу управління ресурсами в мережах IEEE 802.11be. У процесі дослідження вперше отримано такі результати:

1) *Удосконалено* метод оцінки каналу для багатоканального пристрою стандарту IEEE 802.11be, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на комплексному аналізі стану радіосередовища за рахунок впровадження інтегрованого показника якості та вагових коефіцієнтів, які формалізують поточне завантаження спектру, динаміку завад та вплив пристроїв попередніх поколінь Wi-Fi, що дозволяє проводити оцінку і забезпечити обґрунтований вибір оптимальних частотних конфігурацій і каналів.

2) *Вперше розроблено* математичну модель розподілу трафіку для багатоканального пристрою, яка ґрунтується на представленні пристрою як єдиної системи масового обслуговування, де стан середовища та обмеження режимів багатоканальної роботи формалізуються вектором стану і матрицею рішень, а обґрунтування вибору досягається за рахунок встановлення аналітичного зв'язку між цими параметрами керування та очікуваними показниками якості обслуговування, що дозволяє прийняти рішення про доцільність використання політик розподілу трафіку для поточного циклу планування при багатоканальній роботі.

3) *Вперше розроблено* метод розподілу ресурсів між каналами багатоканального пристрою, який інтегрує результати аналізу стану радіосередовища та модель розподілу трафіку за рахунок поєднання профілювання потоків даних за категоріями доступу із прогнозуванням їхнього часу зайнятості радіоресурсу та оптимізацією матриці розподілу навантаження, що дозволяє забезпечити узгоджене керування каналами для підвищення сумарної пропускної здатності та мінімізації затримок доставки пакетів при багатоканальній роботі.

Оцінюючи наведені положення, слід підкреслити високу теоретичну значущість роботи. Головна новизна полягає в тому, що багатоканальний пристрій вперше розглядається як єдина стохастична система масового обслуговування. Це дозволило автору математично коректно зв'язати процеси профілювання трафіку з прогнозуванням зайнятості ефіру, тим самим успішно розв'язавши комплексну задачу детермінованого планування ресурсів на рівні MAC.

Практична цінність результатів. Оцінюючи практичне значення дисертаційної роботи, слід відзначити її внесок у розв'язання актуальної проблеми управління радіоресурсами у сучасних мережах. Безперечною заслугою здобувача є розробка дієвого математичного та методичного інструментарію, який спрямований на підвищення ефективності мереж стандарту IEEE 802.11be і може слугувати основою для вдосконалення механізмів доступу до середовища.

Важливим прикладним результатом слід вважати запропонований удосконалений метод оцінки каналу, цінність якого полягає у можливості автоматизувати процес динамічного вибору оптимальних частотних конфігурацій безпосередньо в багатоканальних пристроях. На практиці застосування цього методу дає змогу суттєво знизити негативний вплив міжканальних завад, зокрема від обладнання попередніх поколінь Wi-Fi, та підвищити стабільність з'єднання у щільно завантаженому спектрі.

Окрему увагу заслуговує математична модель розподілу трафіку, значимість якої обумовлена можливістю здійснювати кількісне порівняння та комплексну аналітичну оцінку ефективності різних політик доступу на рівні MAC. Завдяки цьому можна прогнозувати рівень затримок для пріоритетного трафіку та обґрунтовано обирати оптимальні стратегії балансування навантаження.

Не менш вагомим є метод розподілу ресурсів, який створено з урахуванням можливості його інтеграції безпосередньо в алгоритми канального рівня. Даний метод реалізує узгоджене між каналами динамічне керування навантаженням і дозволяє зменшити затримку доставки пакетів і підвищити сумарну пропускну здатність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Тематика дисертації інтегрована в напрями науково-дослідних робіт, що виконуються у Державному університеті інформаційно-комунікаційних технологій. Практичну реалізацію зв'язку з науковими планами підтверджено застосуванням результатів здобувача у межах НДР «Методи моніторингу продуктивності телекомунікаційних мереж на основі аналізу показників їх якості» спільно з ПНВП «Сардер Телеком». Також матеріали дослідження успішно імплементовані в освітній процес ДУІКТ, де вони використовуються при виконанні кваліфікаційних робіт та вивченні різних фахових дисциплін.

Повнота викладу основних результатів дисертації та апробація. Основні наукові положення та прикладні рішення дисертаційного дослідження

відображені у фаховій літературі. Загальний обсяг напрацювання здобувача за темою дисертації становить 5 наукових статей у виданнях, внесених до переліку фахових видань України, та 4 виступи на науково-практичних конференціях.

Окремо слід наголосити на високому рівні академічної самостійності автора, майже всі матеріали підготовлено та опубліковано ним одноосібно.

Результати дисертації пройшли належну апробацію. Матеріали дисертації обговорювалися під час виступів на міжнародних та всеукраїнських наукових форумах, зокрема на V Всеукраїнській конференції «Telecommunication: problems and innovation», конференції «Сучасні інтелектуальні інформаційні технології в науці та освіті» та IX International Workshop «CMIS-2026».

Загальна кількість, обсяг та зміст оприлюднених праць повністю розкривають суть дослідження і задовольняють вимоги Порядку присудження ступеня доктора філософії.

Загальна характеристика структури та змісту дисертаційної роботи.

Дисертація є повністю завершеним і логічно вибудованим науковим дослідженням, загальним обсягом 122 сторінки. Структурно робота складається зі вступу, чотирьох взаємопов'язаних розділів, загальних висновків та списку використаних джерел.

Змістовне наповнення дисертації характеризується послідовним переходом від теоретичного аналізу проблематики до розробки прикладних алгоритмічних рішень. Дослідження розпочинається із системного аналізу обмежень багатоканального доступу в мережах IEEE 802.11be, що створює підґрунтя для розробки вдосконаленої методики оцінювання спектральної конфігурації пристроїв з урахуванням міжлінкової інтерференції. Далі автор формує комплексну математичну модель для станів радіосередовища та формалізації процесу прийняття керуючих рішень. В результаті теоретичні напрацювання трансформуються у практичну методику адаптивного розподілу трафіку, працездатність та ефективність якої доведена результатами імітаційного моделювання у порівнянні з існуючими базовими стратегіями доступу.

Матеріал викладено у строгому науковому стилі, послідовно та з високим рівнем математичної аргументації. Оформлення роботи повністю відповідає чинним нормативним вимогам, у тексті чітко сформульовані положення, що виносяться на захист, витримано архітектуру наукового пошуку, а всі запозичені ідеї супроводжуються коректними посиланнями на першоджерела.

Зауваження. Під час вивчення запропонованих методів узгодженого управління радіоресурсами виникає кілька практичних питань щодо імплементації розробленої моделі. Хоча імітаційне моделювання у середовищі MATLAB підтверджує зниження затримок та зростання пропускної здатності,

воно абстрагується від обчислювального навантаження на реальне обладнання. Виконання таких комплексних алгоритмів оптимізації вимагатиме значних процесорних ресурсів, що може стати вузьким місцем для мобільних клієнтських пристроїв з обмеженим енергобюджетом. Окремої уваги потребує запропонований механізм компенсації конфліктів у режимі NSTR. Примусове вирівнювання тривалості передач за допомогою додавання пустих байтів дійсно вирішує проблему внутрішньосистемної інтерференції, проте у роботі бракує кількісної оцінки того, як ці накладні витрати впливають на загальну спектральну ефективність при тривалому використанні надширокоих смуг. Також варто зазначити, що орієнтація дослідження на стаціонарний розподіл ресурсів залишає нерозкритим питання швидкодії алгоритму в умовах різких динамічних змін радіосередовища або високої мобільності абонентів, де метрики каналу можуть деградувати швидше, ніж система встигне перепланувати передачу. Зазначені моменти варто розглядати як вектори для подальшого вдосконалення технології багатоканального доступу.

Загальний висновок про дисертаційну роботу. Дисертаційна робота Табора Дениса Івановича на тему «Методи і модель підвищення ефективності передавання багатоканальним пристроєм в мережах стандарту IEEE 802.11be» є самостійним завершеним науковим дослідженням, у якому отримано нові наукові результати, що мають теоретичне та практичне значення для телекомунікацій.

Дисертаційна робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інженерії
програмного забезпечення та кібербезпеки
Державного торговельно-економічного
університету

«23» липня 2026 р. Юрій ХЛАПОНІН

Підпис Ю. Хлапоніна засвідчую
Начальник відділу кадрів
Н. Шевченко