

Голові спеціалізованої вченої ради  
Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка»  
79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора кафедри кібербезпеки та захисту інформації Київського національного університету імені Тараса Шевченка Толюпи Сергія Васильовича на дисертаційну роботу **Кагала Ігоря Олександровича на тему "Підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi"**, подану до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

### 1. Актуальність теми дисертації

В епоху бурхливого розвитку і конвергенції інформаційних і телекомунікаційних технологій, покликаних прискорювати розвиток світової економіки й суспільства, особливу роль відіграє безпроводний зв'язок. Різке збільшення обсягів інформаційного трафіку, яке, в основному, спричинене мобільним відео, соціальними медіа та різноманітними сервісами «Інтернету речей» змушує телекомунікаційних операторів шукати інноваційні способи підвищення пропускної здатності мережі в умовах обмеженості ресурсів радіочастотного спектру. В умовах зростання обсягів даних, що надходять від кінцевих пристроїв збільшується енергоспоживання мобільних телекомунікаційних систем. В системах мобільного зв'язку більшу частину енергії споживає апаратура інфраструктури мережі. Стан досліджень на даний час показує, що до 80% споживання в даному секторі припадає на базові станції мобільного зв'язку, зокрема і в сучасних мережах, що використовують технологію LTE. Такі методи, як тимчасове відключення антен базових станцій (активування передачі при наявності призначених для користувача даних), розгортання невеликих комірок і використання режимів енергозбереження в залежності від локалізації абонентського навантаження в сучасних мережах мобільного зв'язку є прикладом того, як можна зменшити споживання енергії.

Саме тому, актуальним науково-практичним завданням є розроблення нових методів адаптивного планування радіоресурсів, координованого вико-

ристання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами зв'язку та адаптивного формування структури рівня радіодоступу для підвищення якості обслуговування та енергоефективності гетерогенних мереж мобільного зв'язку.

## **2. Загальна характеристика роботи**

Дисертація Кагала Ігоря Олександровича присвячена розв'язанню наукового завдання підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi шляхом розроблення методів адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону, планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу, а також удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для уникнення короточасних відмов каналу в процесі передавання відеопотоків реального часу.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Робота викладена на 195 сторінках, включаючи 133 сторінки основного тексту. Перелік використаних джерел містить 200 найменувань.

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

У першому розділі проведено огляд сучасного стану та перспективи розвитку мобільних мереж шляхом вивчення останніх підходів присвячених плануванню, розгортанню та експлуатації мереж нового покоління оснований на технології LTE. Встановлено, що тенденція до інтеграції мереж LTE і технології Wi-Fi виникла у зв'язку з потребою мобільних операторів в нарощуванні ємності мережі доступу та запобігання її перевантажень. Доведено, що WLAN архітектура повинна бути централізованою для забезпечення гнучкої інтеграції з іншими мережами операторів мобільного зв'язку, доступною в управлінні радіосистемою, масштабованою та мати надійну мережеву безпеку. Швидке зростання трафіку і обмеженість частотного ресурсу, що виділяється операторам мобільного зв'язку, змусило розробників телекомунікаційного обладнання звернути увагу на неліцензовані діапазони частот. В даний час організація 3GPP продовжує розробку і стандартизацію радіомережі доступу п'ятого покоління 5G NR (New Radio), де як одна з функціональних можливостей, так само як і в існуючих стандартах 4G LTE, закладена робота в неліцензійних діапазонах частот. На основі аналізу, доведено, що один з ос-

новних критичних моментів, який виникає при роботі мобільних мереж в зазначених діапазонах, це забезпечення чесного і гармонійного співіснування з іншими системами, що працюють в цих діапазонах, такими як Wi-Fi (802.11a/h/j/n/ac/ax) в діапазоні 5ГГц.

У другому розділі запропоновано концептуальну модель інтегрованої LTE/Wi-Fi мобільної мережі наступного покоління, яка включає в себе ієрархічну структуру комірок різного розміру. Розроблено метод адаптивного управління доступом до неліцензійного радіоканалу в умовах одночасного функціонування систем Wi-Fi та LTE-U для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування та уникнення міжсистемної інтерференції. Для подолання наслідків короточасних втрат зв'язку (інтерференція, низький рівень сигналу), що можуть виникнути у мережах Wi-Fi в умовах масового розгортання LTE-U, запропоновано алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi. Для підвищення якості обслуговування та енергоефективності мережі запропоновано метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi/LTE-U.

У третьому розділі для оцінки ефективності запропонованих рішень побудовано імітаційну модель з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу LTE/Wi-Fi. Проведено моделювання та дослідження ефективності використання різних підходів щодо інтеграції технології LTE та Wi-Fi. Доведено, що якщо мережа складається лише з рівня макрокомірок, то в середньому один абонент може отримувати пропускну здатність від 20 до 25 Мбіт/с, в умовах обслуговування макрокоміркою та пікокоміркою середня пропускну здатність становитиме 45-50 мбіт/с, а при запропонованому підході щодо обслуговування абонента в гетерогенній мережі з трьома рівнями базових станцій включаючи LTE-U, середня пропускну здатність на одного абонента становить 67-71 Мбіт/с, відповідно коли усі малі комірки активні, то середня пропускну здатність становить 70-75 Мбіт/с. На основі розробленої імітаційної моделі та реалізації алгоритму аналізу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі показано, що запропоновані рішення дають змогу підвищити енергоефективність мережі на 30-42% при зменшенні середньої пропускну здатності мережі на 1 – 4%.

У четвертому розділі впроваджено метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі Wi-Fi в корпоративній інфраструктурі НУ “Львівська політехніка”, що дало підвищити якість обслуговування користу-

вачів. Розроблено імітаційну модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” в середовищі Ornet Modeler, яка дає змогу спрогнозувати затримки обслуговування потоків реального часу в корпоративній мережі при конфігурації різних дисциплін обслуговування черг на мережевих пристроях в умовах різного навантаження та вибрати оптимальні рішення для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування. Досліджено процес передавання відеопотоків реального часу по мережі Wi-Fi та встановлено, що використання стандартної дисципліни обслуговування черги FIFO в умовах короткочасних відмов каналу призводить до виникнення проблеми блокування черги головним пакетом, у результаті чого якість передавання відеопотоків зменшується як для отримувачів з погіршеною якістю з'єднань, так і для отримувачів, якість з'єднань з якими залишалась незмінною. Для вирішення цього в роботі удосконалено алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi, який на відміну від відомих, враховує час очікування пакету в черзі. Визначено ефективність модифікованого алгоритму обслуговування черги в процесі передавання відеопотоків реального часу. Результати числових експериментів показали те, що у порівнянні із існуючим адаптивним циклічним планувальником ARR запропонований алгоритм забезпечує кращу якість передавання відеопотоків від 5% до 45% оціненої за критерієм показника MSE

У додатках до роботи подано акти впровадження її результатів та список праць, у яких відображені результати дисертаційної роботи.

### **3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, наданих в дисертації, їхня достовірність**

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Кагала Ігоря Олександровича, впливають з наступного:

- отримані результати не суперечать класичним положенням теорії систем безпроводного зв'язку;

- достовірність отриманих претендентом науково-практичних результатів засвідчено актами впровадження;

- отримані наукові результати забезпечуються коректним використанням математичного апарату теорії систем масового обслуговування та засобів імітаційного моделювання на ЕОМ;

- отримані нові результати гармонійно доповнюють відомі;

- матеріали дисертації обговорювались на 9 міжнародних та всеукраїнсь-

ких науково-технічних конференціях, а також на наукових семінарах, і отримали схвальну оцінку.

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

1. Вперше запропоновано *метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi*, який на відміну від відомих, використовує діаграми Вороного для адаптивної зміни структури мережі радіодоступу та розподілу загальної смуги частот між центральною і граничною зоною комірки LTE в залежності від локалізації абонентського навантаження, що дало змогу уникнути міжкоміркової інтерференції, підвищити якість обслуговування та енергоефективність мережі.

2. Удосконалено *метод адаптивного управління доступом до неліцензійного діапазону в умовах одночасного функціонування систем Wi-Fi та LTE-U*, який на відміну від відомих, базуючись на вимогах QoS користувачів централізовано приймає обґрунтовані рішення щодо частки використання радіоресурсів оператором мобільного зв'язку LTE, що дало змогу підвищити спектральну ефективність в гетерогенних мережах LTE з уникненням міжсистемної інтерференції.

3. Набула подальшого розвитку *імітаційна модель гетерогенної мережі з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу LTE/Wi-Fi*, яка на відміну від відомих, враховує стохастичну геометрію розміщення вузлів мережі спільно з особливостями обслуговування потоків трафіку користувачів в часі, що дало змогу визначити ефективність запропонованих рішень, отримати сценарії поведінки та обслуговування абонентів близькі до реальних.

#### **5. Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях**

Основні результати, які отримані в дисертаційній роботі, опубліковано у 15 наукових праць, серед них 1 стаття в іноземному науковому періодичному виданні за напрямом дисертації, 5 статей у наукових фахових виданнях України та 9 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій. Опубліковані праці повністю висвітлюють матеріали дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи Кагала І. О. пройшли всебічну апробацію на семінарах та конференціях, в тому числі міжнародних, і отримали схвалення провідних фахівців телекомунікаційної галузі.

## **6. Відповідність дисертації встановленим вимогам**

Оформлення дисертації відповідає вимогам до дисертаційних робіт, а також чинним вимогам Постанов Кабінету Міністрів України. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту дисертаційної роботи, висвітлює всі отримані результати, сформульовані висновки та запропоновані рекомендації. Стиль викладення матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття.

## **7. Важливість для науки і народного господарства одержаних результатів та шляхи їх використання**

1. Використання модифікованого методу повторного розподілення частот між комітками LTE в умовах адаптивного формування структури радіодоступу та неліцензійного діапазону частот, дало змогу підвищити на 25% швидкість передавання даних для абонентів інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі з уникненням міжкоміркової інтерференції.

2. Використання запропонованого алгоритму моніторингу та аналізу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі, дало змогу забезпечити підвищення енергоефективності мережі на 30-42% шляхом зменшення середньої пропускної здатності на 1% -4% мережі .

3. Використання методу адаптивного формування розміру комітки безпроводної Wi-Fi мережі дало змогу підвищити якість обслуговування за критерієм пропускної здатності точки доступу на 36% в умовах пікових навантажень на окремі групи комірок.

4. Використання розробленої імітаційної моделі інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” в середовищі Opnet Modeler дало змогу на етапі експлуатації та планування мережі знаходити оптимальні рішення, щодо вибору алгоритмів обслуговування черг на мережевих пристроях для забезпечення необхідного рівня QoS.

5. Використання удосконаленого алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi в умовах короткочасних відмов каналу при передаванні декількох відеопотоків реального часу, що дало змогу в інтегрованій LTE/Wi-Fi мережі покращити якість надання відео послуг від 5% до 45% оціненої за критерієм MSE.

У додатку до роботи подано акти використання результатів роботи у промисловості, які підтверджують їх достовірність .

## **8. Зауваження щодо дисертаційної роботи.**

1. У науковій новизні роботи пропонуються методи, що дають змогу уникнути міжкоміркової та міжсистемної інтерференції в інтегрованій LTE/Wi-Fi мережі. Проте, яким чином проводилось оцінювання та порівняння інтерференції до застосування запропонованих рішень і після у роботі не наведено. Доцільно було б зробити таке порівняння.

2. У другому розділі підпункт 2.3 розроблено алгоритми обслуговування черги каналного рівня та наводиться ймовірнісний опис поведінки системи за допомогою математичних виразів. Проте у дисертаційній роботі конкретних досліджень стосовно оцінки ймовірності вибору певного пакету на обслуговування з черги каналного рівня у Wi-Fi мережі не проведено.

3. На рис. 2.22 другого розділу дисертаційної роботи показано принцип поділу на частотні зони комірки неправильної форми на основі виміряного значення сигнал/шум. Проте, яким саме оптимальним значенням є сигнал/шум для поділу на граничну і центральну зони, і як оцінюватиметься на практиці в режимі реального часу функціонування мережі не відомо.

4. Не зовсім зрозуміло, яким чином отримується результат середньої частки активних малих комірок наведеного на рис. 3.19 дисертаційної роботи, та як отримано значення виграшу в економії електроенергії на 30-42% в процесі функціонування мережі.

5. При верифікації запропонованих рішень важливим також є питання щодо кількості експериментів, що виконуються: їх недостатня кількість призводить до зниження достовірності отриманих характеристик. Зокрема, експериментальні результати, що проводились на реальній мережі НУ “Львівська політехніка” у підрозділі (4.2 Практична реалізація методу адаптивного формування радіоструктури Wi-Fi мережі НУ “Львівська політехніка”.) виконувались одноразово. Таким чином, отриманий результат підвищення якості обслуговування за критерієм пропускну здатності точки доступу на 36% є сумнівним.

6. У роботі не описано, яким чином були співставлені значення показника MSE із MOS оцінками відображених на рис. 4.17 та рис. 4.18.

Представлені зауваження не змінюють у цілому позитивної оцінки роботи.

### **Загальні висновки**

1. Дисертаційна робота Кагала Ігоря Олександровича «Підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi» є

