

67-72-91/1  
01.10.18

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора Лісового Івана Павловича на дисертаційну роботу **Масюка Андрія Романовича на тему "Моделі та алгоритми спільного керування ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах"**, подану до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

### **1. Актуальність теми дисертації**

Стрімкий розвиток мереж радіодоступу, поява нових учасників телекомунікаційного ринку потребують удосконалення інфраструктури мережні з метою надання нових послуг, підтримки якості послуг на високому рівні та забезпечення сумісності різних абонентських пристроїв. Повністю гарантувати високу якість послуг існуючі стандарти 2G-4G забезпечити не можуть, оскільки покриття жодної із загальнодержавних мереж радіодоступу не є абсолютним в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу. Тому впровадження нової технології чи нової архітектури є необхідним етапом для задоволення потреб користувачів. При цьому оператори не поспішають впроваджувати нову модель їх обслуговування, оскільки це потребує повної або часткової реорганізації існуючої мережі, значних капіталовкладень. Таким чином важливого значення набуває впровадження концепції мережі, яка включає в себе низькі капітальні та експлуатаційні витрати і, при цьому, завдяки впровадженню нових послуг, постійному нарощуванню мережі – збільшить прибутки телекомунікаційних компаній. Такий спосіб побудови мережі спонукає різних операторів до спільного будівництва і спільного використання ресурсів мережі. Тому виникає необхідність в об'єднанні мереж різних операторів, побудованих за різними технологіями, тобто формування гетерогенної мережі. Мотивом такого сценарію також є неможливість визначення єдиної технології радіодоступу, яка б поєднувала оптимальну пропускну спроможність та збалансовані витрати на побудову мереж. Саме тому актуальними завданнями в процесі розбудови гетерогенної мережі є ефективне керування спільними ресурсами і прозоре "безшовне" переміщення абонента, що включає у себе підтримку мобільності, хендовер, забезпечення QoS, систему безпеки та тарифікації.

### **2. Загальна характеристика роботи**

Дисертація Масюка Андрія Романовича присвячена розв'язанню наукової задачі підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж радіодоступу та підвищення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору систем радіодоступу та

розроблення моделі спільного керування ресурсами з використанням технології обробки великих обсягів даних.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Роботу викладено на 182 сторінках, включаючи 131 сторінку основного тексту. Перелік використаних джерел містить 121 найменування.

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

У першому розділі виконано аналіз останніх релевантних робіт та існуючих концепцій розвитку гетерогенних мереж мобільного зв'язку. Розглянуто стратегічні напрями впровадження SDN, NFV і хмарних технологій, перший пов'язаний із підвищенням ефективності мережі та гнучкості послуг, другий спрямований на отримання переваг від поєднання нових бізнес-можливостей. Визначено ряд невирішених питань ефективного безвідмовного зв'язку. Розглянуто існуючі критерії реалізації процедури вертикально-горизонтального хендовера у гетерогенних мережах.

У другому розділі запропоновано критерії для забезпечення ефективного керування ресурсами шляхом ініціації процедури горизонтально-вертикально хендовера. Формалізовано завдання для побудови ефективної гетерогенної мережі в заданому просторі. Запропоновано розробити гетерогенну мережу, яка буде орієнтована на абонента та дасть змогу оператору мережі аналізувати і прогнозувати поведінку користувачів шляхом використання хмарних технологій. Проведено порівняння критеріїв для ефективного керування ресурсами та здійснено вибір критерію максимального рівномірного завантаження мобільної мережі. Розроблено метод адаптивного вибору вузла мережі радіодоступу у гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин, що дає змогу забезпечити глобальний доступ та безшовну мобільність між радіомережами із забезпеченням необхідної якості обслуговування. Створено централізований алгоритм хендовера в гетерогенних мобільних мережах на основі хмарних обчислень. Запропоновано архітектуру системи спільного керування гетерогенною радіомережею майбутнього покоління з використанням Big Data.

У третьому розділі розроблено імітаційну модель гетерогенної мережі з використанням множини параметрів і характеристик, які дають змогу описати існуючі мережні технології, використовуючи, відповідно, математичні, прогностичні і оптимізаційні моделі. Створена модель гетерогенної платформи безпровідного доступу автоматизує запропонований метод вибору мережі призначення шляхом розроблення програмного забезпечення, яке відображає процеси, що відбуваються в мережі. У результаті моделювання процесів надання послуг користувачам гетерогенної

мережі на базі розроблених моделей досліджено випадок користування послугою виду «відео реального часу». Порівняно запропонований метод вибору мережі зі стандартним. Визначено оптимальну чарунку гетерогенної мережі, що повинна прийняти на обслуговування заданого користувача на основі оцінювання характеристик та параметрів відповідного вузла доступу мережі з використанням методів теорії нечітких множин.

У четвертому розділі запропоновано метод спільного керування ресурсами гетерогенної мережі, який дає змогу зменшити кількість незадоволених клієнтів за рахунок проведення статичного резервування ресурсів для певного типу послуг для кожної з технологій, динамічного резервування ресурсів та пріоритетності користувачів. Розроблено мережний графік етапів оптимізації гетерогенної мережі, що дає змогу підвищити ефективність функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку. Розроблено програмні коди, що дають змогу аналізувати великі обсяги даних та шляхом фільтрації і впорядкування виводити дані, які дають змогу приймати інтелектуальні рішення для керування ресурсами. Виконано оцінку ефективності запропонованих рішень та досягнутого підвищення продуктивності гетерогенної мережі. Шляхом встановлення пріоритету користувачів підвищено якість обслуговування в гетерогенній мережі та зменшено кількість незадоволених клієнтів.

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

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

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

- отримані результати не суперечать класичним положенням теорії систем радіозв'язку;
- достовірність отриманих здобувачем науково-прикладних результатів засвідчено актами впровадження;
- отримані наукові результати забезпечуються коректним використанням математичного апарату теорії систем масового обслуговування та імітаційним моделюванням;
- отримані нові результати гармонійно доповнюють відомі;
- матеріали дисертаційної роботи обговорювались на 15 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, а також на наукових семінарах, і отримали схвальну оцінку.

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

1. Удосконалено метод вибору мережі радіодоступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин, що дає змогу

прийняти централізоване обґрунтоване рішення щодо проведення процедури горизонтально-вертикального хендовера, базуючись на групі QoS-залежних критеріїв та таких, що залежать безпосередньо від властивостей радіоінтерфейсу мережної системи та передбачає можливість адаптації правил прийняття рішень залежно від умов та політики експлуатації.

2. Набула подальшого розвитку імітаційна модель процесу функціонування гетерогенної мережі яка, автоматизує запропонований метод вибору вузла доступу на основі теорії нечітких множин та дає змогу здійснювати налаштування великої кількості параметрів моделювання, використовуючи допоміжні математичні моделі, зокрема для опису та прогнозування процесів переміщення користувачів .

3. Вперше запропоновано модель функціонування гетерогенної мережі, яка на відміну від відомих використовує технології обробки великого об'єму даних для введення моніторингу за процесами передавання даних, аналізу завдань та виведення необхідних звітів щодо переключення або ініціацію хендовера в інфраструктурі мобільного зв'язку та дає змогу дослідити процес оптимізації інфраструктури мережі мобільного оператора шляхом реалізації запропонованого алгоритму перерозподілу ресурсів мережі й балансування навантаження.

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

Основні результати, які отримані в дисертаційній роботі, опубліковано у 20 наукових публікаціях, серед них 1 стаття в іноземному науковому періодичному виданні за напрямом дисертації, 4 статті у наукових фахових виданнях згідно з переліком МОН України та 15 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій. Опубліковані праці повністю висвітлюють матеріали дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи Масюка А.Р. пройшли 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. Розвинуто метод підвищення продуктивності гетерогенної мережі шляхом застосування комплексного інтелектуального рішення стосовно

спільного керування ресурсами, який, на відміну від відомих, включає процедуру ініціації вертикального хендоверу, гнучкого перерозподілу потоків та відкидання неперіоритетних сеансів користувачів і дає змогу підтримувати безшовне пересування мобільних абонентів з необхідною якістю обслуговування.

2. На основі застосування концепції хмарних обчислень розроблено інтелектуальний алгоритм вертикального хендовера в гетерогенних мобільних мережах із використанням нечіткої логіки для оброблення параметрів мережі і прийняття рішення про міжсистемне переключення, що дало змогу ефективно використовувати ресурси операторів і надавати послуги з кращою якістю (зменшено середню затримку та відхилення затримки пакетів при обслуговуванні відеопотоків реального часу до 6 разів).

3. Запропоновані рішення забезпечують підвищення продуктивності гетерогенної мережі на 16% із використанням методу додаткового резервування ресурсами мережі, порівняно з гомогенними мережами; на 13% із використанням рівномірного розподілу ресурсів та динамічним процесом резервування, в порівнянні з попереднім методом. Підвищено якість обслуговування та зменшено кількість незадоволених клієнтів за допомогою пріоритезації користувачів у гетерогенній мережі.

4. Реалізовано систему оброблення великих обсягів даних на мові програмування Python, а саме розроблено скрипти для аналізу, фільтрації та впорядкування великих обсягів даних, що дають змогу приймати обґрунтовані рішення для спільного керування ресурсами та прогнозувати поведінку гетерогенної мережі..

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використовуються в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторних роботах, для студентів кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

У додатку до роботи подано акти використання результатів роботи у виробництві та навчальному процесі.

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

1. У роботі розв'язується наукове завдання підвищення ефективності функціонування гетерогенних радіомереж та підвищення якості обслуговування користувачів. Таким чином, не зовсім зрозуміло, що розуміється автором під ефективністю функціонування мережі і як саме вона оцінюється у роботі.

2. Не обґрунтовано, яким чином формуються досить важливі за своїм змістом табл. 2.7 - 2.10.

3. У роботі не описано, яким чином здійснюється збір параметрів для прийняття рішень стосовно ініціації запропонованого алгоритму горизонтально-вертикального хендовера в гетерогенній мережі. Не зазначено

як вплине на завантаженість каналів процес збору статистичних даних та сигналізація.

4. У другому розділі підпункт 2.5 розроблено програмне забезпечення на серверному кластері, що керує процесами ресурсної оптимізації (вертикального хендовера), які представлено на рис. 2.7. Встановлено, що використовуючи можливості та засоби платформ хмарних послуг, подібні розрахунки оптимального вибору мережної системи забезпечується в межах кількох мілісекунд. Проте у роботі конкретних досліджень цього результату не наведено.

5. На рис. 3.22 проведено моделювання процесу визначення оптимального вузла мережі доступу для виконання хендовера за шкалою Лікерта. Встановлено, що запропонований метод дає змогу зменшити середню затримку та джитер пакетів при обслуговуванні відео потоків реального часу у 6 разів у порівнянні із стандартним методом. Що таке «стандартний метод» потребує додаткового пояснення, оскільки не відомо чи це існуючий метод, що використовується в мережах мобільного зв'язку, чи запропонований іншими авторами, які працюють у цьому ж науковому напрямі.

6. Не зовсім зрозуміло, чи запропонована схема імітаційної моделі гетерогенної мережі з використанням практичної реалізації Big Data (рис.4.6. дисертаційної роботи) запропонована автором, чи була відома раніше.

7. У тексті роботи присутні незначні стилістичні та граматичні помилки.

8. При верифікації запропонованих рішень важливим також є питання щодо кількості експериментів, що проводились: їх недостатня кількість призводить до зниження достовірності отриманих характеристик. Експериментальні результати, які отриманні у 4-му розділі та проведені на реальному хмарному середовищі виконувались одноразово.

### **Загальні висновки**

1. Дисертаційна робота Масюка Андрія Романовича «Моделі та алгоритми спільного керування ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах» є завершеною науковою працею, що містить нові науково обґрунтовані результати, важливі для подальшого розвитку гетерогенних мереж мобільного зв'язку.

2. Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих у дисертаційній роботі, має практичну цінність і становить розв'язок наукового завдання підвищення ефективності функціонування гетерогенних радіомереж і підвищення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору систем радіодоступу та розробки моделі

спільного керування ресурсами з використанням технологій обробки великих обсягів даних.

3. Дисертаційна робота за змістом відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

4. Матеріали дисертації достатньо апробовано, доповідались на міжнародних і всеукраїнських конференціях, наукових семінарах, висвітлені в наукових публікаціях.

5. Автореферат об'єктивно і з необхідною повнотою розкриває зміст і основні положення дисертації.

6. Структура дисертації є обґрунтованою.

7. Зазначені у відгуку вади не змінюють загальну позитивну оцінку наукової значимості і практичної цінності дисертаційної роботи.

8. За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» КМУ щодо кандидатських дисертацій, а її автор Масюк А.Р. заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент:

професор кафедри телекомунікаційних систем  
Одеської національної академії  
зв'язку ім. О.С. Попова  
д.т.н., професор



І.П. Лісовий

