

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу **Масюка Андрія Романовича "Моделі та алгоритми спільного управління 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 технологій безпроводного зв'язку стимулює появу нових технічних рішень та стандартів мобільних мереж. З кожним наступним поколінням систем мобільного зв'язку зростають пропускні здатності радіоканалів, з'являються нові типи сервісів та збільшується кількість абонентських пристроїв у мережі. Проте, незважаючи на переваги новітніх стандартів телекомунікацій, таких як LTE та 5G, важливим аспектом для операторів є забезпечення плавного переходу до нових поколінь із збереженням якості зв'язку для існуючих абонентів мереж 2G та 3G. Відповідно, інфраструктура мережі мобільного зв'язку розростається та стає більш гетерогенною, що, в свою чергу, призводить до збільшення складності управління фізичною мережною інфраструктурою та складності розподілу її ресурсів між різними сегментами радіодоступу.

Враховуючи ці тенденції, важливим аспектом є пошук нових методів управління мобільністю користувачів для забезпечення плавності переходу абонентів при обслуговуванні як в межах покриття базових станцій однієї технології радіодоступу, так і між різними технологіями радіодоступу, із одночасним забезпеченням прийняттого рівня якості надання сервісів.

2. Загальна характеристика роботи

Дисертація Масюка Андрія Романовича присвячена вирішенню завдання підвищення ефективності функціонування безпроводної гетерогенної мережі та покращення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору мережі радіодоступу і розроблення моделі спільного управління ресурсами з використанням технології оброблення великих об'ємів даних.

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

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 аналіз останніх релевантних робіт та існуючих концепцій розвитку гетерогенних мереж мобільного зв'язку. Встановлено основні вимоги до параметрів ефективності функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку. Сформульовано основні технічні завдання, які потребують вирішення для підвищення ефективності функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку зі спільним управлінням ресурсами, такі як: планування топологічної структури мережі, боротьба із інтерференційними завадами, самоорганізація процесу управління мережею та забезпечення плавного хендверу абонентів.

У *другому розділі* запропоновано формалізовану модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку для розв'язання завдання оптимального вибору мережі радіодоступу за множиною критеріїв ефективності мережі та якості зв'язку. Запропоновано метод адаптивного вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин для агрегації множини оцінок та ухвалення рішень про оптимальне перемикавання абонентів. Розроблено алгоритм централізованого інтелектуального вертикального хендверу, який реалізований на основі високопродуктивних хмарних обчислень, що дає змогу врахувати велику кількість показників ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку при прийнятті рішення про перемикавання абонента між різними технологіями радіодоступу.

У *третьому розділі* розроблено імітаційну модель функціонування гетерогенної мережі з високим рівнем мобільності користувачів, що враховує множини показників, які є критично необхідними для оптимізації процесу вибору мережі радіодоступу. Розроблена модель реалізована у програмному забезпеченні, в основі якого є формалізовані у другому розділі прогностичні та оптимізаційні моделі. На основі розробленої імітаційної моделі проведено дослідження процесів балансування навантаження між різнотипними базовими станціями. Результати моделювання показують перевагу запропонованих у роботі методів на 16% з точки зору ефективності розподілу ресурсів мережі.

У *четвертому розділі* поетапно сформульовано практичні рекомендації стосовно оптимізації гетерогенної мережі із використанням технологій обробки великих об'ємів даних (Big Data). Запропоновано модель функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка використовує методи обробки великих об'ємів даних та моніторинг показників

ефективності функціонування мережі. Для оптимізації процесу управління мережними ресурсами запропоновано комплексний метод розрахунку, який дає змогу ефективно розподіляти вхідне навантаження в гетерогенній мережі мобільного зв'язку.

У *додатках* до роботи подано акти впровадження її результатів та список праць, у яких опубліковані 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 Масюка Андрія Романовича, впливають з наступного. Представлені результати, будучи одержаними із використанням положень апробованого математичного та теоретичного апарату, не суперечать класичним положенням теорії систем безпроводного зв'язку, а їх достовірність засвідчено актами впровадження. Отримані нові результати гармонійно доповнюють відомі. Крім цього, матеріали дисертації всебічно обговорювались на багатьох міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, а також на наукових семінарах.

4. Наукова новизна результатів дисертації

1. Вперше запропоновано модель для дослідження процесів функціонування гетерогенного мережного середовища, яка, на відміну від відомих, використовує методику оброблення великих об'ємів даних (Big Data) для виконання моніторингу передавання інформації, аналізу завдань, які формуються користувачами мережі та виведення статистичних даних щодо ініціації хендвера в інфраструктурі мобільного зв'язку та дала змогу дослідити процес оптимізації операторської мережі шляхом реалізації алгоритму перерозподілу її мережевих ресурсів і забезпечення гнучкого балансування навантаження.

2. Набула подальшого розвитку імітаційна модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку з автоматизацією запропонованого методу вибору радіоінтерфейсу вузла безпроводного доступу на основі теорії нечітких множин, використанням допоміжних математичних моделей, зокрема – для опису та прогнозування процесів руху користувачів мереж мобільного зв'язку, яка дала змогу здійснювати вибір параметрів моделювання для створення потрібних умов дослідження.

3. Удосконалено метод вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному мережному середовищі на основі застосування теорії нечітких

множин, що дало змогу централізовано приймати обґрунтовані рішення щодо проведення процедури горизонтально-вертикального хендвера, базуючись на значеннях мережних параметрів, які належать до групи QoS-залежних критеріїв, а також таких, що залежать безпосередньо від властивостей радіоінтерфейсів мережної системи; передбачено можливості адаптування правил прийняття рішень, залежно від різних умов експлуатації телекомунікаційних систем та запроваджених мережних правил.

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

Результати дисертаційної роботи здобувача пройшли достатню апробацію на конференціях різного рівня в галузі телекомунікаційних технологій.

Основні результати, які отримані в дисертаційній роботі, опубліковано у 20 наукових публікаціях, зокрема 1 статті у закордонному виданні, 4 статтях у виданнях рекомендованих МОН України, як фахові, 15 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій. Опубліковані праці цілком висвітлюють матеріали дисертаційної роботи.

6. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Оформлення дисертації відповідає вимогам до дисертаційних робіт, а також вимогам діючих Постанов Кабінету Міністрів України. Автореферат дисертації повністю висвітлює зміст дисертаційної роботи, отримані автором результати, зроблені ним висновки та надані рекомендації. Стиль викладення матеріалів досліджень є науковим, таким що забезпечує доступність їх сприйняття.

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

1. Набув подальшого розвитку метод підвищення продуктивності гетерогенної мережі мобільного зв'язку шляхом знаходження комплексного інтелектуального рішення щодо спільного управління ресурсами телекомунікаційних операторів, який, на відміну від відомих, включає процедури ініціації вертикального хендвера, гнучкого перерозподілу інформаційних потоків і відкидання неперіоритетних сеансів користувачів та дає змогу підтримувати безшовне пересування рухомих абонентів із необхідною якістю обслуговування.

2. На основі застосування концепції хмарних обчислень розроблено інтелектуальний алгоритм вертикального хендвера в гетерогенних

мобільних мережах із використанням методів нечіткої логіки для більш повної агрегації та оброблення мережних параметрів і прийняття рішення про міжсистемне переключення, що дало змогу ефективно використовувати ресурси різних мережних операторів і надавати телекомунікаційні послуги з кращою якістю (до 6 разів зменшено середню затримку та джитер пакетів даних при обслуговуванні відео потоків реального часу).

3. На основі запропонованих рішень із використанням методу додаткового резервування ресурсів мережі, порівняно з гомогенними мережами досягнуто підвищення продуктивності гетерогенної мережі мобільного зв'язку до 16%; а також додатково, в порівнянні з попереднім методом, – до 13% із використанням методів рівномірного розподілу ресурсів та за рахунок використання динамічного резервування. За допомогою застосування пріоритетизації користувачів гетерогенної безпроводної мережі підвищено якість їх обслуговування та зменшено кількість незадоволених клієнтів.

4. Реалізовано систему оброблення великих обсягів даних на мові програмування Python, а саме розроблено скрипти для аналізу, фільтрації та впорядкування великих обсягів даних, які дали змогу приймати обґрунтовані рішення для управління мережними ресурсами та прогнозування поведінки гетерогенної мережної системи.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсів лекцій з дисциплін «Системне програмування інфокомунікацій»; створення нових курсів лекцій з дисципліни «Розподілені сервісні системи та Cloud-технології», «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку», «Технології мереж мобільного зв'язку».

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено для покращення параметрів якості обслуговування користувачів та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних мережах ТзОВ ВТФ "Контек", ТзОВ "Телекомунікаційна компанія", ПП "Цифрові технології", що підтверджено актами впровадження.

8. Зауваження до дисертаційної роботи

1. Перший розділ роботи перенасичений аналізом еволюції технологій та стандартів мереж мобільного зв'язку, які не мають прямого відношення до завдань дисертаційної роботи. Варто було б більше уваги приділити саме проблематиці спільного управління ресурсами та хендоверу в гетерогенних мережах мобільного зв'язку.

2. З другого розділу дисертації не зрозуміло, яким чином пов'язані між

собою аргументи цільової функції, представлені виразом (2.14). Це ускладнює розуміння математичного процесу наближення значення цільової функції до максимального значення (вираз 2.15).

3. З тексту дисертаційної роботи незрозуміло, яким чином зміниться завантаженість каналів опорної транспортної мережі при ініціації хендоверу між технологіями радіодоступу, і чи враховувались параметри тунелювання службової інформації між шлюзами різних мереж радіодоступу.

4. В роботі не проаналізовано обчислювальну складність реалізації запропонованих алгоритмів оптимізації мережі на основі Big Data, яка безпосередньо впливає на затримку в процесі виконання хендоверу. Зокрема, варто було б проаналізувати затримки, які виникають в процесі пересилання даних від базових станцій до хмарних серверів (і навпаки), а також затримку безпосередньо на виконання обчислень за алгоритмом на сервері.

5. В четвертому розділі не показано порівняння згенерованих моделей трафіку, які використовувались для дослідження запропонованих методів, із реальною мережною статистикою.

6. Не зовсім зрозуміло, чи модель на рисунку 4.31 запропонована автором вперше, чи була відома раніше?

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

Наведені зауваження дещо знижують оцінку дисертаційної роботи, проте не є істотними.

Загальні висновки

1. Дисертаційна робота Масюка Андрія Романовича 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 вирішення наукового завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних гетерогенних мережних систем та покращення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору систем радіодоступу та розроблення моделі спільного управління ресурсами з використанням технології обробки великих обсягів даних.

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

4. Матеріали дисертації достатньо апробовані та апробовані.

5. Автореферат дисертації повністю відображає зміст і основні положення дисертації.

6. За обсягом проведених досліджень, науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями дисертаційна робота "Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах" відповідає вимогам пп. 9, 11, 12 чинного "Порядку присудження наукових ступенів", що може бути підставою для присудження її автору Масюку Андрію Романовичу наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент
доцент кафедри інформаційно-
телекомунікаційних мереж
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», к.т.н., с.н.с.

М.А. Скулиш

Підпис к.т.н., с.н.с. Скулиш М.А. засвідчую,

Вчений секретар
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»



А.А. Мельниченко