

Голові разової спеціалізованої вченої ради ДФ.35.052.049
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук
Опірському Івану Романовичу

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, завідувача кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки Безрука Валерія Михайловича на дисертаційне дослідження Бешлей Галини Володимирівни «Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку», представленого на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка», галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Актуальність теми роботи. Сучасні мережі мобільного зв'язку поставлені перед викликом забезпечення численної кількості сервісів з різноманітними вимогами до параметрів мережі, що пов'язано із відмінностями з точки зору їх застосувань. Зокрема, у мережах мобільного зв'язку 5G передбачено три основні типи сервісів, які поділяються на широкосмуговий доступ із високою пропускнуою здатністю, сервіси масового зв'язку машинного типу та критичні сервіси з низькою затримкою та високою надійністю зв'язку. Це значно ускладнює процес розподілу мережних ресурсів у мережі, оскільки необхідно одночасно підтримувати різноманітні мультимедійні послуги, забезпечувати зв'язок для об'єктів критичної інфраструктури (електростанції, системи газопостачання) та систем управління дорожнім рухом в реальному часі, а також забезпечувати підтримку кількох тисяч кінцевих пристроїв в межах одного квадратного кілометра для систем Інтернету речей. Такі виклики потребують розробки нових методів та моделей розподілу мережних ресурсів як на рівні мережі радіодоступу, так і на рівні ядра, щоб забезпечити наскрізне управління якістю для кожного конкретного сервісу враховуючи його вимоги та поточний стан мережі.

Таким чином, тематика дисертаційної роботи Бешлей Галини Володимирівни, яка присвячена розв'язанню науково-практичного завдання підвищення ефективності використання ресурсів та якості обслуговування в системах мобільного зв'язку нового покоління шляхом розроблення моделей гнучкого управління інформаційними потоками та методів оптимального розподілу мережевих ресурсів.

Актуальність проблематики досліджень додатково підтверджується їх виконанням в рамках ряду держбюджетних науково-дослідних робіт, які виконувались у Національному університеті «Львівська політехніка» за участі:

– «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання», № 0117U004449, (2017–2018 рр.);

– «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні», № 0117U007177, (2018–2019 рр.);

– «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» № 0120U100674, (2020-2022 рр.).

Окремо варто відзначити науково-дослідну роботу, у якій здобувачка є відповідальним виконавцем, і яка безпосередньо пов'язана із тематикою представленої дисертаційної роботи:

– «Розроблення та інтеграція інформаційних і комунікаційних технологій для побудови системи моніторингу та управління міською інфраструктурою», № 0120U102193, (2020-2022 рр.).

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення.

Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 240 сторінок.

У *вступі* подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано всі формальні положення, подано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, а також наведено інформацію про впровадження основних практичних результатів.

У *першому розділі* проведено аналіз архітектурних та структурно-функціональних особливостей побудови сучасних мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління. Зокрема, розглянуто важливі аспекти управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку стандарту LTE, з урахуванням енергетичних та спектральних характеристик радіоканалів. Окремо, приділяється увага відомим на сьогодні методам інтеграції систем Інтернету речей у загальну інформаційно-комунікаційну систему. Проаналізовано проблематику наскрізного забезпечення якості передавання інформаційних потоків з різними вимогами, враховуючи розподіл ресурсів на рівні радіодоступу та методи управління чергами на рівні агрегації потоків. Систематизовано основні завдання, які розв'язуються у дисертаційній роботі для підвищення ефективності використання ресурсів та якості обслуговування в системах мобільного зв'язку нового покоління.

У *другому розділі* роботи представлено удосконалений метод оптимального розподілу ресурсів у мережах мобільного зв'язку та розроблену для його реалізації модель гетерогенної мережі мобільного зв'язку. Новизною запропонованого методу є адаптивний вибір смуги радіочастотного ресурсу для обслуговування індивідуальних інформаційних потоків абонентів та агрегованих інформаційних потоків на рівні M2M шлюзів в залежності від їх вимог до пропускної здатності та затримки. При цьому, процес адаптивного вибору смуги радіочастотного ресурсу вдало

доповнюється, пріоритетною агрегацією трафіку машинного типу у М2М шлюзах, що у комплексі дало змогу підвищити ефективність використання радіочастотного ресурсу шляхом оптимізації процесу формування кадрів на каналному рівні мережі LTE. Також у розділі запропоновано удосконалену імітаційну модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка дає змогу автоматизувати процес розподілу частотно-часових ресурсів у мережах стеку 3GPP, з урахуванням реалістичного сценарію обслуговування трафіку індивідуальних абонентів та групових М2М-кластерів. Перевагою запропонованої моделі є вища точність оцінки необхідного обсягу радіочастотного ресурсу для забезпечення вимог до якості обслуговування інформаційних потоків, у порівнянні із відомими до цього моделями.

Третій розділ присвячено імітаційному моделюванню гетерогенної мережі мобільного зв'язку при різних сценаріях її функціонування. В якості основних критеріїв для оцінки у розділі розглядаються параметри системної спектральної ефективності та наскрізної затримки передавання інформаційних потоків. Поєднання цих параметрів у різних умовах функціонування мережі дає змогу збалансувати значення середньої затримки обслуговування інформаційних потоків кожного класу сервісу відповідно до їх вимог, забезпечуючи при цьому вищу системну спектральну ефективність, за рахунок оптимізації процесу формування кадрів LTE на каналному рівні. Представлені у розділі результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого методу оптимального розподілу ресурсів з точки зору системної спектральної ефективності від 4% до 13%, в залежності від частки пріоритетно-агрегованих інформаційних потоків М2М-шлюзів у загальному трафіку на рівні базових станцій. Крім того, у розділі встановлено, що використання пріоритетної агрегації даних машинного типу на рівні М2М-шлюзів дало змогу у понад 2 рази знизити затримку їх обслуговування, додатково забезпечуючи зниження сумарного навантаження на коміркову інфраструктуру мережі мобільного зв'язку в середньому на 9%.

У четвертому розділі представлено концептуальну модель інтеграції запропонованих у роботі методів та моделей в рамках програмно-конфігурованої телекомунікаційної інфраструктури мобільного зв'язку, із забезпеченням наскрізного управління інформаційними потоками. Запропонована концептуальна модель гетерогенної мережі мобільного зв'язку 4G/5G на основі стеку стандартів 3GPP, забезпечує диференційоване управління ресурсами при обслуговуванні інформаційних потоків на рівні базових станцій та ядра мережі у сегменті мобільного зв'язку, а також на рівні вузлів агрегації у транспортних IP-мережах. Таким чином, досягається гарантія стабільності наскрізних часових параметрів якості обслуговування, в умовах нестабільності часових параметрів у сегментах мобільного зв'язку.

Висновки по дисертаційній роботі узагальнюють наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Список використаних джерел та відповідних посилань на них у тексті дисертаційної роботи свідчить про ґрунтовний аналіз актуальних наукових досліджень провідних світових

вчених та загальну компетентність претендентки у рамках даної тематики. Усі науково-практичні результати дисертації повною мірою висвітлені в публікаціях у наукових фахових виданнях та апробовані на міжнародних науково-технічних конференціях.

Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Бешлей Г.В., підтверджуються наступним:

- у роботі коректно використано математичний апарат теорії ймовірності та математичної статистики, теорії алгоритмів та методів оптимізації;
- отримані результати не суперечать фундаментальним основам систем мобільного зв'язку та відповідають існуючим стандартам 3GPP;
- достовірність підтверджено шляхом аналітичного, імітаційного та експериментального моделювання, що засвідчено актами впровадження;
- отримані нові результати гармонійно доповнюють відомі;
- матеріали дисертації обговорювались на 19 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, а також на наукових семінарах, і отримали схвальну оцінку.

Достовірність і повизна наукових положень, висновків і рекомендацій. У дисертаційній роботі Бешлей Г.В. отримано такі наукові результати:

1. Розвинуто метод розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE, який, на відміну від відомих, базується на адаптивному виборі ширини смуги радіочастот в залежності від вимог якості обслуговування, а також на пріоритетній агрегації трафіку у шлюзах M2M, що дало змогу підвищити ефективність використання ліцензійних радіоресурсів шляхом оптимізації процесу формування кадрів на каналному рівні LTE та зменшення в них частки службового трафіку.

2. Набула подальшого розвитку імітаційна модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка, на відміну від відомих, враховує значну основні кількість технічних параметрів функціонування стандарту LTE для створення реальних умов дослідження та автоматизує запропонований метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів між трафіком мобільних користувачів та M2M/IoT пристроїв з метою забезпечення необхідної якості обслуговування, що дало змогу з урахуванням обмеженості спектральних ресурсів оцінити ефективність розроблених рішень в процесі оптимізації радіоресурсів мережі у порівнянні із відомими методами.

3. Вперше розроблено концептуальну модель гетерогенної мережі мобільного зв'язку 4G/5G на основі стандарту LTE, яка, на відміну від відомих, забезпечує узгоджене на рівні базової станції, ядра мережі та зовнішніх IP-орієнтованих мереж, диференційоване адаптивне управління ресурсами та окремими інформаційними потоками від мобільних та M2M/IoT пристроїв, що дало змогу гарантувати часові параметри якості обслуговування з кінця в кінець в умовах короткочасної нестабільності характеристик безпроводних каналів зв'язку.

Практична значимість результатів роботи. Отримані в дисертаційній роботі Беншлей Г.В. наукові результати мають практичну цінність та можуть бути використані операторами телекомунікацій для оптимізації мережних ресурсів та покращення якості обслуговування абонентів. Зокрема:

1. Розроблений метод оптимального розподілу ресурсів для LTE мереж нового покоління дав змогу в залежності від різних ситуацій моделювання (без та з врахуванням пріоритетів даних) підвищити від 4% до 13% ефективність використання частотно-часових ресурсів в процесі формування кадрів на каналному рівні LTE, в умовах одночасного використання ширини смуги каналу 1,4 МГц та 3 МГц.

2. Застосування мультистандартних M2M шлюзів в архітектурі LTE дало змогу мінімізувати кількість сигнальної інформації в процесі агрегації M2M трафіку до 10%, що у поєднанні із методом оптимального розподілу ресурсів забезпечило розвантаження мережі в середньому на 9% та підвищення середнього значення спектральної ефективності на 6%.

3. На основі розробленої імітаційної моделі гетерогенної мережі LTE/NB-IoT встановлено, що використання пріоритетизації IoT трафіку в процесі планування частотно-часових ресурсів у вузькосмуговому спектрі NB-IoT, дає змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу до 2,12 разів у порівнянні з існуючим методом пропорційного розподілу ресурсів в умовах високого навантаження.

4. Удосконалення алгоритму пріоритетного обслуговування черг пакетів у вузлах зовнішніх IP-орієнтованих мережах шляхом аналізу модифікованих шлюзом P-GW заголовків пакетів поля DSCP, що вказують на критичність пріоритету пакетів щодо тривалості обслуговування в IP мережі дало змогу гарантувати часові параметри якості обслуговування потокового трафіку реального часу з кінця в кінець в умовах короткочасної нестабільності характеристик безпроводних каналів зв'язку. Зокрема, у порівнянні із відомим алгоритмом пріоритетного обслуговування черг запропонований алгоритм зменшує до 30% затримку та джиттер пакетів в процесі обслуговування потокового трафіку реального часу.

Важливість для практики результатів дисертаційної роботи підтверджена актами їхнього впровадження в телекомунікаційних мережах ТОВ «Телекомунікаційна компанія» та ТОВ ВТФ «Контех» для підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами, що

підтверджено актами впровадження.

Повнота викладу основних результатів дисертації у фахових виданнях. Проведений аналіз показав, що здобувач має необхідний обсяг наукових публікацій та апробацій. Результати дисертаційної роботи викладені у 30 наукових працях, серед них 6 статей у наукових фахових виданнях України та 5 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, з яких 3 наукові статті у журналах з імпаکت-фактором, кuartилі Q1-Q2, що входять до наукометричної бази Scopus. Дисертантка доповідала на 19-ти міжнародних і всеукраїнських конференціях, з яких 14 доповідей були представлені на конференціях, які проходили під егідою IEEE та індексуються в наукометричних базах Scopus та IEEE Xplore Digital Library.

Відповідність теми дисертації профілю спеціальності. Дисертація Бешлей Г.В. повністю відповідає спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Відсутність порушення академічної доброчесності. Підстав для сумнівів у науковій доброчесності здобувача під час детального ознайомлення з дисертаційною роботою не виявлено. Узгодженість тексту дисертації з науковими працями Бешлей Г.В. свідчить про відсутність ознак фальсифікації. Проведений аналіз основних ідей та методів дотичних до тематики інших робіт містить відповідні посилання.

Зауваження та недоліки

1. У першому розділі роботи розглянуто основні методи управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку та методи управління чергами у фіксованих мережах зв'язку. Проте, недостатньо уваги приділено їх взаємній інтеграції.

2. У роботі не розглянуто аспекти різних технологій зв'язку для пристроїв M2M, які інтегруються у мультистандартному шлюзі. Таким чином, незрозуміло чи авторка враховувала відмінності між даними стандартами в процесі пріоритезації трафіку у вузлі, і чи впливає це на ефективність запропонованого методу.

3. В тексті дисертаційної роботи при описі запропонованого методу оптимального розподілу радіочастотного ресурсу не уточнено чи планувальник базової станції враховує пріоритети індивідуальних абонентів, чи обмежується лише ідентифікаторами якості обслуговування для окремих сервісів.

4. В описі запропонованого алгоритму вибору головного вузла при формуванні кластерів M2M вказано, що використовуються критерії центральності за діаграмою Вороного та залишкового рівня заряду акумулятора. Виникає питання чи враховується при цьому відстань головного вузла до центрального шлюза M2M, яка впливає на якість радіозв'язку та пропускну здатність каналу.

5. У роботі не представлено дослідження, яке б дало змогу оцінити скільки M2M пристроїв може обслуговувати один шлюз з точки зору пропускної здатності, а також який орієнтовний радіус його дії, враховуючи відмінності між технологіями радіодоступу. У комплексі, це не дає змоги зрозуміти масштаб ускладнення інфраструктури мережі мобільного зв'язку для реалізації запропонованих авторкою технічних рішень.

6. При опису методу агрегації трафіку на рівні M2M-шлюза, вказано, що шлюз здійснює групування трафіку на чотири сервіси QCI_{M2M} . При цьому, не зазначено, яким чином дані сервіси узгоджуються із стандартизованою таблицею QCI_{LTE} . Це ускладнює розуміння того, яким чином планувальник базової станції здійснюватиме виділення ресурсів для кожного класу сервісу M2M-шлюза, одночасно із виділенням ресурсів для трафіку індивідуальних абонентів з різними класами сервісу.

Загальний висновок. Наведені зауваження не змінюють загальну позитивну оцінку наукової значимості і практичної цінності дисертаційної роботи Бешлей Г.В., у якій розв'язано актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності використання ресурсів та якості обслуговування в системах мобільного зв'язку нового покоління шляхом удосконалення моделей гнучкого управління інформаційними потоками та методів оптимального розподілу мережевих ресурсів.

Дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 року № 167. Зміст автореферату відповідає положенням дисертаційної роботи.

Здобувачка Бешлей Галина Володимирівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
завідувач кафедри інформаційно-мережної інженерії
Харківського національного університету
радіоелектроніки
доктор технічних наук, професор

В.М. Безрук

Підпис професора Безрука В.М. засвідчую
Учений секретар
Харківського національного
університету радіоелектроніки



І.В. Магдаліна