

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

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Жураковського Богдана Юрійовича
на дисертацію Бешлей Галини Володимирівни
**«Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в
програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку»**,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Оцінка актуальності теми дисертаційної роботи.

Стрімкий прогрес інформаційних технологій і глобальне впровадження мережі Інтернет, як основних ресурсів масової комунікації є причиною багатьох змін у всіх сферах сучасного життя. Інноваційні науково-технічні зміни сприяють модернізації систем комунікації, і виводять її на новий рівень. Різке збільшення обсягів інформаційного трафіку, яке, в основному, спричинене мобільним відео, соціальними медіа та різноманітними сервісами «Інтернету речей» змушує операторів мобільного зв'язку шукати інноваційні способи управління мережами в умовах обмежених частотних ресурсів. З іншого боку, необхідно розробити алгоритми функціонування нових мережевих елементів функціональної архітектури безпроводних мереж з урахуванням особливостей обслуговування M2M-трафіку і заданих показників ефективності. Технологія LTE є найбільш придатною для застосування методів гнучкого управління ресурсами в мережах мобільного зв'язку нового покоління. Відповідно результатом розвитку технологій LTE є поява мереж п'ятого покоління (5G). Вважається, що в сфері мобільного зв'язку мережі четвертого покоління (4G) на сьогоднішній час є домінуючими не тільки в Україні, але в усьому світі, через що можна говорити не про заміну існуючих технологій 4G на 5G, а про їх розвиток і доповнення новими технологіями радіодоступу, призначеними для конкретних сценаріїв і певних цілей.

Проте, не дивлячись на прогресивний розвиток мереж 4G/5G застосуванні в них методи управління ресурсами володіють недостатньою гнучкістю розподілу в умовах зростаючої кількості вхідних запитів з різними вимогами до якості обслуговування, зокрема сервісів Інтернету речей.

Таким чином, одним із ефективних шляхів підвищення продуктивності та покращення основних параметрів якості обслуговування (QoS) в мережах нового покоління 4G/5G, що базуються на технології LTE є застосування удосконалених методів та моделей оптимального розподілу мережевих ресурсів між користувачами та пристроями Інтернету речей за критерієм якості обслуговування.

У зв'язку із цим тематика дисертаційної роботи Бешлей Галини Володимирівни, яка присвячена підвищенню 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 є актуальною та своєчасною.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота Бешлей Галини Володимирівни виконана згідно з науковими програмами та планами науково-дослідних робіт кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка». Зокрема робота виконувалась в межах низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (№ держреєстрації 0117U004449, (2017–2018 рр.); «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (№ держреєстрації 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» (ДБ/ Блокчейн), (№ держреєстрації 0120U100674, (2020-2022 рр.); «Розроблення та інтеграція інформаційних і комунікаційних технологій для побудови системи моніторингу та управління міською інфраструктурою» (ДБ/SmartCity), (№ держреєстрації 0120U102193, (2020-2022 рр.) – відповідальний виконавець).

Аналіз змісту роботи.

Дисертаційна робота має загальний обсяг 240 аркушів, містить 4 розділи та 3 додатки. Всі подані матеріали цілком відповідають чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, констатовано зв'язок роботи з науковими програмами, темами, сформульовано мету та основні завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, подано наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів із вказівкою відомостей про впровадження результатів роботи,

описано особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи, подано короткий опис структури і обсягу дисертації.

У **першому розділі** роботи проведено аналіз методів управління ресурсами та якістю обслуговування в сучасних мережах мобільного зв'язку. Визначено ключові фактори, які впливають на ефективність функціонування мереж мобільного зв'язку, такі як: кількість базових станцій, доступні радіочастотні ресурси та спектральна ефективність радіоканалів. Для формування напрямку подальших досліджень, проведено аналіз ступеню впливу кожного з вищезгаданих факторів на загальну ефективність функціонування мережі мобільного зв'язку. Встановлено, що значне зростання кількості безпроводних вузлів M2M призводить до деяких проблем в мобільних мережах. Не дивлячись на те, що ємність мереж 4G/5G є достатньою, щоб задовільнити потреби більшості M2M пристроїв, сигнальне навантаження, яке генероване ними перевищує можливості сучасних базових станцій. Встановлено, що відсутність можливості у традиційній технології LTE здійснювати диференційоване управління інформаційними потоками від мобільних та M2M/IoT пристроїв, із врахуванням їх вимог до параметрів якості обслуговування, призводить до неоптимального розподілу навантаження та погіршення якості обслуговування сервісів реального часу.

У **другому розділі** роботи пропонується удосконалена архітектура LTE мережі з метою обслуговування великої кількості M2M пристроїв. Рівень доступу такої мережі є централізованим, за рахунок попередньої синхронізації пристроїв в кластери, у яких визначається головний M2M вузол для передавання блоків даних на шлюз, який шляхом агрегації та класифікації потоків передає дані на базову станцію мережі 4G/5G. Розроблено алгоритм класифікації агрегації та кластеризації вузлів M2M для майбутніх мобільних мереж з використанням нечіткої логіки і діаграм Вороного. Таке рішення дасть змогу гнучко використовувати радіоресурс мобільної мережі, зменшити сигнальне навантаження на базову станцію та збільшити час роботи M2M датчиків. Розроблено метод розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE, що дав змогу підвищити ефективність використання радіоресурсів шляхом оптимізації процесу формування кадрів на каналному рівні LTE та зменшення в них частки сигналізаційного трафіку.

У **третьому розділі** роботи проведено аналітичне та імітаційне дослідження запропонованого методу розподілу радіоресурсів LTE мереж. В процесі дослідження враховано особливості резервування субкадрів в різних смугах частот, показано ефективність запропонованого методу планування субкадрів на каналному рівні мережі в процесі передавання малого об'єму даних від M2M датчиків, виведено узагальнюючу схему обслуговування мобільних користувачів та M2M датчиків. Розроблено унікальну імітаційну

модель, що реалізує запропонований метод оптимального розподілу ресурсів. На основі розробленої моделі проведено дослідження мобільності абонентів гетерогенної мобільної мережі 4G/5G, досліджено доступність ресурсів базової станції в залежності від розташування абонентів та показано основні моменти в процесі виділення частотно-часових ресурсів при обслуговуванні мобільних користувачів і M2M датчиків згідно класичної архітектури LTE та архітектури доповненої мультистандартним M2M шлюзом. Також показано спосіб зменшення відсотка простою субкадрів при резервуванні ресурсів під дані від M2M шлюза. Доведено, що 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% .

У **четвертому розділі** роботи побудовано концептуальну модель програмно-конфігурованої мобільної мережі нового покоління. Згідно даної моделі забезпечується згоджене 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 з метою гарантування наскрізної якості обслуговування. Дані модель базується на використанні вище запропонованого методу стосовно оптимального розподілу радіоресурсів, а також удосконаленому алгоритмі обслуговування черг у вузлах IP-мережі. Обґрунтовано науково-теоретичні підходи щодо реалізації програмно-конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV ТА SDR. Створено алгоритм імітаційної моделі динамічного розподілу та резервування пропускної здатності фізичного каналу між декількома логічними в певний момент часу для забезпечення якості обслуговування інформаційних потоків. Проведено імітаційне моделювання обслуговування мережевого трафіку із параметрами, що відповідають реальним LTE мережам. Проведено дослідження завантаженості SDR фемтосоти, як основного конвергентного пристрою на рівні доступу користувачами технологій різного покоління мобільного зв'язку.

У **висновках** дисертаційної роботи викладено основні отримані результати і рекомендації, які впливають з проведених досліджень, представлено та охарактеризовано кількісні оцінки показників ефективності в процесі використання запропонованих методів, моделей та алгоритмів.

У **додатках** до дисертації містяться програмні коди розроблених імітаційних моделей, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список наукових праць автора.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації, їх достовірність.

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів забезпечується коректним використанням математичного апарату та засобів імітаційного моделювання. Крім того, достовірність результатів роботи підтверджена збігом результатів імітаційного моделювання із аналітичним в процесі дослідження розробленого методу оптимального розподілу радіоресурсів в мережах мобільного зв'язку 4G/5G. Акти про використання результатів підтверджують висновки і рекомендації, які представлені у дисертаційній роботі. Робота достатнім чином опублікована та апробована, у тому числі отримані результати пройшли рецензування у журналах з високим імпаکت фактором, що підтверджується наявністю опублікованих статей у закордонних виданнях, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science.

Оцінка рівня наукової новизни.

Переходячи до обговорення наукової новизни основних положень дисертаційної роботи автором:

- удосконалено метод розподілу радіоресурсів в мережах LTE, який базується на адаптивному виборі ширини смуги частот в залежності від вимог якості обслуговування, а також на пріоритетній агрегації M2M трафіку, що дозволило підвищити ефективність використання ресурсів шляхом оптимізації процесу формування кадрів на каналному рівні LTE.

- набула подальшого розвитку імітаційна модель процесу функціонування мережі мобільного зв'язку 4G/5G, яка, на відміну від існуючих, автоматизує запропонований метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів та використовує основні технічні параметри функціонування стандарту LTE для створення реальних умов дослідження, що дало змогу з урахуванням обмеженості спектральних ресурсів оцінити ефективність запропонованих рішень у процесі оптимізації радіоресурсів мережі у порівняння із відомими методами.

- вперше запропоновано структурно-функціональну модель програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку 4G/5G на основі стандарту LTE, яка забезпечує узгоджене на рівні базової станції, ядра мережі та зовнішніх IP-орієнтованих мереж, диференційоване адаптивне управління ресурсами та окремими інформаційними потоками, що дало змогу гарантувати часові параметри якості обслуговування з кінця в кінець.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено на практиці з метою підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних мережах ТОВ «Телекомунікаційна компанія», в корпоративних мережах Науково-дослідного інституту інтелектуальних комп'ютерних систем, ТОВ ВТФ «Контех», що підтверджено актами впровадження.

Зокрема, отримано наступні практичні результати:

- підвищено 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.
- зменшено кількість сигнальної інформації в процесі агрегації M2M трафіку до 10%, що у поєднанні із розробленим методом оптимального розподілу ресурсів забезпечило розвантаження мережі в середньому на 9% та підвищення середнього значення спектральної ефективності на 6 %.
- зменшено до 2 разів середню затримку передавання критично важливих сервісів Інтернету речей реального часу шляхом використання запропонованого методу розподілу ресурсів у порівнянні з існуючим методом пропорційного розподілу ресурсів.
- зменшено до 30% затримку та джитер пакетів в процесі обслуговування потокового трафіку реального часу на транспортному рівні рівні концептуальної програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку.
- Результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсів лекцій з дисципліни «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку» спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Повнота викладу матеріалів роботи в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.

За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано **30** наукових праць, з них **6** статей у наукових фахових виданнях України та **5** статей у наукових періодичних виданнях інших держав (з яких **3** входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science з індексом цитування (імпакт-фактором, квартиль Q1-Q2)), **19** у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, з них індексованих у наукометричній базі Scopus та Web of Science – **14**.

У працях здобувача повністю висвітлені основні положення та результати дисертаційного дослідження.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора, зарахованих за її темою, порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні.

До зауваження дисертації слід віднести наступне:

1. В першому розділі дисертаційної роботи бажано було б провести дослідження іноземних вчених з точки зору побудови концептуальних програмно-конфігурованих мереж мобільного зв'язку. Порівняти відомі науково-теоретичні методи управління ресурсами для забезпечення наскрізної якості обслуговування M2M трафіку, які використовуються у концептуальних програмно-конфігурованих мережах 5G.

2. У таблиці 2.2 дисертаційної роботи автор наводить характеристики QCI_{M2M} за критерієм затримки, допустимої кількості відмов в обслуговуванні та класом сервісів M2M, проте не відомо, на основі яких специфікацій чи вимог вони формуються. Також потребує додаткового пояснення чому саме автор вводить класи трафіку M2M (L1 та L2, згідно таблиці 2.2), що вимагають ультранизьких затримок в процесі передавання даних, адже на практиці в більшості випадків M2M дані є нереального часу.

3. Результати проведеного імітаційного моделювання у розділі 3 та 4 виконувались автором одноразово, це призводить до того, що недостатня кількість експериментів може призвести до зниження достовірності отриманих вирашних кількісних результатів наведених у висновках та практичній цінності роботи.

4. Третій розділ роботи перенасичений графічним матеріалом отриманих результатів моделювання в процесі оцінки ефективності запропонованих рішень, які в більшості є однотипними. Можливо доцільно було б зосередити увагу на отримані науково-практичних результатів та їх переваги над відомими.

5. У дисертаційній роботі малу увагу приділено питанню інформаційної безпеки, що є важливим, як для самої концепції Інтернету речей, так і для мереж мобільного зв'язку. Хоча серед висунутого списку публікацій автором, як основних по темі дисертації, такі роботи є. Доцільно було виділити окремий підрозділ для вирішення проблем інформаційної безпеки, зокрема навести результати отриманих досліджень автором у своїх наукових працях (A Software Deep Packet Inspection System for Network Traffic Analysis and Anomaly Detection-стаття, Development of Deep Packet Inspection System for Network Traffic Analysis and Intrusion Detection-матеріали конференції).

Висновок про відповідність дисертації вимогам МОН України.

Дисертаційна робота Бешлей Г.В. «Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку» є завершеною науковою працею. Сама робота відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки 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, а її автор, Бешлей Галина Володимирівна, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор

кафедри технічної кібернетики

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського»



Підпис Богдана ЖУРАКОВСЬКОГО засвідчую