

Відгук

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Баранніка Володимира Вікторовича на дисертаційну роботу Одарченка Романа Сергійовича за темою «Методологія підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Актуальність теми дисертації

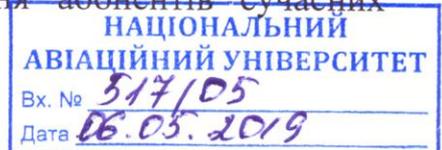
В даний час стрімкими темпами відбувається розвиток сучасних телекомунікаційних мереж. Це особливо помітно по активних процесах міжнародної стандартизації, виробництва обладнання та розгортання мереж. Серед них все більшого поширення набувають, наприклад, такі технології як персональні мережі IEEE 802.15 (Bluetooth), локальні мережі IEEE 802.11 (Wi-Fi), стандарт мереж LTE, в яких бездротовий широкосмуговий доступ використовується дуже широким спектром додатків – від традиційної передачі мови до сучасних мультимедійних додатків.

Значний інтерес представляють дослідження централізованих телекомунікаційних систем, в яких є центральна станція, яка координує роботу абонентських станцій. Саме така мережева архітектура є основною в стандартах мереж LTE (мережі четвертого покоління) та 5G.

При цьому однією з головних проблем створення та розвитку сучасних безпроводових систем зв'язку є розробка методів оцінки, забезпечення та підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку. Очевидно, що за допомогою існуючих методів, моделей, мережевих архітектур та їх компонентів задовольнити запити абонентів практично неможливо, тому виділяють основні причини необхідності удосконалення існуючих мереж четвертого покоління: зниження темпів зростання клієнтської бази операторів мобільного зв'язку в мережах 3G; розвиток мультимедійних послуг; відносно невисока ефективність використання транспортних комунікаційних сегментів в існуючих мережах.

Таким чином, в нинішніх умовах є потреба в ефективних програмно-апаратних засобах керування потоками трафіку, що враховує його різноманітність. Водночас, в оператора повинні бути засоби управління потоками, що дозволяє гарантувати певний рівень якості послуг для кожного окремого абонента, який отримує індивідуальний інформаційний потік. Тому необхідним є дослідження існуючих та розробка нових моделей, методів та алгоритмів, які забезпечують підвищення ефективності передачі даних. Це може надати змогу більш ефективно проводити планування та експлуатацію сучасних безпроводових мереж зв'язку.

Отже, розробка методології підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку є важливою науково-прикладною проблемою, яка спрямована на вдосконалення якості обслуговування абонентів сучасних



стільникових мереж і забезпечення вимог до мереж такого типу, що й підтверджує в повній мірі актуальність даного дисертаційного дослідження.

Дисертаційна робота Одарченка Р.С. пов'язана з актуальними науково-практичними розробками, які реалізовувалися у міжнародних програмах, зокрема, Horizont 2020 (ICT-08-2017 5G PPP Convergent Technologies, ICT-13-2016: Future Internet Experimentation - Building a European experimental Infrastructure, ICT-07-2017: 5G PPP Research and Validation of critical technologies and systems), вітчизняних програмах та концепціях (Концепція національної інформаційної політики, Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук НАН України на 2014-2018 роки, План заходів на 2015-2017 роки щодо впровадження в Україні у 2017 році системи рухомого (мобільного) зв'язку четвертого покоління, Основні пріоритетні напрямки «Національних проектів»: «Відкритий світ та «Місто майбутнього»). Результати дисертаційної роботи також були використані у науково-дослідних роботах, що проводяться в Національному авіаційному університеті та інших закладах вищої освіти та наукових установах.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Дисертаційна робота Одарченка Р.С. є кваліфікаційною науковою працею, написаною ним особисто. Загальний обсяг дисертації, що містить вступ, вісім розділів, висновки і додатки, становить 385 сторінок.

У *вступі* наведені актуальність, мета та завдання дослідження, наукова новизна, практичне значення одержаних результатів, дані про впровадження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У *першому розділі* для визначення задач, які необхідно вирішити, автор послідовно, системно надав узагальнену характеристику стільникових мереж четвертого покоління, визначив особливості їх планування, розглянув засоби та системи, які використовуються в радіомережах та опорних сегментах даних мереж.

Узагальнена характеристика методів планування та експлуатації мереж стільникового зв'язку розглядається з критичної точки зору, оскільки майже в жодному із реалізованих проектів мереж четвертого покоління не досягається необхідний рівень якості обслуговування абонентів. При цьому в цих мережах вже використовуються принципово нові методи та засоби, які дозволяють зменшувати імовірність появи бітових помилок та підвищувати пропускну здатність каналів. До таких технологій автором були віднесені SDN, SDR, DWDM, OTN тощо. Проте було відзначено, що такі технології потребують покращення своїх характеристик. Це надасть можливість більш повного використання їх ресурсу, а відповідно більш ефективного використання самих технологій.

Основними напрямками підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку автор вважає розробку методів оптимізації транспортної мережі, удосконалення методів планування радіомережі,

оптимізації стану мережі, оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж. Також необхідною є розробка та удосконалення методів резервування та балансування навантаження. Таким чином, в кінці першого розділу автором коректно були сформульовані задачі, які вирішувались в наступних розділах дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячено удосконаленню методів планування стільникових мереж. Для цього було запропоновано узагальнену стратегію розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні. Потім було запропоновано удосконалений метод планування мереж LTE, розгортання яких відбувається в Україні. На основі використання удосконаленого в даному розділі методу було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення (веб-додаток), яке може бути використане для оцінки зон радіопокриття та кількості базових станцій при первинному плануванні мережі стільникового зв'язку. Також в даному розділі було розроблено програмне забезпечення для оцінки вартості мережі стільникового зв'язку.

Автором було продемонстровано, що після розгортання мережі стільникового зв'язку необхідно проводити її безперервну оптимізацію шляхом оцінювання основних показників якості обслуговування та ефективності функціонування. Тому було розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності та ефективності функціонування стільникових мереж. В результаті роботи методу визначається, робота якого елемента або елементів мережі не відповідає вимогам, зазначеним в SLA. На основі цього аналізу в подальшому відбувається підвищення показників KPI (розділи 3 – 6 даного дисертаційного дослідження), що дозволяє забезпечити необхідний рівень KQI.

У третьому розділі було запропоновано метод оптимізації підсистеми базових станцій по критерію мінімізації кількості базових станцій із одночасним забезпеченням необхідної якості обслуговування (цільової ефективності) різномірних груп абонентів в різних умовах. Для цього було запропоновано математичну модель, за допомогою якої можна визначити необхідну кількість базових станцій під час оптимізації мережі.

Також в даному розділі було розроблено метод розвантаження радіоінтерфейсу стільникових мереж. Було створено три основних сценарії розвантаження. Для всіх сценаріїв було запропоновано вибір оригінальної метрики та протоколу маршрутизації залежно від виду послуги. Метрика включає в себе наступний перелік параметрів: пропускна здатність каналу; зарезервована пропускна здатність по кожному маршруту; затримка в каналі; завантаженість каналу; коефіцієнт, що дозволяє враховувати або не враховувати параметри інформаційної безпеки під час обчислення метрики; ризик ІБ при передачі даних між вузлами ризик несвоєчасної доставки пакетів при їх передачі.

У четвертому розділі було розроблено метод оптимізації транспортної мережі стільникового оператора. Для цього автором було розділено транспортну мережу на три основних шари: мережа радіорелейних станцій, оптична транспортна мережа та оптична мережа DWDM. В рамках

розробленого метода використовується інтегрована модель оптимізації пропускної здатності для планування трирівневої мережі з урахуванням технологічних обмежень OTN рівня. Запропоновані моделі оптимізації мережі PPC/OTN/DWDM спрямовані на мінімізацію вартості мережі (Модель 1) та зведення до мінімуму загальної пропускної здатності на радіорелейних станціях (PPC) і OXCs (Optical Cross-Connect) (Модель 2). При цьому поставлена задача оптимізації вирішується за допомогою евристичного підходу.

Також в даному розділі було удосконалено метод маршрутизації за рахунок резервування ресурсів та балансування навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки. Основною відмінністю даного методу від більшості існуючих є те, що він динамічний, а також дозволяє розподіляти навантаження в залежності від стану каналів між альтернативними маршрутами з однаковою вартістю, при цьому враховуючи ризик виникнення кіберінцидентів на маршруті передавання даних.

У *п'ятому розділі* було розроблено метод оцінки ефективності функціонування програмно-конфігурованої мережі, що використовується для керування мережею стільникового оператора та впровадження нових сервісів.

Як було показано в розділі 1, в мережах 5G будуть використовувати принципово нову мережеву архітектуру, засновану на технологіях Network Function Virtualization (NFV) і Software Defined Networking (SDN). В рамках вирішення завдання ефективного функціонування такої мережі в першу чергу повинні бути оцінені такі характеристики, як продуктивність, затримка і масштабованість.

Таким чином, під час впровадження нової послуги, оператор мобільного зв'язку повинен перевірити основні характеристики мережі на предмет відповідності основним вимогам.

У *розділі 6* запропоновано удосконалення архітектури 5G з точки зору забезпечення інформаційної безпеки.

В ході проведення аналізу мережевих функцій 5G автором було встановлено, що більша частина уваги приділена процедурам аутентифікації та авторизації, проте як було показано в першому розділі дисертаційної роботи, в сучасних стільникових мережах кількість потенційних кіберзагроз є значно більшою. Тому автор запропонував мати можливість постійного моніторингу стану кібербезпеки стільникових мереж, виявлення атак, усунення їх наслідків тощо. У зв'язку з цим, він запропонував ввести до архітектури ядра мережі 5G новий елемент CSF – Cybersecurity function та N_{cs} – інтерфейси зв'язку вищезгаданої функції із іншими мережевими функціями.

Таким чином, дана функція буде виконувати мережецентричний моніторинг та реагування на кіберінциденти в стільниковій мережі. Даний процес буде відбуватись за розробленим автором алгоритмом, який також детально описаний в розділі 6.

В *розділі 7* були проведені експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання, що дозволило оцінити ефективність запропонованих автором рішень.

У даному розділі представлені результати моделювання радіопокриття базових станцій до і після оптимізації параметрів, зокрема, було проведено моделювання для трьох підходів щодо підключення антен до радіомодулів:

feederline, feederless та з використанням активних антен. Як показали результати моделювання, крім того, що збільшилась площа покриття взагалі, також покращилась і якість зв'язку.

Також в розділі 7 було проведено моделювання розвантаження радіоінтерфейсу підсистеми базових станцій. Результати моделювання продемонстрували, що використовуючи рішення з розвантаження трафіку мобільної передачі даних через хотспоти Wi-Fi, мобільні оператори отримують реальну можливість підвищення пропускну здатності щонайменше на 10%.

Разом із методом розвантаження використовується удосконалений метод маршрутизації. Для оцінки результатів виграшу за використання даного методу, було згенеровано навантаження мережі до та після оптимізації.

Як показано в роботі та авторефераті, застосування даного методу маршрутизації із застосуванням динамічного балансування навантаження дозволяє досягнути більш збалансованого розподілу трафіку по всій мережі і відповідно більш високих показників ефективності утилізації наявних ресурсів. Зокрема, було показано, що використання даного методу дозволяє підвищити до 15% відсотків ефективність розподілу трафіку по суміжним каналам.

Крім того, в даному розділі було проведено моделювання роботи централізованої, локальної децентралізованої, глобальної децентралізованої структури рівня управління (мережі SDN). Було показано, що локальний децентралізований підхід до побудови архітектури мережі більш вигідний у порівнянні з централізованим та глобальним децентралізованим.

Також в даному розділі представлені результати проведених експериментальних досліджень ефективності функціонування сучасних стільникових мереж в Україні. Для оператора стільникового зв'язку Vodafone було проведено вимірювання основних показників якості обслуговування, зокрема, швидкості передавання даних (по низхідному та висхідному каналах) та затримки в мережі. Хоча з одного боку отримані експериментальним шляхом дані свідчать про доволі низьку якість обслуговування абонентів стільникових мереж 3G та 4G в Україні, проте з іншого боку виміряні характеристики свідчать про можливість використання їх ресурсів для надання абонентам більшості послуг реального часу. Тому автором було запропоновано структуру системи моніторингу якості обслуговування абонентів стільникових мереж з метою безперервної оптимізації характеристик мережі.

В розділі 8 було запропоновано методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж. Вихідними даними для методології є кількість вже існуючих абонентів, які потенційно будуть абонентами мереж нових поколінь; вже існуючі апробовані технологічні рішення в світі, які потенційно можуть бути використані в Україні; вимоги від користувачів до мережі; грошові обмеження для операторів стільникового зв'язку тощо.

Методологія передбачає розробку альтернативних стратегій розвитку для операторів стільникового зв'язку, первинне планування радіо- та опорної мережі, моніторинг стану мережі та її безперервну оптимізацію. В результаті підвищується цільова, технічна та економічна ефективність функціонування стільникових мереж зв'язку.

Як було показано автором, за допомогою розробленої методології операторам стільникового зв'язку вдається підвищити ефективність

функціонування своїх мереж за рахунок збільшення радіусу зон обслуговування абонентів стільникових мереж, мінімізації необхідної кількості базових станцій для побудови мережі, збільшення вдвічі кількості активних абонентів, які обслуговуються в стільнику та забезпечення балансування навантаження в радіопідмережі, підвищення економічної ефективності транспортної мережі, підвищення рівня надійності та захищеності мережі, оптимізацію утилізації транспортних каналів, проведення більш гнучкого та оперативного розширення мережі, запровадження нових сервісів, підвищення оперативності доставки даних тощо.

Достовірність і новизна отриманих результатів, наукових положень, висновків та рекомендацій

Результати дисертаційної роботи викладені послідовно, систематично, а також відповідають поставленим задачам. Достовірність наведених результатів підтверджується збігом теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень, а також коректним застосуванням математичного апарату теорії ймовірностей, математичної статистики тощо.

Наукова новизна дисертаційної роботи Одарченка Р.С. наступна:

1. Вперше розроблено методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку.
2. Вперше розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж.
3. Вперше розроблено метод оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора.
4. Вперше розроблено метод оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі.
5. Вперше розроблено метод оцінки ефективності функціонування програмно-конфігурованої мережі.
6. Вперше розроблено метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку.
7. Удосконалено метод планування мережі стільникового оператора.
8. Удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора.
9. Удосконалено метод маршрутизації з резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки.

Практична цінність роботи

Розроблені в роботі математичні моделі, методи, алгоритми, програмно-апаратні засоби дозволили виявити і запропонувати нові практичні шляхи забезпечення та підвищення ефективності функціонування мереж операторів стільникового зв'язку.

На базі алгоритмів, методів та моделей, розроблених у другому – шостому розділах даної роботи було розроблено програмне забезпечення, яке

може бути призначене як для інженерів-проектувальників, так і для студентів, які навчаються за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Запропоновану методику проектування стільникових мереж операторів стільникового зв'язку використано у навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Національного авіаційного університету, зокрема, в дисципліні "Мережі мобільного радіозв'язку". Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами впровадження.

Повнота викладу основних результатів та висновків в опублікованих працях

За матеріалами дисертації опубліковано 95 робіт, які розкривають зміст дисертаційної роботи і серед яких статті, патенти на корисні моделі та тези доповідей на Міжнародних науково-технічних конференціях.

Ідентичність змісту автореферату й основних положень дисертації

Розбіжності між змістом автореферату та змістом представленої дисертаційної роботи відсутні.

Відповідність дисертаційної роботи спеціальності

Дисертаційна робота Одарченка Р.С. відповідає паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Зауваження до роботи

1. Автором запропоновано визначення ефективності функціонування мережі, проведено вибір параметрів, які описують цю ефективність, проте не до кінця зрозумілим є вибір конкретних параметрів із множини запропонованих.

2. Для оцінки зон радіопокриття використано моделі, які враховують можливість використання антенних систем МІМО (до чотирьох антен). Але, як відомо, в мережах наступного покоління планується використання технології Massive МІМО, а цього враховано не було.

3. Метод розвантаження радіоінтерфейсу базових станцій пропонує використовувати протоколи МРТСР, SСТР, але не було розглянуто можливість використання перспективного протоколу МРQІС.

4. В тексті дисертації відсутні кількісні результати по оцінці економічної ефективності функціонування стільникової мережі, хоча це є одним із важливих параметрів, які розглядались в роботі.

5. Автором представлено рис. 4.1, на якому всю мережу розділено на радіопідмережу, транспортний сегмент, підсистему керування тощо. Очевидним є що кожна вище представлена підсистема або висуває вимоги до інших або накладає певні обмеження, однак ці обмеження або вимоги в тексті дисертації відсутні.

6. На жаль, в роботі відсутні результати експериментальних досліджень ефективності функціонування мереж SDN, що не надає змогу в повній мірі оцінити валідність отриманих результатів.

7. Доцільним би було на базі розробленого методу мережецентричного моніторингу кіберінцидентів в стільниковій мережі розробити рекомендації для операторів стільникового зв'язку в Україні.

8. В декількох розроблених методах використовуються дані щодо потужності прийнятого сигналу на боці абонента, однак в жодній моделі або методі не враховані допустимі рівні випромінюваної потужності з точки зору санітарних норм.

9. В роботі не наведено відомостей щодо того, які показники ефективності функціонування є найбільш важливими для яких сервісів користувача, при цьому ці дані могли би бути покладеними в основу методу оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж.

Проте, наведені недоліки не впливають на наукову значимість та практичну цінність цієї дисертаційної роботи.

Загальні висновки

У цілому дисертаційна робота «Методологія підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку» є завершеною працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують науково-прикладну проблему підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку. Дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів № 567 від 24 липня 2013 року (з останніми змінами від 07 липня 2016 року), а її автор Одарченко Роман Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

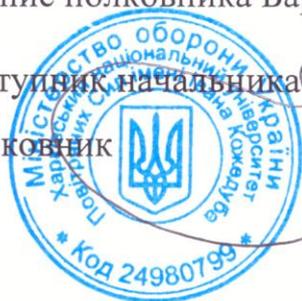
Офіційний опонент,
начальник кафедри бойового застосування
та експлуатації АСУ Харківського
національного університету Повітряних
Сил імені Івана Кожедуба,
доктор технічних наук, професор,
полковник

«23» квітня 2019 р.

В. БАРАНІК

Підпис полковника Баранніка В. підтверджую.

Заступник начальника штабу ХНУ ПС
полковник



Д.ГОЛОВНЯК