

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ОДАРЧЕНКО Роман Сергійович



УДК 621.396 (043.3)

**МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ**

Спеціальність 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: д-р техн. наук, професор

Мачалін Ігор Олексійович,
Національний авіаційний університет,
декан Факультету аеронавігації,
електроніки та телекомунікацій

Офіційні опоненти: д-р техн. наук, професор

Толюпа Сергій Васильович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка,
професор кафедри кібербезпеки та захисту
інформації

д-р техн. наук, професор

Бараннік Володимир Вікторович,
Харківський національний університет Повітряних
Сил
імені Івана Кожедуба,
начальник кафедри бойового застосування та
експлуатації АСУ

д-р техн. наук, доцент

Отрох Сергій Іванович,
Державний університет телекомунікацій,
завідувач кафедри мобільних та
відеоінформаційних технологій

Захист відбудеться 16 травня 2019 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.19 в Національному авіаційному університеті за адресою: Україна, 03680, м. Київ, пр.-т. Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: Україна, 03680, м. Київ, пр.-т. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий 12 квітня 2019 р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., проф.



Т.І. Олешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Створення інформаційного суспільства в Україні є одним із найактуальніших завдань сьогодення. В Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні до пріоритетів формування сучасної інформаційної інфраструктури країни віднесено створення високошвидкісних мереж широкосмужового мобільного доступу до ресурсів мережі Інтернет на всій території України. Йдеться про широкосмужовий доступ на базі використання технологій мобільного зв'язку четвертого покоління 4G (від англ. Generation – покоління) та 5G в найближчому майбутньому. На вирішення питань щодо впровадження 4G технологій на території України спрямовано зусилля найбільших операторів стільникового зв'язку (Київстар, Vodafone та Lifecell). При цьому вплив цих технологій на сучасне суспільство переоцінити неможливо. Стільниковий зв'язок розглядається в даний час як норма, а технології мобільного зв'язку є найбільш затребуваними і тими, що швидко розвиваються.

Стандарт 4G здатний забезпечувати швидкості передачі даних на рівні понад 100 Мбіт/с швидкорухомим абонентам (наприклад, потягам і автомобілям) та 1 Гбіт/с абонентам з невеликою рухливістю (наприклад, пішоходам і фіксованим абонентам) згідно з міжнародною специфікацією International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced). Мережі 5G взагалі будуть здатні використовувати можливість всіх запущених стільникових мереж попередніх поколінь одночасно разом із новим радіоінтерфейсом New Radio (NR). Україні, щоб якнайшвидше інтегруватися в світовий інформаційний простір, необхідно терміново удосконалювати інфраструктуру вже запущених мереж, а також розгорнути нові, побудовані у відповідності до найсучасніших стандартів.

Виходячи з вищесказаного, можна стверджувати, що розвиток інфраструктури широкосмужового доступу до ресурсів мережі Інтернет на всій території України на базі створення високошвидкісних мереж четвертого та п'ятого поколінь і підвищення ефективності їх функціонування є задачею актуальною та перспективною. При цьому під ефективністю будемо вважати множину $W = \{W_C, W_T, W_E\}$, де W_C – цільова ефективність (кількісна міра оцінки відповідності мережі своєму призначенню), W_T – технічна ефективність (кількісна міра, яка відображає технічну довершеність мережі) та W_E – економічна ефективність (кількісна міра економічної доцільності функціонування мережі). Науково обґрунтоване планування й оптимізація стільникових мереж, які забезпечують надання запитуваних послуг із заданими показниками ефективності функціонування, є дуже складною науково-технічною й економічною проблемою, без вирішення якої неможливе створення інформаційної інфраструктури, що відповідає потребам розвинутого інформаційного суспільства. Таким чином, тема дисертаційної роботи є дуже актуальною.

Поряд із зростанням кількості різномірних пристроїв, підключених до мережі Інтернет, та новими популярними сервісами (передача відео з високою роздільною здатністю 4K, 8K, віртуальна реальність (Virtual Reality – VR), доповнена реальність (Augmented Reality – AR), концепція Connected Cars тощо), що висувують нові вимоги до цільової ефективності функціонування стільникових мереж (зменшення затримки, збільшення необхідної пропускної здатності тощо), в світі відбувається експоненціальне зростання кількості передавання даних, з яким не завжди здатні ефективно впоратись існуючі стільникові мережі 4G. Очевидно, що вже в найближчому майбутньому існуючі мережі будуть нездатними забезпечити необхідну якість обслуговування мобільних абонентів, автомобілів та пристроїв IoT.

Для належної підтримки нових ширококосмугових технологій радіодоступу в сучасних стільникових мережах повинна бути підвищена ефективність передачі інформації при зниженні вартості доставки кожного мегабайта трафіку та забезпеченні якості обслуговування (QoS), необхідного кожному типу трафіку. Таким чином, з метою оптимізації вже існуючих та побудови нових мереж 4G та 5G необхідно розробляти методи, які дозволять підвищити ефективність функціонування стільникових мереж зв'язку для того, щоб вони могли відповідати ряду критеріїв: забезпечують впровадження нових систем мобільного зв'язку і підтримку наявних (збереження вкладених інвестицій); відповідають вимогам архітектур мереж наступного покоління; мають ефективні засоби управління трафіком і забезпечення якості обслуговування; надають зручні засоби технічного обслуговування та експлуатації.

При цьому, із розвитком стільникових мереж з'являються нові більш досконалі мережеві архітектури для передачі даних та керування. Проте залишається ряд невирішених завдань та проблемних місць, які необхідно вирішувати та усувати відповідно.

Тому фактично виникає протиріччя між необхідними потребами щодо максимально ефективного функціонування стільникових мереж (обслуговування різних груп абонентів стільникових мереж із заданими показниками якості в умовах квазіреального часу, забезпечення ефективного використання технічного обладнання та каналів зв'язку, зменшення необхідних інвестицій), та фактичними можливостями існуючих інформаційно-комунікаційних технологій, методів та моделей щодо забезпечення цих високих вимог.

Таким чином, розроблення методології підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку є важливою науково-технічною проблемою, спрямованою на вдосконалення якості обслуговування абонентів сучасних стільникових мереж і забезпечення вимог до мереж такого типу.

Вищезгадана проблема, яка вирішувалась в даній дисертаційній роботі, обумовлює її **актуальність**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи та обраний напрямок досліджень безпосередньо пов'язаний з реалізацією положень «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні» (затверджена Кабінетом Міністрів України від 15 травня 2013 року), «Плану заходів на 2015-2017 роки щодо впровадження в Україні у 2017 році системи рухомого (мобільного) зв'язку четвертого покоління» (Рішення Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації № 434 від 18.08.2015), Основних пріоритетних напрямків «Національних проєктів»: «Відкритий світ» (створення інформаційно-комунікаційної (4G) освітньої мережі національного рівня) та «Місто майбутнього» (формування стратегічного плану системи та проєктів розвитку міста), з міжнародними програмами, зокрема, Horizon 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. Основні наукові результати отримано в рамках науково-дослідних робіт: «5G-XCast» (Horizon 2020, grant number 761498); шифр 874-ДБ13, тема «Створення та дослідження нових систем захищеного авіаційного радіозв'язку в рамках Концепції CNS/ATM ICAO» (НДР 0110U000225); шифр 161-ДБ17, тема «Квантово-криптографічні методи захисту критичної інформаційної інфраструктури держави» (НДР 0117U006770); шифр Платформа (НДР 0116U000072т).

Роль автора в зазначених науково-дослідних роботах, у яких дисертант був безпосереднім виконавцем, полягає в аналізі існуючих методів безпроводової передачі інформації, моделюванні та дослідженні роботи розглянутих мереж зв'язку, розробці методів підвищення ефективності функціонування безпроводових мереж зв'язку.

Мета роботи. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування стільникових мереж.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких задач:

1. Проаналізувати якість обслуговування абонентів стільникових мереж з метою визначення ефективності їх функціонування, захищеності та визначити вимоги до стільникових мереж нового покоління.

2. Удосконалити метод планування радіомережі з урахуванням вимог до якості обслуговування та ефективності функціонування мережі, кліматичних умов, рельєфу місцевості та характеру забудови, на основі якого розробити відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення для оцінки радіопокриття та попереднього розрахунку вартості розгортання мережі.

3. Розробити метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж з метою проведення безперервної оптимізації мережі стільникового зв'язку.

4. Розробити метод оптимізації підсистеми базових станцій (БС) стільникового оператора.

5. Удосконалити метод розвантаження радіоінтерфейсу стільникової мережі із використанням безпроводових мереж та керуванням цим процесом за допомогою програмно-конфігурованих мереж.

6. Розробити метод оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі.

7. Розробити метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти у стільниковій мережі нового покоління.

8. Удосконалити метод маршрутизації за рахунок резервування ресурсів та балансування навантаження транспортного мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки.

9. Розробити метод оцінки ефективності функціонування програмно-конфігурованого сегмента стільникового оператора під час впровадження нових сервісів.

10. Розробити методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку та відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення, що дозволить верифікувати запропоновані методи, моделі та методологію і підтвердити їх ефективність.

Об'єктом дослідження є процес передавання та обробки інформації в сучасних стільникових мережах зв'язку.

Предметом дослідження є методи оцінки та підвищення ефективності функціонування сучасних стільникових мереж зв'язку.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених цілей в дисертаційній роботі використано: методи теорії інформації та передавання сигналів – для аналізу методів передавання інформації у широкосмугових радіосистемах стільникових мереж четвертого покоління; методи теорії розповсюдження електромагнітних хвиль – для дослідження процесу затухання електромагнітного поля; методи теорії телетрафіку – для генерування та дослідження розподілу навантаження на мережу; методи комп'ютерного моделювання – для перевірки адекватності розроблених моделей та алгоритмів; методи прямого синтезу – для розробки структурних схем

пристроїв та систем; натурального експерименту – для перевірки адекватності розроблених методів підвищення ефективності функціонування стільникових мереж; математичної статистики – для обробки отриманих експериментальним шляхом та під час комп'ютерного моделювання статистичних даних; теорія множин – для опису множин кіберзагроз, мережевих функцій тощо.

Наукова новизна. У роботі отримані такі нові наукові результати.

1. Удосконалено метод планування мережі стільникового оператора за рахунок послідовного визначення стратегії розвитку оператора стільникового зв'язку, найбільш важливих показників якості обслуговування, виборі обладнання із множини доступних альтернатив, виборі послуг для абонентів, оцінці зон радіопокриття із врахуванням особливостей рельєфу та кліматичних умов, корегування розташування базових станцій, удосконаленій процедури частотного планування, попередній оцінці капітальних витрат на побудову мережі, що дозволяє проводити більш точну оцінку зон радіопокриття, вибір ключових показників якості обслуговування, більш ефективно частотне планування та розрахунок капітальних витрат, що надає змогу операторам оцінити доцільність побудови варіанту мережі стільникового зв'язку.

2. Вперше розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж, який полягає у послідовному визначенні множини оцінюваних послуг, виборі на основі кореляційно-регресійного аналізу статистичних даних якості обслуговування та рівня захищеності оптимальних критеріїв оцінювання функціонування мережі, безпосередній їх оцінці та порівнянні з допустимим рівнем, що на відміну від відомих, дозволяє проводити оцінку найбільш важливих показників ефективності функціонування та захищеності мережі стільникового оператора з метою їх постійного контролю та оптимізації під час впровадження нових сервісів під час обслуговування абонентів.

3. Вперше розроблено метод оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора, який полягає в послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми з урахуванням обмежень по якості обслуговування, допустимій смузі частот, кількості активних абонентів, використанні мультистандартних активних антенних систем та програмно-конфігурованого радіоінтерфейсу, що на відміну від відомих, дозволяє, при необхідності збільшити радіус зон обслуговування абонентів стільникових мереж, проводити динамічний перерозподіл радіочастотних ресурсів мережі та оптимізувати витрати оператора стільникового зв'язку на побудову підсистеми базових станцій.

4. Удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора з використанням підмережі стандарту не-3GPP шляхом використання нових алгоритмів вибору мережі для передачі даних, використання комбінацій протоколів MTCP, TCP, SCTP на різних ділянках мережі та в залежності від типу надаваних послуг, що дозволяє зменшити навантаження на радіоінтерфейс стільникової мережі, забезпечити балансування навантаження та підвищення ефективності функціонування радіопідмережі.

5. Вперше розроблено метод оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, який полягає у послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми станцій радіорелейного зв'язку з урахуванням технологічних обмежень до пропускну здатності каналів, оптимізації структури кожного шару із врахуванням технологічних обмежень цього рівня, основаних на різноманітних параметрах функціонування мережі та показниках вартості, що на відміну від відомих, дозволяє здійснити удосконалення структури транспортної мережі при

переході до мереж нових поколінь, забезпечуючи необхідну пропускну здатність та підвищення економічної ефективності транспортної мережі.

6. Удосконалено метод маршрутизації з резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки за рахунок послідовного визначення характеристик мережі (пропускну здатність, затримка, завантаженість каналу), визначення необхідного резерву в каналі зв'язку, визначення альтернативних шляхів передавання даних з урахуванням ризиків інформаційної безпеки, розробки порогових значень для різних типів сервісів та виконання перерозподілу потоків, що дозволяє, надаючи підвищений рівень надійності та захищеності мережі, підвищити ефективність функціонування транспортних каналів.

7. Вперше розроблено метод оцінки ефективності функціонування програмно-конфігурованої мережі, що використовується для керування мережею стільникового оператора та впровадження нових сервісів, що полягає у послідовному виборі оптимальної архітектури сегменту програмно-конфігурованої мережі, оцінці основних показників ефективності її функціонування, що на відміну від відомих, дозволяє проводити більш гнучке та оперативне розширення мережі, впровадження нових сервісів та підвищення оперативності доставки даних.

8. Вперше розроблено метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку, який полягає в удосконаленні архітектури стільникових мереж зв'язку шляхом введення додаткових безпекових функцій та послідовному зборі інформації про виникнення кіберінцидентів в стільниковій мережі, виявленні типів кібератак, об'єктів та ступеня впливу, реагування на кібератаки та збереження інформації про кіберінциденти в спеціалізовану базу даних, що дозволяє в режимі реального часу проводити моніторинг стану забезпечення кібербезпеки, підвищувати її рівень та ефективність функціонування стільникової мережі.

9. Вперше розроблено методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку, яка полягає у використанні удосконаленого методу планування мережі стільникового зв'язку для розгортання стільникових мереж нового покоління, методу оцінки ключових показників функціонування мережі стільникового оператора з метою безперервної оптимізації мережі оператора шляхом використання методу оптимізації підсистеми базових станцій розгорнутої мережі стільникового оператора, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі Wi-Fi (Wireless Fidelity), методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, удосконаленого методу маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора, методу оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі та методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку, що на відміну від відомих, надає можливість за рахунок безперервного моніторингу ключових показників якості функціонування мережі оперативно підвищувати ефективність функціонування стільникової мережі та якість обслуговування абонентів.

Вищенаведені **наукові результати** дають можливість вирішити проблему підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку.

Практичне значення отриманих результатів. Теоретичні результати, отримані в дисертаційному дослідженні, відкривають можливість виявити і запропонувати нові практичні шляхи підвищення ефективності функціонування стільникових мереж під час їх впровадження в Україні на основі використання нових

методів керування мережею, передавання даних, безперервної оптимізації мережі, моніторингу та реагування на кіберінциденти.

При цьому отримані результати дозволяють:

- підвищувати ефективність планування розміщення базових станцій із використанням уточнюючих факторів;
- оцінювати рівень завантаженості радіоінтерфейсу та транспортної мережі стільникового оператора з метою підвищення ефективності їх функціонування;
- вибирати оптимальні показники ефективності функціонування мережі стільникового оператора;
- проводити оптимізацію параметрів мережі стільникового оператора;
- проводити більш ефективне керування мережею стільникового оператора;
- запроваджувати нові сервіси для використання в стільниковій мережі;
- проводити розвантаження радіоінтерфейсу стільникової мережі;
- забезпечувати резервування ресурсів транспортної мережі;
- проводити попередню оцінку вартості проектного рішення мережі LTE.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в такому:

- розроблено методику безперервної оптимізації ефективності функціонування мережі стільникового оператора;
- розроблено методику планування радіопокриття мережі стільникового оператора;
- розроблено методику вибору сучасних технічних рішень, а також специфікації у галузі уніфікованих комунікацій, побудованих за технологією IMS/A-IMS для побудови загальнодержавної мережі;
- розроблені удосконалені алгоритми розвантаження радіоінтерфейсу стільникових мереж із використанням технологій Wi-Fi, Li-Fi (Light Fidelity) та концепції SDN;
- розроблено відповідне алгоритмічне і програмне забезпечення для оцінки вартості мережі стільникового зв'язку;
- розроблено програмне забезпечення для оцінки показників KPI та QCI мережі стільникового оператора;
- розроблено навчально-інженерне програмне забезпечення (web-додаток) для оцінки зон радіопокриття базових станцій мережі LTE;
- розроблено програмне забезпечення для оцінки показників якості обслуговування кінцевих вузлів в концепції IoE (Internet of Everything);
- розроблено структуру багатоканального шлюзу для мереж 5G;
- розроблено імітаційну модель мережі SDN.

Матеріали дисертаційної роботи упроваджено у діяльність ТОВ «М.М.Д Смарт Україна», ТОВ «Українські новітні технології» (ТМ «Freshel»), Bundleslab KFT (Угорщина), Державного науково-дослідного інституту спеціального зв'язку та захисту інформації, навчальний процес Університету в Бельсько-Бялій, Національного авіаційного університету, Державного закладу «Київський коледж зв'язку» та Центру перепідготовки та підвищення кваліфікації Київської обласної державної адміністрації.

Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок автора. Основні положення й результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. З робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належить: розробка методу адаптивного регулювання потужності передавачів в стільникових мережах в

залежності від кліматичних умов [1]; аналіз результатів моделювання самоподібного трафіку в телекомунікаційних мережах [2]; розробка структури шлюзу для інтеграції різних безпроводових технологій [3]; розробка архітектури ядра мережі 5G для забезпечення багатоканальної передачі даних [4]; розробка нового методу маршрутизації в безпроводових мережах в залежності від стану каналу [5]; моделювання сигналів OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) в сучасних стільникових мережах [6]; статистична оцінка результатів моделювання QAM (Quadrature Amplitude Modulation) сигналів в сучасних широкосмугових радіосистемах [7]; розробка методу розвантаження радіоінтерфейсу в сучасних стільникових мережах 4G та 5G [8]; розробка математичної моделі для оцінки величини втрат потужності під час впливу кліматичних чинників [9]; розробка методу оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора [10]; розробка методу оптимізації потоків трафіку в транспортній мережі стільникового оператора [11]; розробка методу оцінки масштабованості програмно-конфігурованих мереж із різною архітектурою управління [12]; розробка структури шлюзу для інтеграції безпроводових сенсорних мереж та мереж LTE [13]; оцінка параметрів, які впливають на надійність мереж SDN [14]; оцінка додаткових параметрів, отриманих в радіоканалі [15, 16]; вибір основних ключових показників для оцінки захищеності стільникових мереж [17]; моделювання DoS (Denial of Service) атак на сервер [18]; розробка методу удосконалення архітектури систем безпеки стільникових мереж 5G [20]; розробка методу оцінки ключових показників захищеності в стільникових мережах [26]; формування вимог до стільникових мереж нового покоління в Україні [27]; дослідження основних недоліків сучасних базових станцій [28]; розробка архітектури програмного забезпечення та вибір параметрів для вимірювання стільникових мережах для їх подальшої статистичної обробки [29]; розробка методики вибору оптимального проектного рішення для побудови мережі LTE [30]; формування обмежень, які накладаються на кожний наступний рівень багаторівневого транспортного сегменту мереж LTE [31]; розробка математичного апарату, який використовується для резервування ресурсів та балансування навантаження в транспортній мережі стільникових операторів [32]; аналіз архітектури та недоліків сучасних систем моніторингу стільникових мереж зв'язку [33]; розробка архітектури системи управління кіберінцидентами в мережах LTE [34]; визначення вимог до систем безпеки сучасних стільникових мереж [35]; аналіз методу розвантаження мережі LTE із використанням концепції Hotspot 2.0 [36]; удосконалений метод розвантаження мережі LTE із використанням концепції програмно-конфігурованих мереж [37]; моделювання роботи overlay мереж SDN [38]; розробка математичної моделі та алгоритму для оцінки пропускної здатності систем MIMO (Multiple Input Multiple Output) сучасних стільникових мереж [39]; аналіз безпроводових мереж передавання даних та сучасних технологічних рішень, які можуть бути використані в концепції BYOD (Bring Your Own Device) [40]; розробка методики та обробка результатів експериментальних досліджень пропускної здатності безпроводових мереж зв'язку [41]; розробка моделі інтеграції різноманітних сервісів в мережу стільникового оператора [42]; розробка безпроводового сегменту мережі аеропорту [43]; розробка моделі оцінки радіусу зон покриття безпроводових мереж в складних умовах розповсюдження радіохвиль [44]; моделювання величини втрат потужності радіосигналу для різних моделей розповсюдження радіохвиль [45]; дослідження відмінностей в архітектурах стільникових мереж різних поколінь [46]; розробка способу інтеграції мереж Li-Fi та Wi-Fi [47]; аналіз архітектури Інтернету речей [48, 49]; удосконалення методу проектування мережі SDN [50].

Апробація дисертації. Основні теоретичні та практичні результати

дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на таких конференціях і семінарах: Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми розвитку науки і техніки» (Київ, ДУТ, 2015 р.); International scientific-practical conference «Information and telecommunication technologies: education, science and practice» (Казахстан, Алмати, 2015 р.); Міжнародний круглий стіл «Про національну і інформаційну безпеку РК» (Казахстан, Алмати, 2016 р.); IEEE International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)» (Київ, НАУ, 2015 р., 2017 р.); IEEE International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)» (Харків, ХНУРЕ, 2015 – 2018 рр.); VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи і мережні технології» (Київ, НАУ, 2015 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «ITSEC» (Київ, НАУ, 2014 – 2018 рр.); Всеукраїнська науково-практична конференція «Стан та удосконалення безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем «SITS» (Коблево, 2015 – 2018 рр.); Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2015» (Київ, НАУ, 2015 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційна безпека та комп'ютерні технології» (Кропивницький, КНТУ, 2016 р.); XI mezinárodní vědecko - praktická konference «Aktuální možnosti vědy – 2015» (Praha, 2015); Науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 2014 р., 2016 р., 2018 р.); International Conference on Electronics and Information Technology, EIT 2016 (Одеса, 2016 р.); 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (Київ, НАУ, 2016, 2018 р.); XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні засоби зв'язку» (Мінськ, 2016, 2018 р.); Науково-технічна конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем» (Київ, НАУ, 2014 – 2018 рр.); Inter-University Conference «Engineer of 21st Century» (Belsko Biala, 2016 – 2018 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 95 наукових праць, у тому числі: 3 патенти на корисні моделі, 5 розділів колективних монографій, 26 статей у фахових виданнях, які входять в перелік наукових видань, затверджений МОН України, 3 статті у періодичних виданнях, які включені до науково-метричної бази Scopus, інших 15 праць, які включені до науково-метричної бази Scopus, матеріали доповідей на науково-технічних конференціях – 43.

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел (вкінці кожного розділу основної частини дисертації) та додатків і має 286 сторінок основного тексту, 157 рисунків, 18 таблиць, 37 сторінок додатків. Список використаних джерел містить 273 найменування і займає 34 сторінки. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 385 сторінок.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

У вступі обґрунтована актуальність роботи, поставлено мету й завдання досліджень, відображено наукову новизну й практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про їх апробацію й впровадження.

У першому розділі проведено аналіз еволюції операторів стільникового зв'язку в Україні, окреслено основні тенденції розвитку радіотехнологій в світі та в Україні зокрема. Поява нових послуг і вдосконалення технічних можливостей пристроїв означає, що обсяги трафіку в стільникових мережах і споживчий попит на високошвидкісну передачу даних буде зростати з безпрецедентною швидкістю. Так, трафік даних в мережах мобільного широкосмугового зв'язку демонструє практично експоненціальне зростання. На підставі різних прогнозів можна зробити висновок, що після 2020 року ємність систем повинна бути здатною забезпечувати обробку трафіку,

що перевищує нинішній більш ніж в 1000 разів. Зростання числа підключених пристроїв буде супроводжуватися появою нових способів їх застосування, що призведе до виникнення нових вимог до мереж, що варіюються залежно від пристрою і від конкретної мети використання.

При цьому за аналізом якості обслуговування абонентів у реалізованих проєктах мереж LTE в світі та стільникових мереж 3G та 4G в Україні (аналіз показників цільової ефективності $W_{II} = \{R, t_{затр}, IS\}$, де R – фактична швидкість передавання даних, $t_{затр}$ – час затримки при передачі даних, IS – комплексний параметр, який характеризує забезпечення інформаційної безпеки в мережі, встановлено, що заявлені вимоги до мереж четвертого покоління не досягаються в жодній із реалізованих мереж, а фактична якість обслуговування абонентів перебуває на досить низькому рівні, що свідчить про низьку ефективність існуючих методів планування радіомереж, транспортних підсистем, методів керування та забезпечення кібербезпеки.

При цьому, слід звернути увагу на те, що поки в Україні тільки розпочинається впровадження нового стандарту 4G, в більшості європейських держав споживачі вже давно перейшли на прогресивний 4G-зв'язок та готуються до запуску 5G. Швидкість передачі даних там становить від 100 Мбіт/с до 1 Гбіт/с.

Тому, в Україні дуже важливим є швидкий розвиток стільникових мереж, адже це дозволить наблизитись до розвинених країн Європи та світу. Таким чином, для належної підтримки нових ширококугових технологій радіодоступу в стільникових мережах повинна бути підвищена ефективність передачі інформації при зниженні вартості доставки кожної одиниці трафіку із одночасним підвищенням рівня кібербезпеки, що призведе до забезпечення необхідної якості обслуговування (QoS), характерної кожному типу трафіку.

Вищерозглянуті аспекти дозволили вибрати напрямки подальших досліджень. З одного боку, необхідно забезпечити розгортання стільникових мереж нового покоління в Україні, з іншого, також необхідно підвищувати ефективність їх функціонування, наближаючи до вимог 5G, як з точки зору основних показників якості обслуговування, так і з точки зору захищеності. Для цього були окреслені напрямки наукових досліджень, які проводились в дисертаційній роботі.

Другий розділ присвячений удосконаленню методів планування мереж стільникових операторів як в світі, так і в Україні зокрема.

Було запропоновано узагальнену стратегію розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні. Кожен оператор стільникового зв'язку очікує від вкладання коштів у інвестиційні проєкти впливу (ефекту), який відображається на величині прибутку підприємства від реалізації проєкту, тому необхідно провести вибір оптимального проєктного рішення з використанням критерію оптимальності Байєса-Лапласа (BL-критерію), а також обґрунтування використання, як оціночну функцію, оптимальності – чистої приведенної вартості (чистого приведенного ефекту) за проєктом, як інтегрального показника ефективності проєктних рішень.

За критерієм Байєса-Лапласа, оптимальним рішенням $X^* \in D(\vec{X})$ із множини можливих рішень $D(\vec{X})$ вважають таке, для якого математичне очікування результуючої оціночної функції оптимальності досягає найбільшого можливого значення:

$$E_{BL} = \max_{\vec{X} \in D(\vec{X})} E_{jr} = \max_{\vec{X} \in D(\vec{X})} \sum_{j=1}^m P_j \cdot E_{ij},$$

де p_j – імовірність відповідного стану середовища; E_{ij} – нормована оціночна функція для кожного стану середовища.

Безліч оптимальних варіантів згідно з BL-критерієм визначають таким чином:

$$\bar{X}^* = \left\{ \bar{X}_i : \bar{X}_i \in D(\bar{X}) \wedge E_{BL} = \max_{\bar{X}_i \in D(\bar{X})} \sum_{j=1}^m p_j \cdot E_{ij} \right\}.$$

В результаті проведених досліджень були запропоновані альтернативні стратегії розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні.

Далі в даному розділі було удосконалено метод планування мереж LTE, розгоргання яких відбувається в Україні.

Етап 1 – Визначення виробника-постачальника послуг. Необхідно визначити виробника-постачальника обладнання для побудови мережі. Традиційно замовник рішення формулює досить конкретне завдання на технічну реалізацію, і компанія-проектувальник пропонує йому найбільш ефективну систему, здатну забезпечити всі споживчі запити. Після цього за допомогою запропонованої послідовності кроків проводиться підбір і вартісна оцінка всіх можливих технічних реалізацій систем зв'язку з різними споживчими характеристиками, відбувається порівняння цих оцінок з фінансовими можливостями організації-замовника і вибирається рішення, яке дає організації-замовнику найбільший прибуток або найбільшу ефективність від вкладених в нову систему інвестицій.

Вибір проектного рішення описується наступною послідовністю дій:

1. Пошук і систематизація готових рішень для побудови мережі LTE.
2. Вибір критеріїв $k = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$, за якими буде оцінюватися система.
3. Для вибору оціночної шкали запропонований багатокритерійний аналіз певної необхідної характеристики. З ваговими коефіцієнтами критерій інтегральної оцінки має наступний вигляд: $k_{int} = \sum_{n=1}^m (k_n \cdot x_n)$, де вектор $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – вектор важливих для оператора характеристик (пропускна здатність, імовірність бігової помилки тощо), m – кількість важливих для оператора характеристик.
4. Вибір оптимального готового рішення для побудови мережі LTE.
5. Пошук і систематизація рішень для побудови окремих вузлів мережі LTE.
6. Вибір критеріїв, за якими буде оцінюватися рішення для вузлів.
7. Вибір оціночної шкали проводиться аналогічно кроку 3 даної послідовності дій.
8. Вибір оптимальних рішень для окремих вузлів.
9. Перевірка сумісності окремих вузлів різних виробників (в разі невідповідності – заміна на менш оптимальне рішення).
10. Порівняльний аналіз вартостей готового рішення і на основі окремих вузлів, вибір кращого.
11. Розробка специфікації обладнання для побудови LTE мережі в рамках поставленого завдання і використання для подальших розрахунків.

Розроблені специфікації є вихідними даними до наступної послідовності етапів.

Етап 2 – Формування задачі первинного планування мережі. Завдання побудови початкового наближення мережі LTE можна сформулювати наступним чином: при заданій смузі частот потрібно визначити просторові параметри мережі (кількість базових станцій та розміри їх зон обслуговування) за умови, що пікові швидкості передачі даних по лінії «вниз» і лінії «вгору» максимальні, а число базових станцій в складі мережі не перевищує допустимого значення.

Етап 3 – Вибір вхідних даних до планування мережі. Вхідними даними до первинного планування мережі LTE будуть наступні параметри: площа території, на якій необхідно забезпечити покриття, характер забудови, частотний діапазон, допустима затримка в каналі, імовірність бітової помилки, необхідна пропускна здатність на одного абонента, кількість активних абонентів.

Етап 4 – Побудова першого наближення мережі LTE. Використовуючи вищезазначені параметри можливо є побудова першого наближення мережі LTE.

Максимально допустимі втрати при поширенні радіохвиль в каналі визначаються наступним чином:

$$L = P_{BC} + G_{прд} - P_{MC} - B_{тіло} + G_{прм} - B_{фід} - IM - L_{пов} - L_{мет} - L_{ф}, \quad (1)$$

де P_{BC} – потужність передавача базової станції; $G_{прд}$ – коефіцієнт підсилення передавальної антени; $P_{прм}$ – чутливість приймача; $B_{тіло}$ – втрати в тілі абонента; $G_{прм}$ – коефіцієнт підсилення приймальної антени; $B_{фід}$ – втрати у фідері; IM – запас по інтерференції; $L_{пов}$ – запас на повільні завмирання; береться рівним 10,3 дБ; $L_{ф}$ – врати сигналу у фідерних лініях; $L_{мет}$ – втрати, обумовлені поглинаннями в атмосферних газах, гідро метеорах, тумані тощо, дБ.

Таким чином, можна представити максимальну дальність зв'язку для різних частотних діапазонів, що використовуються в LTE (надалі можна використовувати також для 5G) за допомогою моделі SUI (Stanford University Interim):

$$\lg(d/d_0) = (L - (A + X_f + X_h + s)) / 10\gamma, \quad \text{для } d > d_0$$

де d – відстань від базової станції до прийомної антени; $d_0 = 100$ м; X_f – корегуюча для частоти більшої за 2 ГГц; X_h – корегуюча для висоти прийомної антени; s – корегуюча на затінення; $\gamma = a - bh_b + (c/h_b)$ – експонента втрат, де h_b – це висота підйому антени базової станції (м), знаходиться в межах від 10 до 80 м; константи a , b та c залежать від типу місцевості. Параметр s знаходиться в межах між 8,2 та 10,6 дБ. Параметр A визначається: $A = 20 \lg(4\pi d_0 / \lambda)$, де λ – довжина хвилі.

На рис. 1 представлена залежність дальності зв'язку від частоти при різних видах забудови. На рис. 2 приведена залежність величини затухань від відстані для різних частотних діапазонів.

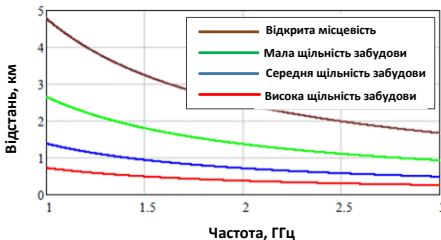


Рис. 1. Залежність дальності зв'язку від частоти для різних типів забудови

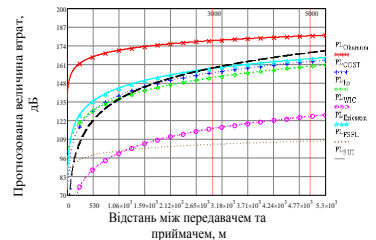


Рис. 2. Залежність втрат потужності радіосигналу від дальності зв'язку

Етап 5 – Удосконалене частотне планування. Даний етап передбачає використання удосконаленої процедури частотного планування в мережах LTE. Основу всіх завдань оптимального частотного планування становить завдання мінімізації числа приймачів, яким не вдається призначити частоти при дотриманні всіх заданих обмежень на повторне використання частот у вигляді матриць допустимого взаємного попарного впливу (сусідства) всіх секторів. Дана процедура

використовується для дрібного та м'якого повторного використання смуг частот каналів, коли вся смуга частот розділена на фіксовану кількість.

Етап 6 – Оцінка ємності мережі. На даному етапі відбувається визначення загального навантаження на кожну базову станцію у стільнику та корегування кількості базових станцій.

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 БС при первинному плануванні мережі стільникового зв'язку.

Також в даному розділі було розроблено програмне забезпечення для оцінки вартості мережі стільникового зв'язку.

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.

Запропонований метод реалізується у чотири етапи:

Етап 1 – Визначення послуги. Для реалізації цього етапу введемо множину послуг, аналіз яких потрібно провести S , які обираються із класифікації послуг оператора стільникового зв'язку (рис. 3). Окремо виділяються послуги забезпечення інформаційної безпеки.

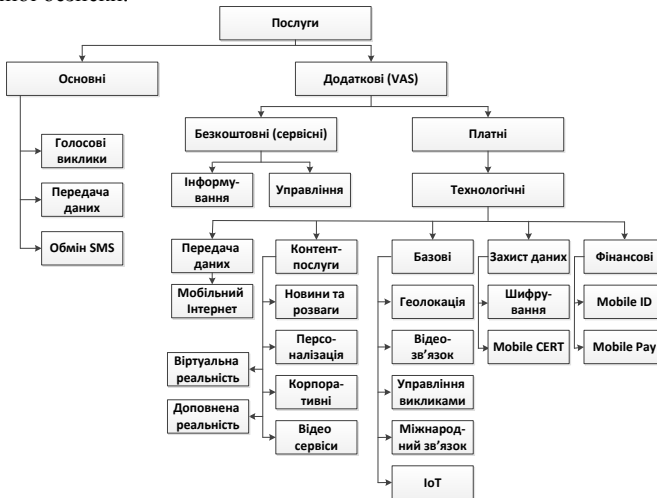


Рис. 3. Класифікація послуг, які надають сучасні оператори стільникового зв'язку

Етап 2 – Визначення показників KQI. На цьому етапі обираються ключові показники якості надання послуг для кожної групи обраних послуг S , які занесені в договір про надання послуг SLA (Service Level Agreement) між абонентами та оператором стільникового зв'язку. Підмножини показників KQI $S_{ij} \subseteq S_i$ визначимо як:

$$S_{ij} = \left\{ \bigcup_{p=1}^{r_{ij}} S_{ijp} \right\} = \{ S_{ij1}, S_{ij2}, \dots, S_{ijr_{ij}} \}, \quad (2)$$

де S_{ij} ($p = \overline{1, r_{ij}}$) – показники KQI, що характеризують якість надання групи послуг S_{ij} ; r_{ij} – кількість таких показників. До основних KQI відносять якість передачі голосу, відтворення відео, завантаження вебсторінок тощо.

Етап 3 - Вибір показників KPI. Відбувається вибір ключових показників продуктивності мережі, які впливають на показник KQI, що досліджується. Для кожного KPI потрібно визначити його числові характеристики. Якщо деякі KPI неможливо кількісно чи якісно визначити або для них недоступна статистика, то їх вилучають з подальшого розгляду. Для цього на основі аналізу зібраних статистичних даних про ключові показники продуктивності мережі та якості надання послуг за допомогою багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу відбувається знаходження аналітичного виразу, котрий найкраще відображав би зв'язок факторних ознак (KPI) з результативною (KQI), тобто вибір функції:

$$\hat{Y} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (3)$$

де \hat{Y} – результативна ознака-функція (KQI); $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – факторні ознаки (KPI).

До основних груп показників KPI в мережах LTE відносяться наступні: доступність, інтегрованість, мобільність, утилізація каналів.

Щоб мати можливість судити про порівняльну силу впливу окремих факторів і резерви, які в них закладені, повинні бути обчислені частинні коефіцієнти еластичності E_i , а також бета-коефіцієнти β_i .

Відмінності в одиницях виміру факторів усувають за допомогою часткових коефіцієнтів еластичності, які розраховують за формулою:

$$E_i = a_i \frac{\overline{x_i}}{\overline{y_i}}, \quad (4)$$

де a_i – коефіцієнт регресії при i -му факторі; $\overline{x_i}$ – середнє значення i -го фактору; $\overline{y_i}$ – середнє значення досліджуваного показника.

Частинні коефіцієнти еластичності показують, на скільки відсотків в середньому змінюється показник, що аналізується, зі зміною на 1% кожного фактора при фіксованому значенні інших факторів.

Для визначення факторів, у розвитку яких закладені найбільші резерви поліпшення досліджуваного показника, необхідно врахувати відмінності в ступені варіювання факторів, що увійшли до рівняння регресії. Це можна зробити за допомогою β -коефіцієнтів, які розраховують за формулою:

$$\beta_i = a_i \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y}, \quad (5)$$

де σ_{x_i} – середнє квадратичне відхилення i -го фактору; σ_y – середнє квадратичне відхилення показника; β – коефіцієнт показує, на яку частину середнього квадратичного відхилення змінюється результативна ознака зі зміною відповідної факторної ознаки на величину його середнього квадратичного відхилення. Виходячи зі співвідношення $\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot r_i = R^2$, та, беручи до уваги, що коефіцієнт множинної детермінації R^2 є часткою досліджуваних факторів у збільшенні результативного показника сукупності, що аналізується, можна зробити висновок, що добуток $\beta_i \cdot r_i$ ($1 \leq i \leq n$) є показником сили впливу відповідного фактора на даний показник.

Коефіцієнт, який показує, яка частка внеску кожного аналізованого фактора в сумарний вплив всіх відібраних факторів:

$$\Delta_i = \frac{\beta_i r_i}{R^2}. \quad (6)$$

Етап 4 – Оцінка показників КРІ. Для реалізації даного етапу використовуються підмножини показників КРІ $S_{\text{фр}}$ (5) і відповідні формули для їх розрахунків та алгоритми проведення необхідних вимірювань, визначених у методиках, регламентованих державними та міжнародними контролюючими органами.

Етап 5 – Порівняння показників з гранично допустимими значеннями. На даному етапі отримані значення порівнюються з гранично допустимими, можливими для забезпечення нормального функціонування мережі. Якщо ці значення перевищують допустимі, необхідно провести аналіз пристроїв або систем, які функціонують в стільниковій мережі, та виявити причини невідповідності отриманих значень.

Для порівняння отриманих значень в результаті розрахунків з гранично допустимими введемо логічну функцію еквівалентності:

$$E(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{при } x > y, \\ 0, & \text{при } x \leq y. \end{cases} \quad (7)$$

В результаті буде визначено робота якого елементу або елементів мережі не відповідає вимогам, зазначеним в SLA. На основі цього аналізу в подальшому відбувається підвищення показників КРІ (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) різнорідних груп абонентів в різних умовах. Нижче представлена математична модель, за допомогою якої можна визначити необхідну кількість базових станцій під час оптимізації мережі.

Кількість необхідних базових станцій для покриття всієї необхідної території обслуговування можна визначити за наступною формулою:

$$N_{BC} = \frac{S_{\text{обсл}}}{S_{\text{ст}}},$$

де $S_{\text{обсл}}$ – загальна площа обслуговування абонентів;

Площа, яка обслуговується однією BC в стільнику, визначається за формулою:

$$S_{\text{ст}} = \pi \cdot d_{\text{max}}^2, \\ d_{\text{max}} = f(P_{BC}, G_{\text{прд}}, G_{\text{прм}}, B_{\text{аб}}, B_{\text{фід}}, IM, L_{\text{мет}}, L_{\text{розп}}, R_{\text{аб}}, N_{\text{аб}}, C_{BC}, P_{\text{бит}}).$$

Відповідно і кількість необхідних базових станцій являється функцією багатьох змінних, яку з метою зменшення витрат оператора стільникового зв'язку слід мінімізувати:

$$N_{\text{ст}} = f(P_{BC}, G_{\text{прд}}, G_{\text{прм}}, B_{\text{аб}}, B_{\text{фід}}, IM, L_{\text{мет}}, L_{\text{розп}}, R_{\text{аб}}, N_{\text{аб}}, C_{BC}, P_{\text{бит}}) \rightarrow \min.$$

Враховуючи те, що деякі змінні параметри на практиці є чітко визначеними (технічні характеристики систем), то запишемо задачу параметричної оптимізації у наступному вигляді:

$$\left[\begin{array}{l} d_{\max} = f(P_{BC}, G_{\text{прд}}, G_{\text{прл}}, B_{аб}, B_{фид}, IM, L_{\text{мет}}, L_{\text{розн}}, R_{аб}, N_{аб}, C_{BC}, P_{bit}, h_{BC}, h_{MC}) \rightarrow \max, \\ 0 < P_{BC} \leq P_{BC, \max}, \\ R_{аб, \min} < R_{аб} \leq R_{аб, \max}, \\ 0 \leq P_{bit} \leq P_{bit, \text{дон}}, \\ h_{BC, \min} \leq h_{BC} \leq h_{BC, \max}, \\ Price \leq Price_{\text{дон}}. \end{array} \right.$$

Вартість встановлення БС включає вартість БС $Price_{BC}$, вартість оренди площі для встановлення БС $Price_{\text{ор.пл}}$, вартість встановлення БС $Price_{\text{вст.БС}}$, вартість підняття антени БС $Price_{\text{вст.ант}}$, вартість антенно-фідерного тракту для підключення БС до антени $Price_{\text{афт}}$, вартість антени $Price_{\text{ант}}$:

$$Price = Price_{BC} + Price_{\text{ор.пл}} + Price_{\text{вст.БС}} + Price_{\text{афт}} + Price_{\text{ант}} + Price_{\text{вст.ант}}.$$

Кількість активних абонентів залежить від площі обслуговування в межах міської забудови $S_{\text{заб}}$, на вулиці $S_{\text{вул}}$, щільностей абонентів відповідно в будівлях та на вулиці σ та коефіцієнтів їх активності ν :

$$N_{\text{акт.аб.}} = \nu_{\text{буд}} \cdot \sigma_{\text{буд}} \cdot S_{\text{заб}} \cdot N_{\text{нов}} + \nu_{\text{вул}} \cdot \sigma_{\text{вул}} \cdot S_{\text{вул}}.$$

Щільності абонентів визначають наступним чином для рис. 4 за допомогою цифрових карт місцевості:

$$\sigma = \frac{N_{\text{люд}}}{S}. \quad (8)$$

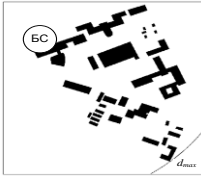


Рис. 4. Схематичне зображення ЗІО (споруди показано чорним кольором)

Площа покриття на вулиці:

$$S_{\text{вул}} = S_{\text{ст}} - S_{\text{заб}} = \pi \cdot d_{\max}^2 - \pi \cdot d_{\max}^2 \cdot \omega_{\text{заб}} = \pi \cdot d_{\max}^2 (1 - \omega_{\text{заб}}).$$

Таким чином:

$$\begin{aligned} R_{\text{заб}} &= R_{аб} \cdot (\nu_{\text{буд}} \cdot \sigma_{\text{буд}} \cdot \pi \cdot d_{\max}^2 \cdot \omega_{\text{заб}} \cdot N_{\text{нов}} + \nu_{\text{вул}} \cdot \sigma_{\text{вул}} \cdot \pi \cdot d_{\max}^2 \cdot (1 - \omega_{\text{заб}})) = \\ &= R_{аб} \cdot \pi \cdot d_{\max}^2 \cdot (\nu_{\text{буд}} \cdot \sigma_{\text{буд}} \cdot \omega_{\text{заб}} \cdot N_{\text{нов}} + \nu_{\text{вул}} \cdot \sigma_{\text{вул}} \cdot (1 - \omega_{\text{заб}})) \leq W \cdot \beta. \end{aligned}$$

Отже:

$$d_{\max} = 10^V,$$

$$\text{де } V = \frac{L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{BC}) + \alpha(h_m) + K}{44,5 - 6,55 \lg(h_{BC})}.$$

Також повинна виконуватись умова:

$$d_{\max} \leq \sqrt{\frac{W \cdot \beta}{R_{аб} \cdot \pi \cdot (\nu_{\text{буд}} \cdot \sigma_{\text{буд}} \cdot \omega_{\text{заб}} \cdot N_{\text{нов}} + \nu_{\text{вул}} \cdot \sigma_{\text{вул}} \cdot (1 - \omega_{\text{заб}}))}}.$$

Для висоти підйому антени БС:

$$L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + \alpha(h_m) + K + 44,5 \cdot \lg(Z)$$

$$13,82 + 6,55 \cdot \lg(Z)$$

$$h_{BC} = 10$$

$$\text{де } Z = \sqrt{\frac{W \cdot \beta}{R_{аб} \cdot \pi \cdot (\nu_{\text{буд}} \cdot \sigma_{\text{буд}} \cdot \omega_{\text{заб}} \cdot N_{\text{нов}} + \nu_{\text{вул}} \cdot \sigma_{\text{вул}} \cdot (1 - \omega_{\text{заб}}))}}.$$

(9)

Для кожної з вищезазначених проблем за допомогою методу робочих характеристик можливо знайти рішення, яке може бути впроваджене мобільним оператором. Метод робочих характеристик полягає в наступному.

Всі показники якості, крім одного, якому присвоюється перший номер, переводяться в розряд обмежень типу рівностей і шукається мінімум (за всіма строго допустимими системам) показника k_1 , тобто вирішується завдання: забезпечити $\min(k_1)$ при $k_2 = k_2^*$, $k_3 = k_3^*$, ..., $k_m = k_m^*$.

Таким чином, важливою задачею для операторів стільникового зв'язку є підвищення рівня прийнятого радіосигналу, проте при виконанні всіх обмежень, наведених вище. Тому, запропонований метод оптимізації підсистеми базових станцій представляється наступним чином.

Етап 1. Оцінка середньої необхідної пропускної здатності для обслуговування одного абонента $R_{аб} = \sum_{i=1}^N R_i$, де N – кількість послуг, що характерні кожному абоненту, R_i – необхідна пропускна здатність для якісного надання кожного сервісу абоненту.

Етап 2. Визначення на основі аналізу статистичних даних щодо обслуговування абонентів стільникового оператора щільностей абонентів відповідно в будівлях та на вулиці σ за формулою (8), коефіцієнтів їх активності та оцінка щільності забудови за допомогою піксельного аналізу цифрових карт місцевості.

Етап 3. Зменшення втрат у фідері $B_{фід}$ шляхом використання підходу feederline (значення фідерів 7/8'' і 1/2'') та feederless.

Етап 4. Вибір оптимальної висоти підйому антен БС за формулою (9) з урахуванням обмежень, наведених в представленій вище математичній моделі, для розміщення антен GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100 та LTE на одній мачті.

Представимо результати моделювання залежності напруженості електромагнітного поля від відстані (рис. 5). При цьому врахуємо, що за підходів feederline (значення фідерів 7/8'' і 1/2'') та feederless, антени LTE потрібно вшати під існуючими антенами GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100, тобто хоча б на 9 м нижче за існуючі антени. При використанні оптимізованого методу побудови БС антени LTE розміщуються на рівні найвищих з цих антен, так як антени всіх стандартів комбінуються у одному корпусі.

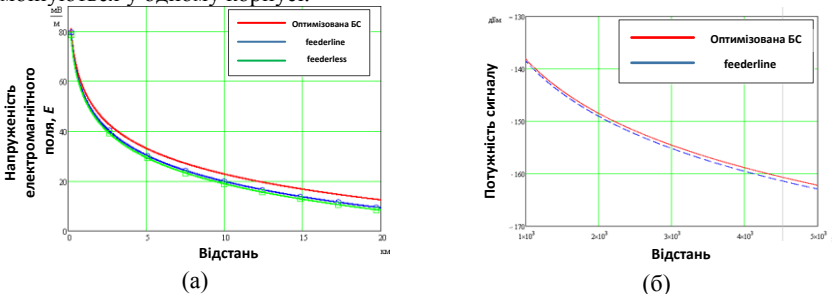


Рис. 5. Напруженість електромагнітного поля (а) та рівень (б) прийнятого сигналу для різних типів підключення

Аналіз залежностей показав, що виграш в рівні сигналу при збільшенні висоти підвісу не дуже значний – до 0,7 дБ. А при зміні висоти підвісу від 40 м до 20 м – отримано збільшення рівня сигналу в приймачі до 3,2 дБ. Таке збільшення рівня сигналу вже є досить значним і часто призводитиме до покращення швидкості

передачі даних для віддалених абонентів. Отже, використання мультистандартних антен призводить до відчутного покращення рівня сигналу.

Площа покриття оптимізованої БС більша за площу покриття БС з підключенням feederless на 38,52% та 79,51% для підходу feederline.

Також в даному розділі було розроблено метод розвантаження радіоінтерфейсу стільникових мереж.

Етап 1. Проводиться оцінка загальної пропускної здатності мережі:

$$C_{BC} = \beta \times W,$$

де W – ширина частотної смуги (МГц); β – спектральна ефективність, яка залежить від методу модуляції (біт/с/Гц).

Етап 2. Опитування групи експертів з метою визначення співвідношення сервісів, якими користуються в сучасних стільникових мережах в різний час доби та дня тижня. До найбільш важливих сервісів було віднесено: голосові виклики, VoIP; відеозв'язок (Skype, Viber тощо); відеоконференція; web-серфінг; Google Maps; перегляд відео (YouTube тощо); відеострімінг (IPTV тощо); ігри («Realttime»); соціальні мережі (Facebook, Instagram тощо).

За результатами опитування експертів робиться оцінка необхідної пропускної здатності БС:

$$C_{обсл} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_m \end{pmatrix}, N_t = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{14} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ N_{91} & N_{92} & N_{93} & N_{94} \end{pmatrix}, C_{сум} = C_{обсл} \cdot N_t,$$

де $t = 1,2,3,4$ (t_1 – ранок; t_2 – день; t_3 – вечір; t_4 – ніч); $C_{обсл}$ – необхідна пропускна здатність каналу для забезпечення якісного надання послуг; N_t – кількість абонентів стільникового зв'язку, що користуються низкою послуг в певні проміжки часу.

Розрахована сумарна пропускна здатність не має перевищувати пропускну здатність, що виділяється БС ($C_{сум} \leq C_{BC}$).

Якщо значення $C_{сум}$ перевищують C_{BC} , тобто дана умова не виконується, тоді виникає задача необхідності розвантаження трафіку. Таким чином, пропускна здатність трафіку, який необхідно передавати, використовуючи технологію Wi-Fi:

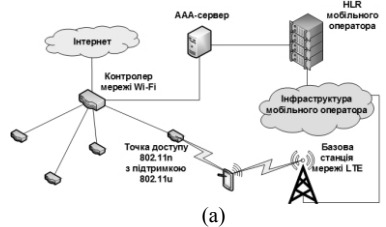
$$\Delta C = C_{сум} - C_{BC}.$$

Етап 3. Відбувається розвантаження радіоінтерфейсу БС мереж LTE із використанням порогових схем та керування цим процесом із використанням програмно-конфігурованих мереж (рис. 6).

Мобільний пристрій приймає рішення про передачу інформації. Залежно від сервісу приймається рішення про вибір мережі для передачі.

При цьому розвантаження мережі оператора може відбуватися за трьома сценаріями:

Сценарій 1. За наявності довіреної Wi-Fi



мережі та при перевантаженості (або слабкому сигналі) базової станції для передачі буде використовуватися довірена мережа Wi-Fi.

Сценарій 2. При великому обсязі інформації, передача здійснюватиметься мережею оператора та довіреною мережею, при цьому використовуватиметься протокол MTCP.

Сценарій 3. У крайніх випадках (великий потік даних та перезавантаженість базової станції) передача може здійснюватися недовіреною мережею.

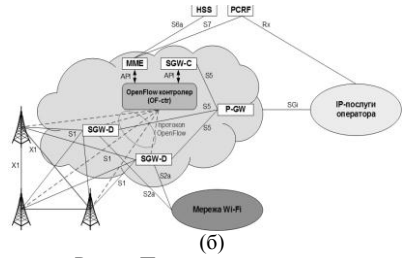


Рис. 6. Процес розвантаження радіоінтерфейсу мережі мобільного оператора

Розглянемо другий сценарій (рис. 6 (а)).

1. UE (User Equipment) визначає, що для передачі та прийому даних необхідна висока пропускна здатність і приймає рішення про використання різних технологій одночасно.

2. Виконується пошук довіреної мережі.

3. Якщо така мережа знайдена, виконується автентифікація UE за допомогою механізму EAP-SIM/EAP-AKA.

4. Виконується встановлення з'єднання UE з шлюзом TWAG (Trusted Wireless Access Gateway).

5. Встановлюється захищений тунель між TWAG та P-GW (Packet Gateway).

При цьому вважається, що з'єднання з eNodeB вже було встановлено.

6. UE приймає рішення про використання протоколу MTCP.

7. Встановлюється MTCP з'єднання з Packet Data Network.

Для всіх сценаріїв розвантаження було запропоновано вибір метрики та протоколу маршрутизації залежно від виду послуги:

$$M(v, u) = \left(k_1 \cdot B(v, u) + \frac{k_2 \cdot B(v, u)}{B(v, u) - L(v, u) - R(v, u)} + k_3 \cdot D(v, u) \right) \times (C_{scale})^{(2 - (K_R - K_R \cdot (R_{p_{u,v}} + K_P \cdot R_{m,doom})))} \tag{10}$$

де $B(u, v) = \min(b(i, j), \forall e(i, j) \in P(v, u))$ – пропускна здатність каналу; $R(v, u)$ – зарезервована пропускна здатність по кожному маршруту;

$D(v, u) = \sum_{\forall e(i, j) \in P(v, u)} (t_i + t_{e(i, j)})$ – затримка в каналі; $L(v, u)$ – завантаженість каналу;

$K_R \in \{0;1\}$ – коефіцієнт, що дозволяє враховувати або не враховувати параметри інформаційної безпеки (ІБ) під час обчислення метрики; $R_{p_{u,v}} \in [0;1]$ – ризик ІБ для шляху p при передачі даних між вузлами u, v ;

$R_{m,doom} \in [0;1]$ – ризик несвоєчасної доставки пакетів при їх передачі від вузла u до вузла v по m -му шляху; $K_P \in \{0;1\}$ – коефіцієнт, який визначає, чи буде враховуватися параметр $R_{m,doom}$ під час розрахунку метрики;

k_B – ваговий коефіцієнт пропускної здатності; k_L – ваговий коефіцієнт завантаження каналу; k_D – ваговий коефіцієнт затримки.

Розрахунок показника інформаційної безпеки, що використовується в запропонованій метриці відбувається наступним чином.

$$R_{P_{a,v}} = 1 - \left(1 - K_{CVSS} \cdot \frac{\sum_{m \in p} R_{CVSS_m}}{n_p} \right) \cdot \left(1 - K_{\theta} \cdot \left(1 - \frac{\sum R_{\theta_m}}{n_p} \right) \right),$$

де $K_{CVSS} \in [0;1]$ та $K_{\theta} \in [0;1]$ – коефіцієнти важливості параметрів ризику R_{CVSS} та R_{θ} відповідно; R_{CVSS_m} – параметри ризику R_{CVSS} кожного з маршрутизаторів m на шляху p ; R_{θ_m} – параметри ризику R_{θ} кожного з маршрутизаторів m на шляху p ; n_p – загальна кількість маршрутизаторів в шляху p .

$$R_{CVSS} = \frac{\sum_{i=1}^n B_{score_i}}{N_{враз.}} \cdot \frac{1}{10},$$

де B_{score_i} – показник базової метрики i -ї вразливості, знайденої на заданому маршрутизаторі, при $i = \overline{1, N_{враз.}}$; $N_{враз.}$ – загальна кількість знайдених вразливостей на маршрутизаторі.

$$R_{m, дост.} = (1 - p_{m, дост.}) \cdot p_{загр.},$$

де $(1 - p_{m, дост.})$ – ймовірність несвоечасної доставки даних отримувачу по шляху m .

$$R_{\theta_i} = \theta_i \cdot p_{загр.i},$$

де $p_{загр.i}$ – ймовірність реалізації загрози виведення з ладу маршрутизатора i та всіх його каналів зв'язку; $p_{m, дост.}$ – ймовірність реалізації загрози, що призводить до зниження ймовірності своєчасної доставки даних отримувачу.

Етап 4. На останньому етапі методу проводиться оцінка виграшу від розвантаження мережі оператора стільникового зв'язку.

На основі отриманих даних змодельовано процес обслуговування абонентів мобільного зв'язку однією базовою станцією. При цьому базова станція має виділити відповідну пропускну здатність (C):

$$C = C_0 \cdot N, \text{ Мбіт/с,}$$

де C_0 - необхідна пропускну здатність каналу для забезпечення якісного надання послуг мобільним абонентам; N – кількість користувачів даної послуги.

У четвертому розділі було розроблено метод оптимізації транспортної мережі стільникового оператора.

Сучасна архітектура транспортної мережі стільникового оператора має трьохшарову структуру: мережа радіорелейних станцій (надалі – РРС), оптична транспортна мережа (Optical Transport Network – OTN) та оптична мережа DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Метод оптимізації такої багатошарової структури мережі наступний.

Етап 1 – Побудова топології мережі радіорелейних станцій. Для вибору оптимальної топології скористаємось наступною математичною моделлю.

Сумарна швидкість інформаційних потоків від БС визначається як:

$$R_{BC} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k R(i, j), \quad (11)$$

де R_{BC} – загальна швидкість потоків від всіх БС; $R(i,j)$ – швидкість j -го потоку від i -ої БС; k – загальна кількість потоків, переданих БС; n – загальна кількість БС.

Слід зазначити, що загальна швидкість потоків від БС R_{BC} є фактором, який не має перевищувати пропускну здатність між РРС та ядром мережі, як відображено на топологічній схемі обміну даними між БС та ядром мережі (рис. 7).

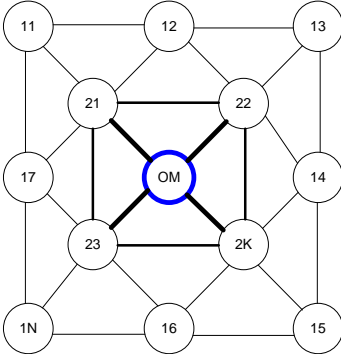


Рис. 7. Комірчаста топологія мережі (вершини графу – РРС, підключені до БС)

Крок 1. На першому кроці роботи даного етапу необхідно встановити всі можливі топологічні зв'язки між вузлами мережі. Для цього необхідна інформація про місцезнаходження БС (координати GPS).

Крок 2. На другому кроці відбувається оцінка пропускну здатності каналів між кожною парою вузлів групи БС. Для цього використовується наступна модель.

Для такої конфігурації антенних систем швидкості передавання даних по мережі розраховуються за формулою для кожного окремого каналу:

$$C = 10^{\frac{P}{10}} / (k \cdot T), \quad (12)$$

де $P = P_{\text{прд}} - L$, де L визначається за формулою (1).

Крок 3. На третьому кроці відбувається визначення оптимальних маршрутів (топологічних зв'язків). Для вирішення завдання при нормальному навантаженні розділює мережу на сегменти обміну даними за умов, що навантаження між проміжними РРС та оптичною мережею не перевищує максимальну пропускну здатність каналу, тобто $C_{2K,OM} \geq \sum C_{1V,2K} + \sum C_{2K,2Z}$, де $C_{1V,2K}$ – пропускну здатність від РРС на краю мережі до проміжної РРС, V – номери крайніх РРС, які мають сполучення із проміжною РРС $2K$; $C_{2K,2Z}$ – пропускну здатність між $2K$ -ю проміжною РРС та оптичною мережею, Z – номери проміжних РРС, які мають сполучення із проміжною РРС $2K$. Відповідно до алгоритму Дейкстри отримаємо найкоротші маршрути для всіх вершин графу. При цьому, в разі перевищення максимальної пропускну здатності між проміжною радіорелейною станцією та оптичною мережею, необхідно шукати інший менш навантажений маршрут.

Етап 2 – Оптимізація пропускну здатності. Далі в рамках розробленого метода використовується інтегрована модель оптимізації пропускну 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). Модель спрямована на оптимізацію пропускної здатності LSRs і OXCs, а не на пропускну здатність каналу зв'язку на кожному мережевому рівні.

Модель 1:

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{P_D} x_{dp} &= 1, \\ \sum_{d=1}^D h_D \cdot \sum_{p=1}^{P_D} \delta_{edp} \cdot x_{dp} &\leq M \cdot y_e, \\ \sum_{q=1}^{Q_c} m_{eq} &= y_e, \\ M \cdot \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_c} \gamma_{eq} &\leq \sum_{k=0}^4 U_k \cdot \omega_{gk}, \\ \sum_{z=1}^{Z_g} s_{gkz} &= \omega_{gk}, \\ \sum_{g=1}^G \sum_{k=0}^4 U_k \cdot \sum_{z=1}^{Z_g} \mathcal{G}_{fgz} \cdot s_{gkz} &\leq N \cdot b_f, \\ \text{Cost}_1 &= \sum_{e=1}^E \eta_e \cdot y_e + \sum_{g=1}^G \sum_{k=0}^4 \beta_{gk} \cdot \omega_{gk} + \\ &+ \sum_{f=1}^F \xi_f \cdot b_f \rightarrow \min, \end{aligned}$$

Модель 2:

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{P_D} x_{dp} &= 1, \\ \sum_{d=1}^D h_D \cdot \sum_{p=1}^{P_D} \delta_{edp} \cdot x_{dp} &\leq M \cdot y_e, \\ \sum_{e=1}^E \theta_{ve} \cdot M \cdot y_e &\leq A \cdot Y_v^l, \\ \sum_{q=1}^{Q_c} m_{eq} &= y_e, \\ M \cdot \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_c} \gamma_{eq} &\leq \sum_{k=0}^4 U_k \cdot \omega_{gk}, \\ \sum_{k=0}^4 \phi_{rg} \cdot U_k \cdot \omega_{gk} &\leq C \cdot Y_r^0, \\ \sum_{z=1}^{Z_g} s_{gkz} &= \omega_{gk}, \\ \sum_{g=1}^G \sum_{k=0}^4 U_k \cdot \sum_{z=1}^{Z_g} \mathcal{G}_{fgz} \cdot s_{gkz} &\leq N \cdot b_f, \\ \text{Cost}_2 &= \sum_{v=1}^V \sigma_v \cdot Y_v^l + \sum_{r=1}^R \rho_r \cdot Y_r^0 \rightarrow \min, \end{aligned}$$

де x_{dp} – змінна PPC, яка включає попит d позначений на шляху p (визначається на етапі 1 даного методу); h_D – величина необхідної пропускної здатності каналу; m_{eq} – змінна потоку OTN позначена на шляху q , що включає пропускну здатність лінії зв'язку e ; s_{gkz} – змінна потоку DWDM позначена на шляху z , що включає пропускну здатність лінії зв'язку g інтерфейсу k ; y_e – кількість модулів PPC з пропускну здатністю ствола M , що повинні бути встановленні на лінії e на рівні радіорелейних ліній; Y_v^l – пропускну здатність v -ї PPC; ω_{gk} – кількість модулів з пропускну здатністю U_k , що повинні бути встановленні на лінії g на OTN рівні; W – кількість модулів на OTN рівні з різною пропускну здатністю; Y_r^0 – пропускну здатність r -го OXC, b_f – кількість модулів з пропускну здатністю N на DWDM рівні; δ_{edp} – коефіцієнт, що вказує на приналежність лінії e шляху p (приймає значення «0» або «1»); γ_{eq} – коефіцієнт, що вказує на приналежність лінії g шляху q (приймає значення «0» або «1»); \mathcal{G}_{fgz} – коефіцієнт, що вказує на приналежність лінії f шляху z (приймає значення «0» або «1»); ϕ_{rg} – бінарна змінна (1 – якщо OXC функціонує нормально, 0 – в протилежному випадку); A – ємність PPC, C – ємність OXC; θ_{ve} – бінарна змінна (1 – якщо PPC функціонує нормально, 0 – в протилежному випадку).

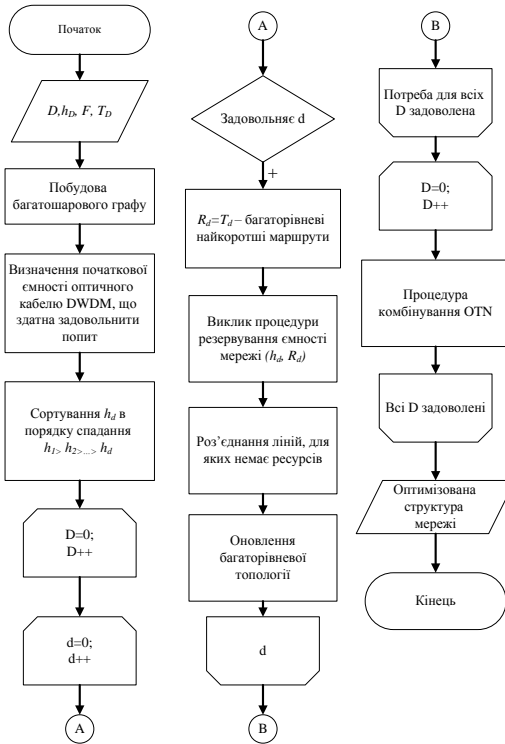


Рис. 8. Евристичний алгоритм вирішення оптимізаційної задачі

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. Процес маршрутизації з врахуванням резервування ресурсів та балансування навантаження за маршрутами з однаковою вартістю та показниками ІБ наступний.

Етап 1 – Визначення основних характеристик мережі. Проводиться визначення пропускної здатності $B(v,u)$, затримки в мережі $D(v,u)$, завантаженості каналів $L(v,u)$ за допомогою відомих службових або сигнальних протоколів стека TCP/IP.

Етап 2 – Визначення необхідного резерву в каналі зв'язку. Для цього скористаємось проведеними експертними оцінками в розділі 3 (Етап 2, метод розвантаження раіоінтерфейсу стільникових мереж) з метою визначення сервісів, якими користуються абоненти стільникових мереж в залежності від часу доби та дня тижня. Тоді для типової БС необхідно буде зарезервувати пропускну здатність каналу транспортної мережі $R(v,u) = \sum_{i=1}^n N_i \cdot C_i$, де N_i – кількість абонентів, що користуються i -м сервісом, необхідна пропускну здатність для якого становить C_i . На основі аналізу

Поставлена задача оптимізації вирішується за допомогою евристичного підходу. На рис. 8 показаний розв'язок для моделі 1.

Модель дозволяє оптимізувати необхідну пропускну здатність на кожному вузлі маршрутизації v і комутації r . Тобто, модель спрямована на оптимізацію пропускної здатності РРС і ОХСс, а не каналу зв'язку на кожному мережевому рівні.

Таким чином, було представлено розроблену модель оптимізації пропускної здатності вузла в багаторівневій мережі РРЛ/OTN/DWDM та результати, які показують, що збільшення мережевого навантаження впливає на пропускну здатність, і формує вимоги до пропускної здатності вузлів на різних рівнях, при цьому ці вимоги можна мінімізувати.

Також в даному розділі було удосконалено метод маршрутизації за рахунок резервування ресурсів та балансування навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки.

статистичних даних за тривалий період часу можна розробити розклад резервування ресурсів транспортної мережі стільникового оператора.

Етап 3 – Вибір оптимального маршруту для відправки пакету. В якості метрики маршруту запропоновано використовувати інтегрований критерій (10). При цьому вибір вагових коефіцієнтів k_B , k_L та k_D відбувається на основі класової моделі обслуговування в IP мережах та на основі принципів арифметичної прогресії.

Етап 4 – Балансування мережевих ресурсів. Кожен вузол мережі характеризується такими показниками: $\sum_{i=1}^l \lambda_{exi}$ – загальна інтенсивність інформаційного трафіку; $\sum_{i=1}^l \lambda_{vixi}$ – загальна вихідна інтенсивність; $\sum_{i=1}^l C_i$ – загальна пропускна здатність каналів зв'язку (КЗ) мережі; l – кількість суміжних вузлів та КЗ для зв'язку з ними.

Якщо виявлено l рівноцінних маршрути з однаковою розрахованою на етапі 2 даного методу метрикою, тоді балансування мережевих ресурсів у моделі здійснюється шляхом знаходження вектора розподілу потоку такого виду:

$$\vec{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_l), \quad \sum_{i=1}^l z_i = 1. \quad (13)$$

Кожен елемент даного вектора характеризує частку вихідного з вузла трафіку, що передається по відповідному КЗ в суміжний вузол. Через фізичне подання даного вектора та з метою запобігання перевантажень каналів і вузлів ТКС на елементи вектора (13) накладаються такі обмеження:

$$0 \leq z_i \leq 1, \quad i = \overline{1..l}. \quad (14)$$

$$\lambda_i^{ex} \cdot k_i \leq C_i - R_i, \quad i = \overline{1..l}, \quad (15)$$

де R_i – зарезервована пропускна здатність в i -му каналі зв'язку.

У межах описаної моделі функціонування транспортної мережі у загальному випадку задача управління мережевими ресурсами зводиться до розв'язання оптимізаційної задачі, яка пов'язана з мінімізацією функціонала, в умовах наявності обмежень (14), (15):

$$\varphi(\vec{K}) = \min(q_1 \cdot \sigma_1(\vec{K}) + q_2 \cdot \sigma_2(\vec{K})), \quad (16)$$

де q_1 , q_2 – вагові коефіцієнти, які характеризують умовну вартість балансування по метриці завантаженості каналів та вузлів мережі; $\sigma_1(\vec{K})$ – середньоквадратичне відхилення (СКВ) завантаженості каналів L_i , $i = \overline{1..l}$:

$$\sigma_1(\vec{K}) = \sqrt{\frac{1}{l-1} \cdot \sum_{i=1}^l (L_i - \bar{L})^2}, \quad (17)$$

де $\sigma_2(\vec{K})$ – СКВ завантаженості локального та суміжних мережевих вузлів Z_i , $i = \overline{1..l}$:

$$\sigma_2(\vec{K}) = \sqrt{\frac{1}{l-1} \cdot \sum_{i=1}^l (Z_i - \bar{Z})^2}. \quad (18)$$

Проведений аналіз показав, що найбільш ефективними засобами мінімізації цільового функціоналу управління мережевими ресурсами (16) є градієнтний метод мінімізації з послідовним наближенням. Проте, в даній роботі процес балансування навантаження стосується саме каналів зв'язку, тому представлена задача враховує

тільки першу складову виразу (16), а тому може бути вирішена послідовним наближенням завантаженості кожного каналу до середнього значення.

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 з основним вимогам. Тому було розроблено метод оцінки ефективності програмно-конфігурованих мереж, який полягає в наступному.

Етап 1 – Оцінка часу обробки запитів в мережі SDN. Для оцінки часу обробки запитів в мережі SDN використовується наступний математичний апарат для трьох основних архітектур: централізованої (19), децентралізованої (20) та ієрархічної (21):

$$E(T_c(N)) = \frac{1}{\mu_c - \lambda_c}, \quad (19)$$

$$E(T_{D,\lambda}) = \frac{L_{D,\lambda} \cdot m_D}{N \cdot (N-1) \cdot \lambda} = \frac{1 + \frac{N \cdot (m_D - 1)}{(N-1) \cdot m_D} \cdot d_D}{\mu_{D,\lambda} - \lambda_{D,\lambda}}, \quad (20)$$

$$E(T_H) = \frac{\frac{N - \frac{N}{m_H}}{N-1}}{\mu_{H,r} - \lambda_{H,r}} + \frac{\ln \left(\frac{N - \frac{N}{m_H}}{N-1} \cdot d_H + 1 \right) + 1}{\mu_{H,r} - \lambda_{H,r}}, \quad (21)$$

де λ – середнє число запитів потоку в секунду від одного хоста на інший; μ_c – це середня швидкість надходження запитів потоку; λ_c – середня швидкість обробки запитів потоку контролером; N – кількість мережевих вузлів; m_D – кількість контролерів в децентралізованій структурі; d_D – середня відстань до контролера в децентралізованій структурі; $L_{D,\lambda}$ – довжина черги для кожного контролера в децентралізованій структурі; $\lambda_{D,\lambda}$ – швидкість надходження запиту ініціювання потоку на кожний контролер в децентралізованій структурі; $\mu_{D,\lambda}$ – середня швидкість обслуговування контролером в децентралізованій структурі; m_H – кількість контролерів в ієрархічній структурі; d_H – середня відстань до контролера в ієрархічній структурі; $\lambda_{H,r}$ – швидкість надходження запиту ініціювання потоку на кожний контролер в ієрархічній структурі; $\mu_{H,r}$ – середня швидкість обслуговування контролером в ієрархічній структурі.

Етап 2 – Оцінка продуктивності мережі SDN. На рівні управління SDN продуктивність $F(N)$ може бути визначена наступним чином:

$$F(N) = \varphi(N) \cdot \frac{T(N)}{\text{Cost}(N)},$$

де N – це кількість мережевих вузлів, $\varphi(N)$ – пропускна здатність рівня управління в обробці мережевих запитів, $T(N)$ – середній час відгуку кожного запиту, $\text{Cost}(N)$ – витрати на розгортання рівня управління.

Етап 3 – Оцінка масштабованості мережі SDN. Масштабованість для рівня управління SDN, коли масштаб мережі змінюється від N_2 до N_1 , визначається так:

$$\psi(N_2; N_1) = F(N_2) / F(N_1),$$

де $F(N_2)$ – продуктивність рівня управління при обробці запитів від N_2 мережевих елементів, $F(N_1)$ – продуктивність рівня управління при обробці запитів від N_1 мережевих елементів.

Оцінку масштабованості мереж SDN доцільно також проводити для трьох основних архітектур: централізованої, децентралізованої та ієрархічної.

На основі представлених вище формул для оцінки середнього часу відгуку на запит в мережі можна оцінити масштабованість для рівня управління SDN для централізованої (22), глобальної децентралізованої (23), локальної децентралізованої (24) та ієрархічної (25) структур.

$$\psi_c(N_1, N_2) \approx \frac{K - N_2^4 \cdot \lambda}{K - N_1^4 \cdot \lambda}, \quad (22)$$

$$\psi_{D,g}(N_1, N_2) \approx \frac{K \cdot m_D - N_2^4 \cdot \lambda}{K \cdot m_D - N_1^4 \cdot \lambda}, \quad (23)$$

$$\psi_{D,l}(N_1, N_2) \approx \frac{K \cdot m_D^4 - N_2^4 \cdot (d_D \cdot m_D - d_D + m_D) \cdot \lambda}{K \cdot m_D^4 - N_1^4 \cdot (d_D \cdot m_D - d_D + m_D) \cdot \lambda}, \quad (24)$$

$$\psi_H(N_1, N_2) \approx \frac{K \cdot m_H^4 - N_2^4 \cdot (d_H \cdot m_H - d_H + m_H) \cdot \lambda}{K \cdot m_H^4 - N_1^4 \cdot (d_H \cdot m_H - d_H + m_H) \cdot \lambda}, \quad (25)$$

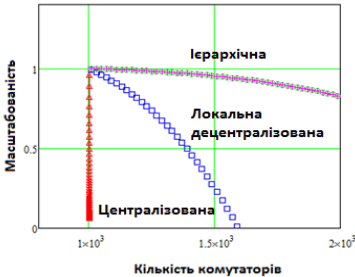


Рис. 9. Масштабованість в SDN різних типів структур при $m=6, d=2$

Масштабованість централізованої структури, локальної децентралізованої структури та ієрархічної структури в залежності від кількості хостів при кількості контролерів $m_D = 6$ та середньої відстані до контролера $d_D = 2$ показано на рис. 9. З графіку видно, що централізована архітектура має найгіршу масштабованість, а локальна децентралізована структура та ієрархічна структура найкращу.

Таким чином 5-й розділ був повністю присвячений розробці методів оцінки та підвищення ефективності мереж SDN у складі стільникових

операторів, що дозволяє зменшити накладні витрати на керування мережею та підвищити її загальну ефективність її функціонування.

На ефективність будь-якої мережі безпосередній вплив також має її рівень захищеності. Тому у розділі 6 запропоновано удосконалення архітектури 5G з точки зору забезпечення ІБ.

В ході проведення аналізу мережевих функцій 5G було встановлено, що більша частина уваги приділена процедурам аутентифікації та авторизації, проте як було показано в роботі, в сучасних стільникових мережах ландшафт кіберзагроз буде значно ширшим, особливо, враховуючи основні рушійні сили розвитку 5G – концепцію IoT. Тому дуже важливою є можливість постійного моніторингу стану кібербезпеки стільникових мереж, виявлення атак, усунення їх наслідків тощо. У зв'язку з цим, пропонується ввести до вже узгодженої архітектури 5G новий елемент CSF – Cybersecurity function. N_{cs} – інтерфейси зв'язку вищезгаданої функції із іншими мережевими функціями.

Таким чином, дана функція буде виконувати мережецентричний моніторинг та реагування на кіберінциденти (КБІ) в стільниковій мережі. Даний процес буде відбуватись за наступним алгоритмом (рис. 10).

Опис Cybersecurity function

Таблиця 1

Функція	Підфункції
Cybersecurity function (CSF)	<ul style="list-style-type: none"> – збір усієї можливої інформації про виявлені інциденти в мережі (DIN) – аналіз, виявлення закономірностей та загальних рис, індикація (ADR) – виявлення потенційних та діючих джерел загроз (IST) – обмін здобутою інформацією із іншими мережами, наприклад не-3GPP (IE)

Перший крок алгоритму – збір даних з мережі про виникаючі кіберінциденти з множини $E_1...E_f$, спричинена як кібератаками $CA_1...CA_e$, так і ненавмисними діями, що надходить на сенсори $S_1...S_g$ (). Далі ці інциденти $I_1...I_u$ ідентифікуються за певним набором їх параметрів за допомогою порівняння з відповідними шаблонами. Так визначається тип відомої кібератаки, або ідентифікується поки що невідома.

Після цього паралельно відбувається визначення об'єктів, які піддаються впливу інцидентів $\mathbf{O} = \{\bigcup_{ac=1}^{ad} \mathbf{O}_{ac}\} = \{\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2, \dots, \mathbf{O}_{ad}\}$, ($ac = \overline{1, ad}$), а також формується

множина правил екстраполяції $\mathbf{R} = \{\bigcup_{ab=1}^{ag} \mathbf{R}_{ab}\} = \{\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_{ag}\}$, ($ab = \overline{1, ag}$), що дозволяють оцінити потенційний вплив кіберінцидентів.

Визначення ступеня впливу кібербезпеки здійснюється за допомогою моделі:

$$\mathbf{I}_{bd} = \frac{Q_{bc}}{\sum_{bi=1}^{bc} Q_{bc}}, bi = \overline{1, bc},$$

де оцінка порівняльної значущості може бути підрахована за формулою:

$$Q_{bc} = \sum_{bi=1}^{bc} a_{bi} x_{bibj}, bi = \overline{1, bc},$$

де x_{bibj} – значення bi -го критерію bj -го виду КБІ; a_{bi} – «вага» bi -го критерію.

Реагування на кіберінцидент відбувається за правилами із множини

$\mathbf{R} = \{\bigcup_{i=1}^n \mathbf{R}_i\} = \{\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n\}$, після чого відбувається перевірка того, чи усунуто наслідки кіберінциденту. Після успішного реагування на кіберінцидент відбувається

збереження даних про нього і формується множина таких інцидентів $I = \left\{ \bigcup_{ia=1}^{na} I_{ia} \right\} = \{I_1, I_2, \dots, I_{na}\}$. Ці дані передаються і обробляються в методі захищеного розвантаження радіоінтерфейсу стільникових мереж та методі маршрутизації із резервуванням мережевих ресурсів та балансуванням навантаження із урахуванням вимог ІБ.

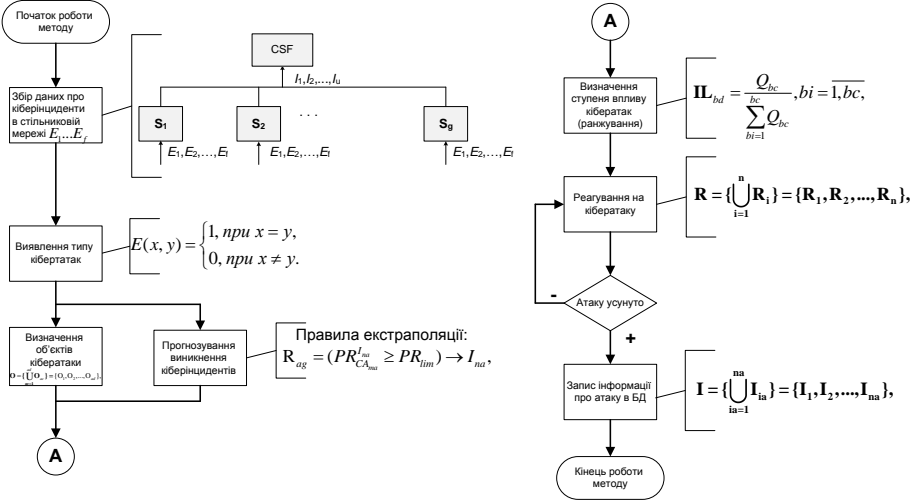


Рис. 10. Алгоритм проведення мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в стільниковій мережі

З метою перевірки адекватності всіх розроблених в дисертаційному дослідженні методів та моделей в розділі 7 були проведені експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання, що дозволило оцінити ефективність запропонованих рішень.

У даному розділі представлені результати моделювання радіопокриття БС до і після оптимізації параметрів. Для визначення, на скільки покращиться покриття БС при використанні запропонованого методу оптимізації БС було проведено моделювання для трьох підходів щодо підключення антен до радіомодулів: feederline, feederless та з використанням активних антен (рис. 11).

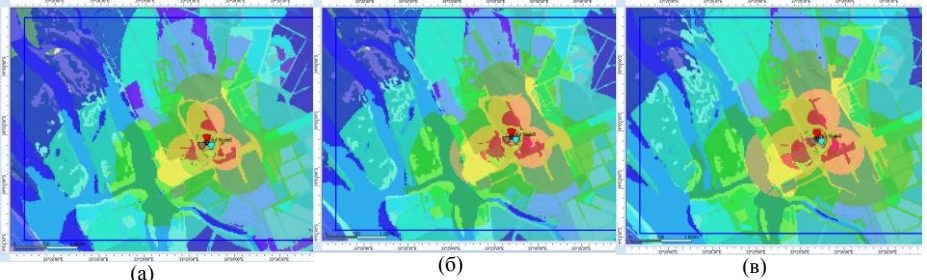


Рис. 11. Порівняння покриття при використанні feederline (зліва зверху), feederless (зправа зверху) та запропонованому методу оптимізації (посередині)

Крім того, що збільшилася площа покриття взагалі, також покращилася і якість зв'язку. При більшому рівні сигналу мережа мобільного оператора пропонує кращий сервіс, тобто більшу швидкість передачі даних завдяки можливості використовувати менш завадостійкі, а отже більш швидкі методи модуляції. Загальна площа покриття для feederline підключення складає 4,5 км², для feederless підключення – 6,54 км² та для оптимізованої архітектури – 8,01 км². Отже, площа покриття однієї БС при використанні запропонованого методу побудови БС у порівнянні з feederline підключенням покращилася на 78%, та на 22% у порівнянні з feederless підключенням.

Також в розділі 7 було проведено моделювання розвантаження радіоінтерфейсу підсистеми БС. Результати моделювання представлено на наступних графіках (рис. 12).

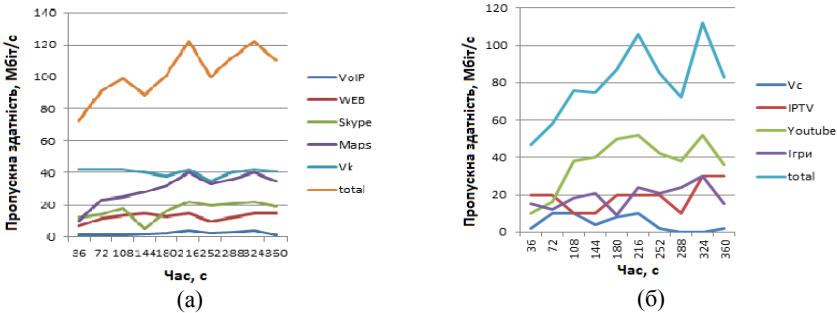


Рис. 12. Залежність пропускної здатності від часу: а – для базової станції, б – для Wi-Fi точки доступу

Взагалі, використовуючи рішення з розвантаження трафіку мобільної передачі даних через хотспоти Wi-Fi, мобільні оператори отримують реальну можливість підвищення пропускної здатності щонайменше на 10%.

Таким чином, за допомогою використання запропонованого методу, вирішується проблема перевантаження стільникової мережі, а отже, підвищується її економічна та енергетична ефективність.

Разом із методом розвантаження використовується удосконалений метод маршрутизації. Для оцінки результатів виграшу за використання даного методу, було згенеровано навантаження мережі на прикладі найпростішої моделі масового обслуговування М/М/1 (рис. 13 та рис. 14).

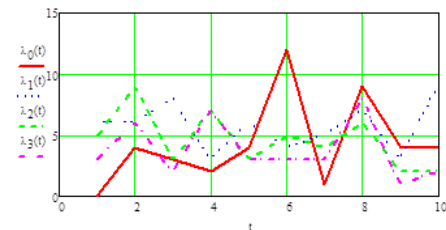


Рис. 13. Інтенсивність заявок в залежності від часу

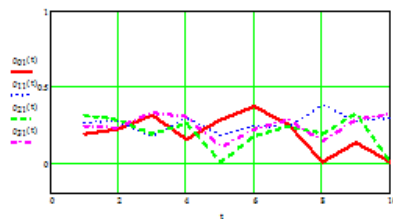


Рис. 14. Завантаженість системи після оптимізації

Як видно з рис. 15, застосування удосконаленого в 3-му розділі дисертаційної роботи 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 проведено дослідження різних підходів до побудови архітектури рівня управління SDN. Для цього в програмному середовищі MiniEdit була розроблена імітаційна модель мережі SDN для різних топологій (рис. 15). Для підтвердження працездатності мереж була проведена перевірка з'єднання між вузлами мережі. Після запуску мережі було перевірено їх працездатність за допомогою команди «pingall».

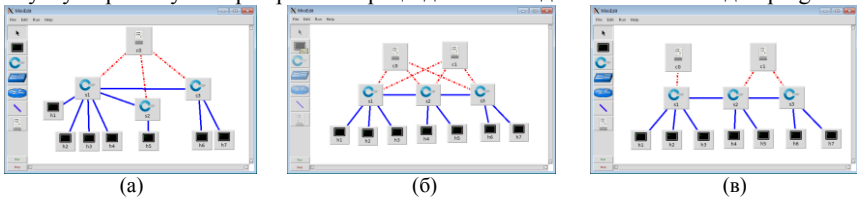


Рис. 15. Імітаційна модель мережі SDN для різних топологій (а – Модель централізованої архітектури рівня управління; б – Модель глобальної децентралізованої архітектури рівня управління; в – Модель локальної децентралізованої архітектури рівня управління)

До того ж було досліджено швидкість передачі даних в даній мережі. Швидкість передачі даних в ієрархічній структурі становить 142 Мб/с, що вище ніж у централізованій та глобальній децентралізованій архітектурі. Це показує, 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 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) (рис. 16 (а)) та затримки в мережі (рис. 16 (б)). Також були розраховані значення джитеру та коефіцієнту варіації затримки в мережі:

$$R_{download.cep} = 5,17 \text{ Мбіт/с}; \quad R_{upload.cep} = 4,52 \text{ Мбіт/с}; \quad t_{cep} = 2,73 \text{ мс}; \quad J = 0,07 \text{ мс}; \\ CV = 0,024 .$$

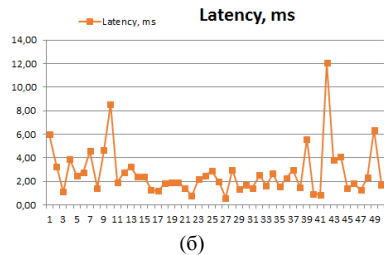
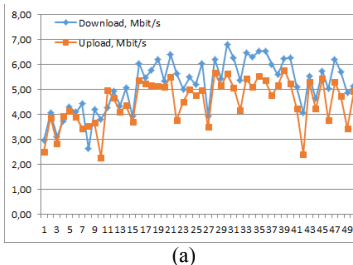


Рис. 16. Результати експериментальних досліджень основних показників якості обслуговування для оператора Vodafone (а – значення швидкості передавання даних; б – значення затримки в мережі)

Отримані експериментальним шляхом дані свідчать про доволі низьку якість обслуговування абонентів стільникових мереж 3G та 4G в Україні порівняно з

запущеними мережами LTE в світі. Проте виміряні характеристики свідчать про можливість використання її ресурсів для надання абонентам більшості послуг реального часу. Але, звертаючи увагу на значний ріст кількості підключень, збільшення мережевих пристроїв (IoT) необхідно підвищувати якість обслуговування, постійно контролюючи параметри мережі. Тому було запропоновано структуру системи моніторингу якості обслуговування абонентів стільникових мереж з метою безперервної оптимізації характеристик мережі.

В результаті проведених досліджень в **розділі 8** було запропоновано методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж (рис. 17). 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. На базі однієї із стратегій необхідно проводити первинне планування радіо- та опорної мережі. Після цього на основі обраних показників KPI/KQI буде проводитись моніторинг стану мережі та її безперервна оптимізація. В результаті буде підвищено цільову, технічну та економічну ефективність функціонування стільникових мереж зв'язку. Методологія підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку (рис. 17) представлена послідовністю взаємопов'язаних між собою етапів.

Етап 1. Використання удосконаленого методу планування мережі стільникового зв'язку для розгортання стільникових мереж нового покоління.

Етап 2. Використання методу оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж з метою вибору оптимальних показників для оцінки ефективності функціонування мережі стільникового оператора під час обслуговування абонентів та запровадження нових сервісів.

Етап 3. Безперервна оптимізація мережі оператора шляхом використання методу оптимізації підсистеми базових станцій розгорнутої мережі стільникового оператора, удосконалення методу розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі Wi-Fi (Wireless Fidelity), методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, удосконалення методу маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора та методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку.

Етап 4. Використання методу оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі для визначення основних показників ефективності рівня управління та вибору оптимальної структури цього рівня.

За допомогою розробленої методології операторам стільникового зв'язку вдається підвищити ефективність функціонування своїх мереж за рахунок збільшення радіусу зон обслуговування абонентів стільникових мереж до 80%, 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 до 70-80%, проведення більш гнучкого та оперативного розширення мережі, запровадження нових сервісів, підвищення

оперативності доставки даних до 2,1 раза для ієрархічної структури рівня управління.

Ефективність функціонування стільникової мережі

$$W = \{W_n, W_r, W_e\}$$

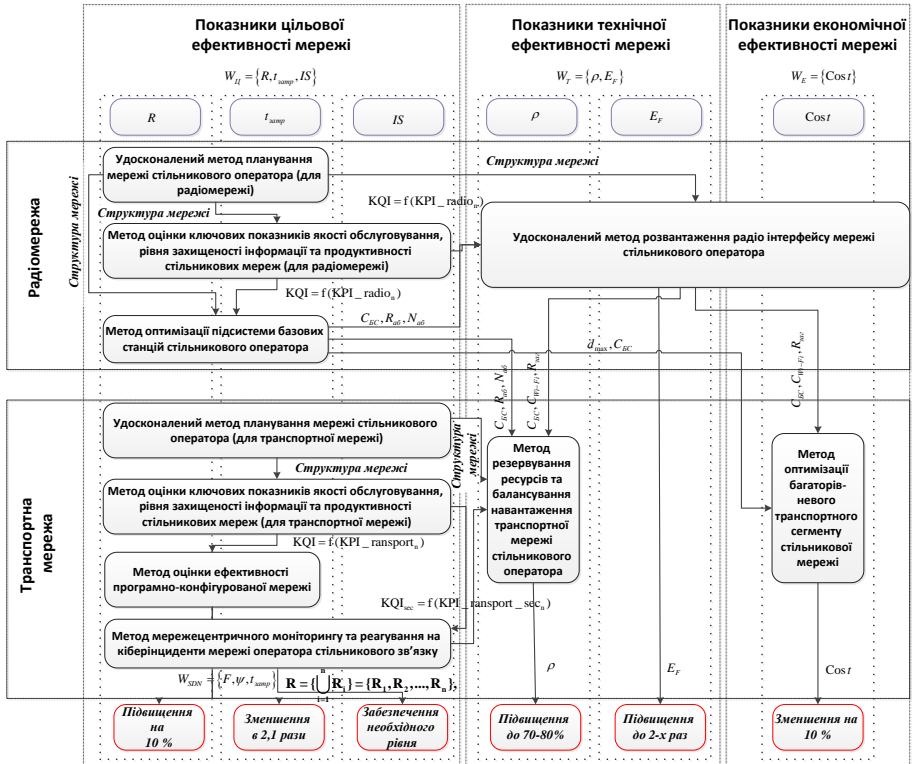


Рис. 17. Методологія підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку

ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, складає вирішення науково-технічної проблеми, яка полягала в необхідності підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку. У дисертаційній роботі отримані такі теоретичні та практичні результати.

1. Проведений аналіз якості обслуговування абонентів стільникових мереж в Україні з метою визначення ефективності їх функціонування та захищеності. Було визначено вимоги до стільникових мереж нового покоління як в світі, так і в Україні зокрема. Це дозволило визначити напрями, за якими необхідно проводити підвищення ефективності функціонування стільникових мереж.

2. Аналіз якості обслуговування абонентів у реалізованих проектах мереж LTE в світі та стільникових мереж 4G в Україні дозволив встановити, що заявлені вимоги до мереж четвертого покоління не досягаються в жодній із реалізованих мереж, а фактична якість обслуговування абонентів (цільова ефективність) перебуває на досить низькому рівні, що свідчить про низьку ефективність існуючих методів планування

радіомереж, транспортних підсистем, методів керування та забезпечення кібербезпеки.

3. Удосконалено метод планування мережі стільникового оператора за рахунок послідовного визначення стратегії розвитку оператора стільникового зв'язку, найбільш важливих показників якості обслуговування, виборі обладнання із множини доступних альтернатив, виборі послуг для абонентів, оцінці зон радіопокриття із врахуванням особливостей рельєфу та кліматичних умов, корегування розташування базових станцій, удосконаленій процедурі частотного планування, попередній оцінці капітальних витрат на побудову мережі.

Удосконалений метод надає змогу операторам стільникового зв'язку проводити більш точну оцінку зон радіопокриття, вибір ключових показників якості обслуговування, більш ефективне частотне планування та розрахунок капітальних витрат, що в свою чергу дозволяє оцінити доцільність побудови варіанту мережі стільникового зв'язку. На основі даного удосконаленого методу розроблено навчально-інженерне програмне забезпечення (web-додаток) для оцінки зон радіопокриття базових станцій мережі LTE.

4. Вперше розроблено метод оцінки ключових показників якості обслуговування, рівня захищеності інформації та ефективності функціонування стільникових мереж, який полягає у послідовному визначенні множини оцінюваних послуг, виборі на основі кореляційно-регресійного аналізу статистичних даних якості обслуговування та рівня захищеності оптимальних критеріїв оцінювання функціонування мережі, безпосередній їх оцінці та порівнянні із допустимим рівнем.

Розроблений метод дозволяє проводити оцінку найбільш важливих показників якості функціонування та захищеності мережі стільникового оператора з метою їх постійного контролю та оптимізації під час впровадження нових сервісів під час обслуговування абонентів.

5. Вперше розроблено метод оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора, який полягає в послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми з урахуванням обмежень по якості обслуговування, допустимій смузі частот, кількості активних абонентів, використанні мультистандартних активних антенних систем та програмно-конфігурованого радіоінтерфейсу.

Запропонований метод дозволяє при необхідності збільшити радіус зон обслуговування абонентів стільникових мереж до 80%, що дозволяє мінімізувати необхідну кількість базових станцій для побудови мережі, а тому майже в 2 рази зменшити витрати оператора стільникового зв'язку на побудову підсистеми базових станцій, тобто підвищити економічну ефективність мережі.

6. Удосконалено метод розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора з використанням підмережі стандарту не-3GPP шляхом використання нових алгоритмів вибору мережі для передачі даних, використання комбінацій протоколів MTCP, TCP, SCTP на різних ділянках мережі та в залежності від типу надаваних послуг.

Запропоновані удосконалення дозволяють зменшити навантаження на радіоінтерфейс стільникової мережі до допустимого рівня, вдвічі збільшити кількість активних абонентів, які обслуговуються в стільнику та забезпечити балансування навантаження та підвищення ефективності функціонування радіопідмережі.

7. Вперше розроблено метод оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, який полягає у послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми станцій радіорелейного зв'язку з урахуванням технологічних обмежень до пропускної здатності каналів, оптимізації структури кожного шару із

врахуванням технологічних обмежень цього рівня, основаних на різноманітних параметрах функціонування мережі та показниках вартості.

Запропонований метод дозволяє здійснити удосконалення структури транспортної мережі при переході до мереж нових поколінь, забезпечуючи необхідну пропускну здатність та підвищення економічної ефективності транспортної мережі до 10%.

8. Удосконалено метод маршрутизації із резервування ресурсів та балансування навантаження транспортної мережі стільникового оператора із урахуванням вимог інформаційної безпеки за рахунок послідовного визначення характеристик мережі (пропускну здатність, затримка, завантаженість каналу), визначення необхідного резерву в каналі зв'язку, визначення альтернативних шляхів передавання даних з урахуванням ризиків інформаційної безпеки, розробки порогових значень для різних типів сервісів та виконання перерозподілу потоків.

Запропонований метод дозволяє, надаючи підвищений рівень надійності та захищеності мережі, підвищити ефективність використання транспортних каналів до 70-80%.

9. Вперше розроблено метод оцінки ефективності функціонування програмно-конфігурованої мережі, що використовується для керування мережею стільникового оператора та впровадження нових сервісів, що полягає у послідовному виборі оптимальної архітектури сегменту програмно-конфігурованої мережі, оцінці основних показників ефективності її функціонування.

Запропонований метод дозволяє проводити більш гнучке та оперативне розширення мережі, запровадження нових сервісів, підвищення оперативності доставки даних до 2,1 раза для ієрархічної структури.

10. Вперше розроблено метод мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку, який полягає в удосконаленні архітектури стільникових мереж зв'язку шляхом введення додаткових безпекових функцій та послідовному зборі інформації про виникнення кіберінцидентів в стільниковій мережі, виявленні типів кібератак, об'єктів та ступеня впливу, реагування на кібератаку та збереження інформації про кіберінцидент в спеціалізовану базу даних.

Запропонований метод дозволяє в режимі реального часу проводити моніторинг стану забезпечення кібербезпеки, підвищувати її рівень та відповідно ефективність функціонування стільникової мережі.

11. Вперше розроблено методологію підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку, яка полягає у використанні удосконаленого методу планування мережі стільникового зв'язку для розгортання стільникових мереж нового покоління, методу оцінки ключових показників функціонування мережі стільникового оператора з метою безперервної оптимізації мережі оператора шляхом використання методу оптимізації підсистеми базових станцій розгорнутої мережі стільникового оператора, удосконаленого методу розвантаження радіоінтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі Wi-Fi, методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мережі, удосконаленого методу маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора, методу оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі та методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку.

Розроблена методологія надає можливість за рахунок безперервного моніторингу ключових показників якості функціонування мережі оперативно

підвищувати ефективність функціонування стільникової мережі та якість обслуговування абонентів.

12. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення, що дозволило верифікувати запропоновані методи, моделі та методологію і підтвердити їх ефективність у контексті підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку. Результати дисертації впроваджено у діяльність ТОВ «Українські новітні технології» (акт від 24.07.2017), ТОВ «М.М.Д Смарт Україна» (акт від 11.12.2018), ДержНДІ спеціального зв'язку та захисту інформації (акт від 07.02.2017), Bundleslab KFT (акт від 03.12.2018), а також використовуються у навчальному процесі Центру перепідготовки та підвищення кваліфікації при Київській обласній державній адміністрації (акт від 23.08.2017), Національного авіаційного університету (акт від 11.12.2018), Державного закладу «Київський коледж зв'язку» (акт від 06.12.2017) та Університету у Бельсько-Бялій (акт від 18.05.2018) для підвищення ефективності підготовки фахівців з телекомунікацій.

Отримані наукові результати доцільно використовувати під час планування безпроводових мереж стандарту LTE та 5G, розробки обладнання та програмного забезпечення для систем передачі даних, а також в навчальному процесі.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Odarchenko R., Al Hadidi, M., Al-Azzeh, J.S., Gnatyuk S., Abakumova A. Adaptive regulation of radiated power radio transmitting devices in modern cellular network depending on climatic conditions. *Contemporary Engineering Sciences*. 2016. Vol. 9, №10. P. 473-485. (*Scopus*)

2. R. Odarchenko Analysis of self-similar traffic models in computer networks /R. Odarchenko and others. *International Review on Modelling and Simulations*. 2018. Vol.10, №5. P. 328-336.

3. Hadidi M.A., Al-Azzeh J.S., Tklich O.P., Gnatyuk S.O., Khokhlova Y.Y. Zigbee, bluetooth and Wi-Fi complex wireless networks performance increasing. *International Journal on Communications Antenna and Propagation*. 2017. №7(1). P. 48-56. (*Scopus*)

4. Roman Odarchenko, Baruch Altman, Rui Aguiar and Yevgeniya Sulema. Multilink Approach for the Content Delivery in 5G Networks: Proceedings of the 5th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 9-12, 2018. P.140-144. (*Scopus*)

5. Improved Method of Routing in UAV Network / R. Odarchenko, S. Gnatyuk, T. Zhmurko, O. Tklich. Proceedings of the 2015 IEEE 3rd International Conference on «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments» (APUAVD), Kyiv, Ukraine, October 13-15, 2015. Vol. 1. P. 294-297. (*Scopus*)

6. OFDM signal formation with adaptive guard interval duration change/R. Odarchenko, O. Tklich, Z. Shevchuk, S. Lukin. Proceedings of the Second International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 13-15, 2015. – P. 216-219. (*Scopus*)

7. Research of energy characteristics of QAM modulation techniques for modern broadband radio systems / O. Solomentsev, M. Zaliskyi, R. Odarchenko, S. Gnatyuk. Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT), Odessa, Ukraine, May 23-27, 2016. P. 14-20. (*Scopus*)

8. Traffic offload improved method for 4G/5G mobile network operator /R. Odarchenko, A. Abakumova, O. Polihenko, S. Gnatyuk. Proceedings of the

14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018 – Proceedings 2018-April, P. 1051-1054. (*Scopus*)

9. Estimation and reduction of the climatic conditions influence on the radio signal propagation in the troposphere / R. Odarchenko, N. Dyka, G. Konakhovych, A. Abakumova and others. Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 10-13, 2017. P. 45-48. (*Scopus*)

10. Mobile operators base station subsystem optimization method / R. Odarchenko, N. Dyka, O. Poligenko, L.Kharlai, A. Abakumova. Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 10-13, 2017. – P. 29-33. (*Scopus*)

11. Transport network optimization methods of mobile operators in Ukraine / R. Odarchenko, Y. Kochergin, A. Abakumova, D. Vergeles. Proceedings of the 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON, Kyiv, Ukraine, 29 May-2 June 2017. P. 1107-1112.

12. Evaluation of SDN network scalability with different management level structure /R. Odarchenko, O. Tkalich, G. Konakhovych, A. Abakumova. Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 4-6, 2016. P. 128-131. (*Scopus*)

13. LTE and wireless sensor networks integration in the concept of "smart home" / R. Odarchenko, O. Tkalich, A. Abakumova, O. Ustinov. Proceedings of the 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, Kyiv, Ukraine, October 18-20, 2016. P. 35-38. (*Scopus*)

14. Software-Controlled Network SDN Reliability Calculation/ R. Odarchenko, S. Dakov, O. Oksiuk, L. Dakova. Proceedings of the 5th International Scientific-Practical Conference on the Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, October 9-12, 2018. P. 99-103. (*Scopus*)

15. Estimation of the communication range and bandwidth of UAV communication systems / R. Odarchenko, O. Polihenko, L. Kharlai, O. Tkalich. Proceedings of the 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), Kyiv, Ukraine, October 17-19, 2017. P. 159-162. (*Scopus*)

16. Signal constructions with low resultant sidelobes for pulse compression navigation and radar systems / R. Odarchenko, A. Holubnychyi, G. Konakhovych. Proceedings of the 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, October 18-20, 2016. P. 267-270. (*Scopus*)

17. Security key indicators assessment for modern cellular networks /R. Odarchenko, V. Gnatyuk, S. Gnatyuk, A. Abakumova. Proceedings of the 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, (SAIC 2018), Kiev, Ukraine, October 8-12, 2018. P. 267-270. (*Scopus*)

18. Method of traffic monitoring for DDoS attacks detection in e-health systems and networks / R. Odarchenko, M. Zaliskiy, S. Gnatyuk, Y. Petrova, A. Chaplits. CEUR Workshop Proceedings, Lviv, Ukraine, November 28-30, 2018. P. 193-204. (*Scopus*)

19. Одарченко Р.С. Удосконалений метод планування мереж LTE. Наукоємкие технологии в инфокоммуникациях: обработка информации, кибербезопасность, информационная борьба: Монография / под общей редакцией В. М. Безрука, В. В. Баранника. Х. : Издательство «Лидер», 2017. С. 106-123.

20. Удосконалена архітектура системи безпеки стільникових мереж нового покоління / Р. С. Одарченко, В. О. Гнатюк В.О., Є. О. Самойлик, В. В. Котелянець. Наукоємні технології в інфокомунікаціях: обробка, захист та передача інформації: Монографія / за ред. В. В. Баранніка, В. М. Безрука. Х.: Видавництво «Стиль-видат», 2018. С. 293-302.
21. Одарченко Р. С. Стратегії розвитку операторів стільникового зв'язку в Україні. *Наукоємні технології*. 2014. Вип. 2, т. 26. С. 141-148.
22. Одарченко Р. С. Обґрунтування основних вимог до систем безпеки стільникових мереж 5-го покоління. *Безпека інформації*. 2015. №3, т.21. С.102-106.
23. Одарченко Р. С. Концепція сенсорної мережі збору метеорологічних даних для системи регулювання випромінюваної потужності радіопередавальних пристроїв стільникових мереж. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2013. Вип. 8. С. 53-61.
24. Одарченко Р. С. Розробка структури системи моніторингу та оптимізації мережі стільникового оператора. *Наукоємні технології*. 2017. №3(35). С.197-203.
25. Одарченко Р. С. Програмне забезпечення для попередньої оцінки вартості мережі LTE. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. Вип.3(51). С. 1-6.
26. Одарченко Р. С., Скульська О. Ю., Гнатюк В. О. Метод оцінки ключових показників захищеності в сучасних стільникових мережах. *Безпека інформації*. 2017. № 1(23). С. 19-26.
27. Одарченко Р. С., Абакумова А. О., Дика Н. В. Дослідження вимог до стільникових мереж нового покоління та можливості їх розгортання в Україні. *Проблеми інформатизації та управління*. 2016. №54. т.2. С. 52-59.
28. Дослідження основних недоліків базових станцій різних поколінь стільникового зв'язку / Р. С. Одарченко та ін. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2016. №3. С. 81-89
29. Програмне забезпечення для оцінки ключових показників якості обслуговування зі сторони абонента стільникової мережі / Р. С. Одарченко та ін. *Проблеми інформатизації та управління*. 2017. №3(59). С. 56-61.
30. Одарченко Р. С., Конахович Г. Ф., Ткаченко В. В. Методика вибору проектного рішення для розгортання захищеної мережі LTE . *Захист інформації*. 2014. № 1 (16). С. 63-68.
31. Одарченко Р. С., Мирутенко Л. В., Даков С. Ю. Удосконалений метод побудови опорного сегменту мережі LTE. *Наукоємні технології*. 2018. №1(37). С.18-26.
32. Одарченко Р. С., Харлай Л. О. Метод резервування ресурсів та балансування навантаження в транспортній мережі з урахуванням основних характеристик мереж. *Технічні науки та технології*. 2018. №1(11). С. 89-96.
33. Одарченко Р. С., Коберник А. Ю., Федюра Т. В. Дослідження архітектури сучасних систем моніторингу в мережах стільникового зв'язку. *Наукоємні технології*. 2018. №2(38). С. 195-202.
34. Розробка системи управління кіберінцидентами в мережах LTE / Р. С. Одарченко та ін. *Безпека інформації*. 2018. № 2. т.24. С. 84-90.
35. Одарченко Р. С., Гнатюк В. О. Концептуальні засади підвищення рівня кібербезпеки сучасних стільникових мереж. *Захист інформації*. 2016. Вип. 22 (2). С. 143-149.
36. Одарченко Р. С., Ткаліч О. П., Стецюра Ю. І. Розвантаження радіоінтерфейсу мережі LTE шляхом застосування концепції Hotspot 2.0 *Проблеми*

створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць. Житомир: ЖВІ ДУТ. 2014. Вип.17. С.63-70.

37. Одарченко Р. С., Ткаліч О. П. Використання концепції мереж SDN для розподілу трафіку між мережами LTE та Wi-Fi. *Наукоємні технології*. 2014. Вип.4 (24). С.432-437.

38. Моделювання роботи overlay мереж SDN та дослідження їх основних характеристик / Р. С. Одарченко та ін. *Наукоємні технології*. 2016. № 3 (31). С. 284-290.

39. Одарченко Р. С., Ткаліч О. П., Креденцар С. М. Програмне забезпечення для оцінювання пропускної здатності MIMO-системи. *Наукоємні технології*. 2013. Вип. 4. С. 384-389

40. Підвищення ефективності використання корпоративної мережі за концепцією BYOD / Р. С. Одарченко та ін. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць*. Житомир: ЖВІ НАУ. 2013. Вип.7. С. 57-67.

41. Одарченко Р. С., Полігенько О. О., Ткаліч О. П. Експериментальні дослідження пропускної здатності мереж стандарту IEEE 802.11n. *Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць*. Київ, 2013. Вип.4 (44). С. 61-69.

42. Одарченко Р. С., Ткаліч О. П., Вітковський Я. І. Інтеграція сервісів місця розташування мобільних абонентів з системою відеоспостереження. *Проблеми інформатизації та управління*. 2014. № 48, т.4. С.56-62.

43. Одарченко Р. С., Гнатюк С. О., Ткаліч О. П. Архітектура сучасної захищеної інформаційно-комунікаційної мережі аеропорту. *Захист інформації*. 2015. №3, т.17. С. 240-246.

44. Розрахунок зони покриття бездротової мережі Wi-Fi для визначення місцезнаходження абонентів в аеропорту / Р. С. Одарченко та ін. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. Т. 2. Вип. 50. С. 117-122.

45. Оцінка адекватності моделей розповсюдження для їх використання під час визначення місцезнаходження абонентів/ Р. С. Одарченко та ін. *Наукоємні технології*. 2015. Вип. 2 (26). С. 159-165.

46. Одарченко Р. С., Дика Н. В. Дослідження архітектури мереж стільникового зв'язку в Україні та можливостей їх переходу до мереж LTE. *Наукоємні технології*. 2016. № 3 (31). С. 291-298.

47. Одарченко Р. С., Пробица Д. М., Третяк І. В. Основні засади функціонування технології Li-Wi в концепції IoT. *Наукоємні технології*. 2017. №2(34). С.107-113.

48. Дослідження вразливостей сенсорних підмереж архітектури Інтернету речей до різних типів атак / Р. С. Одарченко та ін. *Безпека інформації*. 2016. №1, т. 22. С. 12-19.

49. Аналіз загроз та механізмів забезпечення інформаційної безпеки в сенсорних мережах / Р. С. Одарченко та ін. *Захист інформації*. 2016. №1, т.18. 48-56.

50. Одарченко Р. С., Даков С. Ю. Метод проектування SDN-мережі операторського класу. *Наукоємні технології*. 2017. №4(36). С. 289-295.

АНОТАЦІЯ

Одарченко Р.С. Методология підвищення ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі (технічні науки). Національний авіаційний університет, Київ, 2019.

В роботі було розроблено методологію підвищення ефективності стільникових мереж зв'язку, яка полягає у використанні удосконаленого методу планування мережі стільникового зв'язку для розгортання стільникових мереж нового покоління, методу оцінки ключових показників функціонування мережі стільникового оператора з метою безперервної оптимізації мережі оператора шляхом використання методу оптимізації підсистеми базових станцій розгорнутої мережі стільникового оператора, удосконаленого методу розвантаження радіо інтерфейсу мережі стільникового оператора із використанням підмережі Wi-Fi (Wireless Fidelity), методу оптимізації багаторівневого транспортного сегменту стільникової мереж, удосконаленого методу маршрутизації із резервуванням ресурсів та балансуванням навантаження транспортної мережі стільникового оператора, методу оцінки ефективності програмно-конфігурованої мережі та методу мережецентричного моніторингу та реагування на кіберінциденти в мережі оператора стільникового зв'язку.

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 мережі, оптимізації утилізації транспортних каналів, проведення більш гнучкого та оперативного розширення мережі, запровадження нових сервісів, підвищення оперативності доставки даних для ієрархічної структури рівня управління.

Отримані наукові результати доцільно використовувати під час планування безпроводових мереж стандарту LTE та 5G, розробки обладнання та програмного забезпечення для систем передачі даних, а також в навчальному процесі.

Ключові слова: пропускна здатність, стільникова мережа, програмно-конфігурована мережа, потужність радіосигналу, затухання, транспортна мережа, оптимізація, імовірність бітової помилки, затримка.

АННОТАЦИЯ

Одарченко Р.С. Методология повышения эффективности функционирования сотовых сетей связи – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – Телекоммуникационные системы и сети (технические науки). Национальный авиационный университет, Киев, 2019.

Диссертация посвящена вопросам разработки методологии повышения эффективности сотовых сетей связи. В работе был проведен анализ качества обслуживания абонентов сотовых сетей в Украине с целью определения их эффективности. Было установлено, что заявленные требования к сетям четвертого поколения не достигаются ни в одной из реализованных сетей, а фактическое качество обслуживания абонентов находится на достаточно низком уровне, что свидетельствует о низкой эффективности существующих методов планирования

радиосетей, транспортных подсистем и методов управления. В работе были предложены альтернативные стратегии развития операторов сотовой связи в Украине.

В работе впервые разработана методология повышения эффективности сотовых сетей связи, заключающаяся в использовании усовершенствованного метода планирования сети LTE для развертывания сотовых сетей нового поколения, метода оценки ключевых показателей функционирования сети сотового оператора с целью непрерывного оптимизации сети оператора путем использования метода оптимизации подсистемы базовых станций развернутой сети сотового оператора, усовершенствованного метода загрузки радио интерфейса сети сотового оператора с использованием подмодуля Wi-Fi, метода оптимизации многоуровневого транспортного сегмента сотовых сетей, метода резервирования ресурсов и балансировки нагрузки транспортной ме-сети сотового оператора и метода оценки эффективности программно-конфигурируемых сетей.

С помощью разработанной методологии операторам сотовой связи удастся повысить эффективность своих сетей за счет увеличения радиусов зон обслуживания абонентов сотовых сетей, минимизации необходимого количества базовых станций для построения сети, увеличение вдвое количества активных абонентов, обслуживаемых в базовой и обеспечения балансировки нагрузки в радиоподсети, повышение экономической эффективности транспортной сети, повышение уровня надежности сети, оптимизацией утилизации транспортных каналов, проведение более гибкого и оперативного расширения сети, внедрение новых сервисов, повышения оперативности доставки данных для иерархической структуры уровня управления.

Ключевые слова: пропускная способность, сотовая сеть, программно-конфигурируемая сеть, мощность радиосигнала, затухание, транспортная сеть, оптимизация, вероятность битовой ошибки, задержка.

ABSTRACT

Odarchenko R.S. Cellular networks efficiency improving methodology. - As a manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.12.02 - Telecommunication systems and networks. National Aviation University, Kyiv, 2019.

The amount of traffic carried over wireless networks is growing rapidly and is being driven by many factors. Chief among them is the tremendous growth in multimedia applications on mobile devices – streaming music and video, two-way video conferencing and social networking to name a few. The telecoms industry is undergoing a major transformation towards 5G networks in order to fulfil the needs of existing and emerging use cases. The 5G architecture should seamlessly support both fixed and mobile access technologies under a fully converged end-to-end system in order to deliver future service requirements for some of the deployment scenarios that could be supported. This technologies in nearest future have come to Ukraine too.

That's why in this dissertation an analysis of the quality of service of subscribers of cellular networks in Ukraine was conducted in order to determine the efficiency of their operation and security. An analysis of the quality of customer service in the implemented projects of LTE networks in the world and 4G networks in Ukraine has established that the claimed requirements for fourth generation networks are not achieved in any of the implemented networks, and the actual quality of customer service (target efficiency) is at a rather low level which indicates the low efficiency of existing radio network planning methods, transport subsystems, control and cybersecurity management methods. This made it possible to determine the directions by which it is necessary to increase the efficiency of the operation of cellular networks.

In this dissertation were developed several methods to improve network efficiency. The method of planning of the network of the cellular operator enables cellular operators to more accurately assess the coverage of radio coverage areas, choose key indicators of service quality, more efficient frequency planning and capital cost calculation, which in turn allows us to assess the feasibility of constructing a cellular network option. On the basis of this advanced method, a training software (web-application) was developed to evaluate radio coverage zones of LTE network base stations. The method for evaluating key indicators of service quality, the level of information security and the efficiency of cellular networks makes it possible to assess the most important indicators of the quality of functioning and security of the cellular network network in order to continuously monitor and optimize them when introducing new services during customer service. The method for optimizing the subsystem of base stations allows to increase the radius of subscriber service areas of cellular networks, which allows minimizing the number of base stations for network construction, and therefore reduce the cost of the cellular operator to build the subsystem of the base stations, that is, increase the economic efficiency of the network. Improved method of the radio interface off-loading using a non-3GPP standard subnet allow to reduce the load on the radio interface of the network of the cellular network to an acceptable level, double the number of active subscribers, which are served in the cell, and provide load balancing and increase the efficiency of the radio subnetwork. The method of optimization of a multi-level transport segment of a cellular network has been developed, which allows to improve the structure of the transport network during the transition to new generations networks, providing the necessary capacity and increasing and improving the efficiency of the transport network. The method of routing with resource reservation and balancing of the traffic of a cellular operator with the consideration of information security requirements allows to increase the efficiency of the transport channels usage.

The method for evaluating the effectiveness of a software-configured network allows for a more flexible and operational expansion of the network, the introduction of new services, increasing the efficiency of data delivery for the hierarchical structure.

The method of network-centric monitoring and response to cyber incidents in the network of the cellular network allows real-time monitoring of the state of cyber security, its level and, consequently, the efficiency of the cellular network.

On the base of these methods in this dissertation was developed cellular networks efficiency improving methodology, which is using the improved method of LTE network planning, the key method for assessing performance of the cellular operator for the purpose of continuous operator network optimizing using the method of base station subsystem optimization, improved method of radio interface of the cellular operator offloading using Wi-Fi, the method of optimization of multi-vehicle segment of the cellular network, the method of roating with resource reservation and load balancing of mobile operator and method of SDN network effectiveness evaluation.

Using the developed methodology mobile operators can improve the efficiency of their networks by increasing the radius of the service areas, minimizing the required number of base stations for the construction of the network, doubling the number of active subscribers in the cell and provide load balancing in transport and radio network, increase transport network efficiency, enhance network reliability, optimize utilization of transport channels for a more flexible and rapid network expansion, introduction of new services and improved data delivery in the hierarchical structure of SDN. It is advisable to use the obtained scientific results when planning LTE and 5G wireless networks, developing equipment and software for data transmission systems, as well as in the learning process.

Key words: cellular network bandwidth, software-configured network, power radio signal attenuation, the transport network, optimization, probability of bit error, delay.