


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МИХАЛЕВСЬКИЙ ДМИТРО ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 621.391.8

**МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ
ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОКАНАЛІВ КОРПОРАТИВНИХ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ

Дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: Заслужений працівник освіти України,
доктор технічних наук, професор
Кичак Василь Мартинович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри телекомунікаційних
систем та телебачення.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бондарєв Андрій Петрович,
Національний університет «Львівська політехніка»
професор кафедри теоретичної радіотехніки та
радіовимірювань;

доктор технічних наук, професор
Політанський Руслан Леонідович,
Чернівецький національний університет імені Юрія
Федьковича, професор кафедри радіотехніки та
інформаційної безпеки;

доктор технічних наук, професор
Семенко Анатолій Іларіонович,
Відкритий міжнародний Університет розвитку
людини «Україна»,
професор кафедри «Комп'ютерна інженерія».

Захист дисертації відбудеться “ 29 ” вересня 2021 р. о 12-00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12, аудиторія 217 головного навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “ 27 ” серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, к.т.н.



М.І. Бешлей

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні тенденції процесу конвергенції мереж передбачають виникнення подібності в апаратно-програмних засобах, що приводить до створення глобальної мережі, яка займає верхні п'ять рівнів моделі OSI. В результаті існує глобальне віртуальне середовище, в якому створюються велика кількість сервісів та інфокомунікаційних послуг, доступ до яких можна отримати за допомогою каналного та фізичного рівнів, зокрема, використовуючи сучасні технології радіодоступу 5G і Wi-Fi. Але в такому випадку виникає наступна ситуація – для обслуговування абонентських пристроїв використовується обмежений частотний діапазон 1...6 ГГц, що передбачає обмеження фізичного ресурсу. В результаті цього, постійно розробляються технології сумісного використання радіочастотного ресурсу, як для ліцензованих діапазонів, так і не ліцензійних, застосовуючи методи програмно-конфігурованого керування. Такий підхід дає змогу підвищити технічну ефективність (надійність, пропускна здатність, ефективна швидкість передачі інформації та ін.) корпоративних телекомунікаційних мереж шляхом оптимізації основних параметрів радіоканалів в умовах постійного покращення якості надання інфокомунікаційних послуг і необхідності підключення значної кількості пристроїв. Проте, сумісне використання радіочастотного ресурсу призводить до погіршення параметрів та характеристик радіоканалів, особливо це стосується корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi, які працюють в умовах приміщень. Суттєвим недоліком в таких мережах є виникнення ряду зовнішніх негативних факторів, які зменшують ефективність передавання інформації по радіоканалах. До таких факторів можна віднести: вплив інтерференційних завад від сусідніх мереж; вплив параметрів приміщень та внутрішніх об'єктів, що приводить до багатопроменевого поширення хвиль; електромагнітної сумісності; потреба розташування додаткових комірок та низьку ефективність для використання MIMO високих порядків; існування статичних та випадкових факторів впливу та ін. Це сприяє появі затримок та помилок під час сеансів передачі трафіку, що приводить до інформаційних втрат. В загальному це є значною проблемою, яка виникає при проектуванні та експлуатації корпоративних мереж розгорнутих на основі технологій радіодоступу 5G/Wi-Fi із метою досягнення максимально можливої пропускної здатності та стабільності радіоканалів.

Таким чином, в умовах розгортання радіотехнологій доступу 5G/Wi-Fi у корпоративних телекомунікаційних мережах виникає **протиріччя** між потребою підвищення швидкості передавання інформації для покращення якості надання інфокомунікаційних послуг та необхідністю адаптивної оптимізації мережі для зменшення інформаційних втрат на основі методів оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу і існування внутрішніх та зовнішніх факторів впливу в приміщеннях.

Для вирішення такого протиріччя є необхідність детального вивчення, як апаратних рішень технологій радіодоступу 5G/Wi-Fi, так і процесів які виникають під час передавання даних по радіоканалах шляхом створення нової методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів для вдосконалення існуючих методів і моделей проектування та оптимізації телекомунікаційних мереж.

Аналіз існуючих наукових досліджень показує, що на теперішній час оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж є актуальним і набуло досить широкого поширення у роботах вітчизняних та закордонних вчених таких як Л.Н. Беркман, В.М. Шокало, В.О. Пелішок, А.В. Лемешко, А.І. Семенко, С.В. Гаркуша, Ł. Chruszczyk, K. Foster, I. Soldo, K. Malarić, P. Chapre, S. Kotsopoulos та ін. за напрямом досліджень та встановлення закономірностей основних енергетичних параметрів сигналу та С.А. Нестеренко, В.М. Кичак, В.С. Лазебний, В.Л. Бурячок, Т.М. Наритник, К.М. Обельовська, A.D. Potorac, A.V. Barbosa, M.O Khan, K. Rathod та ін. за напрямом дослідження основних інформаційних параметрів радіоканалів. Але в більшості випадків, існуючі роботи направлені на побудову теоретичних моделей безпроводних мереж та радіоканалів або на виявлення певних видів факторів впливу із відсутністю універсального механізму зв'язку із основними параметрами радіоканалу, що робить їх малоприматними для використання на практиці в процесі проектування та оптимізації телекомунікаційних корпоративних мереж. Іншим недоліком існуючих досліджень є сам процес оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів, який також супроводжується значною кількістю випадкових факторів, що впливають на період спостереження і достовірність.

Таким чином, враховуючи низький рівень випромінювання сучасних мереж радіодоступу 5G/Wi-Fi, існування значної кількості факторів впливу та складну картину поширення радіохвиль у приміщеннях виникає актуальна **науково-прикладна проблема** розроблення методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів із врахуванням максимально-можливої кількості різноманітних факторів впливу на основі статистичних зв'язків між ними з метою підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету, в межах низки держбюджетних науково-дослідних тем: «Розробка методів і пристроїв первинного цифрового оброблення високочастотних сигналів для систем радіоелектронної боротьби» (2016-2017 рр., № держреєстрації 0116U004710), «Методи та пристрої формування, оброблення й вимірювання сигналів радіоінформаційних систем промислових і військових об'єктів» (2017-2019 рр., № держреєстрації 0117U007139), «Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу» (2019-2021 рр., № держреєстрації 0119U000296), а також госпдоговірної кафедральної тематики «Методи та засоби вимірювання та оброблення сигналів в радіотехнічних та телекомунікаційних системах на базі інфокомунікаційних технологій» (2013-2018 рр.), № 45К1; «Методи та засоби обробки надвисокочастотних сигналів в телекомунікаційних та радіотехнічних системах» (2019-2023 рр.), № 45К1.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж шляхом розроблення нових методів та моделей оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів із врахуванням факторів впливу та статистичних зв'язків.

Для досягнення поставленої мети в межах дисертаційних досліджень були сформульовані та розв'язані такі завдання:

- аналіз сучасного стану теорії та практики оцінювання енергетичних та інформаційних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi;

- розроблення методу оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача із врахуванням процесів поширення сигналів та внутрішніх і зовнішніх факторів впливу у корпоративних приміщеннях;

- формалізація інтегральних показників ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації;

- розроблення методу визначення ефективної швидкості передачі інформації на основі поєднання методів моніторингу та статистичного аналізу;

- розроблення методу оцінювання гарантованої пропускнуої здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку;

- розроблення інтегральних показників факторів впливу у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж;

- розроблення теоретичних та експериментальних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації в умовах існування різного роду факторів впливу у корпоративних приміщеннях для прогнозування інформаційних втрат у радіоканалах;

- розроблення методології оцінювання основних параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж із врахуванням факторів впливу і статистичних зв'язків між ними;

- практична реалізація та оцінювання ефективності запропонованих методів та моделей на основі досліджень корпоративної телекомунікаційної мережі.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання параметрів інформаційних сигналів на базі програмно-апаратних засобів приймальних пристроїв.

Предмет дослідження: методи та моделі оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для зменшення інформаційних втрат.

Методи дослідження. В процесі теоретичних досліджень радіоканалів використано теорію радіозв'язку, теорію завадостійкості, кодування та інформації, теорію передачі та обробки даних, теорію цифрового радіозв'язку, методи аналізу на основі моделей затухання сигналу у вільному просторі. Для розроблення методів оцінювання використано теорію моніторингу та радіомоніторингу, теорію контролю, теорію випадкових процесів, основні положення теорії ймовірності. Для розроблення моделей оцінювання основних параметрів радіоканалу використано методи математичного і фізичного моделювання та експериментальних досліджень, методи математичної статистики, методи статистичної обробки результатів, теорію статистичного та кореляційного аналізу, методи лабораторного та натурного експериментів, методи регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. **Вперше** запропоновано метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача, який, на відміну від відомих, враховує процеси поширення сигналів та внутрішні і зовнішні фактори впливу в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для забезпечення неперервної оптимізації покриття мережі радіодоступу у приміщенні із мінімальними інформаційними втратами.

2. **Розвинуто** математичну модель процесу передавання інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, яка, на відміну від відомих, відрізняється узагальненим поєднанням технічних параметрів специфікацій стандартів, що у сукупності дає змогу оцінювати вплив різноманітних технологій та активність абонентів у мережі на кількість корисної інформації у радіоканалах.

3. **Вперше** формалізовано інтегральні показники ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації, які, на відміну від відомих, дають змогу прогнозувати інформаційні втрати в межах покриття мереж радіодоступу із врахуванням архітектурних перешкод у корпоративних приміщеннях.

4. **Вперше** розроблено метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, який, на відміну від відомих, базується на поєднанні методів моніторингу та статистичного аналізу із використанням програмно-апаратних засобів спеціалізованих або абонентських приймальних пристроїв, що дало змогу покращити результативність управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах радіодоступу.

5. **Вперше** запропоновано метод оцінювання гарантованої пропускнуої здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку, який, на відміну від відомих, використовує статистичний зв'язок між параметрами радіоканалу, що дало змогу збільшити швидкодію обробки результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування.

6. **Вперше** запропоновано узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах, на основі еталонних моделей середньостатистичних значень в межах покриття мереж радіодоступу, що дають можливість оцінювати дію факторів впливу на основні параметри радіоканалів, як окремо так і комплексно.

7. **Набула подальшого розвитку** стохастична модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій, яка, на відміну від відомих, використовує статистичну імовірність і дисперсію, що дає можливість значно спростити отримання кінцевого результату інтервалів флуктуацій на основі середньостатистичних результатів моделей оцінювання.

8. **Вперше** розроблено методологію оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, яка дає змогу підвищити ефективність досліджень, отримання нових знань про роботу радіоканалів в умовах приміщень і дію факторів впливу на їх параметри, що дає можливість створення логіко-аналітичного інструменту для підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації.

Практичне значення одержаних результатів. Основним практичним результатом дисертації, який отриманий на базі проведених теоретичних та експериментальних досліджень, полягає у можливості їх застосування для покращення технічної ефективності існуючих корпоративних телекомунікаційних мереж побудованих на базі радіотехнологій 5G/Wi-Fi, а також для подальшого впровадження та знаходження компромісних рішень в процесі розгортання наступних стандартів 6G та Wi-Fi 7 у корпоративний сектор. Отримані результати можна використовувати як базу для систем програмно-конфігурованого керування, автоматизованого проектування та початкової і неперервної оптимізації корпоративних телекомунікаційних мереж з використанням машинного навчання з метою покращення їх технічних та економічних показників і мінімізації інформаційних втрат.

Крім того, до вагомих практичних результатів, можна віднести:

1. На основі експериментальних та статистичних досліджень встановлено, що достовірність запропонованих методів становить: 0,997 для оцінювання потужності сигналу на вході приймача із похибкою $\pm 0,3$ дБм при флуктуаціях $\Delta P = \pm 2$ дБм та 0,95 для визначення ефективної швидкості передачі інформації із похибкою до 0,6 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для випадку мінімальної дії факторів впливу у приміщенні. Ступінь адекватності отриманих моделей, становить не менше за 0,95 для потужності сигналу на вході приймача та 0,9 для ефективної швидкості передачі інформації.

2. Метод оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж та стохастична модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій дали змогу підвищити швидкодію отримання кінцевого результату до 5 с із достовірністю 0,95 і похибкою оцінювання до 1 дБм та 1 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для мінімальної дії факторів впливу у приміщенні.

3. Отримано коефіцієнти просторових розподілів потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації для приміщень при кутовому та центральному положенні точки доступу в діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц, що дало змогу враховувати та прогнозувати дію статичних і випадкових факторів впливу, а також існування додаткових флуктуацій біля стін приміщення.

4. На основі експериментальних досліджень, отримано коефіцієнти флуктуацій потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації, які дають можливість враховувати взаємозв'язок факторів впливу та параметрів радіоканалу.

5. Експериментальним шляхом встановлено, що у порівнянні із існуючими методами і моделями оцінювання параметрів радіоканалу, запропоновані рішення дали змогу досягти підвищення ефективності оцінювання потужності сигналу на вході приймача на 9% та ефективної швидкості передачі інформації на 12% використовуючи можливості приймально-передавального обладнання.

6. На основі експериментальних досліджень доведено, що використання запропонованої методології оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж в умовах значного завантаження

частотного ресурсу, дало змогу підвищити ефективну швидкість передачі інформації у 3 рази, а рівень сигналу покращити на 8% у порівнянні із традиційними методами. Крім того, в 2 рази, вдалося розширити зону гарантованого надання інфокомунікаційної послуги на рівні радіодоступу мережі Wi-Fi.

Наукові та практичні результати проведених досліджень використані в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету в дисциплінах: «Системи комутації та розподілу інформації», «Аналіз і синтез радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій», «Телекомунікаційні системи NGN та мультисервісні системи наступних поколінь», «Системи доступу», а також при виконанні курсових, бакалаврських і магістерських дипломних робіт студентами спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено для підвищення інформаційної та енергетичної ефективності при проектуванні та оптимізації корпоративних мереж на базі радіодоступу у Вінницькій філії ВАТ Укртелеком, ТОВ «АТРАКОМ», ПрАТ «Лілея», а також у Вінницькому національному технічному університеті.

Отримані в дисертаційній роботі наукові та практичні результати можуть знайти подальше застосування для підвищення технічної ефективності на етапах проектування та оптимізації телекомунікаційних систем та мереж зв'язку на основі радіоканалів будь-яких стандартів, а також у науково-дослідних установах та навчальному процесі вищих навчальних закладів. Достовірність основних теоретичних положень і висновків підтверджується їх збіжністю з результатами математичних та експериментальних досліджень.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, які опубліковані самостійно: у роботах [9, 10] – метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача; [5] – інтегральні показники ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації; [8] – метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж та інформаційна модель радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на основі повного циклу передачі кадру; [12] – метод оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку; [13, 19] – стохастична модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій; [14, 15, 17, 18] – узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах; [19–20] – отримано коефіцієнти флуктуацій потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації; [14] – моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації у просторі приміщень.

У працях, опублікованих у співавторстві, авторів належать: [1–4] – окремі розділи у колективних монографіях, що присвячено розширеним дослідженням радіоканалів стандарту Wi-Fi; [6–7] – розроблено інтегральні показники ефективності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на основі статистичного зв'язку між основними параметрами; [11] – моделі оцінювання

просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача для центрального положення точки доступу; [16] – оцінювання достовірності запропонованих методів; [21–25] – проведено аналіз основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж та запропоновано методику експериментальних досліджень із врахуванням факторів впливу; [26–33] – експериментальні дослідження факторів впливу на параметри радіоканалу; [34–40] – проведено аналіз основних параметрів радіоканалів; [41–54] – запропоновано методологію досліджень основних параметрів радіоканалів; [54–78] – запропоновано використання приймальних пристроїв для оцінювання параметрів радіоканалів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на наступних міжнародних науково-технічних конференціях: 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing у 2016 р.; Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп’ютерних систем (MEICS) у 2015, 2017 рр.; Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТ) у 2017 р.; Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях у 2017 р.; Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП) у 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 рр.; Математика. Інформаційні технології. Освіта у 2016 р.; Modern methods, innovation, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference у 2017 р.; Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН) у 2019 р.; Контроль і управління в складних системах (КУСС) у 2014, 2018 рр.; Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки у 2014 р.; Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ» у 2014 р.; Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства у 2013, 2014 рр.; Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС у 2013 р.; Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи у 2014 р.; International Scientific and Practical Conference “World Science” у 2014, 2015, 2016 рр.

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 78 наукових праць, із яких 40 є одноосібними. Серед них 4 колективні монографії; 9 статей у журналах що індексуються в наукометричних базах: Scopus, Web of Science, серед яких 4 у закордонних періодичних виданнях, 5 статей у фахових виданнях України категорії А, що входить до наукометричних баз Scopus, 15 – статей у наукових фахових виданнях України категорії Б, що індексуються в міжнародних базах даних (Index Copernicus, Google Scholar і ін.); 13 в наукових журналах що індексуються в міжнародних базах даних (Index Copernicus, Google Scholar і ін.); 34 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, а також 3 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 405 сторінок друкарського тексту, із них 11 сторінок вступу, 318 сторінок основного тексту, 155 рисунків, 24 таблиць, список використаних джерел із 293 найменувань, 2 додатки на 17 сторінках. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовані мета та завдання досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами та програмами, вказана новизна та практична цінність отриманих результатів, відзначений особистий внесок автора, наведені дані про апробацію та практичне впровадження, публікації та структуру роботи.

У **першому розділі «Аналіз методів оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi»** – проведено огляд існуючих наукових досліджень за темою дисертації для визначення сучасних тенденцій розвитку методів оцінювання і аналізу параметрів та характеристик телекомунікаційних мереж із використанням радіотехнологій. В більшості випадків, вони направлені на мережі масового обслуговування на основі технологій 4G і 5G. У зв'язку із значним ростом обсягів інформації що передається, такі мережі, потребують не тільки вдосконалення технічної та інтелектуальної бази, а й створення допоміжних мереж для розвантаження головних комутаційних вузлів, роль яких виконують приватні та корпоративні мережі, в яких найбільшого поширення отримали технології радіодоступу Wi-Fi для створення високошвидкісних радіоканалів.

Корпоративна мережа – це телекомунікаційна мережа, яка призначена для обслуговування підприємства чи організації, створення інформаційних ресурсів та забезпечення обміном інформацією між внутрішніми користувачами. Сучасною особливістю розвитку таких мереж є використання систем радіодоступу на основі стандартів 5G і Wi-Fi для забезпечення надійних та високошвидкісних радіоканалів для корпоративних та індивідуальних користувачів. В процесі розгортання таких мереж, головною проблемою є досягнення необхідних показників по покриттю, пропускній здатності і якості обслуговування в умовах обмеженого енергетичного та частотного ресурсів в умовах існування значної кількості внутрішніх та зовнішніх факторів впливу у корпоративних приміщеннях, що приводить до інформаційних втрат. Саме приміщення висуває ряд вимог в проектуванні та експлуатації мереж, що обумовлює більш раціональне використання стандарту Wi-Fi. 5G технологію раціональніше використовувати для пристроїв, які знаходяться поза межами приміщень, оскільки в приміщеннях необхідно створювати додаткові піко- і нано-комірки, що значно обмежать можливості радіоканалів на частотах 2...6 ГГц та додатково потребують значних інвестицій. За рахунок конвергенції мереж та послуг обидва цих стандарти мають важливе значення в процесі проектування корпоративних телекомунікаційних мереж для створення радіодоступу, які, в умовах обмеженого енергетичного і радіочастотного ресурсів, будуть однаково реагувати на існування зовнішніх та внутрішніх факторів впливу.

Отже, виникло технічне протиріччя між потребою підвищення швидкості передавання інформації для покращення якості надання інфокомунікаційних послуг та необхідністю адаптивної оптимізації мережі для зменшення інформаційних втрат на основі методів оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу і існування внутрішніх та зовнішніх факторів впливу в приміщеннях.

В процесі аналізу встановлено, що використання класичних підходів до оцінювання дають низьку інформативність, за рахунок існування значної кількості факторів впливу, які не враховуються, або значно зростають затрати на оптимізацію за рахунок використання дорогого обладнання. Це потребує створення нових підходів до процесу оцінювання, аналізу і контролю параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, що показано у структурно-логічній схемі досліджень на рис. 1.

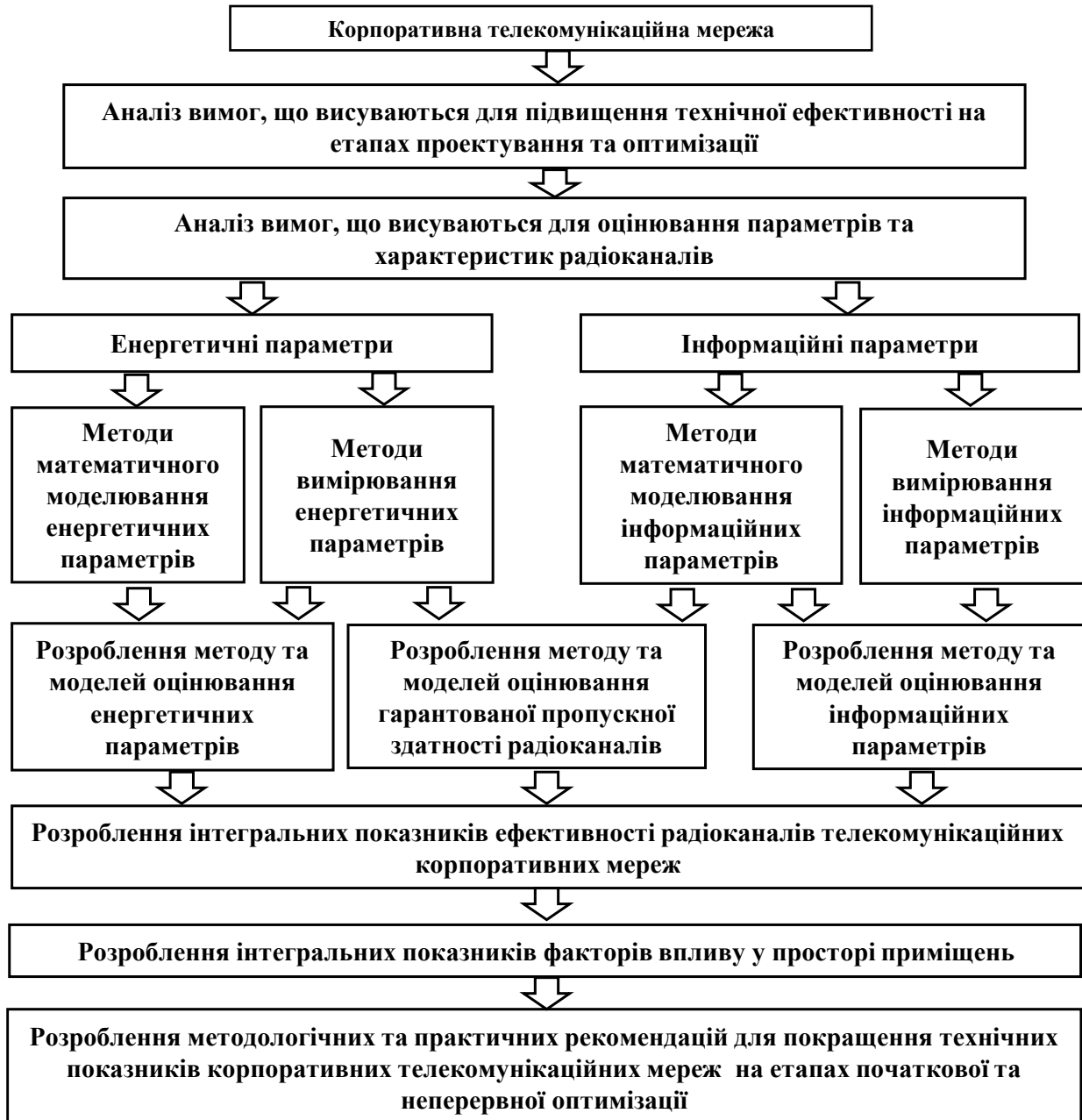


Рис. 1. Структурно-логічна схема дисертаційного дослідження

Таким чином, на основі проведених досліджень, актуалізується проблематика розроблення методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi шляхом створення нових та ефективних рішень з метою підвищення технічної ефективності на етапах початкової та неперервної оптимізації.

У другому розділі «Моделі та метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу у діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц для мереж 5G/Wi-Fi» – запропоновано *метод просторового оцінювання потужності сигналу на вході приймача* із врахуванням процесів поширення сигналів та внутрішніх і зовнішніх факторів впливу в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi. Особливістю методу є моделі із врахуванням параметрів приміщення та положення точки доступу.

Суть методу полягає в наступному. На *першому етапі* виконується вимірювання потужності сигналу P_m на вході приймача з використанням програмно-апаратних засобів приймального пристрою.

Середньостатистичне значення параметру P_m отримується на базі вимірювальних засобів приймального пристрою, за наступним виразом:

$$P_m \approx \frac{1}{T} \int_0^T P_m(t) dt \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} \quad (1)$$

де T – період спостереження; n – кількість циклів моніторингу.

На *другому етапі* визначаються коефіцієнти затухання c , g , a , b із врахуванням максимумів та мінімумів флуктуацій, на основі виразів:

$$c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_i \pm \Delta c, \quad g = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_i \pm \Delta g, \quad a = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q a_i \pm \Delta a, \quad b = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q b_i \pm \Delta b, \quad (2)$$

де m і q кількість отриманих характеристик по координаті l і d відповідно; Δc , Δg , Δa , Δb – інтервали, які визначають межі зміни коефіцієнтів затухання, та оцінюють наявність максимумів і мінімумів просторового розподілу потужності сигналу, що виникає внаслідок відбиття від поверхонь у приміщенні.

На *третьому етапі* виконується розрахунок просторового розподілу потужності сигналу для приміщення за розробленими моделями оцінювання в залежності від необхідних умов із використанням координат приміщення (l , d):

- для кутового положення точки доступу та частотного діапазону 2,4 ГГц:

$$P_{Rx} \approx P_m + \frac{1}{2} c (l^2 - 1) + \frac{1}{2} g (l - 1) + \frac{1}{2} a (3d^2 / 4 - dd_0 / 2 - d_0^2) + \frac{1}{2} b (d / 2 - d_0) \pm \Delta P. \quad (3)$$

- для центрального положення точки доступу та частотного діапазону 2,4 ГГц:

$$P_{Rx} \approx P_m + \frac{3}{8} (cl^2 + ad^2) - c(l - 2) + g \left(\frac{1}{4} l - 1 \right) + \frac{1}{4} bd \pm \Delta P. \quad (4)$$

- для частотного діапазону 5 ГГц:

$$P_{Rx} = \frac{5}{8} (cl^2 + ad^2) + \frac{1}{4} (gl + bd) - c(l + 2) - g + P_m \pm \Delta P. \quad (5)$$

Оцінювання за моделями (3) і (4) у приміщенні наведено на рис. 2.

Модель (5) використовує інший підхід для оцінювання коефіцієнтів затухання із використанням наповненості приміщення перешкодами та відбиваючими поверхнями. В такому випадку, інтервали коефіцієнтів затухання мають симетричність, тому наявність максимумів та мінімумів флуктуацій у просторовому розподілі визначається знаком « \pm » для коефіцієнтів затухання.

Оцінювання на основі моделі (5) наведено на рис. 3.

На четвертому етапі враховуються межі флуктуацій потужності сигналу на вході приймача ΔP із врахуванням довірчий інтервалу, які можна записати так:

$$P_m - \Delta P - \sigma < P_{Rx} < P_m + \Delta P + \sigma, \quad (6)$$

де σ – випадкова похибка оцінки середньостатистичного значення потужності сигналу на вході приймача.

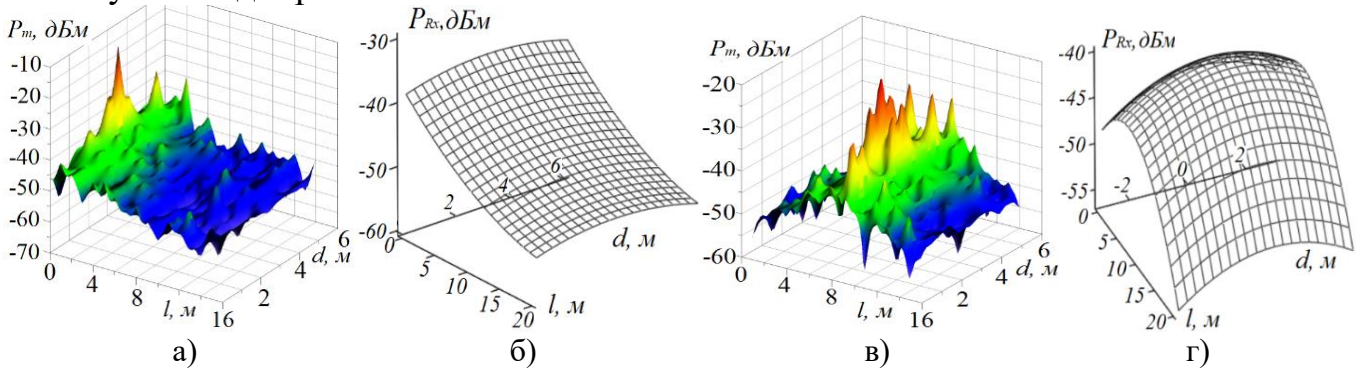


Рис. 2. Фрагменти розподілу потужності сигналу у приміщенні при кутовому (а) та центральному положенні точки доступу (в) для частотного діапазону 2,4 ГГц та результати оцінювання за моделлю (3) (б) і моделлю (4) (г)

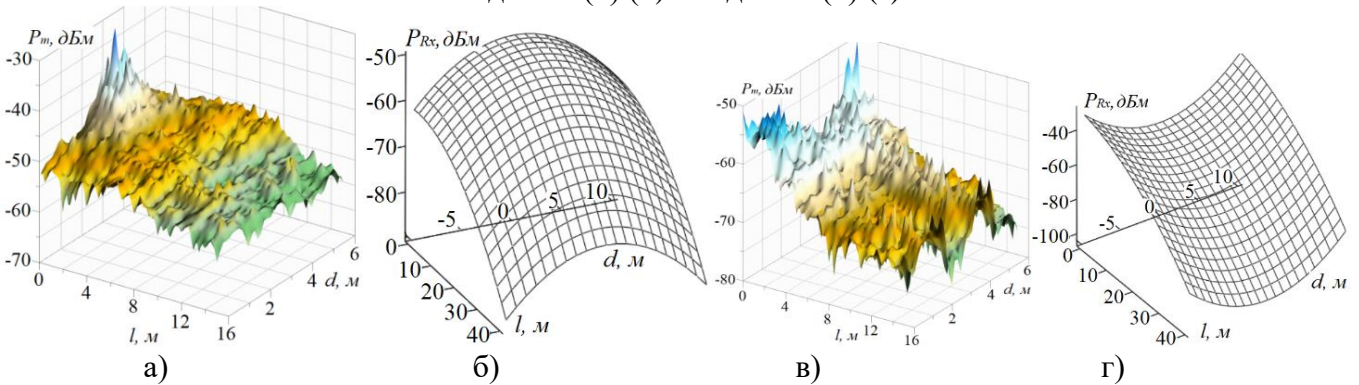


Рис. 3. Фрагменти розподілу потужності сигналу у приміщенні при кутовому (а) та центральному положенні точки доступу (в) для частотного діапазону 5 ГГц та результати розрахунку за моделлю (5) для приміщення заповненого менше 30 % (б) та для приміщення заповненого більше 30 % (г)

Приклад оцінювання флуктуацій розподілу сигналу наведено на рис. 4.

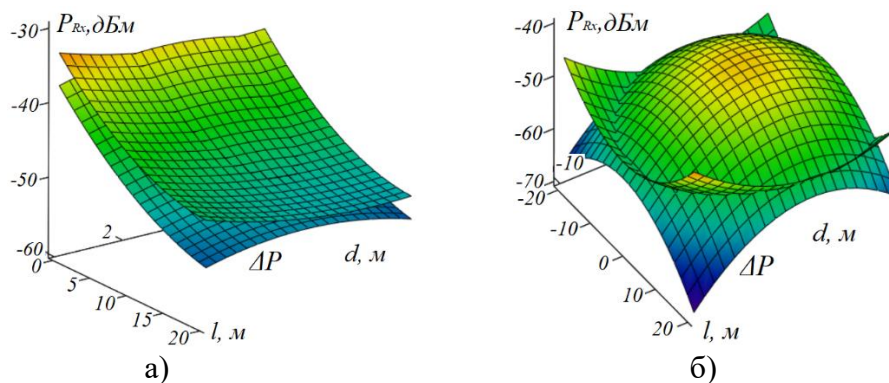


Рис. 4. Приклад оцінювання флуктуацій у розподілі сигналу: а – для кутового положення ТД та частотного діапазону 2,4 ГГц; б – для центрального положення ТД та частотного діапазону 5 ГГц

Величина параметра ΔP залежить від геометричних розмірів приміщення та коефіцієнта відбиття сигналу від поверхонь стін та об'єктів. Це враховується за допомогою параметрів Δc , Δg , Δa , Δb . Флуктуації сигналу є випадковим процесом,

які мають значно більше значення чим випадкова похибка вимірювання. На основі експериментальних досліджень, можна вважати, що ΔP може складати до $\pm 2,5$ дБм від середньостатистичного параметра P_m для прямої видимості та до ± 5 дБм на відстанях до чотирьох метрів від відбиваючої поверхні.

Метод є простим для реалізації та може використовуватись для будь-якого приймального пристрою з метою оцінювання покриття корпоративних телекомунікаційних мереж із врахуванням максимально-можливої кількості факторів впливу та для забезпечення неперервної оптимізації покриття мережі радіодоступу у приміщенні. До обмежень можна віднести корпоративні приміщення із розміром 20x40 для кутового положення ТД або 20x20 для центрального положення ТД.

Призначення методу: підвищення ефективності оцінювання потужності сигналу на вході приймача; знаходження максимально-можливого покриття мережі із врахуванням порогового значення рівня сигналу при якому інформаційні втрати будуть мінімальні; врахування внутрішніх і зовнішніх факторів впливу у корпоративних приміщеннях, можливість застосування для радіоканалів Wi-Fi та 5G. Недолік – значний період спостереження, не менше 360 с.

Третій розділ «Розроблення моделі та методу визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж» – присвячено дослідженню теоретичним та практичним аспектам визначення інформаційних параметрів радіоканалів на основі пропускну здатності та ефективної швидкості передачі інформації та врахування дії різного роду факторів впливу. Для цього, в роботі *вдосконалено математичну модель радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж* на основі коефіцієнту ефективності передачі інформації, яка дає змогу, оцінювати вплив різного роду технологій та активність абонентів на кількість корисної інформації враховуючи специфікації стандартів, яку можна записати так:

$$K_{eff} = \frac{V_{eff}}{V_{pl}} = \frac{m(L_{MPDU} - L_{c.MPDU} - L_{c.TCP/IP})}{2 - (1 - p)^{v_c} \sum_{i=1}^k \gamma_i ((t_{RTS/CTS} + t_{ck}) V_{pl} + L_{RTS} + L_{CTS} + mL_{MPDU} + L_{ACK})}, \quad (7)$$

де $L_{c.MPDU}$ – довжина службової інформації у кадрі MPDU; L_{MPDU} – довжина кадру MPDU, що вміщує корисну інформацію; L_{RTS} – довжина RTS кадру; L_{CTS} – довжина CTS кадру; L_{ACK} – довжина кадру підтвердження; m – кількість MPDU кадрів в агрегованому кадрі AMPDU; t_{ck} – час сканування абонентом часового слоту; γ_i – імовірність надходження кадру від k -го абонента у мережі; p – імовірність виникнення помилки в кадрі; v_c – кількість інформації, із врахуванням циклу передачі; k – кількість активних радіоканалів у мережі; V_{pl} – пропускну здатність; V_{eff} – ефективна швидкість передачі інформації; v_c – кількість інформації, із врахуванням циклу передачі.

Модель призначена для теоретичного оцінювання ефективності передачі інформації по радіоканалах та прогнозування кількості корисної інформації при врахуванні різного роду технологій та кількості активних абонентів у мережі на

основі специфікацій стандартів 5G і Wi-Fi. Результати математичних досліджень моделі (7) для радіоканалів стандарту Wi-Fi наведено на рис. 5.

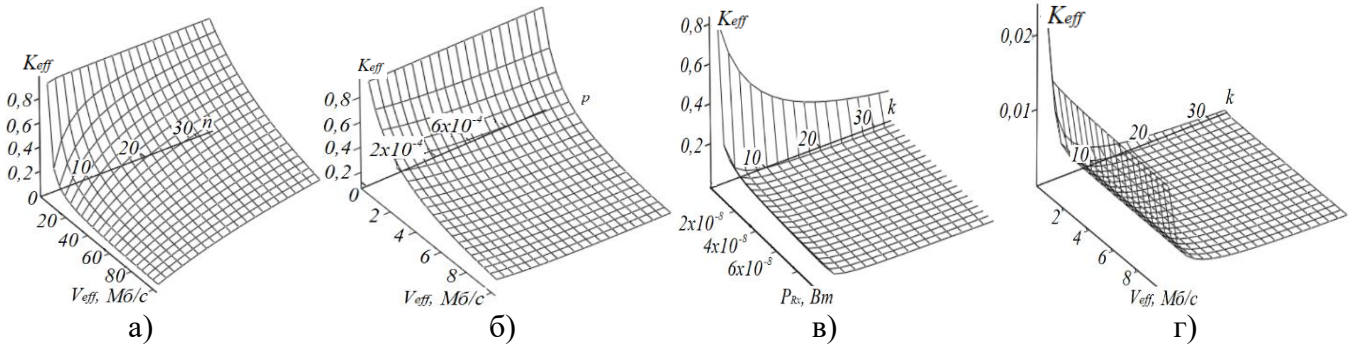


Рис. 5. Результати досліджень моделі (7) для радіоканалу стандарту 802.11 і високопродуктивного режиму роботи у приміщенні: а – для агрегації кадрів; б – при існуванні кадрів із помилками; в – для зміни потужності сигналу на вході приймача; г – для зміни ефективного швидкості передачі інформації

У роботі вперше запропоновано **інтегральні показники інформаційної ефективності радіоканалів** для визначення впливу різного роду архітектурних перешкод на процеси передавання даних в межах приміщень на основі проведення експериментальних досліджень та використання регресійних моделей:

-для одного активного радіоканалу:

$$K_{eff}^e \approx \frac{1}{V_{pl,max}} \sum_{i=1}^k \lambda_i (s_i - (-u_i \pm \Delta u_i) \cdot l - \Delta V_i); \quad (8)$$

-для двох активних радіоканалів:

$$K_{eff}^e \approx \frac{1}{V_{pl,max}} \sum_{i=1}^k \lambda_i \left(\frac{2(x_i - (f_i \pm \Delta f_i) \ln(l)) \cdot ((u_i \pm \Delta u_i) l^2 - (z_i \pm \Delta z_i) l + x_i + 3)}{(u_i \pm \Delta u_i) l^2 - (f_i \pm \Delta f_i) \ln(l) - (z_i \pm \Delta z_i) l + x_i + 3} - \Delta V_i \right); \quad (9)$$

де u, z, f – коефіцієнти спадання регресійних моделей; x – початковий коефіцієнт ефективного швидкості передачі; l – довжина радіоканалу; $\Delta u, \Delta s, \Delta f$ – коефіцієнти які визначають межі допустимих змін коефіцієнтів спадання; k – кількість перешкод; λ_i – вагові коефіцієнти перешкоди.

Для оцінювання впливу архітектурних перешкод використовуються інтервали $\Delta f, \Delta u$ і Δs , на основі яких, можна встановити як змінюється інформаційна ефективність радіоканалу в залежності від кількості перешкод та їх густини, як показано на рис. 6.

Інтегральні показники ефективності радіоканалів (8) і (9) призначені для оцінювання та прогнозування інформаційних втрат в умовах існування різного роду архітектурних перешкод по всій довжині покриття мережі, а також оцінювання двох радіоканалів при максимальному навантаженні, та є справедливими для стандартів Wi-Fi і 5G. Рівень адекватності 0,8..0,9. До недоліків можна віднести: кількість активних радіоканалів, не враховуються інші фактори впливу, для врахування флуктуацій необхідно створення значної бази експериментальних досліджень коефіцієнтів відхилення.

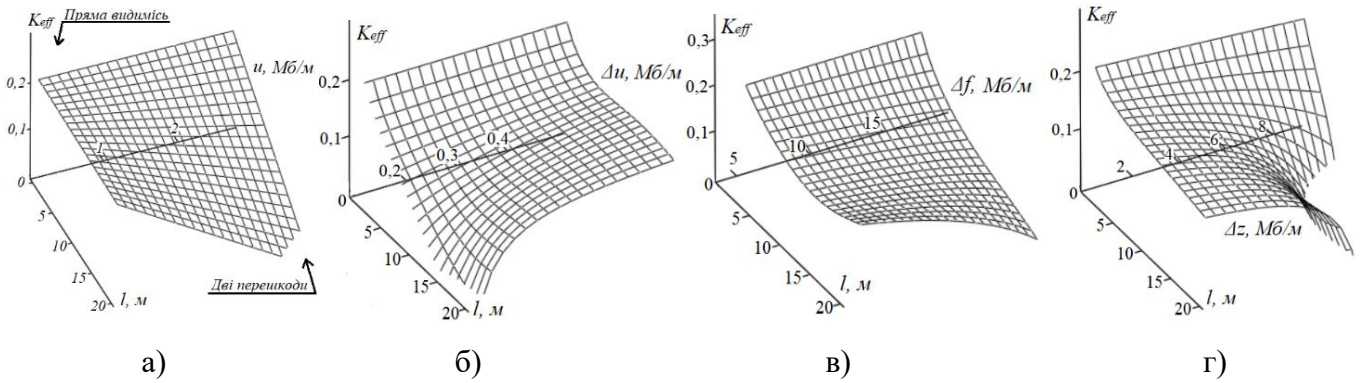


Рис. 6. Графіки оцінювання показника інформаційної ефективності для радіоканалу стандарту 802.11n із смугою 20 МГц від допустимих меж змін коефіцієнтів спадання: а – для u ; б – для Δu ; в – для Δf ; г – для Δs

Для вирішення цього, було запропоновано **метод визначення ефективної швидкості передачі інформації в радіоканалі** на основі статистичних параметрів програмно-апаратних засобів моніторингу приймальних пристроїв, суть якого полягає в наступному.

На *першому етапі* проводиться оцінювання середньостатистичних параметрів циклу передачі кадрів у радіоканалі. Для цього необхідно здійснити обмін тестовою інформацією, та отримати часовий розподіл параметрів N_{MSDU}^{Tx} (кількість переданих кадрів), N_{MSDU}^{Rx} (кількість прийнятих кадрів), N_r (кількість циклів повторної передачі кадру), $N_{m,r}$ (кількість циклів повторної передачі кадру більше одного разу) та N_f (кількість втрачених кадрів). Як правило, це можна здійснити на основі доступу до будь-якої інфокомунікаційної послуги (наприклад тест пропускної здатності інтернет з'єднання) та отримати середньостатистичні значення, із періодом спостереження не менше 360 с, на основі наступних виразів:

$$N_{MSDU}^{Rx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{MSDUi}^{Rx}, \quad N_{MSDU}^{Tx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{MSDUi}^{Tx}, \quad N_r^m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_r + N_{m,r})_i, \quad N_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_f^i,$$

де n – кількість вимірювань на протязі періоду спостереження.

На *другому етапі* розраховується ефективна швидкість передачі інформації у радіоканалі. Середньостатистичне значення ефективної швидкості передачі інформації за період спостереження у будь-якій точці розташування приймального пристрою в межах зони покриття мережі можна визначити так:

$$V_{eff} = \frac{K(L_{MSDU} - L_{c.TCP/IP})}{tn} \sum_{i=1}^n (N_{MSDU}^{Tx} + N_{MSDU}^{Rx} - (N_r + N_{m,r})_i - N_f^i), \quad (10)$$

де K – коефіцієнт завантаження радіоканалу службовою інформацією моніторингу.

Для визначення ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням довжини радіоканалу та флуктуацій використовується наступна регресійна модель:

$$V_{eff} = \frac{K(L_{MSDU} - L_{c.TCP/IP})}{t} F(l) + N_0^{Tx} + N_0^{Rx} - \left(\frac{5}{4} e^{kl} + \frac{1}{20} e^{0,4kl} \right) N_{0r} \pm \Delta V,$$

$$F(l) = \begin{cases} (a_1^{Tx} + a_1^{Rx})l, & \text{для } 0,1 \leq k \leq 0,2, \\ (a_2^{Tx} + a_2^{Rx}) \ln l, & \text{для } 0,2 < k \leq 0,3. \end{cases} \quad (11)$$

де a_1 і a_2 – коефіцієнти спадання регресії для переданих та прийнятих кадрів; N_0^{Tx} і N_0^{Rx} – початкові рівні регресії для переданих та прийнятих кадрів; l – довжина радіоканалу; N_{or} – початковий рівень регресії для циклів перезапиту; k – коефіцієнт зростання регресії для циклів перезапиту; ΔV – інтервал флуктуацій; $F(l)$ – функція спадання регресійної моделі.

Коефіцієнт k залежить від кількості архітектурних перешкод і густини матеріалу. Для отриманих досліджень встановлено $k=0.1 \dots 0.3$, де нижнє значення це пряма видимість, а верхнє – існування перешкоди типу «цегла». Якщо не враховувати максимум випромінювання, то початкові рівні можна визначити за наступними виразами:

$$N_0^{Tx} + N_0^{Rx} \approx \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n (N_{MSDU.i}^{Tx} + N_{MSDU.i}^{Rx})}{4na_1}, & \text{для лінійної залежності,} \\ \frac{\sum_{i=1}^n (N_{MSDU.i}^{Tx} + N_{MSDU.i}^{Rx})}{1,4na_2}, & \text{для логарифмічної залежності.} \end{cases}$$

$$N_{or} \approx \frac{\sum_{i=1}^n N_{r.i}}{ne^{2k}}.$$

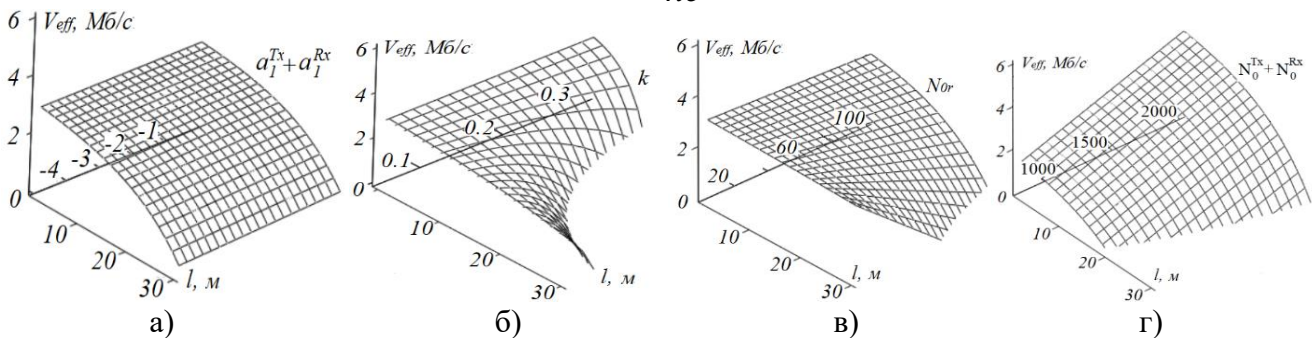


Рис. 7. Результати математичних досліджень для залежностей V_{eff} від: коефіцієнтів спадання переданих та прийнятих кадрів MSDU (а); циклів перезапиту (б); переданих та прийнятих кадрів (в); циклів перезапиту (г)

Третій етап – оцінювання інтервалу флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації на основі виразу:

$$\Delta V = (\Delta N - \Delta N_r - \Delta N_{m.r} - \Delta N_f) \frac{K(L_{MSDU} - L_{c.TCP/IP})}{t}. \quad (12)$$

де ΔN , ΔN_r , $\Delta N_{m.r}$ і ΔN_f – інтервали флуктуацій відповідних параметрів моніторингу.

Інтервали флуктуацій параметрів моніторингу можна визначити так:

$$\Delta N_x \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\min N_x(t); \max N_x(t)). \quad (13)$$

де x – індекс відповідного параметра; \max – кількість максимумів на часовій характеристиці; \min – кількість мінімумів на часовій характеристиці.

На *четвертому етапі* отримується результат визначення ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням інтервалу флуктуацій та похибки. Кінцевий результат можна записати так:

$$V_{eff}^{Rx} - \Delta V - \sigma_V \leq V < V_{eff}^{Rx} + \Delta V + \sigma_V. \quad (14)$$

де σ_V – випадкова похибка оцінювання ефективної швидкості передачі інформації.

Призначення методу полягає у підвищенні ефективності визначення ефективної швидкості передачі інформації у приміщеннях на етапах неперервної оптимізації корпоративних телекомунікаційних мереж, використовуючи можливості спеціалізованого і абонентського обладнання та додатків моніторингу прикладного рівня, що є широко доступним та легко реалізується на практиці; оптимізація технічних параметрів корпоративних телекомунікаційних мереж із використанням програмно-апаратних засобів спеціалізованих або абонентських приймальних пристроїв; оцінювання дії різного роду факторів впливу та ефективності технологій покращення технічних параметрів радіоканалів в реальному часі.

Достовірність такого методу залежить від достовірності оцінювання параметрів моніторингу та точності вимірювання абонентського пристрою. Достовірність методу складає 0,95, а ступінь адекватності запропонованих моделей становить 0,9. До недоліків можна віднести: довжина радіоканалу до 40 м, недосить поширене обладнання що підтримує оцінювання всіх статистичних параметрів циклів передачі кадрів, та для високої достовірності необхідно мати базу визначених коефіцієнтів спадання для різного роду факторів впливу. Похибка оцінювання може досягати до 0,6 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для мінімальної дії факторів впливу у приміщенні.

У четвертому розділі «Метод оцінювання гарантованої пропускну здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж» – на базі функціонального зв'язку між основними параметрами радіоканалу проведено теоретико-експериментальні дослідження статистичного зв'язку та запропоновано **метод оцінювання гарантованої пропускну здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж** для передачі різних типів трафіку, що дало змогу підвищити швидкодію отримання результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування. Суть методу полягає в наступному.

На *першому етапі* за допомогою програмно-апаратних засобів приймального пристрою виконується оцінювання потужності сигналу на вході приймача P_m аналогічно виразу (1).

На *другому етапі* розраховується ефективна швидкість передачі інформації на основі моделі статистичного зв'язку із врахуванням довжини радіоканалу:

$$V_{eff}(l) \approx \begin{cases} K(a_1 l + P_m - 2a_1 \pm \Delta P) + S_0, & \text{для } l \leq 16 \text{ м;} \\ K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 \pm \Delta P) + S_0, & \text{для } l > 16 \text{ м.} \end{cases} \quad (15)$$

де K і S_0 – коефіцієнти лінійної регресії статистичного зв'язку, які визначаються експериментально; a_1 і a_2 – коефіцієнти спадання моделей затухання сигналу.

Можливі флуктуації біля стін приміщення можна оцінити на основі виразу із квадратичною функцією:

$$V_{eff}(l) \approx K(\pm a_3(l^2 - 4) + a_4(l - 2) + P_m \mp \Delta P) + S_0, \quad (16)$$

де a_3 і a_4 – коефіцієнти спадання квадратичних моделей затухання сигналу.

На *третьому етапі* визначаються коефіцієнти інформаційної K_v та енергетичної ефективності K_p для всіх типів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж в межах одного стандарту за наступними виразами:

$$K_P = \begin{cases} \frac{K(a_1 l + P_m - 2a_1) + S_0}{a_1 l + P_m - 2a_1}, & \text{для } l \leq 16\text{м}; \\ \frac{K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 \pm \Delta P) + S_0}{a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2}, & \text{для } l > 16\text{м}. \end{cases} \quad (17)$$

$$K_V = \begin{cases} \frac{K(a_1 l + P_m - 2a_1) + S_0}{V_{pl}}, & \text{для } l \leq 16\text{м}; \\ \frac{K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 \pm \Delta P) + S_0}{V_{pl}}, & \text{для } l > 16\text{м}. \end{cases} \quad (18)$$

Четвертий етап – виведення результатів оцінювання із врахуванням інтервалів флуктуацій та похибки вимірювання. Враховуючи, що оцінювання ефективної швидкості передачі інформації виконується на основі потужності сигналу на вході приймача, то враховуючи флуктуації параметра P_m , отримаємо наступну нерівність:

$$\left. \begin{aligned} & K(a_1 l + P_m - 2a_1 - \Delta P - \sigma_P) \\ & K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 - \Delta P - \sigma_P) \end{aligned} \right\} + S_0 < V_{eff} \leq \\ \leq S_0 + \begin{cases} K(a_1 l + P_m - 2a_1 + \Delta P + \sigma_P), & \text{для } l \leq 16\text{м}; \\ K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 + \Delta P + \sigma_P), & \text{для } l > 16\text{м}. \end{cases} \quad (19)$$

або враховуючи відповідність параметрів ΔP і ΔV , які було встановлено експериментально, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} & K(a_1 l + P_m - 2a_1) \\ & K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2) \end{aligned} \right\} + S_0 - \Delta V - \sigma_V < V_{eff} \leq \\ \leq S_0 + \Delta V + \sigma_V + \begin{cases} K(a_1 l + P_m - 2a_1), & \text{для } l \leq 16\text{м}; \\ K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2), & \text{для } l > 16\text{м}. \end{cases} \quad (20)$$

де σ_P – випадкова похибка оцінювання потужності сигналу на вході приймача; σ_V – випадкова похибка оцінювання ефективної швидкості передачі інформації.

П'ятий етап – встановлення границі гарантованої пропускної здатності радіоканалу для передачі трафіку. Експериментально встановлено, що у радіоканалі в умовах приміщення, при забезпеченні високої якості інфокомунікаційної послуги, бітова швидкість $V_{\bar{o}}$ повинна відповідати наступній умові:

$$V_{\bar{o}} \leq (0,8..0,7)V_{eff} - \Delta V - \sigma_V. \quad (21)$$

Приклад оцінювання гарантованої пропускної здатності відеопотоку із частотою 30 к/с для сервісу Youtube із врахуванням бітової швидкості 4к – 56 Мбіт/с та HD – 10 Мбіт/с у просторі приміщення на базі радіоканалу стандарту 802.11n 40 МГц для кутового та центрального положення точки доступу, наведено на рис. 8.

Аналогічні розрахунки можна отримати для будь-якого радіоканалу із врахуванням висоти приміщення, наповненості корпоративних приміщень об'єктами, інтервалів флуктуацій та врахуванням флуктуацій біля стін.

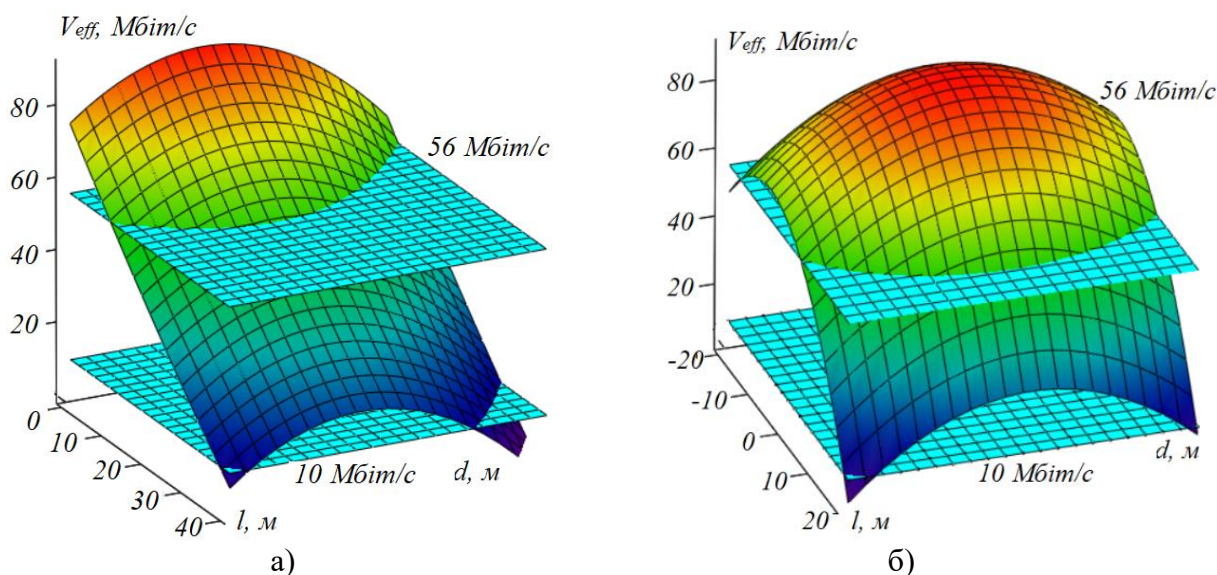


Рис. 8. Оцінювання гарантованої пропускної здатності у просторі приміщенні для передачі відеотрафіку для: а – кутового положення ТД; б – для центрального положення ТД

Запропонований метод є відносно простим і доступним та базується на вимірюванні основного енергетичного параметра P_m за допомогою програмно-апаратних засобів моніторингу абонентського пристрою. Операції оцінювання параметра P_m можуть бути як для прямої відстані між точкою доступу та приймальним пристроєм, так і з врахуванням просторових розподілів для отримання відповідних результатів для ефективної швидкості передачі інформації у будь-якому корпоративному приміщенні для конкретного абонента із врахуванням всіх діючих факторів впливу.

Метод характеризується високою швидкістю отримання результатів оцінювання, що дає змогу значно зменшувати час початкової оптимізації корпоративних мереж. Якщо враховувати можливості сучасних абонентських пристроїв для математичних обчислень, то швидкістю отримання кінцевого результату буде визначатись часом вимірювання середньостатистичного параметра потужності сигналу на вході приймача. Для достовірності 0,95 період спостереження складе 20 с із похибкою до $\sigma_P \pm 0,5$ дБм та $\sigma_V \pm 0,06$ Мб/с, а для 5 с – до $\sigma_P \pm 1$ дБм та $\sigma_V \pm 0,1$ Мб/с, що в загальному дасть похибку не більше 5% для високопродуктивних радіоканалів, що є меншим ніж середньостатистичні значення інтервалів флуктуацій для прямої видимості.

Як обмеження у застосуванні запропонованого методу, можна виділити існування значної кількості факторів впливу, особливо інтерференційних завад. Збільшення кількості інтерференційних завад призведе до збільшення похибки оцінювання, оскільки такі завади зміщують характеристики радіоканалу до моделі логарифмічного характеру. Запропонований метод об'єднує операції оцінювання параметра P_m , оцінювання ефективності радіоканалу по всій довжині та можливий вплив факторів впливу.

У п'ятому розділі «Розроблення та дослідження інтегральних показників факторів впливу у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж» – отримано та проаналізовано результати експериментальних досліджень дії факторів впливу на параметри радіоканалів в умовах корпоративних приміщень. На основі

цього запропоновано *узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах*, які використовують еталонні моделі середньостатистичних значень в межах покриття мереж радіодоступу, що дало можливість прогнозувати дію кожного окремого фактору на характеристики радіоканалу.

Узагальнені моделі оцінювання основних параметрів радіоканалу із врахуванням факторів впливу можна записати так:

$$P_{Rx} \approx (f_P(l, d) + P_m - f_P(2)) K_P^e, \quad V_{eff} \approx (f_V(l, d) + V_m - f_V(2)) K_V^i. \quad (22)$$

де $f_P(l, d)$ і $f_V(l, d)$ – функції просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі для інформації у приміщенні відповідно; $f_P(2)$ і $f_V(2)$ – функції зв'язку початкових значень із параметрами вимірювання P_m і V_m відповідно; K_P^e , K_V^i – інтегральні показники впливу енергетичних та інформаційних факторів відповідно.

Інтегральні показники факторів впливу можна визначити на основі еталонних моделей, що оцінюють середньостатистичні значення, та моделей що враховують дію факторів впливу. Тоді можна записати так:

$$K_P^e \approx \sum_{k=1}^v \varphi_k \left(\frac{f_P(l, d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{Tx.i} - \left(\sum_{j=1}^m P_{e.j} \right)_i}{L_i} \right) - f_P(l_0)}{f_P(l, d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{Tx.i}}{L_i} \right) - f_P(l_0)} \right)_k, \quad (23)$$

$$K_V^i \approx \sum_{z=1}^c \rho_z \left(\frac{f_V(l, d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(V_{m.i} - \sum_{i=1}^s V_{i.i} \right) - f_V(l_0)}{f_V(l, d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m.i} - f_V(l_0)} \right)_z.$$

де P_{Tx} – потужність сигналу випромінювання передавача; L – затухання сигналу у середовищі передачі; P_e – рівень потужності енергетичного фактору впливу; m – кількість існуючих факторів впливу у радіоканалі; n – кількість вимірів за період спостереження V_i – швидкість передачі інформації, що втрачається із-за інформаційного фактору впливу; s – кількість інформаційних факторів впливу у радіоканалі; v – кількість енергетичних показників впливу; c – кількість інформаційних показників впливу; φ_k і ρ_v – вагові коефіцієнти факторів впливу.

Для статистичного зв'язку основних параметрів радіоканалу, узагальнену модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації можна записати так:

$$V_{eff}(P_{Rx}) \approx K (f_P(l, d) + P_m - f_P(2)) K_i^P + S_0, \quad (24)$$

а коефіцієнт інформаційної ефективності так:

$$K_V = \frac{K (f_P(l, d) + P_m - f_P(2)) K_P^e + S_0}{V_{pl}}. \quad (25)$$

Достовірність оцінювання за такими моделями залежить від рівня адекватності еталонних моделей оцінювання основних параметрів, яка буде збільшуватись при розширенні бази даних експериментальних досліджень, як для існуючих стандартів побудови радіоканалів, так і для майбутніх модифікацій.

Як приклад, врахування дії найбільш вагомих факторів впливу на параметри та характеристики радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, можна навести інтерференційні завади, для яких показник впливу, можна записати так:

$$K_{in}^P = \frac{P_{Rx}^{in}(l)}{P_{Rx}^e(l)}, \quad K_{in}^V = \frac{V_{eff}^{in}(l)}{V_{eff}^e(l)}, \quad (26)$$

де $P_{Rx}^{in}(l)$ – регресійна модель оцінювання потужності сигналу на вході приймача із дією інтерференційної завади; $V_{eff}^{in}(l)$ – регресійна модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації при дії інтерференційної завади.

Результати оцінювання наведено на рис. 9 і 10 (результати отримані для радіоканалу стандарту 802.11n із смугами 20 МГц та 40 МГц. Архітектурні перешкоди являли собою конструкції із дерева, як перший тип, та цегли як другий. Для аналізу результатів досліджень введено наступні види позначень на графіках: крива 1 – канал зі смугою 20 МГц без архітектурних перешкод; крива 2 – канал зі смугою 20 МГц і перешкоди першого типу; крива 3 – канал зі смугою 20 МГц і перешкоди другого типу; крива 4 – канал зі смугою 40 МГц без архітектурних перешкод; крива 5 – канал зі смугою 40 МГц і перешкоди першого типу; крива 6 – канал зі смугою 40 МГц і перешкоди другого типу).

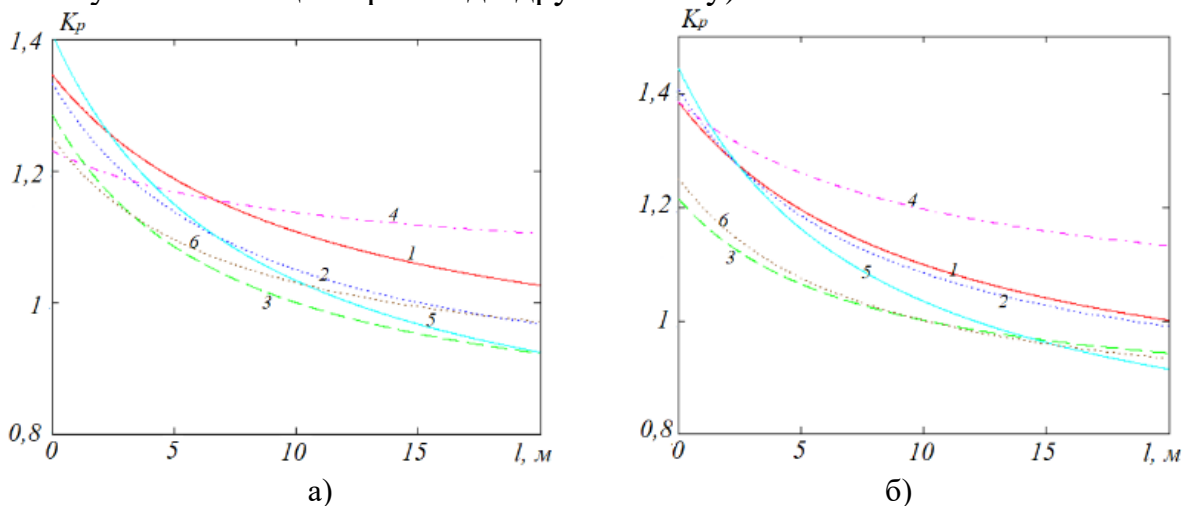


Рис. 9. Залежності енергетичного показника впливу від довжини радіоканалу для: а – суміщеного каналу двох абонентів; в – сусіднього каналу двох абонентів

Таким чином, для параметра P_{Rx} існування інтерференційних завад дає незначне послаблення рівня сигналу, що збільшується відносно кількості активних абонентів. Для параметра V_{eff} спостерігаються значні відхилення для різних моделей оцінювання із-за обмежень частотного ресурсу та механізму боротьби між всіма активними пристроями, які попадають у суміщений і сусідній інтерференційні канали.

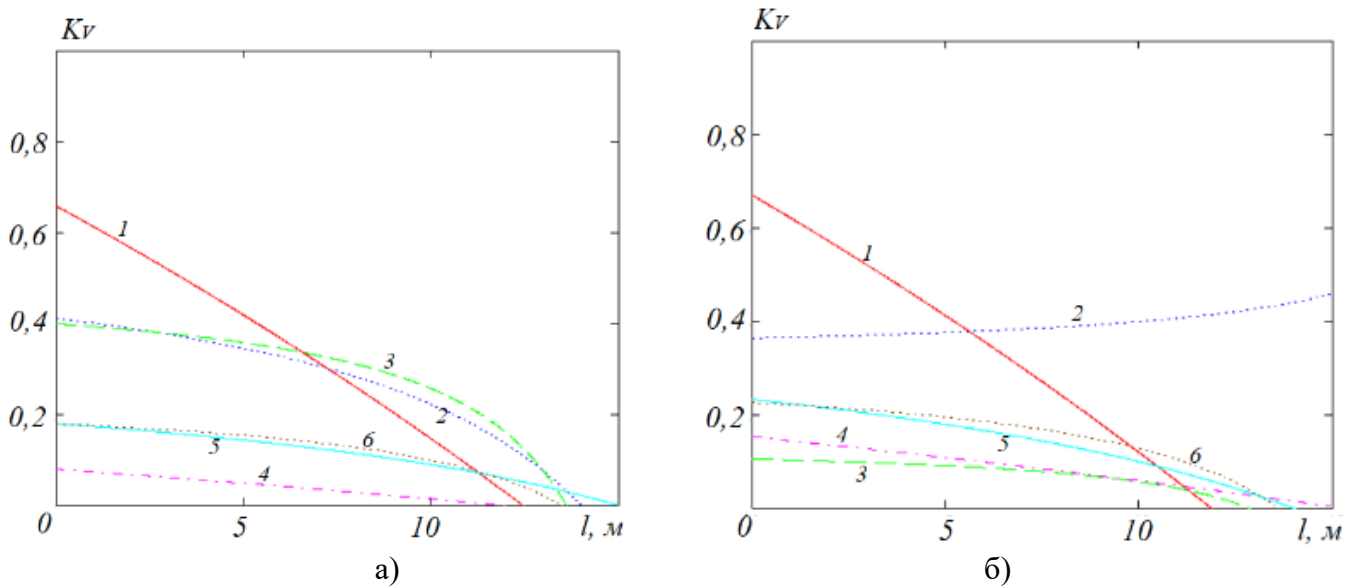


Рис. 10. Залежності інформаційного показника впливу від довжини радіоканалу для: а – суміщеного каналу двох абонентів; б – сусіднього каналу двох абонентів

Узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах призначені для підвищення ефективності оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж як доповнення до розроблених методів.

Шостий розділ «Практичні аспекти застосування запропонованої методології для покращення технічних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж» присвячено розробленню методології оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів та практичних рекомендацій для покращення технічних показників корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi. Для цього розроблено логіко-аналітичний інструмент процесу оцінювання, визначено достовірність вимірювання засобів моніторингу, достовірність розроблених методів та адекватність отриманих у роботі моделей, а також виконано експериментальні дослідження практичної реалізації на основі структури корпоративної телекомунікаційної мережі.

На основі обробки експериментальних результатів досліджень радіоканалів у корпоративних приміщеннях, *вперше запропоновано стохастичну модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій*. Така модель використовує співвідношення взаємозв'язку статистичної імовірності, дисперсії та інтервалу флуктуацій, а також статистичний зв'язок між флуктуаціями основних параметрів радіоканалу, що дає можливість значно пришвидшити отримання кінцевого результату оцінювання, оскільки за один цикл оцінювання можна отримати інформацію про технічні параметри радіоканалу та наближений результат інтервалів флуктуацій.

Якщо розглядати регресійний аналіз експериментальних результатів, то діаграми розсіювання параметра P_{Rx} для лінійної регресії, можуть бути представлені, як показано на рис. 11.

Якщо не враховувати залежність рівня флуктуацій від довжини радіоканалу, то границі довірчих інтервалів регресії будуть залежати від дисперсії та довірчої імовірності.

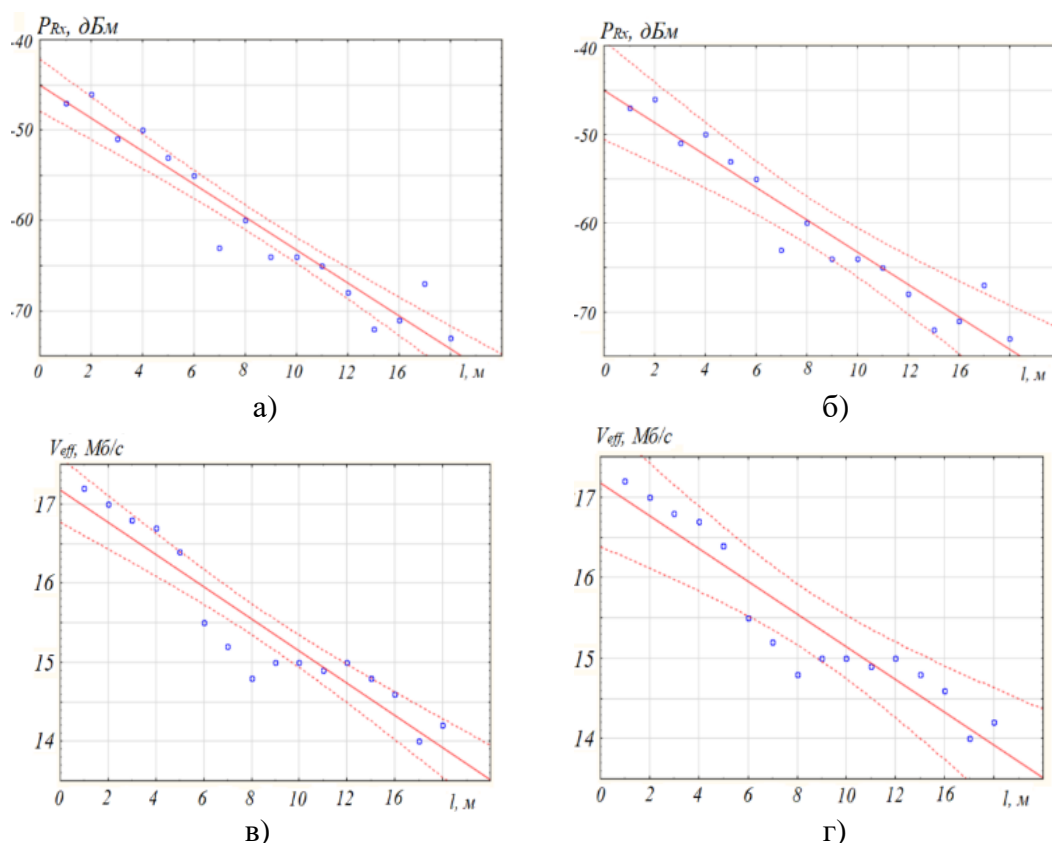


Рис. 11. Діаграма розсіювання параметра: P_{Rx} для імовірності 0,95 (а); P_{Rx} для імовірності 0,999 (б); V_{eff} для імовірності 0,95 (в); V_{eff} для імовірності 0,999 (г)

Рівень флуктуацій можна розрахувати так:

$$\Delta P \approx 2t\sigma_P^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}, \quad \Delta V \approx 2t\sigma_V^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}. \quad (27)$$

Для перевірки адекватності отриманих виразів (27) проведено порівняння розрахунків із результатами експериментальних досліджень для наступних радіоканалів: 802,11n, 40 МГц, 2,4 ГГц; 802,11ac, 80 МГц; 802,11n, 20 МГц, 5 ГГц. Результати наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця вимірювальних та розрахункових інтервалів флуктуацій

Параметри	ΔP експериментальне для $l=16$ м	ΔP розрахункове $p=0,85$	ΔV експериментальне для $l=80$ м	ΔV розрахункове $p=0,97$
радіоканал 802,11n, 40 МГц, 2,4 ГГц				
ΔP	± 4 дБм	± 3 дБм	± 6 дБм	± 5 дБм
ΔV	$\pm 0,5$ Мб/с	$\pm 0,7$ Мб/с	± 2 Мб/с	$\pm 1,4$ Мб/с
радіоканал 802,11ac, 80 МГц				
ΔP	± 5 дБм	$\pm 4,5$ дБм	± 8 дБм	± 9 дБм
ΔV	$\pm 1,5$ Мб/с	$\pm 1,2$ Мб/с	± 2 Мб/с	$\pm 1,8$ Мб/с
радіоканал 802,11n, 20 МГц, 5 ГГц				
ΔP	± 2 дБм	± 3 дБм	± 4 дБм	± 5 дБм
ΔV	$\pm 0,1$ Мб/с	$\pm 0,13$ Мб/с	$\pm 0,3$ Мб/с	$\pm 0,2$ Мб/с

Із табл. 1 видно, що при імовірності 0,85 отримано усереднене значення інтервалу флуктуацій, що відповідає прямій видимості та із мінімальною кількістю завад при експериментальних вимірюваннях. При більшій довжині радіоканалу у приміщенні збільшується вплив фактору багатопробеневого-поширення хвиль, що в результаті відповідає імовірності 0,97. Наведені результати є підтвердженням взаємозв'язку основних параметрів радіоканалу із інтервалом розсіювання регресії та можливістю визначення рівня флуктуацій на основі довірчої імовірності.

Залежності взаємозв'язку довірчої імовірності, дисперсії та рівня флуктуацій основних параметрів радіоканалу, на основі моделей (27), наведено на рис. 12.

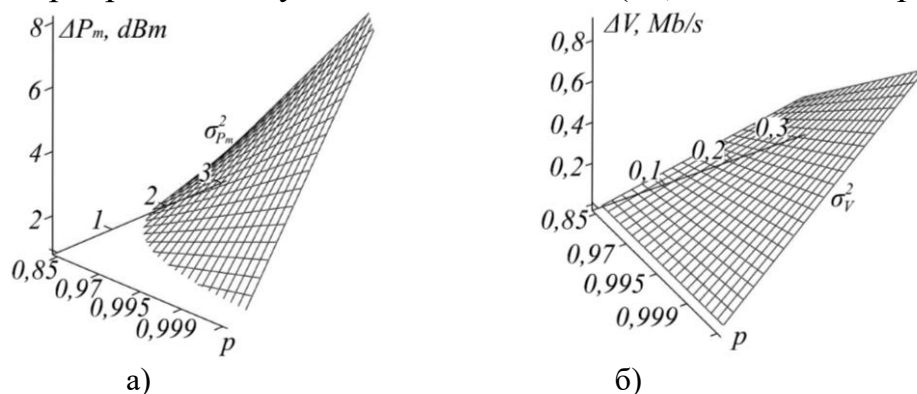


Рис. 12. Залежності взаємозв'язку довірчої імовірності, дисперсії та рівня флуктуацій для: а – потужності сигналу на вході приймача; б – ефективної швидкості передачі інформації

Як видно із рис. 12, якщо враховувати значну дію факторів впливу, при флуктуаціях до $\pm 5..10$ дБм, які приводять до флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації до $\pm 0,1..0,5$ Мб/с, то еквівалент довірчих інтервалів буде визначатись імовірністю на рівні 0,999. Такі відхилення є відносно незначними для флуктуацій, що отримані експериментальним шляхом та автоматично можуть враховуватися в процесі встановлення певного запасу при умовах визначення гарантованої пропускнуої здатності радіоканалу.

Вперше запропоновано методологію оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, що дає можливість створення логіко-аналітичного інструменту для підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації. Блок схема запропонованої методології та її основні етапи підвищення ефективності оцінювання радіоканалів наведені на рис. 13.

Перший етап. Оцінювання покриття мережі у приміщенні $P_{RX}(l,d)$.

Другий етап. Умова порівняння дій, які привели до підвищення рівня потужності сигналу на вході приймача абонентського пристрою:

$$K_p = \frac{P_{Rx.i}(l,d)}{P_{Rx.i+1}(l,d)},$$

де i – кількість наперед заданих дій, що впливають на рівень потужності сигналу на вході приймача.

Третій етап. Цикл виконання запланованих дій: пошук оптимального положення ТД у приміщенні, налаштування діаграми спрямованості антенної системи, регулювання потужності випромінювання ТД і абонентського пристрою для

зменшення ефекту несиметричності, зміна модуляції, зміна частотного діапазону, зміна частотного каналу.

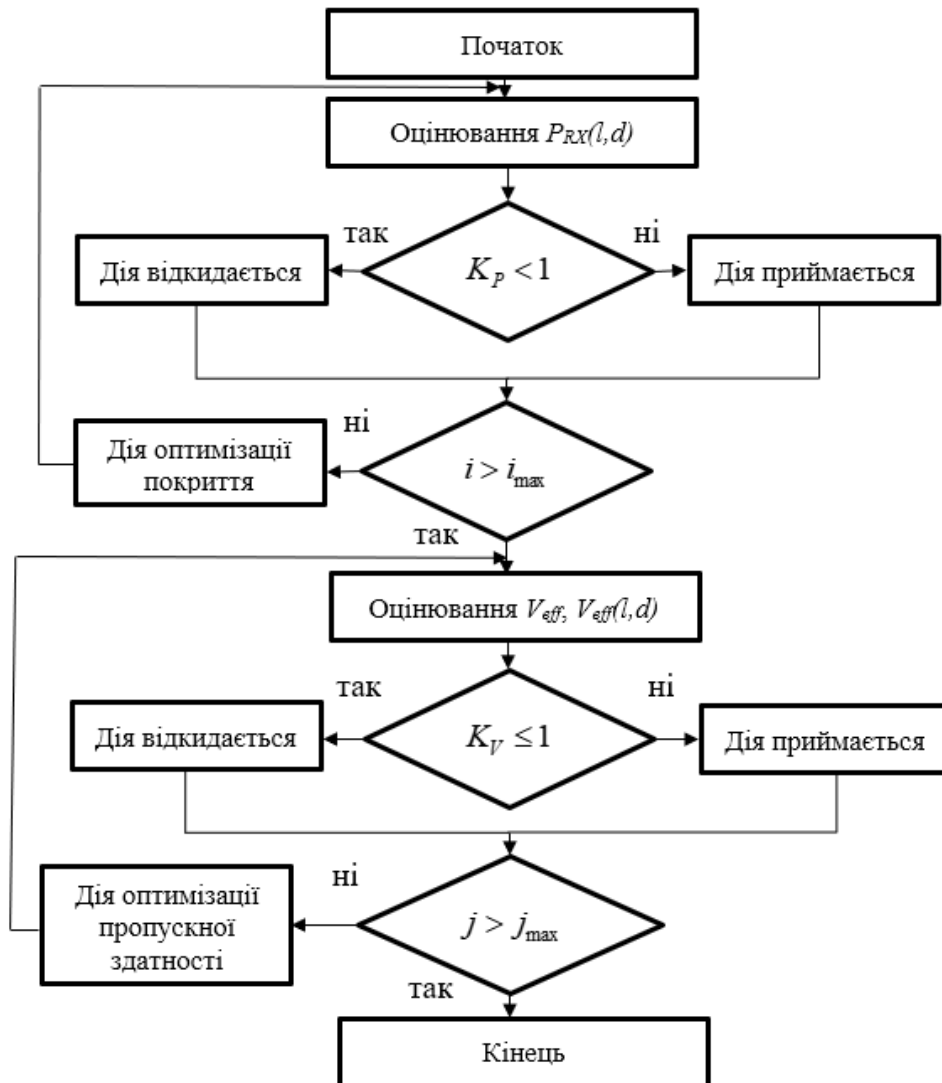


Рис. 13. Блок-схема методології підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж

В результаті отримується максимально можливий рівень сигналу для покриття максимально можливої площі приміщення із умовою мінімальних інформаційних втрат.

Четвертий етап. Використання методу оцінювання ефективної швидкості передачі інформації V_{eff} або отримання просторового розподілу $V_{eff}(l,d)$.

П'ятий етап. Умова порівняння дій, які привели до підвищення ефективної швидкості передачі інформації для абонентського пристрою:

$$K_V = \frac{V_{eff.j}(l,d)}{V_{eff.j+1}(l,d)},$$

де j – кількість наперед заданих дій, що впливають на ефективну швидкість передачі інформації.

Шостий етап. Цикл виконання запланованих дій.

До дій, які можуть покращити параметр V_{eff} , можна віднести: зміна смуги частотного каналу, пошук іншого частотного каналу, визначення оптимальної кількості кадрів в агрегованому кадрі, задання кодування, зміна режиму контролю якості, зміна режиму енергозбереження, довжина захисного інтервалу, зміна режиму шифрування та ін. В результаті отримується максимально-можлива пропускна здатність радіоканалу для абонентського пристрою, а враховуючи можливості статистичного зв'язку отримується розподіл ефективної швидкості передачі інформації у приміщенні.

Як приклад оптимізації, можна навести результати покращення технічних параметрів корпоративної телекомунікаційної мережі, які наведено на рис. 14 і рис. 15.

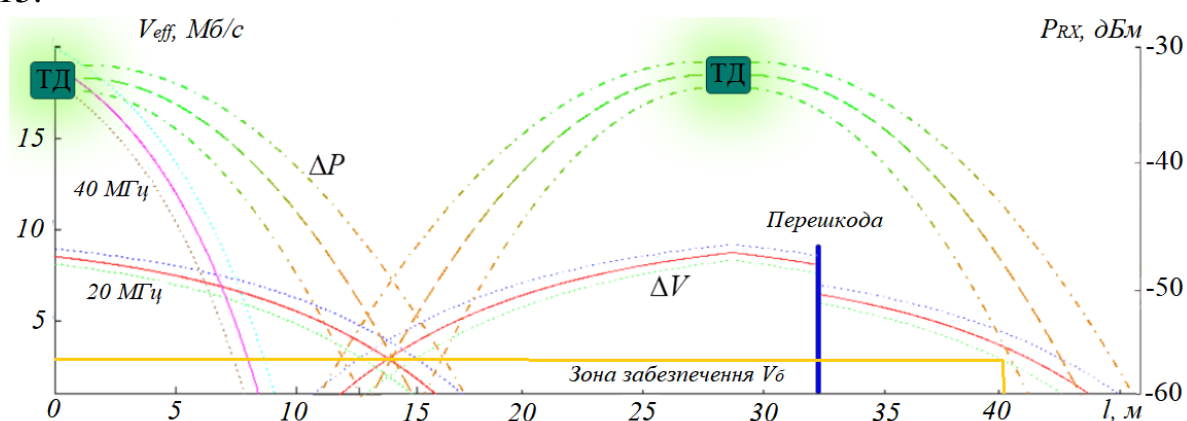


Рис. 14. Зона оптимізованого покриття мережі для забезпечення гарантованої бітової швидкості передачі інформації

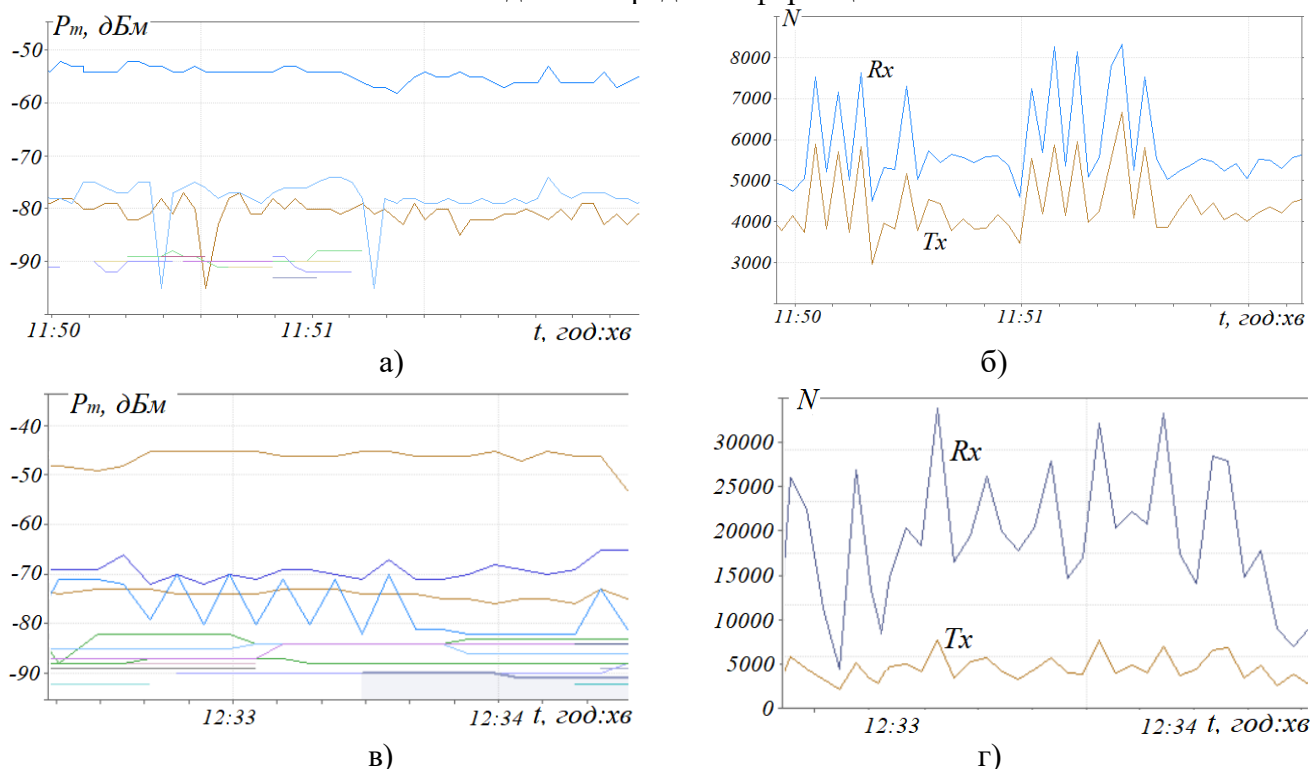


Рис. 15. Фрагмент моніторингу потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації на основі переданих та прийнятих кадрів без застосування методології (а) і (б) та з її використанням (в) і (г)

Аналіз отриманих результатів показує, що покращився параметр потужності сигналу на вході приймача приблизно на 10 дБм, а ефективна швидкість передачі інформації в радіоканалі збільшилась у 3 рази, залишаючи незмінним положення ТД. В результаті отримано більшу площу покриття мережі та у 2 рази вдалося розширити зону гарантованого надання інфокомунікаційної послуги на рівні радіодоступу мережі Wi-Fi, в якій спостерігалася мінімальна кількість інформаційних втрат в умовах існування значних інтерференційних завад.

Ефективність оцінювання запропонованої методології залежить від кількісних та якісних показників. Кількісні показники визначено на основі порівняння результатів оцінювання потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації для існуючих та розроблених моделей, як показано на рис. 16 і рис. 17 (використано наступні позначення на графіках: 1 – результати експериментальних вимірювань радіоканалу 802.11n; 2 – розроблена модель; 3 – ITU-R модель із низьким коефіцієнтом затухання; 4 – логарифмічна модель затухання; 5 – ITU-R модель із середнім коефіцієнтом затухання; 6 – Tata модель затухання у приміщенні).

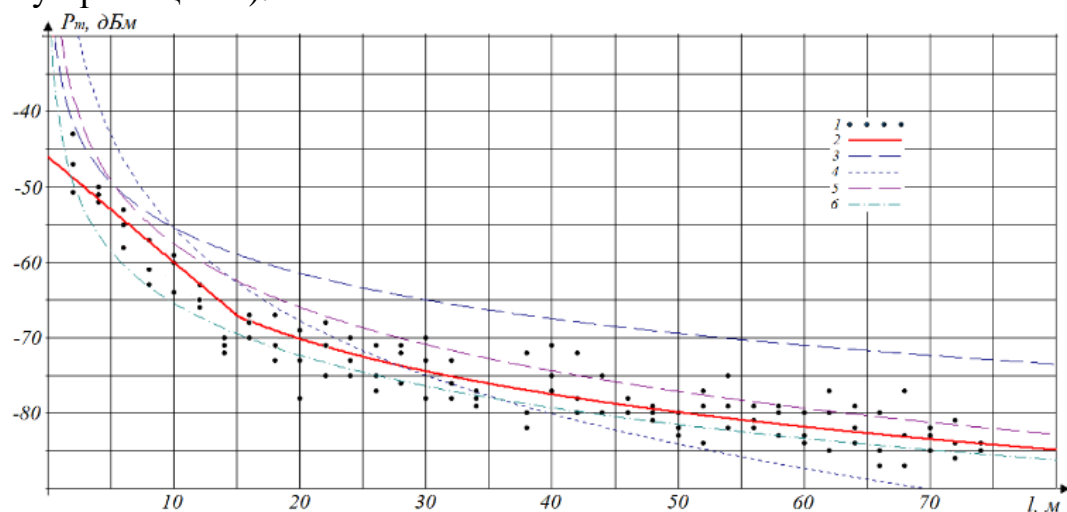


Рис. 16. Результати оцінювання потужності сигналу на вході приймача для різних моделей затухання

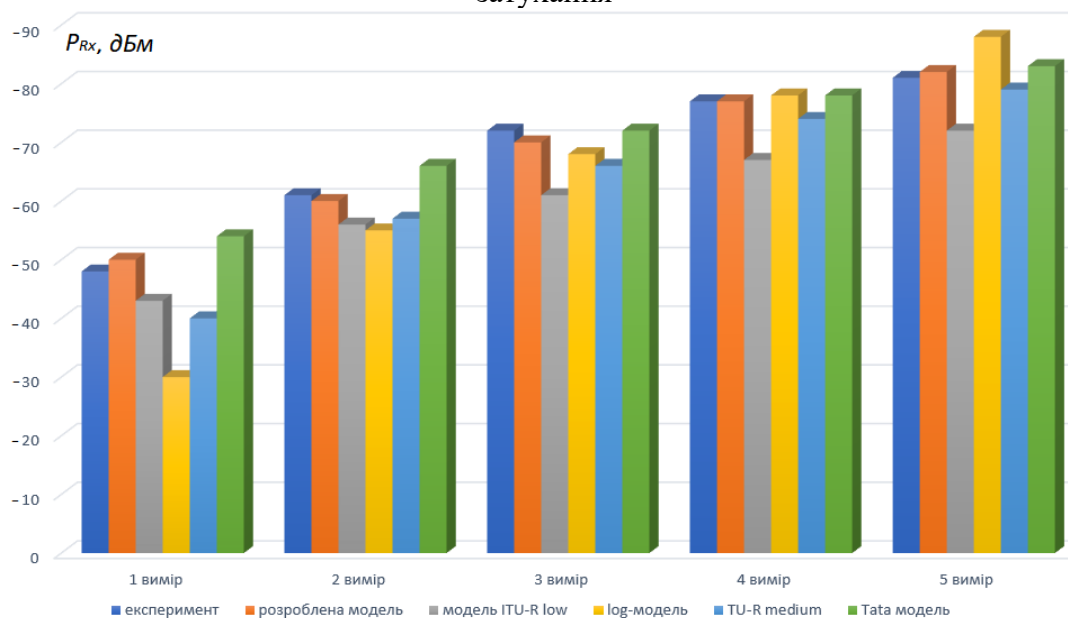


Рис. 17. Гістограма порівняння результатів оцінювання за різними моделями

Оцінювання ефективної швидкості передачі інформації проведено на основі інформаційних моделей із врахуванням довжини кадру, що містить в собі корисну інформацію і наведено на рис. 18 (позначення на графіках: 1 – запропонована модель із дією незначної кількості факторів впливу; 2 – запропонована модель із дією значної кількості факторів впливу; 3 – розрахункова модель із врахуванням імовірності помилок; 4 – розрахункова модель із врахуванням кількості втрачених пакетів; 5 – модель із врахуванням імовірності виникнення колізій при $p=0$; 6 – модель із врахуванням імовірності виникнення колізій при $p=0,1$; 7 – модель із врахуванням імовірності виникнення колізій при $p=0,5$).

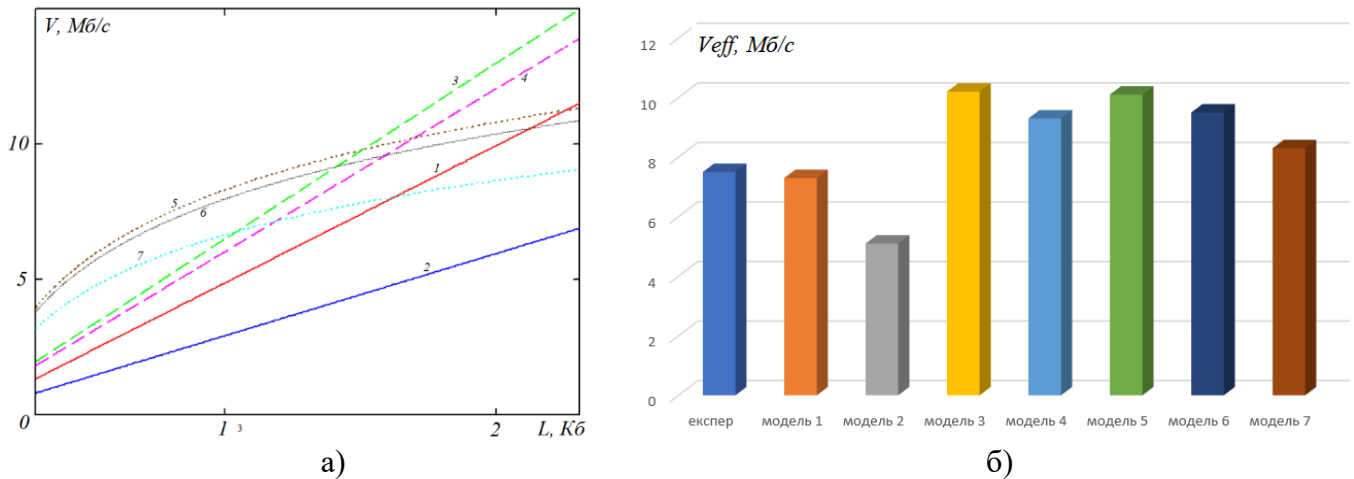


Рис. 18. Результати оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для різних інформаційних моделей (а) та гістограма порівняння (б)

Таким чином, на основі експериментальних досліджень встановлено, що відносно існуючих рішень, ефективність оцінювання потужності сигналу на вході приймача підвищується, в середньому, на 9 %, а ефективної швидкості передачі інформації до 12%.

До якісних показників ефективності можна віднести: врахування максимально-можливої кількості факторів впливу, оцінювання рівня флуктуацій, можливість прогнозування дії різного роду факторів впливу, прогнозування можливостей радіоканалу для передачі різних типів трафіку, можливість використання програмно-апаратних засобів будь-якого приймального пристрою, оцінювання для будь-яких приміщень із різною наповненістю і ін.

Встановлено, що для потужності сигналу на вході приймача довірчі інтервали будуть становити не більше $\pm 0,3$ дБм при умові періоду спостереження рівному 360 с із циклом моніторингу 1 с. Це є досить високим результатом, якщо порівнювати із існуючими флуктуаціями сигналів у просторі при дії різного роду факторів впливу де флуктуації становлять від ± 2 дБм для прямої видимості в приміщеннях. Для інформаційних параметрів процес оцінювання є складнішим, тому тут достатньо проводити 50 вимірів для відхилення не більше $\pm 0,04$ Мб/с ефективної швидкості передачі інформації та не більше ± 7 Мб/с для пропускну здатності.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема розроблення методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів із врахуванням максимальної-можливої кількості різноманітних факторів впливу на основі статистичних зв'язків між ними з метою підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. Проведено аналіз сучасного стану проблеми оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi. Встановлено, що використання класичних підходів до оцінювання дають низьку інформативність, за рахунок існування значної кількості факторів впливу, які не враховуються, або значно зростають затрати на оптимізацію за рахунок використання дорогого обладнання. Це потребує створення нових підходів до процесу оцінювання, аналізу і контролю параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. Визначено, що для підвищення ефективності оцінювання є необхідність детального вивчення, як апаратних рішень технологій радіодоступу, так і процесів які виникають під час передавання даних по радіоканалах.

2. Запропоновано метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача, який, враховує процеси поширення сигналів та внутрішні і зовнішні фактори впливу в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для забезпечення неперервної оптимізації покриття мережі радіодоступу у приміщенні із мінімальними інформаційними втратами. Особливістю методу є використання моделей оцінювання розподілу сигналу безпосередньо у просторі приміщення із врахуванням геометричних розмірів, кутового і центрального положення точки доступу та інтервалу флуктуацій, а також статичних і випадкових факторів впливу, що підвищує ефективність оцінювання на 9% по відношенню до існуючих рішень. Достовірність методу становить 0,997 при оцінюванні потужності сигналу на вході приймача із похибкою $\pm 0,3$ дБм і флуктуаціях $\Delta P = \pm 2$ дБм.

3. Формалізовано інтегральні показники ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації, новизною яких, є можливість прогнозування інформаційних втрат в межах покриття мереж радіодоступу та враховувати різного роду архітектурні перешкоди у корпоративних приміщеннях із рівнем адекватності 0,8..0,9.

4. Розроблено метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для покращення результативності управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах радіодоступу і отримання оптимальних технічних показників при існуванні різного роду факторів впливу у корпоративних приміщеннях. Особливістю методу є використання моделей розрахунку середньостатистичного значення ефективної швидкості передачі інформації за період спостереження у будь-якій точці розташування приймального пристрою в зоні дії покриття мережі або враховувати дію факторів впливу та інтервалу флуктуацій по всій довжині радіоканалу, що

підвищує ефективність оцінювання на 12% по відношенню до існуючих рішень. Достовірність методу становить 0,95 із похибкою оцінювання до 0,6 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для випадку мінімальної дії факторів впливу у приміщенні.

5. Вперше запропоновано метод оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку та збільшення швидкодії обробки результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування. Використання такого методу дало змогу підвищити швидкість отримання кінцевого результату до 5 с із достовірністю 0,95 із похибкою оцінювання до 1 дБм та 1 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с при мінімальній дії факторів впливу у приміщенні.

6. Вперше запропоновано узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах на основі еталонних моделей середньостатистичних значень в межах покриття мереж радіодоступу, що дає можливість оцінювати дію факторів впливу, як окремо так і комплексно. На основі експериментальних досліджень отримано коефіцієнти дії різного роду факторів впливу та інтервали флуктуацій потужності сигналу на вході приймача і ефективної швидкості передачі інформації.

7. Розвинуто математичну модель процесу передавання інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж та стохастичну модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій. На основі математичних досліджень встановлено оптимальні умови роботи радіоканалів при використанні різного роду технологій підвищення ефективності та розподіл ресурсу між активними абонентами у мережі. Також, отримано коефіцієнти просторових розподілів потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації для корпоративних приміщень при кутовому та центральному положенні точки доступу в діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц, що враховують дію статичних і випадкових факторів впливу.

8. Розроблено методологію оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, яка дає змогу підвищити ефективність досліджень, отримання нових знань про роботу радіоканалів в умовах приміщень і дію факторів впливу на їх параметри, що дає можливість створення логіко-аналітичного інструменту для підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації. Це дає змогу створити універсальну систему отримання оптимальних технічних показників для досягнення максимально можливої пропускної здатності та мінімальних інформаційних втрат у межах покриття систем радіодоступу для будь-яких стандартів Wi-Fi і 4G/5G та визначення оптимальних умов їх узгодження при обмеженні енергетичного та частотного ресурсів.

9. Розроблено блок схему запропонованої методології для знаходження оптимальних технічних параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi при існуванні різного роду факторів впливу. На основі експериментальних досліджень встановлено, що використання такого алгоритму в умовах значного завантаження частотного ресурсу, дало змогу підвищити ефективну швидкість передачі інформації у 3 рази, а рівень сигналу покращити на 8% у порівнянні із традиційними методами. Крім того, в 2 рази, вдалося розширити зону гарантованого надання інфокомунікаційної послуги.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Колективні монографії:

1. Михалевський Д.В. Дослідження параметрів каналного та фізичного рівнів мереж стандарту 802.11. *Информационно-коммуникационные технологии в управлении : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2015. Гл. 6. С. 133–152.

2. Михалевський Д.В. Особливості каналного та фізичного рівнів технології МІМО для стандарту 802.11. *Наука и инновации в современном мире: техника и технологии : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2017. Кн. 2, гл. 8. С. 125–136.

3. Михалевський Д.В. Дослідження параметрів каналного та фізичного рівнів мереж стандарту 802.11n. *Научные ответы на вызовы современности: техника и технологии : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2016. Кн. 2, гл. 3. С. 52-76.

4. Mykhalevskiy D.V. Study of channel and physical levels parameters of 802.11ac standard. *The potential of modern science. Vol 3: [coll.] monograph*. London: SCIEMCEE, 2019. Pp. 186–211. (British library catalogue).

Статті у журналах, що входять до наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:

5. D.V. Mykhalevskiy. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2019, № 1. Pp. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004. (Журнал індексується Scopus, Web of Science та ще 39 баз).

6. D.V. Mykhalevskiy, V.M. Kychak (2019), “Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard”, *Latvian journal of physics and technical sciences*, №2, Pp. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0009. (Журнал індексується Scopus, Web of Science та ще 39 баз).

7. D.V. Mykhalevskiy, O.S. Horodetska. Investigation of wireless channels according to the standard 802.11 in the frequency range of 5 GHz for two subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERRD)*, № 42(2), pp. 50–57. 2019. Doi: 10.26480/jmerd.02.2019.50.57. (Журнал індексується Scopus, Open Access).

8. D.V. Mykhalevskiy. Method for estimating the effective data rate in 802.11 channel with using monitoring algorithm. *Journal of Applied Research and Technology*, № 18(3), 2020, Pp. 119-128. DOI: 10.22201/icat.24486736e. 2020.18.3.1089 (Журнал індексується Scopus, Open Access).

9. D. Mykhalevskiy. Development of a spartial method for the estimation of signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, № 4/9 (88). Pp. 29–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106925. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

10. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the input to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. № 6/9 (96). P. 16–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983 (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

11. D. Mykhalevskiy, N. Vasylykivskiy, O. Horodetska. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 4/9 (88), pp. 38–43. 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

12. D. Mykhalevskiy. Development of the method of evaluation of effective data rate on the basis of empirical model of statistical relationship of basic parameters for the wireless channel 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 5/9 (107), pp. 26–35. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

13. D. Mykhalevskiy. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 6/9 (108), pp. 18–24. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218720. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

Статті у наукових фахових виданнях України:

14. Михалевський Д.В. Розробка математичних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації у просторі приміщень для безпроводних каналів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2020, № 1. С. 110–115. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-110-115> (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

15. Михалевський Д.В. Дослідження факторів впливу на оцінювання основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2020, № 6. С. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-153-6-107-114> (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

16. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Оцінка достовірності алгоритмів моніторингу для абонентських пристроїв стандарту 802.11. *Вісник ХНУ*. 2020. №6. С. 151–155. DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-151-155.

17. Михалевський Д. В. Технічна діагностика безпроводних каналів стандарту 802.11. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. № 2. С. 111–120. Doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-2-111-120. Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

18. Михалевський Д.В. Розробка моделі оцінювання основних параметрів безпроводного каналу стандарту 802.11 з урахуванням дестабілізуючих факторів. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. № 1. С. 59–67 Doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-1-59-67. Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

19. Михалевський Д.В. Оцінка адекватності моделей регресії в оцінюванні основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2020. Том 31 (70). №6. Частина 1. С. 16–20. DOI: 10.32838/TNU-2663-

5941/2020.6/03 (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

20. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Розробка моделі оцінювання впливу архітектурних перешкод на основні параметри безпроводного каналу стандарту 802.11. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2020. Том 31 (70). №3. Частина 1. С. 48–53. (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

21. Михалевський Д.В. Розробка моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для каналів стандарту 802.11 на основі квадратичної функції. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2020. Том 31 (70) № 4, 2020. С. 25–29. (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

22. Михалевський Д.В. Оцінка параметрів безпроводного каналу передачі інформації стандарту 802.11 Wi-Fi. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2014, № 6/9 (72). С. 22-25. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31666. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

23. Михалевський Д.В., Гузь М.Д., Красота Р.О. Дослідження впливу довжини пакетів верхніх рівнів на ефективну швидкість передачі для стандарту Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2014, №4. С. 189-192.

24. Михалевський Д.В., Гузь М.Д. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2015, №1. С. 195-199. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

25. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка якості мультимедійного трафіку під час перемикавання між точками доступу у мережах Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2014, №3. С. 151-155. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

26. Михалевський Д.В., Мондляр В.Є., Красота Р.О. The research of wi-fi channel for multimedia traffic. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2014, №2. С. 175-178. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

27. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Система передачі високоякісних звукових сигналів без втрат. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2013, №3. С. 153-156. (Наукове фахове видання кат. Б, ндексується Index Copernicus, Google scholar).

28. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка параметрів відео зображення в телекомунікаційних системах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2013, №1. С. 201-205. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

Статті у журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз даних:

29. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при перемиканні між точками доступу. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 3(36), Т. 6, 2014. С.56–59. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

30. Михалевський Д.В., Гузь М.Д., Красота Р.О. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 4(37), Т. 5, 2014. С.13–16. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

31. Михалевський Д.В., Гузь М.Д. Оцінка розподілу потужності сигналу передавача стандарту 802.11 у приміщенні. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 1(38), Т. 3, 2015. С.48–52. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

32. Михалевський Д.В., Номировська В.В., Постернак О.М. Оцінка розподілу потужності сигналу для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 2(39), Т. 4, 2015. С.32–35. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

33. Михалевський Д.В., Номировська В.В., Постернак О.М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного та сусіднього інтерференційного каналів для стандарту 802.11n. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №2, 2015. С. 155-159. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

34. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 3(40), Т. 3, 2015. С.43–47. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

35. Михалевський Д.В. Аналіз побудови пакетів та кадрів під час передачі інформації безпроводним каналом стандарту 802.11. *Научные труды SWorld*, Вып. 1(42), Т. 4, 2016. С. 76–82. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

36. Михалевський Д.В., Крутінь А.В., Рогозіна Л.А. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11n частотного діапазону 5 ГГц. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №2, 2016. С. 214–218. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

37. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Особливості технології MIMO у стандарті 802.11. *Научные труды SWorld*, Вып. 3(44), Т. 1, 2016. С. 49–54. DOI:10.21893/2410-6720-2016-44-1-106. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

38. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №3, 2016. С. 172–176. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

39. Михалевський Д.В., Арсенюк Д.І., Жмурко І.С. Керуючий операційний елемент у стандарті 802.11. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 46, Т. 1. 2017. С.

27–32. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-46.1.105. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

40. Михалевський Д.В. Дослідження розподілу потужності сигналу в умовах багатопроменевого поширення хвиль для стандарту 802.11. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 47, Т. 1. 2017. С. 30–34. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-47.1.091. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

41. Михалевський Д.В. Дослідження впливу чутливості приймачів стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №3, 2017. С. 176–180. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

Основні праці, у матеріалах міжнародних конференцій:

42. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. *Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing*. Conference Proceeding. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine, P. 369-372.

43. Михалевський Д.В. Оцінка критерію якості для безпроводного каналу стандарту 802.11. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2015)*. Тези доповідей. 25-27 листопада 2015 р., м. Дніпропетровськ. С. 110-111.

44. Михалевський Д.В. Просторовий розподіл сигналу у приміщенні при центральному розміщенні точки доступу стандарту 802.11. *Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТ-2017)*. Матеріали VI міжнар. наук.-техн. Конференції. 28-30 червня 2017 р., Вінниця, ВНТУ. С. 40-41.

45. Михалевський Д.В. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11ас. *Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях*. Матеріали VI міжнар. наук.-техн. Конференції. 9-11 листопада 2017 р., Чернівці, ЧНУ ім Ю. Федьковича, 2017. С. 31.

46. Михалевський Д.В. Дослідження просторового розподілу сигналу у приміщенні для стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції. 8-13 червня 2017 р., Одеса–Хмельницький, ОНАЗ ім. О.С. Попова–ХНУ, 2017. С 188–189.

47. Михалевський Д.В. Оцінка об'єму інформації для однонаправленого режиму передачі кадру у стандарті 802.11. Математика. *Інформаційні технології. Освіта*. Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції. 5-7 червня 2016 р., Луцьк-Світязь. 2016. С. 90-91.

48. Михалевський Д.В. Дослідження розподілу потужності сигналу в умовах багатопроменевого поширення хвиль для стандарту 802.11. *Modern methods, innovation, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference*. Radom, Republic of Poland. December 27-28, 2017. С.47–50 .

49. Михалевський Д.В. Модель оцінки ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням параметрів моніторингу. *Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій,*

радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)». 14-16 листопада 2019 р., Вінниця, ВНТУ, 2019. С. 28–29.

50. Михалевський Д.В. Розподіл потужності сигналу у приміщенні для кутового розміщення точки доступу стандарту 802.11 в діапазоні 5 ГГц. *Матеріали XIV міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)"*, 15-17 жовтня 2018 р. Вінниця, ВНТУ, 2018. С.1.

51. Михалевський Д.В., Шаталюк В.О., Куць В.Й. Особливості технології мімо у стандарті 802.11ac. *Матеріали XVI міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-16-2016)*, 10-15 червня 2016 р, Одеса, 2016. С. 204.

52. Михалевський Д.В. Особливості моделювання безпроводного каналу стандарту Wi-Fi. *Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки. IV МНПК. 23-25 жовтня 2014 р., Чернівці, 2014. С. 90.*

53. Михалевський Д.В. Гузь М.Д., Красота Р.О. Аналіз мультимедійного трафіку для концепції цифрового будинку. *Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ – 2014»*: 10-та ММНТК. 12-17 травня 2014 р., Севастополь, 2014. С. 96.

54. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Технологія МІМО для передачі звуку високої якості без втрат. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства. XX МНПК студентів,аспірантів,та молодих учених. Квітень 2013р., Кременчук, 2013.*

55. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Передача високоякісних звукових сигналів без втрат. *Матеріали XII міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-12-2013)*. Червень 2013р., Одеса, 2013.

56. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка параметрів передачі високоякісних звукових сигналів. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2013. Жовтень 2013р., Вінниця ВНТУ, 2013. Ст. 40.*

57. Михалевський Д.В., Красота Р.О., Гузь М.Д. Особливості передачі мультимедійного трафіку в безпроводних мережах. *Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»*. 10 – 16 березня 2014 р., Київ, 2014. С. 169-170.

58. Михалевський Д.В., Бойко М.В. Використання технології мімо для мережі цифрового будинку. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства. XXI МНПК студентів,аспірантів,та молодих учених. Квітень 2014р., Кременчук, 2014. С. 70-71.*

59. Михалевський Д.В., Мондьяк В.Є., Красота Р.О. Дослідження wi-fi каналу для передачі мультимедійного трафіку. *Матеріали XIII міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-13-2014)*. Червень 2014р., Одеса, 2014. С. 214.

60. Михалевський Д.В. Аналіз параметрів сигналу у каналах стандарту 802.11g при спектральних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "MSATPA" Oct. 20-22, 2014, Dubai. С. 33-37.*

61. Михалевський Д.В. Дослідження потужності сигналу приймачів сигналу WI-FI. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "TPMSPS"*. Sep. 22-24, 2014, Dubai. С. 29-31.

62. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка рівня сигналу від положення антен у просторі. *Матеріали XII Міжн. Конф. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)*. 14-16 жовтня 2014 р., ВНТУ, Вінниця.

63. Михалевський Д.В. Дослідження впливу довжини пакетів на параметри безпроводного каналу. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "The Goal of the World Science 2015"*, January 24-25, 2015, Dubai, UAE, 2015, Pp. 6-13

64. Михалевський Д.В. Аналіз сигналу у каналах стандарту 802.11 при інтерференційних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Science and Education – Our Future"*, November 24-26, 2014, Abu Dhabi, UAE, 13-17 pp.

65. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на пропускну здатність каналу 802.11. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Innovative technologies in science"*, February 21-22, 2015, Dubai, UAE). Vol. 1, 71-78 pp.

66. Михалевський Д.В. Дослідження впливу інтерференційних каналних завад у мережах 802.11n. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Scientific and Practical Results in 2014"*, Desember 22-24, 2014, Dubai, UAE, Vol. 1, 2014, 33-36 pp.

67. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на пропускну здатність каналу стандарту 802.11 ч.2. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Methodology of modern reseach"*, March 21-22, 2015, Dubai, UAE, Vol. 1, 2015, 56-61 pp.

68. Михалевський Д.В. Номировська В.В., Постернак О.М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного каналу для стандарту 802.11n. *Матеріали XIV міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-14-2015)*, червень 2015 р, м. Одеса, с.253.

69. Михалевський Д.В. Аналіз частотного спектру діапазону 5 ГГц для сімейства стандартів 802.11x. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «The Top Actual Researches in Modern Science*, July 18-19, 2015, Ajman, UAE, Vol. I, 9-12 pp.

70. Михалевський Д.В. Дослідження чутливості приймачів стандарту 802.11. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions*. September 24-25, 2015, Dubai, UAE, 2(2), Vol.1, pp. 87-92.

71. Михалевський Д.В. Поняття діагностики у мережах стандарту 802.11. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application*. October 20-21, 2015, Dubai, UAE, 3(3), Vol.1, pp. 20-21.

72. Михалевський Д.В. Наугольних Є.С. Аналіз критеріїв ефективності безпроводних мереж. *Матеріали XIV міжнародної НТК «Вимірювальна та*

обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТІ-15-2015), вересень 2015р. Одеса, с.80-81.

73. Михалевський Д.В., Рогозіна Л.А., Крутінь А.В., Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для каналу стандарту 802.11n у діапазоні 5ГГц. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Innovative Technologies in Science.)* February 25 – 26, 2016, Dubai, UAE, 2(6), Vol.1, pp. 66-69.

74. Михалевський Д.В. Дослідження режиму multicast у стандарті 802.11. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Methodology of Modern Research).* March 28 – 29, 2016, Dubai, UAE, 4(8), Vol.1, pp. 54-56.

75. Михалевський Д.В. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11ac. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем (MEICS-2017):* Матеріали II Всеукраїнська. наук.-техн. конференції. 22-14 листопада 2017 р., Дніпро, ДНУ ім. О. Гончара, с. 70.

Патенти України на корисну модель:

76. Михалевський Д.В. Максимчук Ю.А. Пристрій для прийому сигналів ір телебачення, із подальшим їх відображенням: патент №75146 України на корисну модель. № u2012 048; заявка 18.04.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл. №22. 4 с.

77. Михалевський Д.В. Тіщенко І.Б. Янковчук Д.О. Пристрій для аналізу частотних каналів мереж стандарту wi-fi: патент № 102699 України на корисну модель. № u2015 05419; заявка, 02.06.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 4 с.

78. Михалевський Д.В. Тіщенко І.Б. Янковчук Д.О. Пристрій для оцінки параметрів якості відеозображення: патент № 102698 України на корисну модель. № u2015 05418; 02.06.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 4 с.

АНОТАЦІЯ

Михалевський Д.В. Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми розроблення методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів із врахуванням максимально-можливої кількості різноманітних факторів впливу на базі статистичних зв'язків між ними з метою підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації.

Для вирішення проблеми використано методи математичної статистики та регресійного аналізу результатів експериментальних досліджень, на основі яких, було розроблено методи оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. Запропоновані методи враховують процеси поширення сигналів, внутрішні і зовнішні фактори впливу у корпоративних приміщеннях та призначені для забезпечення неперервної оптимізації покриття

мережі радіодоступу, при мінімальних інформаційних втратах, та ефективного керування ресурсами для отримання оптимальних технічних показників радіоканалів. Для збільшення швидкодії обробки результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування, розроблено метод оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку. Вперше запропоновано інтегральні показники ефективності радіоканалів та дії факторів впливу для прогнозування інформаційних втрат в межах покриття мереж радіодоступу. Вперше запропоновано стохастичну модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій, яка, використовує статистичну імовірність і дисперсію. Вперше запропонована методологія оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, на основі узагальнених математичних моделей.

Ключові слова: радіоканал, корпоративна телекомунікаційна мережа, потужність сигналу, пропускна здатність каналу, ефективна швидкість передачі інформації, параметри та характеристики, 5G, Wi-Fi.

АННОТАЦІЯ

Михалевський Д.В. Методологія підвищення ефективності оцінки параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 «Телекоммуникационные системы и сети» (172 – Телекоммуникации и радиотехника). – Национальный университет "Львовская политехника" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы разработки методологии оценки параметров и характеристик радиоканалов с учетом максимально-возможного количества различных факторов влияния на базе статистических связей между ними с целью повышения технической эффективности корпоративных телекоммуникационных сетей на этапах проектирования и оптимизации.

Для решения проблемы использованы методы математической статистики и регрессионного анализа результатов экспериментальных исследований, на основе которых были разработаны методы оценки основных параметров радиоканалов корпоративных телекоммуникационных сетей. Предложенные методы учитывают процессы распространения сигналов, внутренние и внешние факторы влияния в корпоративных помещениях и предназначены для обеспечения непрерывной оптимизации покрытия сети радиодоступа, при минимальных информационных потерях, а также эффективного управления ресурсами для получения оптимальных технических показателей радиоканалов. Для повышения быстродействия оценивания, при начальной оптимизации сети, разработан метод оценки гарантированной пропускной способности радиоканалов корпоративных телекоммуникационных сетей для передачи различных типов трафика. Впервые предложено интегральные показатели эффективности радиоканалов и действия

факторов влияния для прогнозирования информационных потерь в зоне действия сетей радиодоступа. Впервые предложено стохастическую модель флуктуаций основных параметров радиоканалов на основе интервала рассеивания моделей регрессий, которая использует статистическую вероятность и дисперсию. Получила дальнейшего развития теория оценивания параметров и характеристик радиоканалов корпоративных телекоммуникационных сетей на основе обобщенных математических моделей.

Ключевые слова: радиоканал, корпоративная телекоммуникационная сеть, мощность сигнала на входе приемника, пропускная способность канала, эффективная скорость передачи информации, факторы влияния, параметры и характеристики, 5G, Wi-Fi.

ABSTRACT

D. Mykhalevskiy. Methodology for Improving the Efficiency of Estimation of Radio Channel Parameters and Characteristics in Corporate Telecommunications Networks. – As a manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the D.Sc. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication networks and systems. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry for education and science of Ukraine, Lviv, 2021.

This thesis is concerned with addressing the urgent applied-science challenge of developing a methodology for estimating radio channel basic parameters and characteristics corporate telecommunications networks considering influencing factors based on of statistical links between them in order to improve the technical efficiency of corporate telecommunication networks at the design and optimization stages.

The purpose of this thesis is to resolve conflict between the need for increase in the data-transfer rate for improving the quality of information and communication services and the necessity for adaptive optimization of the network to reduce data loss through methods for estimating the radio channel parameters and characteristics in an environment of the limited radio-frequency resource and the influence of internal and external factors on the premises. This is achieved through a detailed study of hardware-based solutions for 5G and Wi-Fi wireless access technology and the processes appearing when sensing traffic in radio channels based the creation of a new approach to estimation of radio channel parameters and characteristics in order to improve the current methods and models of corporate telecommunications network design and optimization.

Methods for estimating the basic parameters of radio channels in corporate telecommunications networks have been developed within the methodology. The suggested methods take into account the signal propagation processes, the internal and external influencing factors on the corporate premises; and they are intended to ensure that wireless access network coverage is continuously optimized with the minimum data loss, and the resources are effectively managed in order to obtain optimal performance characteristics of radio channels. A method for estimating the guaranteed bandwidth of radio channels for sending different types of traffic in corporate telecommunications networks has been developed in order to increase the speed of estimation during the initial optimization of the network. For the first time, the integrated factors of radio channel efficiency and the effect

of influencing factors have been introduced to predict any data loss within wireless access network coverage. For the first time, a stochastic model of fluctuations of the main parameters of radio channels based on the scattering interval of regression models is proposed, which uses statistical probability and variance. The theory of estimation of radio channel parameters and characteristics in corporate telecommunications networks has been further developed based on generalized mathematical models.

The implementation of the suggested methodology in a corporate telecommunications network consists in finding optimal radio channel parameters with the existence of external and internal influencing factors. Based on experimental studies of corporate telecommunications networks it was found that the implementation of the suggested methodology made it possible to achieve 9% increase in the estimation efficiency of the signal strength at the receiver input and 12% increase in the effective data-transfer rate using the transmitting-and-receiving equipment capabilities as compared with the existing methods and models. Moreover, applying the suggested methodology under the significant frequency resource load provided an opportunity for triple increase in the effective data-transfer rate and 8% enhancement of the signal level. Apart from that, it proved possible to double the area of guaranteed information and communication service delivery.

Keywords: radio channel, corporate telecommunication network, signal power, channel bandwidth, effective data rate, influencing factors, parameters and characteristics, 5G, Wi-Fi.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АП	–	абонентський пристрій
БК	–	безпроводний канал
Пд	–	передавач
Пр	–	приймач
ТД	–	точка доступу
АСК	–	кадр підтвердження
CTS	–	функція дозволу відправлення кадру
HD	–	формат відео високої чіткості
LLC	–	підрівень керування логічним з'єднанням
MAC	–	підрівень керування доступом до середовища
MCS	–	схема визначення індексу модуляції і кодування
MPDU	–	кадр мак протоколу
MSDU	–	сервісний пакет даних MAC підрівня
PLCP	–	підрівень узгодження фізичного рівня
PMD	–	підрівень середовища передачі
PPDU	–	пакет даних підрівня PLCP
RTS	–	функція запиту на відправлення пакету
Tx, Rx	–	функції передачі та прийому пакетів

Підписано до друку 20.08.2021р. Папір офсетний. Друк на різогр.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,9. Наклад 120 прим. Зам. №244

Друк СПДФО Марусич М.М. Свідоцтво №1252 від 30.12.1996
м. Львів, пл. Осмомисла, 5/11
тел./факс (032) 261-51-31.
email: interprint-m@ukr.net