

ВІДГУК офіційного опонента

на дисертаційну роботу Михалевського Дмитра Валерійовича за темою «Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж» подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі».

1. Актуальність теми дисертації

Розвиток сучасного корпоративного сектору неможливий без створення власних внутрішніх мереж. Такі мережі будуються за індивідуальним замовленням і повинні забезпечувати високу якість обслуговування та мінімізувати витрати на їх експлуатацію. Побудова сучасних корпоративних телекомунікаційних мереж передбачає використання багаторівневої структури із використанням радіодоступу на основі поширених радіотехнологій Wi-Fi і 5G. Одним із перспективних напрямків підвищення ефективності і функціонування радіотехнологій за технічними та економічними показниками, є розроблення методів та моделей керування ресурсами мережі та побудова систем програмно-конфігурованого управління. Особливо актуальним це питання постає при розгортанні корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi в умовах обмеженого радіочастотного і енергетичного ресурсу досягнення необхідних показників по покриттю, пропускній здатності і якості обслуговування та існування значної кількості внутрішніх і зовнішніх факторів впливу. Такі особливості суттєво ускладнюють процеси проектування та оптимізації, що потребує нових ефективних рішень програмно-конфігурованого керування ресурсами мереж радіодоступу. Для досягнення цього, в першу чергу необхідно отримати достовірні вхідні параметри, які отримуються на основі методів моніторингу параметрів мережі, мережної аналітики та методів оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів. Єдиний узагальнений механізм оцінювання із врахуванням параметрів корпоративних приміщень відсутній. Тому, є актуальним вирішення завдань оцінювання, аналізу і виявлення особливостей передавання інформації у радіоканалах, при існуванні різного роду факторів впливу, з метою покращення технічних і економічних показників мереж радіодоступу.

Актуальність дисертаційних досліджень підтверджується також зв'язком роботи з науковими програмами та темами, що виконувались на кафедрі телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету

2. Загальна характеристика дисертаційної роботи

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему 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.

Дисертаційна робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків, які містять акти впровадження результатів дисертаційних досліджень та список праць автора. 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.

У **вступі** обґрунтовано науково-прикладну проблему, виділено актуальність теми досліджень, наведена загальна характеристика роботи, описано існуюче протиріччя, наведено інформацію про зв'язок роботи із науково-дослідними програмами та інформацію про практичне впровадження.

Перший розділ дисертаційної роботи містить огляд найбільш актуальних літературних джерел за тематикою досліджень. Зокрема, автором проаналізовано існуючі стандарти побудови корпоративних телекомунікаційних мереж на основі радіодоступу Wi-Fi і 5G. Проведено аналіз енергетичних та інформаційних параметрів канального і фізичного рівня. Детально розглянуто сучасні та перспективні методи та моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача та пропускної здатності на канальному та фізичному рівнях функціонування. На основі проведеного аналізу, сформульовано структурно-логічну схему дисертаційного дослідження.

В **другому розділі** дисертантом запропоновано підхід до оцінювання потужності сигналу на вході приймача із використанням просторового розподілу у приміщеннях. Зокрема варто відзначити, запропоновані моделі для частотних діапазонів 2,4 ГГц і 5 ГГц, які отримані на основі експериментальних характеристик затухання сигналу у просторі приміщення, враховують геометричні розміри приміщення, кутове і центральне положення точки доступу та інтервал флуктуацій. Такі моделі є основою методу 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. Використання такого методу дає можливість знаходження максимально-можливого покриття мережі із мінімальними втратами з метою покращення технічних показників радіоканалів на етапах експлуатації корпоративних телекомунікаційних мереж.

Третій розділ присвячений дослідженню та визначенню ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж. Для цього вдосконалено існуючий підхід передачі інформації по радіоканалах на основі моделі процесу передавання інформації із узагальненим поєднанням технічних параметрів специфікацій стандартів. Таку модель доцільно використовувати для теоретичного оцінювання ефективності передачі інформації по радіоканалах та прогнозування кількості корисної інформації при врахуванні різного роду технологій. Для визначення особливостей роботи мережі при існуванні декількох абонентів, в реальних умовах приміщень, запропоновано нові інтегральні показники ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації в межах покриття мереж радіодоступу. Такі показники дають змогу враховувати вплив різного роду архітектурних перешкод на параметри радіоканалів. Враховуючи можливості сучасних приймальних пристроїв із проведення моніторингу, дисертантом запропоновано метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для вирішення проблеми низької достовірності оцінювання, у реальних умовах, та високої складності реалізації із врахуванням флуктуацій. Метод побудований на основі статистичних параметрів моніторингу та аналізу, який призначений для підвищення ефективності управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах радіодоступу.

У **четвертому розділі** розв'язується завдання збільшення швидкодії обробки результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування. Для цього запропоновано метод оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку. Основою такого методу, є моделі оцінювання основних параметрів радіоканалу на основі статистичного зв'язку. За рахунок цього, для параметра ефективної швидкості передачі інформації вдалося отримати просторові розподіли на основі вимірювального значення потужності сигналу на вході приймача, а також отримати можливість розраховувати можливі флуктуації біля стін приміщення. Додатковою можливістю запропонованого методу, є встановлення границь гарантованої пропускної здатності радіоканалу для передачі трафіку.

У **п'ятому розділі** представлено результати досліджень основних факторів впливу на параметри і характеристики радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. Зокрема, в даному розділі 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. Використання таких показників дають змогу розширити можливості розроблених методів та моделей

оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та експлуатації. На основі інтегральних показників оцінено вплив інтерференційних завад, архітектурних перешкод, виробничо-експлуатаційних відхилень параметрів приймальних пристроїв та ін. на параметри та характеристики радіоканалів.

Шостий розділ присвячений представленню основних аспектів методологію оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на основі розроблених у дисертаційній роботі методів, інтегральних показників та моделей. На основі експериментальних досліджень доведено, що використання такої методології дало змогу досягти підвищення ефективності оцінювання потужності сигналу на вході приймача на 9% та ефективної швидкості передачі інформації на 12% використовуючи можливості приймально-передавального обладнання, підвищити ефективну швидкість передачі інформації у 3 рази у мережі та покращити рівень сигналу в межах покриття на 8%. Крім того, в розділі запропонована методика оцінювання достовірності запропонованих методів та адекватності отриманих моделей. Для визначення інтервалів флуктуацій основних параметрів радіоканалів запропоновано стохастичну модель на основі інтервалу розсіювання моделей регресій, статистичної імовірності і дисперсії, що дає можливість значно спростити отримання кінцевого флуктуацій на основі середньостатистичних результатів моделей оцінювання.

У **висновках** дисертаційної роботи узагальнено основні отримані результати, які в підсумку дали змогу вирішити науково-прикладну проблему 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.

Додатки містять акти впровадження та список праць автора.

3. Наукова новизна дисертаційної роботи

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 пропускної 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.

4. Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Михалевського Дмитра Валерійовича, підтверджуються аналітичними та експериментальними моделями, які не суперечать основним принципам реалізації корпоративних телекомунікаційних мереж, їх коректністю з точки зору фундаментальних положень теорії радіозв'язку, теорії цифрового радіозв'язку, теорії ймовірності, математичної статистики та регресійного аналізу. Достовірність наукових положень запропонованої методології підтверджено збіжністю теоретичних розрахунків і моделювання із результатами практичних досліджень. Основні практичні результати дисертаційної роботи впровадженні на практиці, що підтверджено відповідними актами. Ключові положення дисертації були представлені автором на 34 науково-технічних конференціях що проводились в Україні та за кордоном. За результатами роботи отримано 3 патенти України на корисну модель.

5. Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях

За результатами дисертаційної роботи, автором опубліковано 78 наукових праць, із яких 40 є одноосібними. Серед яких 4 колективні монографії; 3 патенти, 4 статті у закордонних періодичних виданнях, що індексуються в наукометричних базах: Scopus, Web of Science, 5 статей у фахових періодичних виданнях України категорії А, що входить до наукометричних баз Scopus, 15 – статей у фахових періодичних виданнях України категорії Б, 13 статей в наукових журналах що індексуються в міжнародних базах даних

Результати дисертаційної роботи, пройшли апробацію у матеріалах міжнародних конференцій, 34-ма публікаціями у матеріалах міжнародних конференцій.

Загалом, усі публікації повністю висвітлюють матеріали дисертаційної роботи.

6. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертація оформлена відповідно до чинних вимог для докторських дисертацій пп. 9, 10 і 12 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., а також наступними змінами та доповненнями до цієї постанови. Автореферат дисертації коректно узагальнює отримані наукові результати та запропоновані рекомендації, і оформлений згідно з вимогами. Матеріал у авторефераті представлений у лаконічній формі, що забезпечує доступність сприйняття основних положень дисертаційної роботи.

7. Важливість отриманих результатів для науки і народного господарства перспективи їх використання

Отримані результати мають вагоме практичне значення для економіки та народного господарства України. Зокрема практичне впровадження результатів роботи стимулюватиме подальший розвиток корпоративних телекомунікаційних мереж на основі радіотехнологій 5G/Wi-Fi, а також стимулювання переходу на наступні стандарти 6G та Wi-Fi 7.

Зокрема, автором отримано наступні практичні результати.

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 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.

Практичне впровадження дисертаційної роботи підтверджене відповідними актами, які наведені у додатку.

8. Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

1. В дисертації, розділи, переобтяжені описом методики експериментальних досліджень, що доцільно було б привести у одному розділі.
2. При аналізі неліцензійних частотних діапазонів 2,4 ГГц і 5 ГГц, у підрозділі 1.1. доцільно було б розглянути спектр від 2 ГГц до 6 ГГц, оскільки саме він далі згадується в тексті.
3. У формулах (2.20) і (5.5), які посилаються на модель (2.2) присутній інтеграл, а також у виразах (6.19) і (6.20), Проте в подальших виразах він відсутній, і з опису не зовсім зрозуміло, як він перетворюється або зникає.
4. Запропонована модель (2.31) передбачає оцінювання просторового розподілу потужності сигналу у приміщенні для частотного діапазону 5 ГГц із врахуванням заповненості приміщення об'єктами. Проте, автор не зазначає, що це за об'єкти та яке положення їх у приміщенні.
5. У третьому розділі, при дослідженні узагальненої математичної моделі радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, на мою думку, варто було б розглянути випадки при різних значеннях імовірності надходження кадрів.
6. У виразах (3.56) і (3.57) отримані співвідношення для коефіцієнтів регресії k N_{or} . Проте, не зовсім зрозуміло весь процес їх визначення. На мою думку, детальніший розгляд, можна було б винести у додатки.
7. У дисертації невдало обрано літерні позначення для коефіцієнтів моделей. Зокрема, у математичних моделях оцінювання (2.25), (2.29) і (2.31) використовуються позначення a і b , як коефіцієнти квадратичних регресій просторового розподілу сигналу, що мають однакові розмірності. У той же час, у виразах (5.30) коефіцієнти a і b використовуються як узагальнені коефіцієнти лінійних регресій, при чому, другий коефіцієнт має іншу розмірність. Аналогічне зауваження до параметрів u і Δu інтегральних показників інформаційної ефективності радіоканалів у виразах (8), і (9) автореферату та (3.36) і (3.42) дисертації.
8. На результатах математичних досліджень запропонованих моделей оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж зустрічаються від'ємні значення довжини і ширини приміщення, зокрема, як приклад, рис. 2.9 і рис 2.12, рис. 4.17 і рис. 4.19 та ін. Проте, з дисертації, не зовсім зрозуміло використання такого підходу. Було б доцільним більш інформативно описати умови при яких використовуються від'ємні значення та що вони означають

Наведені зауваження не зменшують наукового рівня та цінності дисертаційної роботи в цілому.

9. Загальні висновки

1. Дисертаційна робота Михалевського Дмитра Валерійовича, є завершеною науковою працею, яка містить нові наукові результати, що мають важливе значення для розвитку корпоративних телекомунікаційних мереж в Україні.

2. Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих у дисертаційній роботі, має практичну цінність і вирішує науково-прикладну проблему 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.

3. Дисертаційна робота за змістом відповідає вимогам Паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

4. Матеріали дисертації достатньо апробовані, доповідались на міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах і висвітлені в наукових публікаціях.

5. Автореферат об'єктивно із необхідною повнотою відображає зміст і основні положення дисертації дисертації повністю відповідає змісту дисертації.

6. Структура дисертації є обґрунтованою.

7. Наведені зауваження не змінюють загальну позитивну оцінку наукової значимості і практичної цінності дисертаційної роботи.

8. За актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною значимістю одержаних результатів дисертаційна робота Михалевського Д.В., яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, відповідає вимогам для докторських дисертацій п.п. 9, 10, 12 чинного «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., а також наступними змінами та доповненнями до цієї постанови, а її автор Михалевський Дмитро Валерійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент,
професор кафедри радіотехніки
та інформаційної безпеки
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича
доктор технічних наук, професор,



Політанський Р.Л.

