

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**  
**на дисертаційну роботу**  
**Сопронюка Івана Івановича**  
**на тему: «Методи моніторингу частотного спектру для підвищення**  
**ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем»,**  
**подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії**  
**Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»**  
**Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**Актуальність напрямку дисертаційного дослідження.**

Розвиток високошвидкісних телекомунікаційних систем, зростання кількості абонентів зумовило утворення складної завадової ситуації для функціонування безпроводових систем зв'язку. Разом з підвищенням вимог до якості передавання різного роду інформації це зумовлює необхідність ускладнення методів аналізу і обробки інформаційних сигналів.

Особливу важливість мають завдання динамічного виявлення вільних частотних ресурсів і мінімізації впливу шумів та завмирань, що висувається як ключова перевага у роботі когнітивних мереж зв'язку, які прагнуть мати можливість динамічно розподіляти доступний частотний ресурс між первинними та вторинними користувачами мережі, забезпечуючи максимум ефективності роботи телекомунікаційних мереж. Існуючі методи спектрального моніторингу не завжди забезпечують необхідну точність і швидкість ідентифікації вільних частотних смуг у складних радіочастотних умовах. Присутність шумів, міжканальних перешкод, фазових спотворень і завмирань сигналу в безпроводових середовищах ускладнює точне визначення частотних компонентів. Це обґрунтовує важливість продовження інтенсивних пошуків нових рішень та необхідність впровадження нових гібридних підходів, які здатні підвищити надійність і ефективність управління спектральними ресурсами.

Слід враховувати, що сучасний рівень обчислювальних потужностей дозволяє успішно реалізовувати алгоритми обробки сигналів, що довгий час не мали широкого практичного використання, а також застосовувати нові поглиблені і нестандартні процедури аналізу для отримання інноваційних технологічних рішень. Таким чином дисертантом була встановлена мета роботи, яка пов'язана з її актуальністю: створити інструменти, які дозволять підвищити ефективність когнітивних телекомунікаційних систем шляхом

удосконалення спектрального моніторингу. Результати дослідження придатні для розв'язку одразу кілька проблем: забезпечення високої точності виявлення вільних частотних смуг, покращення стійкості до шумів і створення адаптивних систем, здатних реагувати на змінні умови радіосередовища. Мета розв'язати важливі проблеми, що стоять перед телекомунікаційною галуззю на основі впровадження гібридних методів та адаптивних алгоритмів, що забезпечують динамічне виявлення невикористаних частотних ресурсів та оптимізацію використання спектру в умовах змінного радіосередовища, робить дослідження актуальним як у науковому, так і у практичному контексті.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій.**

Аналіз змісту дисертації, висновків та публікацій показує наукову обґрунтованість і достовірність викладених автором результатів. Робота містить аналіз сучасного стану проблематики, звідки виведена постановка часткових задач дослідження, послідовне розв'язання яких в повній мірі розкриває результат – досягнення поставленої мети роботи. Найсуттєвіші наукові і практичні результати, одержані здобувачем, викладено в загальних висновках та достатньою мірою висвітлено в опублікованих працях.

Основа дослідження побудована на методах класичної теорії обробки сигналів, включає часово-частотний аналіз сигналів, принципи формування, фільтрації і передачі інформації в складних середовищах, використано методи теорії оптимізації для підвищення точності і швидкості аналізу, зокрема для вибору параметрів розроблених алгоритмів та вибору оптимальних моделей сигналу, крім того застосовано принципи теорії інформації для аналізу завадостійкості та ефективності передачі даних. Робота не лише базується на відомих теоріях і методах, а й вдосконалює їх за допомогою розробки гібридних підходів, інтеграції статистичних та адаптивних алгоритмів.

Обґрунтованість наукових положень та висновків, сформульованих дисертантом, підтверджено наведеними прикладами моделювання та експериментальних розрахунків, що супроводжуються відповідним описом і поясненням отриманих результатів та не викликають сумніву.

### **Достовірність наукових положень.**

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, отриманих у дисертації, підтверджується наступними аспектами:

- математичний апарат, що використаний у дисертаційних дослідженнях, застосований на достатньому рівні точності та коректності;
- нові наукові результати, які отримані в дисертації підтверджуються обґрунтованими результатами моделювання та узгоджуються з існуючим методам та теоріям.

Матеріали дисертації пройшли необхідну апробацію, обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі отримані наступні нові наукові і практичні результати:

1. Вперше розроблено метод моніторингу частотного спектру – VTSM (Variable Time Segment Monitoring) на основі неоднорідної декомпозиції часових сегментів та адаптивного спектрального аналізу в залежності від статистичних властивостей сигналу. Запропонований метод, на відміну від традиційних, забезпечує динамічну адаптацію довжини сегментів від характеристик сигналу в реальному часі, що підвищує точність виявлення частотних компонентів, знижує вплив шуму та збільшує ефективність використання спектра в умовах динамічних передач.

2. Удосконалено метод спектрального моніторингу на основі варіативних часових сегментів та адаптивних вейвлет-перетворень (Морле, Добеші) та адаптивних фільтрів: Калмана, LMS та RLS для оптимізації виявлення та аналізу спектральних характеристик у різних умовах навантаження. Запропонований метод відрізняється від відомих здатністю забезпечувати високий рівень адаптивності та точності за рахунок використання передових фільтраційних технік і спектрального аналізу.

3. Удосконалено метод ієрархічного циклічного моніторингу частотного спектру за рахунок застосування інформаційних критеріїв Акайке та Байеса для виявлення вільних частотних смуг у спектральному діапазоні, а також з багатоступеневою фільтрацією, для зменшення шумів та спотворень сигналу, і з врахуванням завмирань. Запропонований метод відрізняється від існуючих тим, що критерій Акайке використовується для початкового вибору моделей, а критерій Байеса забезпечує уточнення налаштування і запобігання «перенавчання», що робить метод більш ефективним для застосування у складних радіосередовищах з різними типами шумів та спотворень.

**Практичне значення отриманих результатів.** Наведені теоретичні і експериментальні дані дослідження ефективності роботи розроблених методів для різноманітних сигналів у реальних умовах завмирань та спотворень в телекомунікаційних мережах підтверджують практичну цінність та

можливості реалізації запропонованих в роботі методів та алгоритмів спектрального моніторингу. На основі запропонованих нових та удосконалених методів аналізу сигналів у сфері когнітивних безпроводових телекомунікаційних систем запропоновано алгоритми та програмні реалізації:

1) методу моніторингу спектру на основі декомпозиції часових сегментів та адаптивного спектрального аналізу, що на відміну від традиційних, забезпечує динамічну адаптацію довжини сегментів від характеристик сигналу в реальному часі, що підвищує точність виявлення частотних компонентів, знижує вплив шуму та збільшує ефективність використання спектра в умовах динамічних передач;

2) інтегрованого методу спектрального моніторингу з використанням вейвлет-перетворень та фільтрації з врахуванням спотворень та завмирання частоти сигналу, що здатний забезпечувати високий рівень адаптивності та точності за рахунок використання передових фільтраційних технік і спектрального аналізу;

3) методу ієрархічного циклічного моніторингу частотного спектру з застосуванням інформаційних критеріїв Акайке і Байеса та багатокроковою фільтрацією для зменшення шумів та спотворень сигналу із врахуванням завмирань, що робить метод більш ефективним для застосування у складних радіосередовищах з різними типами шумів та спотворень.

Представлений огляд та аналіз проведених процедур верифікації та експериментального підтвердження запропонованих методів супроводжується оцінкою показників якості. Вибір та розрахунок показників здійснений коректно, супроводжується достатніми поясненнями, дає числову оцінку різних аспектів роботи запропонованих методів, можливості для глибокого аналізу та розуміння ефективності і надійності алгоритму.

Розроблено рекомендації для їх практичного використання та визначено перспективні шляхи подальшого розвитку і вдосконалення методів управління частотним спектром.

**Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях.** Основні результати дисертації викладені у 13 наукових працях: 8 статей у фахових виданнях України, 1 стаття у міжнародному виданні, відображено у 4 апробаційних публікаціях за матеріалами міжнародних науково-практичних конференцій. У вступі роботи міститься інформація про особистий вклад автора у публікаціях, зміст яких відповідає темі та меті роботи і висвітлює результати виконання часткових задач.

**Мова і стиль** викладення матеріалу в дисертації відповідають вимогам, що висуваються до оформлення науково-дослідних робіт. Подання змісту дисертаційної роботи вирізняється чіткістю, науковою коректністю та логічною послідовністю. Автор демонструє високу культуру наукового письма, використовує сучасну фахову термінологію. Це сприяє легкому сприйняттю тексту та глибокому розумінню представленого матеріалу. Джерела інформації є сучасними, коректно оформленими та забезпечують прозорість і наукову добросовісність дослідження.

**Обсяг і структура дисертації** відповідають вимогам та рекомендаціям ДАК. Загальний обсяг дисертації складає 181 сторінок, з них 167 сторінок основного тексту, у тому числі 38 рисунків, 26 таблиці, 154 найменування у списку використаних джерел, 6 Додатків (А-Е).

**У вступі** обґрунтовано актуальність і доцільність обраної теми, сформульовано мету і задачі роботи, наведено методологічну основу роботи, яка включає використання сучасних теоретичних і практичних підходів, що забезпечують наукову обґрунтованість отриманих результатів. Чітко виділено практичну цінність, наукову новизну отриманих результатів, показано загальну структуру роботи та наведено відомості про апробацію результатів і їх впровадження.

**У першому розділі** міститься аналіз сучасних стандартів IEEE когнітивних безпроводових телекомунікаційних мереж та визначення потреб умов та особливостей спектрального моніторингу. Розглянуто існуючі методи моніторингу, проведено порівняння та оцінку їх ефективності за критеріями точності виявлення сигналів, швидкості реакції на зміни в частотному спектрі та завадостійкості, обґрунтовано необхідність впровадження адаптивних методів для підвищення ефективності управління радіочастотними ресурсами. Визначена проблематика і основні завдання дослідження.

**У другому розділі** розроблено новий гібридний метод спектрального моніторингу на основі змінного часового сегментування – VTSM (Variable Time Segment Monitoring), який відрізняється від традиційних методів тим, що використовує адаптивну часову сегментацію сигналів, яка динамічно підлаштовується до змін у спектрі залежно від статистичних характеристик сигналу. Проведена експериментальна верифікація методу та здійснено порівняльний аналіз ROC-кривих для різних методів моніторингу. Показано, що метод VTSM є найбільш ефективним при середніх і високих рівнях SNR, коли потрібно аналізувати складні ансамблі сигналів в динамічних або

змінних безпроводових телекомунікаційних системах. Для відомих сигналів при високих рівнях SNR VTSM може поступатися методам спектрального моніторингу, які спеціально налаштовані на конкретні характеристики сигналу.

У **третьому розділі** проведено удосконалення інтегрованого методу спектрального моніторингу за рахунок використання вейвлет-перетворень (Морле та Добеші) та адаптивної фільтрації (Калмана, LMS та RLS) на різних етапах обробки сигналів. Розроблено алгоритм методу спектрального моніторингу, який використовує варіативні часові сегменти, що дозволяє проводити аналіз спектра в реальному часі та відслідковувати зміни в спектральному складі сигналу. Виконано порівняння показників ефективності детектування сигналів за допомогою комп'ютерного моделювання для сигналів 4G LTE, 5G NR, Wi-Fi 6, DVB-T2, GPS для різних рівнів SNR. Обґрунтовано, що інтеграція статистичних підходів з адаптивними фільтраційними техніками забезпечує ефективне зменшення впливу шумів та частотних спотворень, які виникають у безпроводових радіомережах. Запропоновано удосконалення інтегрального методу спектрального моніторингу за рахунок використання адаптивних вейвлет-перетворень та адаптивних фільтрів (Калмана, LMS, RLS).

У **четвертому розділі** розроблено метод ієрархічного циклічного спектрального моніторингу з використанням інформаційних критеріїв Акайке та Байєса для вибору оптимальних моделей сигналів, що забезпечує баланс між точністю та складністю моделі. Запропоновано багатокрокову адаптивну фільтрацію з використанням фільтрів Калмана, Вінера та медіанного фільтра, яка дозволяє ефективно знижувати рівень шуму та враховувати завмирання сигналу, що підвищує загальну точність і надійність спектрального моніторингу. Алгоритм реалізації методу, розроблений на основі цих підходів, демонструє переваги в порівнянні з традиційними методами завдяки своїй здатності адаптуватися до швидких змін у спектральному середовищі та різних типів радіозавад. Експериментально доведено, що метод покращує якість виявлення сигналів, забезпечуючи суттєве підвищення амплітуди та співвідношення сигнал/шум, особливо для таких сигналів, як Wi-Fi та 5G NR. Це свідчить про високу адаптивність методу до складних умов радіочастотного середовища.



**Висновки** відображають узагальнені результати дисертаційного дослідження, що спрямовані на вирішення актуальної науково-практичної проблеми та підтверджують виконання поставлених у роботі завдань.

#### **Зауваження та недоліки.**

При розгляді роботи виникли деякі запитання та зауваження, зокрема:

1. У роботі спостерігається недостатній огляд сучасних досліджень на задану тематику, що ускладнює порівняння отриманих в дисертації результатів з вже існуючими науковими досягненнями.

2. З наведених графіків ROC-кривих для оцінки ефективності методу VTSM (стор. 75, 76, 78) видно, що запропонований гібридний метод на основі енергетичної оцінки має певні обмеження. Автору доцільно обґрунтувати вибір енергетичного критерію або вказати недоліки інших методів, які використані як основа для аналізу запропонованого методу зі змінним часовим сегментуванням.

3. Для запропонованих у дисертації алгоритмів (Розділ 2, стор. 68-73, Розділ 3, стор. 83-94, Розділ 4, стор. 123-131) автором недостатньо висвітлено вплив затримок, які можуть виникати при виконанні спектрального та вейвлет-аналізу. Ці затримки мають вагоме значення для ефективності проведення моніторингу, особливо в реальному часі. Доцільно надати більше інформації щодо обчислювальних витрат і часу виконання алгоритмів.

4. У роботі розроблено та змодельовано три методи моніторингу частотного спектру та виявлення сигналів радіозв'язку для різних стандартів. На завершення доцільно було б надати практичні рекомендації щодо вибору методу залежно від умов радіосередовища, що підвищило б прикладну цінність роботи. У Розділі 2 (стор. 65) наведено переваги та недоліки першого методу. Варто було б зробити подібний аналіз для інших методів у відповідних розділах роботи, щоб забезпечити рівноцінний підхід до оцінки.

Наведені зауваження та недоліки не є принциповими, і не впливають на кінцеві результати дисертаційної роботи.

#### **Загальна характеристика роботи.**

Дисертація є одноосібною кваліфікаційною науковою працею, яка містить нові наукові результати, демонструє внутрішню єдність та логічність викладення матеріалу, обґрунтовує особистий внесок автора в науку. У роботі розглянуто актуальну науково-практичну проблему, проведено всебічний аналіз відповідної сфери, запропоновано інноваційні ідеї, які реалізовано у вигляді методів, підходів, алгоритмів та програмних продуктів.

Автор продемонстрував належне володіння математичним апаратом і коректне його застосування для вирішення поставлених наукових завдань дослідження. Одержані наукові результати, зокрема розробка методів спектрального аналізу та критеріїв оптимізації процесу спектрального моніторингу, а також практичні результати: алгоритми та експериментальна перевірка, свідчать про значний обсяг виконаної роботи. Це забезпечує вагомий практичний внесок у розвиток когнітивних телекомунікаційних технологій та створює основу для подальших досліджень та впроваджень.

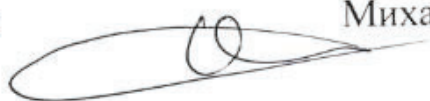
За результатами вивчення дисертаційної роботи можна зробити висновок, що дисертаційна робота в цілому містить нове вирішення задачі підвищення ефективності спектрального моніторингу в безпроводових когнітивних телекомунікаційних системах.

За своїм змістом та науковим рівнем дисертаційна робота задовольняє вимогам Постанови № 44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженої Кабінетом Міністрів України від 12 січня 2022 р (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 502 від 19.05.2023р.) а її автор – Сопронюк Іван Іванович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за науковою спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри інформаційно-комунікаційних технологій  
Національного університету «Львівська політехніка»  
доктор технічних наук, професор

Михайло КЛИМАШ

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.



Підпис Климаша М. М. засвідчую:

Вчений секретар  
Національного університету  
«Львівська політехніка»



Роман БРИЛИНСЬКИЙ