

## **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 теми дисертаційної роботи.** Функціонування більшості галузей промисловості, технологічного сектору та систем життєзабезпечення людей безпосередньо залежить від продуктивності та надійності систем передачі й обробки інформації. Активне розширення ринку цифрових комунікаційних технологій та впровадження концепції Інтернету речей спричинило стрімке збільшення швидкостей передачі даних. Паралельно з цим, зростання числа користувачів телекомунікаційних мереж значно загостило питання дефіциту частотного спектру, що висуває вимоги до впровадження більш досконалих методів фільтрації для забезпечення стабільного та швидкого обміну інформацією.

На сьогодні розроблено і впроваджено широкий ряд алгоритмів обробки сигналів заснований на методах розпізнавання, фільтрації, спектрального аналізу компонентів інформаційних сигналів, проте питання вибору конкретних методів часто вирішується евристичними підходами і залежить від досвіду фахівців. Стає очевидно, що традиційні підходи до моніторингу частотного спектру та управління радіочастотними ресурсами більше не відповідають потребам сучасності.

Впровадження нових адаптивних підходів дозволить підвищити ефективність виконання аналізу для різних технологій зв'язку в широкому діапазоні сигналів, дозволяє оперативно реагувати на появу чи зростання рівня перешкод або навмисні втручання в процес передачі інформації, мінімізує дію людського фактору в управлінні мережами, забезпечуючи реалізацію перспективних можливостей когнітивних мереж. Інтенсивні дослідження в цьому напрямку спрямовані на мультикритеріальну оптимізацію методів спектрального аналізу, де одночасно враховуються кілька критеріїв, такі як швидкість, точність, енергоспоживання.

Відповідно до піднятої проблематики, метою дисертаційної роботи було обрано підвищення ефективності функціонування безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем шляхом впровадження гібридних методів спектрального моніторингу, отриманих на основі методів оптимізації та удосконалених методів аналізу радіочастотного спектру а також розроблених адаптивних алгоритмів управління спектральними ресурсами в умовах динамічно змінюваного радіосередовища. Зазначена мета відповідає темі

дисертаційної роботи та розкривається у комплексі завдань, серед яких варто окремо виділити наступні:

–вивчення перспектив підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних мереж на основі впровадження гібридних методів моніторингу спектру;

–застосування адаптивної часової сегментації та динамічного налаштування до змін частотно-часових характеристик сигналу для створення гібридного методу спектрального моніторингу, що забезпечує ефективне виявлення вільних частотних смуг та зниження рівня завад;

–використання адаптивних вейвлет-перетворень і фільтрів для створення методів спектрального моніторингу в умовах складного радіочастотного середовища;

–розробка методу ієрархічного циклічного спектрального моніторингу з оптимізацією вибору моделей сигналу на основі інформаційних критеріїв, а також із застосуванням багатокрокової адаптивної фільтрації з метою зниження інтерференції і врахування умов завмирання сигналу.

Глибокий і всебічний підхід до врахування особливостей і умов функціонування об'єкту дослідження відкриває нові перспективи в актуальній сфері технологій сучасності та закладає надійний фундамент для подальших досліджень.

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

Предметом дослідження дисертаційної роботи є методи, моделі, алгоритми оптимізації спектрального моніторингу та адаптивного управління радіочастотними ресурсами. Робота базується на використанні сучасних методів спектрального аналізу, оптимізації, адаптивного управління сигналами, а також на інтеграції математичних моделей, які враховують динамічну природу сигналів і шумів у телекомунікаційних мережах. Ключовим теоретичним підґрунтям є концепція когнітивного радіо, яка забезпечує динамічне управління частотним спектром для підвищення ефективності його використання.

Достовірність отриманих результатів підтверджується достатнім науковим обґрунтуванням що супроводжує розв'язання всіх поставлених часткових задач. Зокрема численні наведені результати експериментального моделювання дозволяють переконливо довести правомірність кожного висновку. Використання комплексного підходу до оцінки методів спектрального моніторингу, зокрема розроблених гібридних методів, таких як VTSM, забезпечує методологічну надійність отриманих результатів.

Авторський підхід до інтеграції інформаційних критеріїв Акайке та Байеса із сучасними методами адаптивної фільтрації не лише продемонстрував високу адаптивність розроблених алгоритмів, але й забезпечив баланс між складністю реалізації та точністю аналізу частотного спектру. Експериментальна апробація підтвердила, що запропоновані методи ефективно функціонують у динамічному радіочастотному середовищі, значно перевершуючи традиційні підходи.

Рівень обґрунтованості наукових положень і рекомендацій підтверджується апробацією результатів дисертаційного дослідження в публікаціях автора та участю в наукових конференціях міжнародного рівня та застосуванням результатів досліджень, що підтверджено актами про впровадження, дозволяє розглядати дисертаційне дослідження як завершений, методологічно чіткий та інноваційний внесок у розвиток когнітивних телекомунікаційних систем.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

– 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;

– 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;

– 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;

Всі отримані наукові результати є оригінальними та актуальними на сучасному етапі розвитку та застосування технологій моніторингу спектру телекомунікаційних систем та мереж.

#### **Практичне значення результатів дослідження.**

Дисертаційна робота Сопронюка І. І. має вагоме практичне значення, оскільки охоплює цикл цілісного дослідження, починаючи з постановки завдання і завершуючи достовірним вирішенням цього завдання, включає в себе всі відповідні теоретичні та експериментальні дані, переконливе обґрунтування рекомендацій та висновків.

Практичні результати дисертаційного дослідження полягають у розробці технологічних рішень, алгоритмів та програмних реалізацій на основі запропонованих методів у сфері когнітивних безпроводових телекомунікаційних систем. Окремо слід виділити такі результати:

– оптимізовано процес ідентифікації вільних частотних смуг та зниження рівня завад за допомогою методів статистичного аналізу і рекурсивної фільтрації. Зокрема доведено, що метод VTSM дозволяє підвищити точність на 18,5% при середньому рівні SNR (10 дБ) та знизити ймовірність хибних тривог на 10,2% у порівнянні з традиційними методами;

– розроблено алгоритм методу спектрального моніторингу з використанням варіативних часових сегментів, що дозволяє проводити аналіз спектру в реальному часі та відслідковувати зміни в спектральному складі сигналу. Метод досягає максимальної ефективності точності виявлення сигналів при високих SNR – до 85,6%. Експериментальна перевірка на сигналах 4G LTE, Wi-Fi 6 і GPS

підтвердила здатність методу ефективно працювати в умовах складного радіочастотного середовища;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію методу ієрархічного циклічного спектрального моніторингу з використанням інформаційних критеріїв Акайке (AIC) і Байєса (BIC) для оптимального вибору моделей сигналу, що дозволяє досягти балансу між точністю та складністю моделі. Отримані експериментальні результати для сигналів Wi-Fi, 5G NR, UWB, LoRaWAN, Bluetooth, GSM показали ефективну адаптацію роботи методу до шумів та завмирань;

Практичне впровадження отриманих результатів підтверджується відповідними актами, що містяться в додатках роботи.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності встановленим вимогам.** Дисертаційне дослідження автора представляє собою самостійну, унікальну, завершену наукову роботу, в якій розв'язане актуальне наукове завдання. Дисертація має структуру, що відповідає вимогам до наукових робіт такого рівня, складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота містить 167 сторінок основного тексту, у тому числі 38 рисунків, 26 таблиць, 154 найменування у списку використаних джерел, 6 Додатків (А-Е). Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 181 сторінках.

У вступі обґрунтовано актуальність задачі підвищення ефективності використання частотного ресурсу когнітивних безпроводових телекомунікаційних систем через удосконалення спектрального моніторингу, сформульовано завдання дослідження, вказано наукову новизну, практичну цінність та особистий внесок автора. Науковий апарат роботи добре визначений, а об'єкт, предмет та мета дослідження, зазначені у вступі, відповідають темі.

У першому розділі проаналізовано вимоги та підходи до застосування методів спектрального моніторингу, зокрема адаптивного управління частотним спектром. Визначено переваги гібридних методів, здійснена оцінка ефективності за точністю, швидкістю реакції та завадостійкістю, що дало змогу сформулювати напрямки подальших досліджень.

У другому розділі запропоновано гібридний метод VTSM із змінною часовою сегментацією, що динамічно адаптується до змін спектру. Наведені експериментальні результати підтвердили його ефективність при середніх і високих рівнях SNR, особливо для динамічних систем, проте метод поступається спеціалізованим підходам при низьких SNR.

У третьому розділі представлено вдосконалений метод спектрального моніторингу з використанням адаптивного сегментування, вейвлет-перетворення і адаптивну фільтрацію, що дозволяє проводити аналіз спектру сигналу в реальному. Розроблений алгоритм із варіативними часовими сегментами забезпечує виконання гнучкого аналізу, для зменшення шумів і підвищення точності при будь-якому SNR.

У четвертому розділі представлено метод ієрархічного спектрального моніторингу з використанням критеріїв Акайке і Байєса для оптимізації моделей сигналів. 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.

Висновки узагальнюють результати, підтверджуючи вирішення поставлених завдань і науково-практичну цінність роботи.

Форма і суть викладу матеріалу має чітку і логічну структуру, супроводжується математичними викладками для обґрунтування теоретичних положень та результатами комп'ютерного моделювання на мові Python. В роботі широко використовується ілюстративний матеріал, що наочно демонструє процес та результати дослідження. Виклад матеріалів, наукових положень і висновків подано доступним і зрозумілим стилем з посиланнями на використані джерела. Порушень академічної доброчесності не виявлено.

#### **Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації.**

Позитивно оцінюючи рівень розробки наукових і методичних положень, обґрунтованість наукових висновків та пропозицій, необхідно відмітити присутні недоліки.

1. У пунктах 3 і 7 алгоритму VTSM (Розділ 2, стор. 63 – 73) дублюється використання алгоритму Фур'є. Перший раз – при загальній оцінці складності сигналу і відповідній зміні довжини сегмента, другий раз – для визначення спектральних характеристик сигналу в нових сегментах та отримання оптимальних порогових значень для кожного сегмента. Таке повторне використання може спричинити збільшення затримок обробки сигналів у лініях зв'язку. Доцільно уточнити, яким чином враховувався цей аспект під час розробки алгоритму.

2. Для алгоритму VTSM рішення про наявність чи відсутність сигналу приймається шляхом порівняння параметрів енергії сигналу із розрахованим значенням порогу (Розділ 2, стор. 73, формули 2.9, 2.10). Разом з тим, забезпечення оптимального прийому вимагає мінімізації сумарної умовної ймовірності похибок 1-го і 2-го роду. У роботі доцільно було б надати оцінку відношення ймовірностей виявлення сигналу ( $PD$ ) до ймовірності хибного виявлення ( $Pfa$ ) для повнішого обґрунтування ефективності алгоритму.

3. Для удосконалення ефективності методу спектрального моніторингу в алгоритмі (Розділ 3, стор. 84, рис. 3.2) запропоновано замінити фільтри Баттерворта, Чебишева та Кайзера на адаптивні фільтри Калмана, LMS та RLS. Проте дисертація не містить достатнього обґрунтування такого вибору, зокрема, щодо переваг запропонованого підходу у порівнянні з попереднім рішенням. Доцільно було б уточнити, чим саме обумовлено таке рішення.

Слід відмітити, що зазначені зауваження не мають принципового характеру і не можуть негативно вплинути на загальну позитивну оцінку теоретичного рівня та практичної значущості результатів дисертаційної роботи Сопронюка І.І.

### **Висновок.**

Дисертаційна робота СОПРОНЮКА Івана Івановича на тему: «Методи моніторингу частотного спектру для підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем», є завершеною науковою працею на актуальну тему, містить інноваційні, самостійні авторські, науково обґрунтовані і практично адаптовані результати в галузі телекомунікацій.

Визначальним результатом теоретичних та експериментальних досліджень є розробка і удосконалення методів спектрального аналізу за допомогою використання гібридних підходів, інтеграції статистичних та адаптивних алгоритмів. Це дозволило забезпечити високий рівень точності і адаптивності в умовах реального часу.

Таким чином, дисертаційна робота СОПРОНЮКА І.І. «Методи моніторингу частотного спектру для підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем», відповідає стандарту спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», та 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.). Автор роботи, СОПРОНЮК Іван Іванович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент,  
професор кафедри телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних технологій  
Хмельницького національного університету  
доктор технічних наук, професор

Юлій БОЙКО

«03» 02

2025 р.

