

**ВІДГУК**  
офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**Шмігеля Богдана Олеговича**  
на тему «Підвищення продуктивності низькоенергетичних безпроводових  
каналів зв'язку сенсорних телекомунікаційних систем»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»  
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**Актуальність теми дисертації.**

Створення інформаційного суспільства у світі є одним із найактуальніших та найважливіших завдань сучасності. Пріоритетами формування сучасної інформаційної інфраструктури в Європейському Союзі (ЄС) та в Україні, зокрема, є створення загальноєвропейської системи високошвидкісного мобільного широкосмугового доступу до ресурсів мережі Інтернет по всій території. Це широкосмуговий зв'язок доступ на основі використання мобільних технологій четвертого покоління 4G та 5G (п'яте покоління), Wi-Fi та інших розповсюдженіх радіотехнологій. На вирішення питань впровадження новітніх радіотехнологій спрямовані цільові зусилля найбільших світових операторів стільникового зв'язку (наприклад, Orange, Vodafone тощо), виробників мережевого обладнання (Ericsson, Nokia тощо), дослідницьких установ тощо.

У той же час вплив цих технологій сучасного суспільства неможливо переоцінити. Наразі мобільний зв'язок вважається нормою, а мобільні технології є найпопулярнішими та тими, що розвиваються стрімкими темпами.

Поряд зі зростанням кількості різних пристрій, підключених до глобальної мережі, з'являються і нові популярні послуги (передача відео високої чіткості 4K, 8K, віртуальна реальність (Virtual Reality - VR), доповнена реальність (Augmented Reality - AR), концепція Connected Cars тощо), які висувають принципово нові вимоги до цільової ефективності стільникових мереж (а саме: зменшення затримок, збільшення необхідної пропускної здатності тощо). При цьому, слід відзначити, що сучасний світ переживає експоненціальне збільшення даних, які передаються різними мережами, а тому існуюча інфраструктура вже не завжди здатна ефективно справлятися з цими об'ємами мобільного трафіку. При цьому, окремим напрямком розвиваються також радіотехнології, що здатні забезпечувати стійкий зв'язок із пристроями Інтернету речей (сенсорами). Для них є необхідним забезпечення стійкого зв'язку в умовах низької енергетики ліній зв'язку, завад та багатопроменевого розповсюдження.

Очевидним стає те, що найближчим часом існуючі мережі не зможуть забезпечити необхідну якість обслуговування для сенсорних пристрій Інтернету речей. Таким чином, обрана дисертантом тематика є дуже актуальною та перспективною.

## **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вдосконалено векторно-фазовий метод для визначення завадостійкості багатопозиційних сигналів, що відкрило можливості використання методу в умовах низької енергетики каналу (при значеннях відношення сигнал/шум до 10 дБ).

2. Вдосконалено метод визначення умов підвищення показників продуктивності на основі зміни швидкості передавання інформації від джерела, відмінність якого полягає в тому, що за рахунок синтезу параметрів багатопозиційних сигнально-кодових конструкцій визначено умови досягнення екстремумів продуктивності каналу зв'язку.

3. Вдосконалено метод оцінки ефективності використання ресурсів каналу зв'язку, відмінність якого полягає в тому, що оцінка ефективності передавання дискретних сигналів дозволяє наочно відображає динаміку зміни відношення потужності сигнал шум на вході демодулятора одночасно для показників енергетичної, частотної та інформаційної ефективності.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

## **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Шмігеля Б.О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми ОП 46365 «Телекомунікації та радіотехніка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям підвищення продуктивності низькоенергетичних безпроводових каналів зв'язку.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Шмігеля Богдана Олеговича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, plagiatu та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

## **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 137 сторінок.

У вступі розкрита актуальність теми дисертаційного дослідження, підkreślено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, чітко сформульовані мета та задачі дисертаційного дослідження, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Також у вступі наведено короткий опис структури дисертаційного дослідження та зміст основних її розділів.

У першому розділі автором було розглянуто основні засади побудови сенсорних телекомунікаційних систем, проведено змістовний аналіз стандартів безпроводового зв'язку. Також було проаналізовано архітектуру та відповідно класифікацію сенсорних мереж зв'язку. Крім того, автором було розглянуто показники якості функціонування каналів зв'язку сенсорних мереж та відповідно було сформовано критерії підвищення продуктивності систем з використанням цих стандартів. На базі проведеного аналізу було сформульовано цілі і зроблена постановка задач дослідження, що полягала у необхідності підвищення якості зв'язку в каналах систем сенсорного зв'язку. В якості одного із етапів вирішення цієї задачі було описано методологію оцінки продуктивності каналів зв'язку при використанні широкосмугових сигналів та сигнально-кодових конструкцій.

Другий розділ було присвячено дослідженю властивостей широкосмугових каналів зв'язку в умовах низької енергетики. То ж було розглянуто властивості широкосмугових сигналів та проведено порівняння характеристик завадостійкості з вузькосмуговими сигналами при однаковій потужності випромінювання та методах обробки. Проведено аналіз використання широкосмугових сигналів при незмінній енергії сигналу та описано доцільність їх використання в умовах низької енергетики каналу. Було показано, що використання широкосмугових сигналів доцільне тільки для протидії вузько-смуговим завадам, які займають тільки частину смуги частот і для забезпечення скритності електромагнітних сигналів у спеціальних сферах використання. При обмеженні в ресурсі (обмежена енергія сигналу), відбуваються втрати завадостійкості або витрати ресурсу під час намагань по відновленню достовірності.

В третьому розділі проведено розробку методу оцінки достовірності передачі сигналів в сенсорних телекомунікаційних системах. Спочатку було проведено аналіз методів оцінки достовірності передачі сигналів. На базі використання результатів проведеного аналізу, було запропоновано метод оцінки граничних показників достовірності широкосмугових сигналів зв'язку та сигнально-кодових конструкцій. Положення даного методу лягли в основу формування рекомендацій щодо вдосконалення методу оцінки завадостійкості на основі векторно-фазового методу. Вдосконалений векторно-фазовий метод

для визначення завадостійкості багатопозиційних сигналів полягає в тому, що реалізовано можливості використання методу в умовах низької енергетики каналу (при значеннях відношення сигнал/шум до 10 дБ). Завдяки цьому підвищено точність оцінці показників завадостійкості сигналів при значеннях відношення сигнал/шум до 10 дБ, доведена суттєва похибка при використанні традиційного аналітичного оцінювання достовірності передавання інформації в умовах низької енергетики, що суттєво позначилося на точність розрахунків показників продуктивності каналу зв'язку в цих умовах. Усунена похибка визначення ймовірності помилки  $P_b$  складає до 90% при зміні відношення сигнал/шум в діапазоні 2-5 дБ та до 25% в діапазоні 5-10 дБ у порівнянні із використанням традиційних аналітичних формул.

В четвертому розділі проведено дослідження показників продуктивності каналів зв'язку сенсорних телекомунікаційних систем в умовах низької енергетики. Зроблено аналіз енергетичних границь використання сигналів каналів зв'язку сенсорних телекомунікаційних систем за критерієм їх продуктивності. Наведено метод визначення екстремумів продуктивності в різних енергетичних умовах. Визначено особливості забезпечення необхідної продуктивності каналів зв'язку сенсорних телекомунікаційних систем в умовах низької енергетики. Також було проведено оцінку інформаційної ефективності використання каналів зв'язку сенсорних телекомунікаційних систем в умовах низької енергетики. Зроблено аналіз методики оцінки ефективності каналів зв'язку. Модифіковано методику оцінки ефективності з урахуванням особливостей каналів зв'язку сенсорних телекомунікаційних систем. Проведена оцінка показників інформаційної ефективності безпроводових каналів зв'язку сенсорних телекомунікаційних систем.

У загальних висновках до роботи відображені стисла характеристика роботи, її наукова новизна, практична цінність та розкриті перспективи використання результатів роботи.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Орилюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 19 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 монографія та 5 тез доповідей у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах WoS та/або Scopus, 4 статті у періодичних наукових виданнях, 5 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

Також результати дисертації були апробовані на 11 наукових фахових конференціях.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. На стор. 28 наведено таблицю 1.1 із порівнянням стандартів сенсорних мереж, проте в тексті відсутнє посилання на неї і відповідно висновки, які можна зробити за результатами аналізу даної таблиці.
2. В підрозділі 1.4 «Цілі і постановка задачі дослідження» було би доцільно додати таблицю з результатами порівняння існуючих методів, методик, моделей, визначенням їх недоліків, що могло б в результаті виокремити результати отримані автором.
3. У другому розділі присутнє посилання на формулу (4.1), яке є некоректним.
4. Рисунок 2.1 є неякісним. Доцільно було би його замінити.
5. У роботі наведено велику кількість графіків, згенерованих у програмному середовищі Matlab, проте відсутній програмний код, який використовувався для моделювання. Доцільно було би додати його у додатках, що б дозволило відтворити моделювання, проведене автором.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Шмігеля Богдана Олеговича на тему «Підвищення продуктивності низькоенергетичних безпроводових каналів зв'язку сенсорних телекомунікаційних систем» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Шмігель Богдан Олегович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

**Офіційний опонент:**

Завідувач кафедри телекомунікаційних  
та радіоелектронних систем  
Національного авіаційного університету  
доктор техн. наук, професор

Роман ОДАРЧЕНКО

М.П.

«17» березня 2023 року



Підпись гр. Одарченко Р.

засвідчує

Вчений секретар

Національного авіаційного університету