

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

**ЦИМБАЛЮКА ІВАНА РОСТИСЛАВОВИЧА**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПРИЙМАННЯ**

**РАДІОСИГНАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

### *Актуальність теми дисертації*

Дисертаційна робота «Методи та засоби підвищення достовірності приймання радіосигналів із використанням нейронних мереж» є досить актуальною, особливо в умовах військової агресією, яка супроводжується активним використанням засобів повітряного нападу та засобів радіоелектронної боротьби. Технології штучного інтелекту загалом, та нейронні мережі зокрема, продемонстрували високу ефективність у різних галузях, таких як комп'ютерний зір та розпізнавання мови. Вони виявилися успішними й у системах зв'язку, де основними проблемами є перешкоди та ентропійна невизначеність джерел інформації. Використання нейронних мереж для обробки радіосигналів дозволяє підвищити достовірність приймання, виявляти шум і слабкі сигнали, що особливо важливо для сучасних систем зв'язку.

Перенесення технологій машинного навчання та штучного інтелекту у сферу обробки радіосигналів дозволяє суттєво підвищити їхню достовірність. Нейронні мережі здатні навчатися на великих масивах даних, вони забезпечують високу точність і автономність систем обробки сигналів. Вони можуть ефективно розпізнавати недетерміновані сигнали та вирішувати завдання, які раніше були складними для традиційних методів обробки, таких як фільтрація, модуляція та демодуляція.

Таким чином, розроблення методів та засобів підвищення достовірності приймання радіосигналів із використанням нейронних мереж є актуальною науковою задачею. Впровадження цих технологій може дозволити значно

покращити якість бездротових комунікацій, зменшити кількість помилок і втрат даних, підвищити достовірність приймання радіосигналів, що в свою чергу дозволить забезпечити вищий рівень стабільності та надійності роботи критичних систем.

***Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.***

Тема дисертації відповідає науковим напрямкам кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету "Львівська політехніка" "Телекомунікаційні, інфокомунікаційні та радіотехнічні системи передавання даних, сигналів керування та телеметричної інформації" та "Проектування вбудованих процесорних систем з використанням штучного інтелекту і нейронних мереж". Дисертаційна робота виконана в межах держбюджетних науково-дослідницьких робіт:

1. «Підвищення ефективності засобів бездротового зв'язку відповідального призначення та процедур моделювання і прогнозування їх характеристик» (ДБ/Зв'язок), держ. реєстр. № 0118U000261.
2. «Розроблення криптозахищеної системи високошвидкісного передавання даних у діапазонах УВЧ і НВЧ з підвищеними завадостійкістю та відмовостійкістю» (ДБ/ДЕМОДУЛЯЦІЯ), держ. реєстр. № 0122U0009600.
3. «Методи та алгоритми роботи завадозахищеного радіоканалу зв'язку з використанням технології програмно-визначеного радіо» (ДБ/Радіозв'язок), держ. реєстр. № 0124U000777.
4. «Система криптозахищеного завадозахищеного прихованого зв'язку з безпілотними літальними апаратами великого радіусу дії з використанням ретранслятора», держ. реєстр. № 0124U000825.

***Достовірність отриманих у роботі наукових та практичних результатів забезпечується якістю та забезпеченням відповідних умов проведення експериментальних робіт, використанням відомих методів досліджень.***

### ***Наукова новизна результатів дисертаційної роботи***

Здобувач наводить три основні пункти наукової новизни, що стосуються розроблення та вдосконалення методів і засобів підвищення достовірності приймання радіосигналів за допомогою нейронних мереж. Кожен із цих пунктів має вплив на розвиток технологій обробки сигналів і сприяє підвищенню ефективності сучасних систем зв'язку.

- Використання комірок Вороного забезпечує більш раціональну організацію даних для навчання нейронних мереж.
- Врахування впливу зовнішніх чинників при імітаційному моделюванні, зокрема шумів та фазових зміщень, дозволяє оптимізувати процес створення вибірок для навчання нейронних мереж, що забезпечує високу достовірність моделювання і наближає його до реальних умов експлуатації.
- Використання одновимірних нейронних мереж для оброблення сигналів забезпечує вищу достовірність оброблення радіосигналів за рахунок інваріантності щодо зсуву та виявлення абстрактних закономірностей зміни параметрів сигналів.

### ***Практичне значення***

Здобувач наводить два основні пункти практичного значення роботи, які демонструють конкретні досягнення в області розробки та впровадження систем для підвищення достовірності приймання радіосигналів з використанням сучасних технологій.

### ***Характеристика основних положень роботи***

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та завдання, предмет та об'єкт дослідження. Викладено зміст наукової новизни та практичне значення отриманих результатів. Відзначено особистий внесок автора дисертації, наведено його публікації і зазначено де проводилася апробація результатів дисертації.

**В першому розділі** автор оглядає останні наукові публікації щодо використання нейронних мереж у сфері радіокомунікацій, аналізує сучасні тенденції та стандарти, такі як LTE, 4G і Wi-Fi. Детально розглянуто архітектуру, функції активацій та методи навчання нейронних мереж, підтверджуючи актуальність і потенціал теми.

**В другому розділі** автор описує математичні моделі приймача та передавача з амплітудною модуляцією багатьох складових (АМБС). На основі цих моделей створено імітаційні моделі в середовищі GNU Radio, які дозволяють враховувати недосконалість системи та симулювати реальні умови радіокомунікацій.

**В третьому розділі** автор описує практичну реалізацію та оцінку розробленої системи на базі ШНМ для оброблення сигналів АМБС. Автором описано процес формування навчальної вибірки, запропоновано метод формування масиву радіосигналів з використанням комірок Вороного, а також розроблено математичну модель нейронної мережі для обробки недетермінованих сигналів.

**В четвертому розділі** автор описує результати експериментальних дослідження з використанням приймача на базі RTL-SDR та мікрокомп'ютера Pine A64. Експерименти показують покращення точності ідентифікації сигналів порівняно з традиційними методами, зокрема зменшення імовірності символної помилки при низькому відношенні сигнал-шум.

Основний зміст роботи викладено на 115 сторінках. Робота містить 69 рисунків, 11 таблиць і 88 бібліографічних найменувань. Її загальний обсяг становить 147 сторінок.

Дисертація є завершеною науковою працею, має логічну структуру, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України.

### ***Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності***

За результатами аналізу дисертаційної роботи та на основі довідки про її перевірку на академічний плагіат порушення академічної доброчесності не виявлено. Фальсифікація тексту відсутня.

### ***Питання та зауваження до дисертації***

- 1) З тексту роботи незрозуміло, як саме отримано окремі практичні результати, зокрема підбір навчальних та контрольних вибірок, що зменшує практичну цінність проведеного дослідження.
- 2) У роботі описується використання повнозв'язних шарів, але при цьому використовується термін «рекурентні» (ст. 90, 105).
- 3) Недостатньо обґрунтовано вибір розмірності вхідних даних нейронної мережі (ст. 107) та не зазначено, чи використовувалися методи зменшення розмірності даних.
- 4) На ст. 113 заявлено про доцільність вибору діапазону ВСШ саме від -12 дБ до 4 дБ, але не пояснено у чому полягає така доцільність.
- 5) В дисертаційній роботі було б доцільно навести приклади застосування розробленого програмно-апаратного комплексу з врахуванням характеристик реального обладнання, а також навести практичні рекомендації по використанню розробленого методу.
- 6) У роботі виявлені стилістичні та граматичні неточності.

### ***Висновки***

Дисертація Цимбалука Івана Ростиславовича «Методи та засоби підвищення достовірності приймання радіосигналів із використанням нейронних мереж», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації» та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» за актуальністю, науковою новизною, загальним переліком отриманих результатів, а також їх взаємозв'язком та повнотою їх викладу в журнальних публікаціях та апробацією цілком відповідає вимогам «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 №44 від 12 січня 2022 року №44 зі змінами, внесеними згідно Постанови Кабінету Міністрів України №341 від 21 березня 2022 року.

Рішення, що запропоновані Цимбалюком І. Р., є актуальними, дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44), а її автор Цимбалюк Іван Ростиславович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

### Рецензент

Доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри телекомунікацій  
Національного університету  
“Львівська політехніка”



Мар'ян КИРИК

### Підпис професор Кирика М.І. засвідчую:

Вчений секретар  
Національного університету  
“Львівська політехніка”



Роман БРИЛИНСЬКИЙ

