

## 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 Цимбалюка Івана Ростиславовича присвячена створенню методів підвищення достовірності приймання радіосигналів із використанням нейронних мереж, при мінімізації обчислювальної потужності. Важливість задачі підвищення чи підтримання на задовільному рівні достовірності приймання радіосигналів неможливо переоцінити, особливо в сучасних умовах, де безпровідні технології є невід'ємною частиною як щоденного життя людини, так і функціонування критичної інфраструктури. У випадку критичної інфраструктури, наприклад систем управління промислових підприємств, моніторингу здоров'я, аварійних служб і безпілотного транспорту, збільшення кількості помилок чи втрат даних може призводити до серйозних наслідків, починаючи від великих фінансових збитків, закінчуючи загрозами здоров'ю чи життю людей. Тому внаслідок всюдисущості безпровідних технологій в сучасному світі завдання розроблення методів і засобів, що покращують достовірність приймання радіосигналів, є дуже важливою задачею як для інженерів, так і для науковців.

Запропоновані в дисертації методи та засоби базуються на припущеннях щодо ефективного розподілу простору сигнальних сузір'їв багатопозиційних модуляцій, досягненню балансу достовірності оброблення сигналів та затребуваної обчислюваної потужності, використанні методів аналітичного та імітаційного моделювання та машинного навчання. Зокрема, нейронні мережі показали високу ефективність у вирішенні задач, які традиційно важко було розв'язати за допомогою інших методів, таких як фільтрація, модуляція та демодуляція, кодування та декодування тощо.

Таким чином, тема дисертації, присвячена розробленню нових методів та засобів підвищення достовірності приймання радіосигналів з використанням нейронних мереж є актуальною науковою задачею.

### *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) (2018-2019 рр.), держ. реєстр. № 0118U000261.
2. «Розроблення криптозахищеної системи високошвидкісного передавання даних у діапазонах УВЧ і НВЧ з підвищеними завадостійкістю та відмовостійкістю» (ДБ/ДЕМОДУЛЯЦІЯ) (2022-2023 рр.) 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» (2024-2026 рр.) держ. реєстр. № 0124U000825.

*Достовірність отриманих у роботі наукових та практичних* результатів забезпечується якістю та забезпеченням відповідних умов проведення експериментальних робіт, використанням загальноприйнятих апробованих методів досліджень, таких як аналітичні методи, імітаційне моделювання, експериментальне дослідження програмної реалізації сформованих моделей на реальних пристроях приймання радіосигналів.

### ***Наукова новизна***

Усі отримані в дисертаційній роботі наукові результати є новими.

Зокрема автором вперше запропоновано метод формування масиву радіосигналів для навчання нейронних мереж, який, на відміну від існуючих, базується на використанні комірок Вороного, що дало можливість спростити та впорядкувати процес навчання нейронних мереж для розпізнавання сигналів з амплітудною модуляцією багатьох складових (АМБС).

В роботі вдосконалено метод імітаційного моделювання приймального та передавального пристроїв АМБС, який, на відміну від існуючих, дає змогу обробляти радіосигнали в режимі реального часу, а також надає базис для імітації процесу оброблення радіосигналів із використанням моделей нейронних мереж.

Подальшого розвитку набула модель нейронної мережі оброблення радіосигналів, яка на відміну від інших, обробляє недетерміновані радіосигнали і базується на використанні операції згортки одновимірних даних, що

забезпечує вищу достовірність оброблення радіосигналів за рахунок інваріантності щодо зсуву та виявлення абстрактних закономірностей зміни параметрів сигналів.

Все це дало можливість підвищити достовірність приймання радіосигналів безпроводних мереж шляхом створення нових методів та засобів, що використовують штучні нейронні мережі для оброблення радіосигналів.

### ***Практичне значення***

Практичне значення роботи зумовлено, насамперед, реалізацією програмно-апаратного приймача АМБС на базі системи з модифікованим для програмно-визначеного радіо приймачем телевізійного стандарту DVB-T RTL-SDR v4 та мікрокомп'ютером PINE A64 для програмного оброблення прийнятих сигналів з допомогою середовища GNU Radio та одновимірної згорткової нейронної мережі, створеної інструментами стандартизованої бібліотеки TensorFlow. Крім того, автором було створено імітаційні моделі приймача та передавача АМБС з допомогою інструментів мови програмування Python та середовища GNU Radio.

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

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань і додатків.

**У першому розділі** розглянуто та проаналізовано сучасні тенденції, стандарти радіокомунікацій, включаючи LTE, 4G та Wi-Fi, відповідні види цифрової модуляції та оцінено потенціал використання штучних нейронних мереж в задачах оброблення радіосигналів.

**Другий розділ** присвячено моделюванню приймально-передавальних пристроїв з амплітудною модуляцією багатьох складових. Зокрема, описані математичні моделі еталонних приймача та передавача АМБС. Розроблено та описано метод імітаційного моделювання приймального та передавального пристроїв АМБС, який, на відміну від існуючих, дає змогу обробляти радіосигнали в режимі реального часу, а також надає базис для імітації процесу оброблення радіосигналів із використанням моделей нейронних мереж. У підсумку, в розділі отримано моделі, що імітують реальні умови передавання та приймання сигналів.

**У третьому розділі** розроблено та досліджено нейромережеві моделі оброблення радіосигналів. Проведено огляд використання штучних нейронних мереж для оброблення радіосигналів на прикладі формування мережі з бінарною фазовою маніпуляцією для підтвердження ефективності використання нейронних мереж в задачах оброблення радіосигналів. Запропоновано удосконалену архітектуру нейронної мережі з урахуванням особливостей радіосигналів, зокрема їх часової структури та особливостей

сигнального сузір'я. Для визначення ефективності системи використовувались сучасні техніки машинного навчання, які дають змогу глибше аналізувати структуру даних та ефективніше вирішувати задачі класифікації.

У четвертому розділі описано експериментальні дослідження запропонованого підходу до приймання радіосигналів. Наведено процес розгортання експериментальної системи з використанням моделі приймача на базі RTL-SDR та дипольної антени. Отримані дані були проаналізовані з використанням розробленої моделі нейронної мережі, що дало змогу продемонструвати практичну працездатність системи. В результаті проведених експериментів було встановлено, що застосування штучних нейронних мереж дозволяє значно підвищити достовірність оброблення сигналів АМБС порівняно з класичними підходами. Описана система забезпечує високу точність при детектуванні сигналів і може адаптуватися до змін у характеристиках радіоканалу, що підтверджує високий потенціал використання нейронних мереж в сучасних радіотехнічних системах.

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, 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) Під час класифікації радіосигналів не виділялась валідаційна вибірка для перевірки залежності побудованої нейромережевої моделі від даних; вибірка ділилась тільки на навчальну та тестову.
- 2) На стор. 90 дисертаційної роботи наведено «просту РНМ для класифікації фрагментів 8-АМБС», точність визначення символів якої становила 99,87%. Проте контексту та мети побудови такої моделі, а також її недоліків, які зумовлюють подальші дослідження та удосконалення нейромережевих моделей не наведено.
- 3) В роботі не наведено детального опису набору даних – обсяг навчальної та тестової вибірок, збалансованість класів в тестовій вибірці, тощо.
- 4) Не зрозуміло, що мається на увазі під терміном «приблизна структура моделі» на рис.3.17 (стор. 105).
- 5) На стор. 107 дисертаційної роботи вказано, що розроблена математична модель нейронної мережі зображена на рис. 5. По-перше незрозумілим є

посилання на рисунок, оскільки рисунок з таким номером в дисертації відсутній, а по-друге, математичну модель, мабуть, краще подавати у вигляді рівнянь.

### **Висновок**

Дисертація Цимбалюка 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» є актуальною, завершеною науковою працею, що направлена на розв'язання актуального науково-практичного завдання розроблення нових методів та засобів приймання радіосигналів із використанням нейронних мереж. Рішення, що запропоновані Цимбалюком І. Р., є актуальними.

Беручи до уваги актуальність, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, вважаю, що 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 систем штучного  
інтелекту Національного університету  
«Львівська політехніка»

Віталій ЯКОВИНА

Підпис д.т.н., професора Яковини В.С.  
засвідчую:

Вчений секретар Національного  
університету «Львівська політехніка»



Роман БРИЛИНСЬКИЙ