

## ВІДГУК

офіційного опонента - доктора технічних наук, професора, завідувача відділу інформаційних технологій дистанційного зондування Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України

РУСИНА Богдана Павловича 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.***

Забезпечення надійності прийому радіосигналів є надзвичайно важливою проблемою у сучасних умовах, де бездротові технології відіграють ключову роль у багатьох галузях науки. Сучасні системи часто залежать від точності та стабільності переданих сигналів, оскільки навіть незначні помилки або втрати даних можуть призвести до серйозних наслідків, включаючи значні фінансові втрати та загрози для безпеки. Це особливо критично у випадках, коли сигнали використовуються для отримання і обробки даних, що мають вирішальне значення для прийняття рішень та моніторингу важливих технологічних процесів.

Використання нейронних мереж для обробки сигналів має велике значення для покращення точності та надійності їх класифікації. Проте впровадження цих технологій часто ускладнюється високими вимогами до обчислювальних ресурсів. Втім, необхідність значних обчислювальних потужностей все ще залишається перешкодою для широкого впровадження цих технологій у практичні системи, де важлива висока продуктивність та ефективність. Таким чином, розробка нових методів, які підвищують надійність прийому сигналів при мінімізації обчислювальних витрат, є актуальним і важливим завданням.

Отже, тема дисертації, яка присвячена розробленню нових методів та засобів підвищення достовірності приймання радіосигналів з використанням нейронних мереж, є актуальним науковим завданням.

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

Тема дисертації відповідає науковим напрямкам кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету «Львівська політехніка», а саме «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 відповідними умовами проведення експериментальних робіт з використанням відомих методів досліджень.

**Наукова новизна** отриманих автором результатів:

1. Вперше запропоновано та досліджено 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 АМБС.
2. 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 машинного навчання.
3. Набула подальшого розвитку математична модель нейронної мережі оброблення радіосигналів, яка, на відміну від існуючих, обробляє недетерміновані радіосигнали і базується на використанні операції згортки одновимірних даних, що забезпечує вищу достовірність оброблення радіосигналів за рахунок інваріантності відносно зсуву та виявлення абстрактних закономірностей зміни параметрів сигналів.



### ***Практичне значення отриманих результатів:***

1. Створено імітаційні моделі приймача та передавача АМБС з допомогою інструментів мови програмування Python та середовища GNU Radio.
2. Реалізовано програмно-апаратний приймач АМБС на базі системи з модифікованим для ПБП 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 бібліотеки Tensor Flow.

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

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань та додатків.

**Перший розділ** присвячено аналізу сучасних праць з обробки радіосигналів методами машинного навчання та штучного інтелекту. Основна увага зосереджена на використанні нейронних мереж для обробки сигналів у системах зв'язку, зокрема виявлення слабких сигналів та шуму за допомогою різних типів мереж. Проведений огляд наукових публікацій підтверджує актуальність теми до застосування їх в обробці радіосигналів. У цьому розділі також розглянуто сучасні тенденції, стандарти радіокомунікацій, включаючи LTE, 4G та Wi-Fi, а також цифрові методи модуляції.

**Другий розділ** охоплює математичні моделі передавача і приймача з амплітудною модуляцією багатьох складових (АМБС). Створені моделі використовуються для формування сигналів та обробки інформаційних послідовностей на боці приймача. Імітаційна модель, розроблена у середовищі GNU Radio, показує функціональну завершеність системи та її здатність працювати в умовах адитивного білого гаусового шуму та фазових спотворень. Цей розділ також містить оцінки точності моделі та приклади передавання байтових послідовностей, що підтверджують її ефективність у реальних умовах.

**Третій розділ** досліджує реалізацію системи на базі мереж для обробки сигналів АМБС. Розроблена архітектура нейронних мереж враховує особливості радіосигналів, зокрема їх часову структуру та сузір'я модуляції. Запропоновано метод формування навчальної вибірки на основі комірок Вороного, що спрощує процес навчання нейронних мереж. Результати тестування демонструють високу точність ідентифікації сигналів, підтверджуючи переваги розробленої моделі. Описано процес розпізнавання аналогових сигналів, включаючи бінарну модуляцію, та надано кількісні оцінки точності.

**Четвертий розділ** описує експериментальне дослідження з використанням приймача на базі RTL-SDR з дипольною антеною, підключеною

до комп'ютера Pine A64. Проведені експерименти показали покращення точності ідентифікації сигналів порівняно з традиційними методами. Результати дослідження підтверджують, що застосування нейромереж дає змогу зменшити ймовірність помилок та підвищити якість прийому радіосигналів в умовах низького співвідношення сигнал/шум. Цей розділ також містить аналіз точності розробленої моделі та оцінки її швидкодії, що демонструють ефективність нейромережевого підходу у реальних умовах прийому сигналів.

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.

### ***Дискусійні положення, побажання щодо вдосконалення змісту, питання та зауваження до дисертації.***

1. В першому науковому результаті недостатньо чітко описано, в чому полягає метод формування радіосигналів для навчання нейромережі.
2. В наукових та практичних результатах не приведені кількісні оцінки, які б свідчили та підтверджували переваги запропонованого методу. На скільки підвищена достовірність прийняття радіосигналів в порівнянні з іншими моделями.
3. Перший розділ перенасичений загальними поняттями про нейромережі.
4. В виразі (2.11) допущена помилка – відсутній знак, по якому іде інтегрування.
5. В роботі недостатня кількість порівняльних оцінок з іншими моделями.
6. Як правило, в машинному навчанні різні моделі з точки зору обчислювальних затрат порівнюються в FLOPS.
7. Не зрозуміло, яким чином формується навчальна вибірка і як її розмір впливає на точність класифікації.
8. Необгрунтованим є вибір оптимізатора Adam.
9. На рис. 3.8, 3.16, 3.20 приведені не алгоритми, а їх блок-схеми.
10. В роботі часто зустрічаються граматичні та синтаксичні помилки (стр.71,80,92,99,104).



### **Загальний 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».

### **Офіційний опонент:**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач відділу  
інформаційних технологій  
дистанційного зондування  
Фізико-механічного інституту  
ім. Г.В. Карпенка НАН України



Богдан РУСИН

Підпис проф. Русина Б.П. засвідчую.

Т.в.о. ученого секретаря  
Фізико-механічного інституту  
ім. Г.В. Карпенка НАН України



Михайло ЗАЛІСКО