

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, доцента **Комара Мирослава Петровича**
на дисертаційну роботу **Пелешака Івана Романовича**
**«Система розпізнавання мультиспектральних образів на основі
осциляторних нейронних мереж»**,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 124 *Системний аналіз*
(галузь знань 12 *Інформаційні технології*)

1. Актуальність теми дисертації

У контексті розвитку теорії лінійних та нелінійних осциляторних нейронних мереж актуальними задачами є: розпізнавання мультиспектральних образів з амплітудою сигналу, співмірною рівню шуму; збільшення коефіцієнту стиску інформації нейронною мережею без втрати інформації; зменшення використовуваного обчислювального ресурсу і часу налаштування вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків нейронної мережі; оптимізація структури багатошарової нейронної мережі; підвищення ступеня криптостійкості нейромереж.

Окреслені у дисертаційному дослідженні проблеми свідчать про теоретичну і практичну актуальність тематики та про необхідність розробки системи розпізнавання мультиспектральних образів на основі осциляторних нейронних мереж.

2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка» «Дослідження, розроблення і впровадження інтелектуальних розподілених інформаційних технологій та систем на основі ресурсів баз даних, сховищ даних, просторів даних та знань з метою прискорення процесів формування сучасного інформаційного суспільства» і виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт:

- «Методи та засоби функціонування систем підтримки прийняття рішень на основі онтологій» (номер державної реєстрації 0118U000269; терміни виконання роботи: 01.2018–12.2019 р.),

- «Система підтримки прийняття рішень розпізнавання мультиспектральних образів на основі технологій машинного навчання та онтологічного підходу» (номер державної реєстрації 0120U102203; терміни виконання роботи: 04.2020–12.2021 р.).

Основні положення дисертації апробовано на семи міжнародних наукових конференціях (Львів, 2017 – 2019 рр., Харків, 2017 р., Czech Republic–Ceske Budejovice, 2019 р.). Відгуки науковців у ході обговорення основних положень підтверджують **актуальність дисертаційного дослідження.**

3. Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечена методологією визначення мети і завдань, об'єкту, предмету і

методів дисертаційного дослідження, використанням наукової термінології та законів обґрунтованих наукових теорій. Зокрема, застосовано головні методи системного аналізу для *побудови моделі системи* розпізнавання та шифрування мультиспектральних образів на основі нейронних мереж з лінійними та нелінійними осциляторними нейронами, *аналізу цієї моделі* нейронної системи способами *декомпозиції, аналізу, синтезу та концептуального моделювання*. При формулюванні висновків враховувалися результати найсучасніших суміжних досліджень, які представлені у відкритій базі цифрової ідентифікації DOI.

Враховуючи методологічну основу дисертаційного дослідження, кількісне та якісне опублікування матеріалів дисертації, а також їхнє широке обговорення на міжнародних наукових конференціях, наукових семінарах кафедри інформаційних систем та мереж, вважаю, що наукові положення, висновки і рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі, є **обґрунтованими і достовірними**.

4. Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у ґрунтовності теоретико-практичного підходу до розроблення системи розпізнавання і шифрування мультиспектральних образів на основі осциляторних нейронних мереж. Завдяки застосуванню методології системного аналізу *вперше розроблено метод стиску* на основі діагоналізації матриці вагових синаптичних зв'язків штучної нейронної мережі; *метод розпізнавання мультиспектральних образів* осциляторною нейромережею на основі інформаційного резонансу; *удосконалено метод шифрування інформації* з постійно змінним асиметричним ключем для кожного нового вхідного образу, який базується на синтезі діагоналізованої нейромережі та алгоритму AES і на синтезі нелінійних осциляторних нейронів з топологією ланцюжка і кільця. У процесі концептуального моделювання розроблено математичні моделі тришарової нейромережі з лінійними та нелінійними осциляторними нейронами, осциляторної нейромережі з топологією ланцюжка і кільця та *розвинуто модель оптимізації розміру* багатшарової нейромережі прямого поширення з мінімальною похибкою узагальнення.

5. Практичне значення результатів дисертації

Застосування запропонованих у дисертації методів для галузі системного аналізу забезпечить розробку і побудову моделей складних інформаційних систем, систем підтримки прийняття рішень та упровадження цих моделей засобами комп'ютерного моделювання. Зокрема, *метод стиску* вхідних образів на основі діагоналізації матриці вагових синаптичних зв'язків може бути використаний для зменшення часу налаштування синаптичних зв'язків у процесі навчання нейронної мережі завдяки зменшенню їх числа та для збільшення коефіцієнта стиску вхідних образів відносно повнозв'язної нейронної мережі. *Метод шифрування вхідних інформаційних сигналів* на основі ланцюгової та кільцевої нелінійної нейронної мережі та *метод шифрування інформації* на основі синтезу алгоритму AES і нейронної мережі з діагоналізованими синаптичними зв'язками можуть бути використані для шифрування вхідних інформаційних сигналів та захисту інформації від атак по стороннім каналам з підвищеним ступенем криптостійкості. *Осциляторна нейронна мережа* може бути використана як детектор радіолокаційних діаграм

розсіяння сигналів за критерієм резонансу. *Нелінійна модель оптимізації структури* багатошарової нейронної мережі може бути використана для оцінки параметра складності навчання нейронної мережі.

6. Аналіз змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і містить нові наукові положення, висновки та рекомендації з підтвердженим практичним значенням та патентом на корисну модель (Спосіб шифрування цифрової інформації на основі синтезу діагоналізованої нейронної мережі та AES. Національний університет «Львівська політехніка». У 2021 01284. № 3320/ЗУ/21). Структурно дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та трьох додатків. Також містить анотацію, зміст і перелік умовних позначень. Загальний обсяг дисертації – 171 сторінка, з яких 119 сторінок основного тексту.

У *вступі* подано загальну характеристику дисертації, зокрема, обґрунтовано актуальність теми, окреслено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка», визначено мету і завдання, об'єкт і предмет, методи дисертаційного дослідження, чітко сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів дослідження, окреслено особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертаційного дослідження на міжнародних наукових та науково-практичних конференціях і наукових семінарах кафедри інформаційних систем та мереж, зазначено кількість публікацій, зарахованих за темою дисертації, та структуру і обсяг дисертаційної роботи.

У *першому розділі* дисертації здійснено ґрунтовний системний та порівняльний аналіз структури і властивостей штучних нейронних мереж. По-перше, проаналізовано моделі штучних нейронних мереж з осциляторними нейронами – повнозв'язні та з локальними зв'язками; визначено їхні недоліки і на цій підставі окреслено необхідність розробки нових моделей лінійних та нелінійних осциляторних нейромереж. По-друге, проаналізовано нейромережеві технології розпізнавання осциляторних і мультиспектральних образів та виділено дві основні проблеми розпізнавання образів – визначення та добування ознак і прийняття рішення про відношення вектору ознак до певного класу. Проаналізовано два підходи до вирішення задач у теорії розпізнавання образів – навчання без вчителя та навчання з вчителем. По-третє, проаналізовано способи стиснення даних, алгоритми втратного та безвтратного стиснення. Зокрема, ґрунтовний аналіз методів стиснення даних на основі виділення частотних областей, застосування вейвлетів та фрактальних перетворень, методів з використанням більш універсальної моделі геометричних перетворень, методу нейромережевого стиснення інформації самоорганізованою мережею Кохонена. По-четверте, проаналізовано: технології нейронних мереж у задачах шифрування інформації; стійкість криптосистем; використання криптоалгоритмів не тільки для задач шифрування даних, але й для аутентифікації й перевірки цілісності.

У *другому розділі* досліджено стиск та шифрування вхідних образів методом діагоналізації матриці вагових синаптичних зв'язків у нейронній мережі. Для збільшення коефіцієнту стиску шляхом зменшення числа

синаптичних зв'язків запропоновано спосіб стиску вхідного інформаційного сигналу у нейронній мережі внаслідок діагоналізації матриці $\hat{\lambda} \equiv (\lambda_{ik})$ вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків між нейронами. На підставі порівняльного аналізу схематичних зображень нейромереж до і після діагоналізації синаптичних зв'язків встановлено, що недіагональні компоненти синаптичних зв'язків не зникають, а містяться в перенормованих елементах головної діагоналі після діагоналізації. Операція діагоналізації приводить до мінімізації часу налаштування вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків у нейронній мережі в процесі її навчання завдяки зміні морфології синаптичних зв'язків між нейронами та до зменшення числа операцій агрегування.

Крім того, у дисертаційній роботі запропоновано модифіковану тришарову нейронну мережу з архітектурою, яка має тільки діагональні синаптичні зв'язки між нейронами та доведено модифіковану теорему Хехт-Нільсена, що дає змогу апроксимувати функцію від n змінних, з заданою точністю $\varepsilon > 0$, за допомогою однієї операції агрегування. Доведено, що діагоналізація матриці синаптичних зв'язків приводить до зменшення використовуваного обчислювального ресурсу і до зменшення часу налаштування вагових коефіцієнтів у нейронній мережі в процесі її навчання.

Також у роботі запропоновано спосіб оптимізації структури багатошарової нейронної мережі за рахунок мінімізації нелінійної узагальненої похибки на основі принципу мінімальної довжини опису. Встановлено, що узагальнена похибка мережі при роботі з новими даними визначається похибкою апроксимації даних нейронною мережею у нелінійному наближенні та похибкою опису моделі. З умови мінімуму узагальненої похибки мережі виведені вирази для обчислення оптимального розміру мережі (кількість синаптичних зв'язків та кількість нейронів у прихованих шарах). Зазначено, що оптимізація багатошарової нейромережі пов'язана з проблемою її перенавчання. Розкрито, що задачею навчання нейронної мережі є не мінімізація похибки навчання, а мінімізація похибки узагальнення ε , визначеної для всіх можливих прикладів у майбутньому. Мережа з мінімальною похибкою узагальнення ε_{\min} буде володіти максимальною точністю розпізнавання та класифікації образів.

У дисертації розроблено систему шифрування інформації на основі синтезу діагоналізованої нейронної мережі та алгоритму AES (Advanced Encryption Standard (Rijndael)). Запропоновано систему шифрування на основі діагоналізації матриці вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків нейронної мережі у базисі векторів вхідних образів, що забезпечує формування нового асиметричного ключа для кожного вхідного образу. Внаслідок шифрування інформації постійно змінним ключем підвищується ступінь криптостійкості алгоритму порівняно з існуючими. Доведено, що криптосистема, побудована на синтезі алгоритму AES та діагоналізованої нейронної мережі, яка використовує нелінійну функцію активації і метод постійно змінних ключів для кожного окремого вхідного образу, є більш стійкою до відомих атак, ніж сам алгоритм AES та недіагоналізована нейро-криптосистема AES.

У третьому розділі розроблено архітектуру осциляторних нейронних мереж з лінійними та нелінійними осциляторними нейронами. Для розпізнавання мультиспектральних образів на основі інформаційного резонансу

побудовано математичну модель та архітектуру штучної нейронної мережі з лінійними та нелінійними осциляторними нейронами, що мають власну динаміку. Розроблено нелінійну модель шифрування вхідних інформаційних сигналів за допомогою системи взаємопов'язаних нелінійних осциляторних нейронів з топологією «ланцюжка» та «кільця», а дешифрування сигналів на виході лінійного та кільцевого ланцюжків – за допомогою оберненого оператора, що діє на вектор вихідного сигналу. Встановлено, що структура вихідного сигналу на виході нелінійної мережі за формою, амплітудою та часовою залежністю миттєвої частоти несучого інформаційного сигналу має вищий ступінь стохастичності ніж морфологія сигналу на виході окремого нелінійного нейрона. Виявлено існування резонансних ефектів у системі взаємопов'язаних нелінійних осциляторних нейронів з топологією «ланцюжка» і «кільця» за умови рівності частоти вхідного нестационарного сигналу та власної частоти динаміки нейрона. Розроблено спосіб розпізнавання інформації за допомогою модифікованої осциляторної нейронно-голографічної мережі з діагональними синаптичними зв'язками.

У *четвертому розділі* представлено результати комп'ютерного експерименту з використанням нейронних мереж. Для моделі осциляторної нейронної мережі розроблено алгоритм навчання та програму для розпізнавання мультиспектральних образів на основі інформаційного резонансу, яка програмно реалізована на мові Python. У середовищі «Wolfram Mathematica» розраховані графічні залежності узагальненої похибки мережі від кількості синаптичних зв'язків між нейронами при різних значеннях вхідних образів і фіксованій кількості навчальних прикладів та графічні залежності оптимальної кількості синаптичних зв'язків від числа навчальних прикладів при різних значеннях вхідних образів. Здійснено оцінку часу навчання нейронної мережі на основі співвідношень для оптимального числа синаптичних зв'язків між нейронами та оптимального числа нейронів в прихованих шарах.

7. Повнота викладу результатів у наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації забезпечується публікацією результатів дисертаційного дослідження в рецензованих міжнародних та вітчизняних періодичних наукових виданнях, а також численними доповідями на наукових та науково-практичних фахових конференціях. Пелещак І. Р. є автором 21 наукової праці, серед яких 1 монографія (зарубіжне наукове видання), 2 статті у фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз (з них 1 індексується у базі Scopus, 1 у базі Web of Science), 1 стаття у фаховому виданні України, 5 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, що входять до наукометричної бази Scopus, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, 5 матеріалів міжнародних наукових та науково-практичних конференції, які індексуються у базі Scopus, 1 патент на корисну модель, 5 наукових праць, які додатково відображають наукові результати дисертації.

8. Відсутність порушення академічної доброчесності

Результати перевірки дисертації та наукових публікацій Пелещака І. Р. свідчать про відсутність ознак академічного плагиату та фальсифікацій. Текст дисертації містить посилання і на власні публікації, і на публікації інших авторів. Отже, можна констатувати відсутність порушення академічної

доброчесності в дисертаційній роботі Пелешака І. Р. «Система розпізнавання мультиспектральних образів на основі осциляторних нейронних мереж».

9. Зауваження до дисертації

Дисертація Пелешака І. Р. «Система розпізнавання мультиспектральних образів на основі осциляторних нейронних мереж» є завершеною науковою працею та містить вагомі результати для галузі інформаційних технологій. Однак, варто зазначити окремі дискусійні аспекти, які виявлено в ході ретельного аналізу тексту дисертаційної роботи:

1. Окрім аналітичної оцінки, варто було би провести чисельну оцінку залежності часу налаштування синаптичних зв'язків у повнозв'язній та діагоналізованій нейронних мережах при розпізнаванні мультиспектральних образів.

2. Доцільно було би дослідити ступінь шифрування інформації гібридною криптосистемою, яка складається як з лінійного, так і кільцевого ланцюжків нейронів.

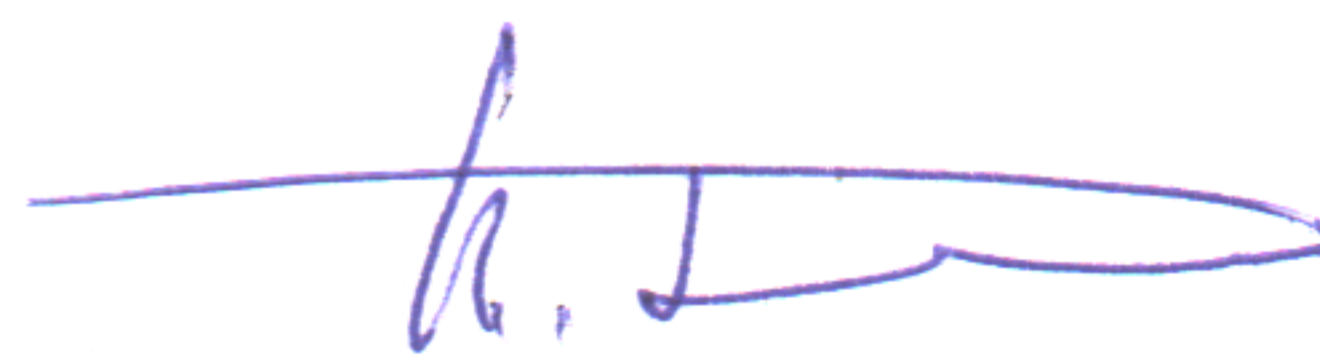
3. У тексті дисертації зустрічаються окремі стилістичні огріхи у використанні категорій «число» та «кількість».

Проте, наведені зауваження не зменшують теоретичної та практичної цінності отриманих результатів дисертаційного дослідження та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

10. Висновок про відповідність дисертації вимогам МОН України

Дисертація Пелешака І. Р. «Система розпізнавання мультиспектральних образів на основі осциляторних нейронних мереж» є завершеною науково-дослідною працею з вагомими теоретичними і прикладними результатами та повністю відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами № 759 від 31.05.2019 р.), Тимчасовому порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 06.03.2019 р. № 167 зі змінами № 608 від 09.06.2021 р.), які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а здобувач Пелешак Іван Романович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю **124 Системний аналіз, галузь знань 12 Інформаційні технології**.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, доцент,
завідувач кафедри інформаційно-
обчислювальних систем і управління
Західноукраїнського національного
університету



Мирослав КОМАР

Підпис Комара М. П. засвідчую.

Вчений секретар,
кандидат психологічних наук, доцент,
доцент кафедри психології та соціальної роботи
Західноукраїнського національного
університету



Марія МУДРАК