

ВІДГУК

офіційного опонента,
доктора технічних наук, професора,
директора інституту комп'ютерних систем
Національного університету «Одеська політехніка»
професора Антощук Світлани Григорівни
на дисертацію Ізоніна Івана Вікторовича на тему:
“Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу
біомедичних даних малих обсягів”,
що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 05.13.23 - Системи та засоби штучного інтелекту

1. Актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами

Актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена потребою у розробленні ефективних методів і засобів інтелектуального аналізу даних в умовах обмеженого обсягу інформації. Такі методи та засоби затребувані в галузі сучасних біомедичних досліджень, персоналізованої медицини, медико-біологічних експериментів, фармакогенетики, військової медицини та суміжних галузей, де збирання великомасштабних вибірок даних часто є технічно складним, фінансово затратним або обмеженим етичними міркуваннями.

Для даних в цих застосуваннях характерним є висока розмірність ознак, наявність аномалій, шумів, пропущених значень, а також гетерогенна структура даних, що істотно ускладнює застосування класичних моделей машинного навчання. Зокрема, використання ітеративних методів навчання, орієнтованих на великі обсяги даних, демонструє низьку ефективність в умовах обмеженого обсягу вибірки даних через підвищену ймовірність перенавчання, чутливість до початкових умов і складність налаштування значної кількості параметрів. Це обмежує їх практичну застосовність для широкої низки задач у вищеперерахованих галузях.

Тому важливість цього дисертаційного дослідження полягає в необхідності розроблення та теоретичного обґрунтування нових нейроподібних ансамблевих структур з неітеративним машинним навчанням для підвищення точності розв'язання задач регресії та класифікації на вибірках біомедичних даних малих обсягів. Такі ансамблі здатні забезпечити високу точність, робастність,

відтворюваність і здатність до узагальнення навіть за умов аналізу екстремально коротких вибірок даних.

Також актуальність і прикладна значущість вирішення виявленої теоретичної проблеми підтверджується активною участю здобувача у виконанні та керівництві низкою міжвідомчих і міжнародних дослідницьких проєктів, присвячених аналізу біомедичних даних малих обсягів, що свідчить про високий рівень затребуваності подібних методів і засобів у широкому спектрі застосувань: від фундаментальних досліджень до вирішення конкретних прикладних задач у сфері біомедицини, охорони здоров'я та медико-інформаційних технологій.

2. Наукова новизна результатів роботи

Автором вирішено важливу теоретичну проблему розвитку основ теорії синтезу нейроподібних ансамблевих структур з неітеративним машинним навчанням для підвищення точності розв'язання задач регресії та класифікації. Наукова новизна отриманих результатів не викликає сумнівів і полягає у наступному:

1. Вперше розроблено методологію розв'язання задач регресії і бінарної класифікації на основі декартового квадрату множини вхідних компонентів векторів, яка включає базовий, адитивний, каскадний методи, а також методи формування комбінованої поверхні відгуку та формування аугментованої вибірки даних необхідного обсягу, що забезпечує підвищення точності роботи нелінійних моделей машинного навчання і властивостей узагальнення під час аналізу екстремально-коротких вибірок біомедичних даних.

2. Вперше розроблено метод синтезу ансамблю лінійних нейроподібних структур, який завдяки агрегуванню кусково-лінійно апроксимованих поверхонь відгуку кожного його елемента, забезпечує підвищення точності моделей регресії та класифікації.

3. Вперше розроблено метод синтезу ансамблів гомогенних нелінійних штучних нейронних мереж, який шляхом агрегування апроксимованих поверхонь відгуку, сформованих на незалежних вибірках із використанням попарних симетричних випадкових зміщень, забезпечує підвищення точності моделей регресії та класифікації.

4. Вперше розроблено метод часткової компенсації систематичної похибки нейронної мережі узагальненої регресії, який за рахунок використання ансамблю з двох таких нейронних мереж, забезпечує підвищення точності розв'язання задач регресії у випадку аналізу біомедичних даних малих обсягів.

5. Вперше розроблено метод нелінійного розширення простору незалежних ознак біомедичної вибірки даних, який внаслідок їх доповнення вихідними сигналами шару підсумовування ймовірнісної нейронної мережі, забезпечує підвищення точності класифікації даних на лінійних неітеративних нейроподібних структурах.

6. Вперше розроблено прямий та зворотний методи компенсації похибки моделі регресії, в яких за рахунок перетворень на основі раціональних дробів, забезпечує підвищення точності та робастності апроксимації в задачах аналізу біомедичних даних малих обсягів з можливістю додаткового ітеративного уточнення результатів.

7. Удосконалено метод глобально-локальної апроксимації біомедичних даних малих обсягів, який на відміну від існуючого використовує незалежне виділення глобальної та локальної компонент шуканого сигналу із використанням ансамблю з двох нейронних мереж узагальненої регресії, що надає можливість додаткового ітеративного уточнення шуканого значення.

8. Удосконалено метод формування комбінованої поверхні відгуку із застосуванням кластерного аналізу, який на відміну від існуючого, доповнює простір ознак цільовим значенням центру кластера, що забезпечує підвищення точності моделей регресії та класифікації на вибірках даних малих обсягів без втрати узагальнення.

9. Набула подальшого розвитку теорія синтезу нейроподібних ансамблевих структур з неітеративним машинним навчанням, яка ґрунтується на розроблених методах нелінійного розширення простору ознак, аугментації даних, декореляції вибірок та компенсації похибок для підвищення точності розв'язання задач регресії та класифікації на вибірках біомедичних даних малих обсягів.

10. Набув подальшого розвитку метод кусково-лінійної апроксимації, який за рахунок ізоморфного подання кожного значення ознаки у вигляді її локальних компонентів розширює простір вхідних даних та забезпечує локальну корекцію параметрів багатовимірної поверхні відгуку лінійними неітеративними нейроподібними структурами.

Сукупність наведених положень наукової новизни свідчить про отримання значущих та оригінальних результатів, які у своїй сукупності забезпечують вирішення важливої теоретичної проблеми - розвиток основ теорії синтезу нейроподібних ансамблевих структур з неітеративним машинним навчанням для підвищення точності розв'язання задач регресії та класифікації на вибірках біомедичних даних малих обсягів.

3. Практична цінність результатів роботи

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у практичному використанні розроблених та вдосконалених методів і програмних засобів для розв'язання різноманітних прикладних задач інтелектуального аналізу біомедичних даних малих обсягів. Розроблені методи відзначаються високою точністю, стійкістю до шумів та аномалій, а також обчислювальною ефективністю. Це забезпечує їх придатність для застосування в умовах реальних біомедичних досліджень та клінічної практики (задачі біоматеріалознавства, ревматології, травматології, стоматології, трансплантології, кардіології, тощо), що підтверджено відповідними актами впровадження та використання розроблених та удосконалених методів у медичних установах різних регіонів України.

Автором розроблено низку оригінальних методів, які успішно застосовуються для розв'язання різноманітних задач в умовах аналізу екстремально-коротких вибірок даних. Також, використання розробленої автором методології розв'язання задач регресії і бінарної класифікації на основі декартового квадрату множини вхідних компонентів векторів, яка забезпечує квадратичне збільшення обсягу навчальної вибірки, дозволяє розв'язувати чимало прикладних задач із використання існуючих нелінійних алгоритмів машинного навчання в тому числі і штучних нейронних мереж. Всі розроблені та вдосконалені методи мають високий ступінь універсальності. Їх міжгалузева придатність є результатом продуманої архітектури методів, орієнтованої на обробку структурованих даних малих обсягів незалежно від предметної області.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Аналіз тексту дисертаційної роботи, а також використаного теоретико-методологічного інструментарію дозволяє зробити висновок про високий рівень наукової обґрунтованості розроблених та удосконалених методів, одержаних результатів, висновків і практичних рекомендацій.

Зокрема, теоретичні положення роботи добре формалізовані із застосуванням апарату математичного аналізу, теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії штучних нейронних мереж і сучасних методів машинного навчання. Їх достовірність забезпечується спиранням на усталені наукові гіпотези, теоретичні засади та доведені теореми, які обґрунтовують процес побудови, функціонування і результати розроблених/удосконалених методів. Такий підхід забезпечує не лише внутрішню логічну узгодженість, а й формальну коректність розроблених моделей.

Практичну реалізацію розроблених у дисертаційній роботі методів забезпечено за допомогою створеного автором спеціалізованого програмного забезпечення, що підтверджено трьома свідоцтвами про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми. Достовірність отриманих результатів підтверджується багаторівневою верифікацією, яка включала чисельне моделювання, порівняльний аналіз із класичними методами машинного навчання на основі різних показників ефективності, а також експериментальні дослідження на модельних та реальних біомедичних даних. Практична цінність і прикладна ефективність запропонованих рішень підтверджуються їх успішним впровадженням у діяльність низки медичних і науково-дослідних установ з різних регіонів України, що засвідчено відповідними актами впровадження та використання.

Загалом, дисертаційна робота Ізоніна І.В. характеризується високим ступенем як наукової обґрунтованості положень, висновків і рекомендацій, так і достовірності отриманих ним результатів, що підтверджуються як теоретичними доведеннями, так і практичними впровадженням.

5. Повнота викладення основних результатів роботи

У межах виконання дисертаційного дослідження Ізоніним І.В. було сформовано вагомий науковий доробок, який включає 53 публікації, що відображають різні аспекти теоретичних і прикладних результатів роботи. До складу публікацій за темою та змістом дисертації входять два розділи у колективних монографіях, підготовлених в Україні та за кордоном, 22 наукові статті, з яких 16 опубліковано у міжнародних виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus або Web of Science, та 6 - у фахових виданнях України. Крім того, автором опубліковано 26 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних наукових конференцій, з яких переважна більшість також індексується у Scopus. Практичну реалізацію результатів дослідження засвідчують три зареєстровані свідоцтва про авторське право на комп'ютерні програми, які відображають прикладний рівень і завершеність розроблених програмних засобів.

Наукові результати висвітлювалися на міжнародних форумах і конференціях у тринадцяти країнах світу, що дало змогу не лише апробувати основні ідеї дослідження та розроблені методи, а й отримати зовнішню фахову оцінку від міжнародної наукової спільноти. Тема публікацій повністю корелює зі спеціальністю дослідження і охоплює питання розробки, обґрунтування та

практичного застосування ансамблевих методів інтелектуального аналізу біомедичних вибірок даних малих обсягів.

Усі результати, що подані у публікаціях, належать до особистого внеску автора. У тих випадках, коли роботи підготовлені у співавторстві, внесок здобувача чітко визначено і задокументовано, і свідчить про його провідну роль у формуванні концептуальних і методологічних засад дослідження. Загалом, кількість, тематика та зміст наукових праць відображає повноту та послідовність реалізації дисертаційної роботи, а також відповідність вимогам до опублікування результатів досліджень, що висуваються на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

6. Оцінка змісту та завершеності дисертаційної роботи

Дисертація Ізоніна І.В. на тему “Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу біомедичних даних малих обсягів” є завершеним науковим дослідженням, викладеним на 371 сторінці, з яких основний текст становить 310 сторінок.

Структура роботи включає анотацію, вступ, сім змістовно насичених розділів, висновки до кожного з них, загальні висновки, список використаних джерел і додатки. Робота містить 17 таблиць, 50 рисунків і 5 додатків. Перелік літератури охоплює 310 джерел і займає 40 сторінок. Оформлення роботи відповідає чинним вимогам, визначеним наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 щодо оформлення дисертацій.

У **вступі** автор обґрунтовує актуальність дослідження, формулює мету й завдання, визначає об’єкт, предмет і методи дослідження, а також викладає наукову новизну й практичну значущість отриманих результатів. Тут також подано відомості про апробацію, публікаційну активність і особистий внесок здобувача у співавторські роботи.

Перший розділ присвячено аналізу специфіки біомедичних даних та проблем, пов’язаних із їх опрацюванням в умовах вибірок обмежених обсягів. Розглянуто обмеження класичних моделей машинного навчання, проаналізовано сучасні підходи до розширення простору ознак, аугментації даних (збільшення обсягу вибірки) та формування ансамблів ШНМ. Розглянуто класифікацію ансамблевих методів, їх недоліки, і сформульовано ключові завдання дослідження.

У **другому розділі** подано методи розширення вхідного простору ознак неітеративних моделей штучних нейронних мереж (ШНМ) за допомогою полінома Колмогорова–Габора, розроблено метод класифікації на основі вихідних сигналів імовірнісної ШНМ, а також удосконалено метод формування комбінованої поверхні

відгуку на базі кластерного аналізу. Розвинено метод кусково-лінійної апроксимації для підвищення точності апроксимації багатовимірних поверхонь відгуку лінійними методами машинного навчання.

У третьому розділі запропоновано новий підхід до структурної аугментації табличних даних на основі декартового квадрату множини вхідних компонент. Описано базовий та адитивний методи для розв'язання задач регресії та класифікації нелінійними алгоритмами машинного навчання. Розглянуто їх адаптацію до існуючих моделей ШНМ, а також розширення у вигляді каскадування і використання кластерного аналізу.

Четвертий розділ дисертації присвячено завданню синтезу ансамблів гомогенних ШНМ, які функціонують на декорельованих вибірках даних. Запропоновано різні стратегії декореляції, зокрема різновиди методу випадкових зміщень і кусково-лінійної апроксимації. Показано, як синтезовані ансамблі реалізують такі стратегії агрегування, як усереднення, голосування, блендінг і стекінг.

У п'ятому розділі розроблено методи компенсації похибок ШНМ, зокрема для штучної нейронної мережі узагальненої регресії. Описано каскадні методи (прямий та зворотний) компенсації похибок на основі раціональних дробів, що забезпечують усунення систематичних похибок ШНМ першого рівня, а також удосконалено метод глобально-локальної апроксимації.

Шостий розділ містить опис результатів моделювання й аналізу ефективності розроблених методів. Проведено експерименти на модельних даних з метою кількісного порівняння ефективності поданих методів з ефективністю за існуючими, що підтвердило їх переваги в задачах опрацювання біомедичних даних малих обсягів.

У сьомому розділі представлено приклади практичного використання розроблених методів для реальних біомедичних задач, зокрема у сферах біоматеріалознавства, ревматології, стоматології, травматології та трансплантології. Наведено результати моделювання, що підтверджують ефективність розроблених чи удосконалених методів у порівнянні з класичними. Окрему увагу приділено етичним аспектам застосування штучного інтелекту в медичній сфері.

У загальних висновках підсумовано основні досягнення роботи, спрямовані на розв'язання теоретичної проблеми, яка вирішується у дисертаційній роботі. У додатках подано графічні матеріали, експериментальні таблиці, акти впровадження та свідоцтва про реєстрацію авторського права на програмне забезпечення.

Слід зазначити, що автореферат відповідає змісту дисертації, написаний українською мовою з використанням сучасної української наукової термінології. Опубліковані в авторефераті положення співпадають з основними положеннями дисертаційної роботи.

7. Ступінь використання матеріалів і висновків кандидатської дисертації

Наукові результати, положення та висновки, представлені у дисертації Ізоніна І.В. на тему “Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу біомедичних даних малих обсягів”, поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.23 Системи та засоби штучного інтелекту, є самостійним дослідженням і не містять матеріалів попередньої дисертації автора на тему “Методи та засоби забезпечення надвисокої роздільної здатності зображень з флуктуаційною функцією інтенсивності”, захищеної 2016 року у спеціалізованій вченій раді Д 35.052.14 при Національному університеті “Львівська політехніка”.

8. Відсутність (наявність) академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації

У поданій до захисту дисертаційній роботі Ізоніна І.В. не виявлено ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації наукових результатів. Усі положення, результати, таблиці, графіки та програмні реалізації супроводжуються відповідними посиланнями на джерела або належно задокументовані як результати власного авторського дослідження.

Робота виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності відповідно до чинних нормативних вимог.

9. Відповідність дисертаційної роботи паспорту спеціальності та профілю докторської ради

Тема та зміст дисертаційної роботи Ізоніна І.В. на тему “Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу біомедичних даних малих обсягів” повністю узгоджується з науковим напрямом діяльності спеціалізованої вченої ради Д 35.052.14.

Дисертаційна робота відповідає положенням паспорта спеціальності 05.13.23 Системи та засоби штучного інтелекту: розроблення теоретичних засад створення та застосування систем штучного інтелекту різноманітного призначення; аналіз, синтез і моделювання нейронних мереж, розроблення методів їх проектування, оптимізації та навчання.

10. Недоліки і зауваження до дисертації

1. Опис існуючих, альтернативних методів аналізу даних малих обсягів (машина опорних векторів, випадковий ліс, екстремальний градієнтний бустинг, тощо), поданий в першому розділі дисертації, варто би було розглянути детальніше.

2. У тексті роботи корисно було б навести структурно-функціональні схеми роботи гетерогенних та гомогенних стекінгових ансамблів, з метою унаочнення різниці між модельною формою та функціонуванням цих ансамблів штучних нейронних мереж.

3. На ст. 111 автор визначає один із кроків удосконаленого методу формування комбінованої поверхні відгуку, а саме етап кластеризації, на якому використовується метод *k-means*. Проте, у випадку суттєвого перетинання класів, що типово для біомедичних задач, цей метод може не забезпечити якісних результатів роботи. Тут варто було б використати інші, більш ефективні методи, зокрема і нейронечіткі.

4. У 4 розділі подано розроблені лінійний та нелінійні ансамблі гомогенних нейронних мереж. Варто було б окреслити випадки використання кожного з них.

5. У підпункті 4.5 (стор. 190) четвертого розділу дисертації описано ієрархічні методи розв'язання задач регресії та класифікації, що базуються на попередній кластеризації вхідних даних. Водночас, їх виклад має переважно описовий характер, без належної математичної формалізації. Доцільно було б доповнити цей підрозділ чітким аналітичним описом принципів функціонування таких ієрархічних ансамблевих структур.

6. У п'ятому розділі дисертаційної роботи, автором розроблено та подано опис прямого та зворотного методів уточнення параметрів моделі регресії. Варто було б навести рекомендації, в яких випадках доцільніше використовувати кожен із них.

7. У розділі 7, пункт 7.6, етичні аспекти застосування розроблених та вдосконалених методів інтелектуального аналізу біомедичних даних малих обсягів розглянуто досить узагальнено та поверхнево. З огляду на чутливість медичних даних, наявність етичних обмежень щодо їх збору, зберігання та обробки, а також потенційний вплив результатів моделювання на клінічні рішення, доцільно було б більш детально висвітлити це питання.

8. З тексту роботи не зрозуміло, які методи використовувались для оцінки кількості кластерів для подальшої кластеризації методом *k-means* (стор. 235).

9. Не зрозуміло, з яким саме методом на рисунку 6.4 (стор. 238 – напис «існуючий метод») йде порівняння. В посиланні вказано номер джерела [229]. В цій роботі аналізуються інші набори даних (О.С. Міщук «Нейроподібні методи та засоби прогнозування параметрів забруднення атмосферного повітря»).

10. Не зрозуміло з тексту роботи, яку роль в описаній задачі регресії відіграє метод «диференційної еволюції» (табл.6.3, останній рядок).

11. В роботі присутні деякі огріхи, які пов'язані з оформленням, наприклад, не розкрито позначення в таблиці Б1 (додаток Б)– «значення розмаху гаусівської функції (сігма) 0.83 епох».

Зазначені зауваження не впливають суттєво на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, яка присвячена розв'язанню актуальної теоретичної проблеми, характеризується новизною отриманих результатів, має широке практичне значення та свідчить про високий рівень самостійності й завершеності проведеного дослідження.

11. Висновок

Дисертаційна робота Ізоніна Івана Вікторовича на тему: “Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу біомедичних даних малих обсягів”, є самостійною та завершеною науковою працею, в якій вирішено важливу теоретичну проблему розвитку основ теорії синтезу нейроподібних ансамблевих структур з неітеративним машинним навчанням для підвищення точності розв'язання задач регресії та класифікації на вибірках біомедичних даних малих обсягів.

За актуальністю теми дисертації, обсягом та рівнем виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, науковою новизною та практичною цінністю, ступенем обґрунтованості та достовірності результатів, а також повнотою опублікування результатів досліджень, дисертація відповідає вимогам, які висуваються до докторських дисертацій, а за змістом поданого в ній матеріалів - паспорту спеціальності 05.13.23 *Системи та засоби штучного інтелекту*.

Узагальнюючи, дисертаційна робота Ізоніна Івана Вікторовича на тему “Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу біомедичних даних малих обсягів” є самостійним, завершеним і цілісним науковим дослідженням, що відповідає встановленим вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, зокрема положенням пунктів 7–9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197.

Враховуючи актуальність теми роботи, наукову новизну, обґрунтованість результатів та їх практичну значущість, автор роботи, ІЗОНІН Іван Вікторович,

заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – Системи та засоби штучного інтелекту.

Офіційний опонент:

директор інституту комп'ютерних систем,

Національного університету «Одеська політехніка»

Міністерства освіти і науки України,

доктор технічних наук,

професор

Світлана АНТОЩУК

*Вчений секретар
Вченої ради
Національного
університету
«Одеська політехніка»*



*Людмила
Троконов*