

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора СТИРЕНКА Сергія Григоровича на дисертаційну роботу ІЗОНІНА Івана Вікторовича: “Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу біомедичних даних малих обсягів”, яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.23 Системи та засоби штучного інтелекту.

Актуальність теми дослідження та зв'язок з науковими програмами, планами та темами

В умовах сучасного етапу розвитку біомедичних досліджень, що характеризується обмеженістю кількості спостережень у низці прикладних задач, особливої наукової і практичної актуальності набуває проблема інтелектуального аналізу структурованих вибірок даних малих обсягів. В цьому випадку класичні методи машинного навчання часто виявляються неефективними. Це пов'язано з високим ризиком перенавчання моделей, що виникає внаслідок надлишкової кількості параметрів порівняно з обсягом доступних даних, обмеженою здатністю до узагальнення, а також труднощами налаштування і валідації складних архітектур штучних нейронних мереж.

Існуючі ансамблеві підходи, зокрема об'єднання декількох моделей штучних нейронних мереж, можуть частково компенсувати зазначені недоліки шляхом зменшення варіації, підвищення стабільності та покращення узагальнювальної здатності. Проте їх практичне застосування до задач з екстремально малою кількістю даних стикається з низкою суттєвих проблем. Серед них слід відзначити надмірну ресурсоємність ітеративних алгоритмів навчання, високу чутливість до вибору гіперпараметрів, а також складністю забезпечення відтворюваності результатів. Це особливо критично в задачах регресії і класифікації на вибірках біомедичних даних малих обсягів, де

точність і надійність моделі мають прямий вплив на клінічні або наукові висновки.

Враховуючи ці виклики, виникає нагальна потреба у розробленні нових класів моделей, здатних забезпечити високу точність, робастність та швидкодію без використання ітеративних процедур навчання. В таких випадках перспективними є методи синтезу неітеративних ансамблевих структур, які орієнтовані на обробку вибірок даних малих обсягів і враховують обмеженість доступних даних, їхню високу розмірність, гетерогенність, а також наявність шумів і аномалій. Такі моделі можуть стати основою для формування ефективних інструментів інтелектуального аналізу в умовах, де класичні методи не гарантують прийнятної рівня узагальнення.

Таким чином, розробка нових ансамблів штучних нейронних мереж із неітеративними методами їх навчання, зокрема для аналізу біомедичних вибірок даних малих обсягів, є не лише науково обґрунтованим завданням, але й критично важливим кроком у напрямі підвищення точності, відтворюваності та ефективності аналізу в сучасній біоінженерії, біоінформатиці та персоналізованій медицині. Більше того, актуальність дисертаційної роботи підтверджується активною участю Ізоніна І.В. у виконанні низки науково-дослідних проєктів національного та міжнародного рівня, присвячених розвитку методів інтелектуального аналізу біомедичних даних малих обсягів. Зокрема, результати дослідження були отримані в межах таких ініціатив, як міжнародний проєкт EURIZON “Artificial Intelligence in Medicine: Small Data Approach (SmallAIM)” (Horizon Europe), а також прикладних досліджень, що фінансувалися Національним фондом досліджень України, Міністерством освіти і науки України та Міністерством охорони здоров'я України. Участь у цих проєктах засвідчує високий рівень важливості та значущості теми цього

дисертаційного дослідження у сфері інтелектуального аналізу даних малих обсягів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Обґрунтованість та достовірність отриманих наукових результатів у дисертаційній роботі забезпечується коректним та послідовним використанням сучасного теоретичного апарату та строгим дотриманням методологічних принципів математичного моделювання й машинного навчання. Основні положення дослідження формалізовані із застосуванням відомих методів та теорій. Розроблені методи ґрунтуються на чітко сформульованих гіпотезах, логічно пов'язаних із властивостями оброблюваних даних, що забезпечує коректність побудови та функціонування поданих методів у межах поставлених задач.

Свідчення про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми, отримані за результатами дисертаційного дослідження, засвідчують факт створення автором оригінального програмного забезпечення, яке реалізує розроблені, удосконалені чи розвинуті методи аналізу біомедичних даних малих обсягів. Наявність таких охоронних документів підтверджує не лише завершеність і працездатність розроблених алгоритмів, а й їх практичну придатність до використання в реальних прикладних задачах.

Достовірність отриманих результатів підтверджується чітко організованою та методично коректною верифікацією, що включала чисельне моделювання з використанням процедур крос-валідації та аналізу різноманітних показників ефективності під час розв'язання задач регресії та класифікації на модельних і реальних біомедичних вибірках малих обсягів. Автором здійснено ґрунтовний порівняльний аналіз точності та здатності до

узагальнення поданих у дисертації методів у зіставленні з класичними алгоритмами машинного навчання, включно з базовими штучними нейронними мережами. Додатковим підтвердженням достовірності результатів є їх успішне впровадження в низці практичних застосувань, що документально засвідчено відповідними актами впровадження та використання.

Наукова новизна отриманих в дисертації результатів

Автором дисертаційної роботи 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. В основі її вирішення покладено сукупність нових наукових положень, наукова новизна й оригінальність яких не викликає сумнівів.

Зокрема, автором 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, і забезпечує підвищення як точності роботи нелінійних моделей машинного навчання так і їхніх властивостей узагальнення під час аналізу екстремально-коротких вибірок біомедичних даних.

Ізонін І.В. вперше розробив метод синтезу ансамблю лінійних нейроподібних структур, який завдяки агрегуванню кусково-лінійно апроксимованих поверхонь відгуку кожного його елемента, забезпечує підвищення точності моделей регресії та класифікації.

Також, автором 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.

Окрім цього, Ізонін І.В. вперше розробив 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.

Також, він вперше розробив 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.

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

Також, ним 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, та надає можливість додаткового ітеративного уточнення шуканого значення.

Окрім цього, Ізонін І.В. удосконалив 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.

Автор розвинув теорію 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.

Окрім цього, Ізонін І.В. розвинув 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.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Розроблені, удосконалені та розвинуті в дисертаційній роботі методи і засоби характеризуються комплексом властивостей, що визначають їх практичну придатність до використання в задачах аналізу біомедичних даних малих обсягів в умовах реального застосування. Насамперед, розроблені методи демонструють високі показники точності у задачах регресії та класифікації, що є критично важливим у клінічному та діагностичному аспектах, де навіть незначні похибки можуть призвести до хибних висновків або рішень.

Крім того, розроблені ансамблі моделей неітеративних нейроподібних структур демонструють стійкість до аномалій та викидів, що часто трапляються в біомедичних даних через обмеженість експериментальних умов, технічні обмеження вимірювального обладнання чи людський фактор.

Завдяки використанню авторських методів аугментації даних, принципів ансамблевого навчання, компенсації похибок різних знаків, а також використанню каскадних ансамблів уточнення параметрів моделі регресії - забезпечено зниження впливу таких спотворень на кінцеві результати аналізу.

Ще однією важливою перевагою є достатня обчислювальна ефективність розроблених методів, зумовлена неітеративним характером алгоритмів навчання. Це забезпечує потенційну можливість їх застосування у режимі реального часу або в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, що актуально для медичних закладів, мобільних діагностичних систем і вбудованих медичних пристроїв.

Завдяки поєднанню цих трьох властивостей (точності, робастності та швидкодії), розроблені методи успішно застосовувалися для розв'язання низки прикладних задач у різних галузях біомедичних досліджень (біоматеріалознавстві, ревматології, травматології, стоматології та трансплантології), що підтверджено відповідними актами впровадження та використання.

Зміст дисертації та відповідність її встановленим вимогам

Дисертаційне дослідження Ізоніна І.В., є завершеним науковим дослідженням, що охоплює повний спектр теоретичних, методичних та прикладних аспектів поставленої проблеми. Робота викладена на 371 сторінці, з яких 310 сторінок становить основний текст. Структурно дисертація складається з вступу, семи розділів, кожен з яких містить підрозділи та підсумкові висновки, а також загальних висновків, списку літератури та додатків. Матеріал дисертації ілюстровано 17 таблицями, 50 рисунками та доповнено п'ятьма додатками. Перелік використаних джерел налічує 310

позицій, розміщених на 40 сторінках, що свідчить про глибоке опрацювання літератури.

Обсяг, структура, оформлення матеріалів дослідження в цілому відповідають вимогам “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого Постановою КМУ №1197 від 17 липня 2021 р., та вимогам наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 “Про затвердження вимог до оформлення дисертації”.

Автореферат підготовлено відповідно до вимог чинного законодавства та нормативних документів, і він повністю відображає зміст, структуру та основні наукові результати дисертаційної роботи. Документ складено українською мовою з дотриманням норм сучасної української наукової мови, з використанням фахової термінології, притаманної галузі штучного інтелекту.

У тексті автореферату коректно викладено ключові положення дисертаційного дослідження, зокрема мету, завдання, наукову новизну, практичну значущість, методологічну основу, результати теоретичних досліджень і прикладної апробації. Зміст автореферату повністю узгоджується з основним текстом дисертації, а подані формулювання не суперечать і не спотворюють зміст положень, які винесено на захист.

Повнота викладення результатів досліджень у наукових публікаціях за темою докторської дисертації

Усі ключові положення дисертаційного дослідження, включно з постановкою задач, формалізацією методів, аналітичними обґрунтуваннями, результатами чисельного моделювання та прикладами практичного застосування, відображено у структурованому корпусі наукових публікацій. Загальний публікаційний доробок автора за тематикою дисертації становить 53 наукові праці. До нього входять:

- два розділи у колективних монографіях,
- 16 статей у міжнародних журналах, що включені до баз даних Scopus або Web of Science, 15 з яких входить до 1-2 квіртилів;
- 6 статей у фахових виданнях України;
- 26 тез у матеріалах міжнародних конференціях;
- 3 свідоцтва про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми.

Публікації охоплюють усі етапи дослідження - від розробки нових методів неітеративного ансамблевого навчання до їх впровадження у реальні біомедичні задачі. У статтях, опублікованих у рецензованих журналах та матеріалах наукових конференцій, детально висвітлено характеристики розроблених методів, результати їх порівняльної оцінки з базовими методами машинного навчання при роботі з вибірками малих обсягів. У більшості наукових публікацій, а також у тексті дисертаційної роботи чітко зазначено особистий внесок автора в спільних дослідженнях.

Таким чином, результати дисертаційного дослідження Ізоніна І.В. у повному обсязі представлені в опублікованих наукових працях, що відповідають вимогам до результатів опублікування результатів дисертаційної роботи, яка подається на здобуття ступеня доктора наук, а також демонструють цілісність виконаної наукової роботи.

Відсутність (наявність) академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації.

У дисертаційній роботі Ізоніна І.В. не зафіксовано випадків академічного плагіату, а також відсутні будь-які ознаки фабрикації чи фальсифікації результатів наукового дослідження. Робота підготовлена з повним дотриманням норм академічної доброчесності відповідно до вимог

статті 42 Закону України “Про освіту”. Усі наукові положення, результати, та висновки, викладені в дисертації, є результатом самостійної науково-дослідної діяльності автора. У випадках використання ідей, методик або фрагментів тексту інших науковців, це завжди супроводжується належним посиланням на джерело, або оформлюється як пряма цитата із використанням лапок і вказівкою на першоджерело.

Відповідність дисертаційної роботи паспорту спеціальності

Тема, науковий зміст та суть дисертаційної роботи Ізоніна І.В. “Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу біомедичних даних малих обсягів” повною мірою відповідає науковому профілю докторської ради Д 35.052.14 при Національному університеті “Львівська політехніка”, а також безпосередньо узгоджується з пунктами, визначеними паспортом спеціальності 05.13.23 – Системи та засоби штучного інтелекту.

Зокрема, робота охоплює розроблення нових теоретичних підходів до побудови ансамблів моделей неітеративних нейроподібних структур для аналізу біомедичних даних малих обсягів, що відповідає пункту: *“розроблення теоретичних засад створення та застосування систем штучного інтелекту різноманітного призначення”*.

Окрім того, значна частина дослідження присвячена аналізу, моделюванню, навчанню та оптимізації розроблених ансамблів, що прямо відповідає пункту: *“аналіз, синтез і моделювання нейронних мереж, розроблення методів їх проектування, оптимізації та навчання”*.

Дискусійні питання та зауваження до роботи

1. У першому розділі дисертаційної роботи розглядаються окремі способи агрегування результатів, такі як усереднення, зважене голосування,

мета-модель (ст. 78). Було б доцільно розглянути та проаналізувати і інші способи агрегування, наприклад на основі різноманітних алгебраїчних критеріїв.

2. На ст. 97 автором подано показники обчислювальної складності: “Зокрема зменшення обчислювальної складності з $p^2 \times g$ у випадку використання нейромережевого представлення методу [19], [130] до p^2 у випадку використання поліноміального представлення методу (2.11)”. З тексту дисертації не є зрозумілим що являє собою параметр в даному контексті.

3. Автор наводить низку алгоритмів визначення оптимальної кількості кластерів для ряду методів, удосконалених чи розроблених у дисертаційній роботі. Це, зокрема метод силуету, метод ліктя, Гар-статистика, індекс Калінського–Харабаша, індекс Девіса–Боулдіна, тощо (ст. 111). Корисним було б зазначити, який саме із цих алгоритмів варто використовувати для аналізу даних малих обсягів.

4. Кожен із нелінійних ансамблів, розроблених у четвертому розділі передбачає додаткову можливість формування вибірки даних для мета-алгоритму шляхом додавання початкових входів задачі до отриманих вихідних сигналів кожного члена ансамблю (рис. 4.2 та 4.3). Проте такий підхід суттєвим чином розширить простір вхідних даних задачі і може провокувати перенавчання. Необхідно було окреслити та аргументувати випадки використання такого підходу.

5. На ст. 205-206 (рис. 5.1) автором наведено 3 способи агрегування результатів роботи бустингового ансамблю для оцінювання та часткового усунення систематичної похибки нейронної мережі узагальненої регресії. Проте, автором не зазначено в яких випадках який із них слід використовувати.

6. У розділах 6 та 7 автором описано розроблені програмні засоби в межах кожного пункту експериментального дослідження удосконаленого чи розробленого методів. Проте весь такий опис слід було б виділити в один загальний пункт, який слід було поставити першим у 6 розділі.

7. У Таблиці 6.5 наведено результати оцінювання якості розв'язання задачі класифікації, яка є помірно незбалансованою. У зв'язку з цим використання показника “точність класифікації” (accuracy) є методологічно недоцільним, оскільки він не відображає реальної ефективності моделі в умовах дисбалансу класів і може призводити до хибно оптимістичної інтерпретації результатів.

8. У роботі не зазначено вимоги до апаратного забезпечення для реалізації розроблених та удосконалених методів і засобів, що є важливим у випадку їх можливої подальшої апаратної імплементації або інтеграції в мобільні діагностичні системи.

Загальні висновки

Дисертаційна робота Ізоніна І.В. на тему “Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу біомедичних даних малих обсягів” є самостійно виконаним, цілісним та завершеним науковим дослідженням, що присвячене вирішенню актуальної теоретичної проблеми в області інтелектуального аналізу даних. Робота вирізняється високим рівнем методологічної послідовності та логічної структурованості.

Зміст дисертаційної роботи Ізоніна І.В. повністю узгоджується з визначеною метою дослідження та відображає його послідовну логіку. Сформульовані в роботі наукові положення, висновки та рекомендації є належним чином обґрунтованими й підтверджені аналізом широкого спектра сучасних наукових джерел, а також результатами практичної верифікації, проведеної за участі медичних установ. Структура та наповнення дисертації демонструють цілісність, внутрішню узгодженість та завершеність роботи, а також повністю відповідають вимогам паспорта спеціальності 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту.

Реферат дисертації в повній мірі відображає основні наукові положення, викладені у ній, її наукову новизну і практичну значимість, відповідає змісту дисертації.

У цілому, дисертаційна робота Ізоніна І.В. за темою: “Ансамблі моделей неітеративного машинного навчання для аналізу біомедичних даних малих обсягів” відповідає вимогам пунктів 7–9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук” затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021, № 1197, що є підставою для присудження її автору, Ізоніну Івану Вікторовичу, наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.23 *Системи та засоби штучного інтелекту*.

Офіційний опонент:

проректор з наукової роботи

Національного технічного університету України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

доктор технічних наук,

професор,



Сергій СТИРЕНКО