

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри програмних засобів факультету комп'ютерних наук і технологій НУ «Запорізька політехніка», **Субботіна Сергія Олександровича** на дисертаційну роботу **Васька Олександра Юрійовича** на тему «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 111 «Математика».

27 січня 2025 року

1. Актуальність теми дослідження

Актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена сучасними тенденціями розвитку математичного моделювання складних нелінійних систем, а також стрімким поширенням методів штучного інтелекту та машинного навчання в наукових і прикладних задачах. Згорткові нейронні мережі на сьогодні є одним із базових інструментів обробки сигналів, зображень та багатовимірних даних, проте більшість існуючих моделей ґрунтується на градієнтних методах оптимізації, які мають низку відомих обмежень – чутливість до вибору початкових параметрів, проблеми локальних мінімумів, нестабільність навчання та обмежену інтерпретованість.

У цьому контексті особливої актуальності набувають альтернативні, неградієнтні підходи до навчання нейронних мереж, які дозволяють розширити математичний апарат аналізу та підвищити стійкість і керованість процесу оптимізації. Використання багатозначних нейронів створює принципово нові можливості для побудови моделей, що працюють у комплексній або фазово-амплітудній області, а також дозволяє формулювати строгі математичні твердження щодо збіжності та властивостей навчальних алгоритмів.

З огляду на це вважаю, що тема дисертації «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» є актуальною, своєчасною та такою, що відповідає сучасному рівню розвитку математичної науки й прикладних досліджень у галузі штучних нейронних мереж.

2. Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи «Моделі і методи системного аналізу» (державний реєстраційний номер 0121U110806), що виконувалась на кафедрі системного аналізу та теорії оптимізації факультету математики та цифрових технологій Ужгородського національного університету. Тематика дисертації безпосередньо відповідає науковому напрямку зазначеної НДР та спрямована на розвиток математичних моделей і методів оптимізації складних систем. Результати дисертаційного дослідження логічно вписуються у загальну тематику наукових планів кафедри та факультету, доповнюють і розвивають існуючі дослідження у сфері математичного моделювання нейронних мереж і системного аналізу.

3. Оцінка наукового рівня дисертації і наукових публікацій здобувача

Дисертаційна робота характеризується високим науковим рівнем, що відповідає сучасним вимогам до досліджень спеціальності 111 – Математика. Зміст роботи свідчить про ґрунтовну математичну підготовку здобувача, вміння самостійно формулювати та розв'язувати складні наукові задачі, а також коректно застосовувати сучасний апарат математичного аналізу, теорії оптимізації та теорії нейронних мереж.

Результати, отримані у дисертації, мають системний характер і становлять завершене наукове дослідження. Запропоновані математичні моделі та алгоритми відзначаються внутрішньою логічною узгодженістю, коректністю формалізації та достатнім рівнем узагальнення. Особливо слід відзначити наявність строгих математичних доведень ключових тверджень, зокрема теореми про збіжність неградієнтного алгоритму навчання згорткових мереж на багатозначних нейронах.

Наукові публікації здобувача повною мірою відображають основні положення та результати дисертаційного дослідження. Їх тематика відповідає

заявленій темі дисертації, а рівень опрацювання матеріалу свідчить про здатність автора представляти отримані результати у фахових наукових виданнях. Наявність публікації у міжнародному журналі, індексованому в наукометричній базі SCOPUS (квартиль Q2), підтверджує міжнародний рівень отриманих результатів та їх наукову значущість. Крім того, основні результати дисертаційної роботи апробовано та представлено на трьох міжнародних наукових конференціях, що проводилися під егідою IEEE, що додатково свідчить про їх визнання на міжнародному науковому рівні.

4. Новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень, повнота викладу в опублікованих працях

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розв'язанні важливої наукової задачі – побудові та дослідженні нового класу згорткових нейронних мереж із неградієнтним навчанням на основі багатозначних нейронів.

До основних результатів, що визначають наукову новизну роботи, належать:

- уперше реалізовано поєднання згорткової архітектури з багатозначними нейронами та формалізовано новий клас моделей – CNNMVN, навчання яких здійснюється на основі неградієнтного алгоритму, первісно розробленого для повнозв'язної мережі MLMVN з урахуванням специфіки згорткових ядер;

- уперше математично описано процеси неградієнтного зворотного поширення помилки від повнозв'язних шарів до згорткових, а також зворотного поширення між згортковими шарами, у тому числі за наявності шарів субдискретизації, що створює теоретичну основу для неградієнтного навчання згорткових структур;

- уперше показано, що згорткова мережа CNNMVN є узагальненням повнозв'язної мережі MLMVN;

- уперше запропоновано алгоритм корекції помилок у згорткових шарах для багатозначних нейронних мереж;
- сформульовано та доведено теорему про збіжність розробленого алгоритму неградієнтного зворотного поширення та корекції помилок для CNNMVN, що є суттєвим теоретичним результатом;
- уперше розроблено механізм адаптивного навчання для неградієнтної моделі CNNMVN із використанням двох принципово різних підходів до регулювання швидкості навчання;
- запропоновано інноваційне застосування повнозв'язної мережі MLMVN як згорткової нейромережі у частотній області та метод субдискретизації у частотній області на основі перетворення Фур'є.

5. Наукова обґрунтованість отриманих результатів, наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки та результати, сформульовані у дисертаційній роботі, характеризуються високим рівнем обґрунтованості та логічної послідовності. Автор спирається на сучасний математичний апарат теорії нейронних мереж, математичного та комплексного аналізу, теорії оптимізації та спектральних методів аналізу сигналів.

У роботі послідовно побудовано математичну модель згорткової нейронної мережі на основі багатозначних нейронів, детально виведено рівняння неградієнтного зворотного поширення помилки, а також обґрунтовано алгоритми корекції вагових коефіцієнтів. Усі теоретичні твердження супроводжуються строгими математичними міркуваннями, а ключові результати підтверджені доведеннями.

Достовірність отриманих результатів додатково підтверджується чисельними експериментами, порівняльним аналізом з відомими підходами та узгодженістю теоретичних висновків із результатами моделювання.

6. Теоретичне і практичне значення результатів дослідження

Теоретичне значення дисертаційної роботи полягає у розвитку математичних основ теорії нейронних мереж, зокрема у частині неградієнтної оптимізації та використання багатозначних нейронів у згорткових архітектурах. Отримані результати розширюють існуючі уявлення про можливості побудови та навчання нейронних мереж і можуть слугувати основою для подальших теоретичних досліджень.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування розроблених моделей і алгоритмів при створенні спеціалізованих нейромережевих систем для аналізу комплексних сигналів. Результати дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес Ужгородського національного університету, що підтверджено відповідним актом впровадження.

7. Оцінка вмісту дисертації, її завершеності в цілому

Дисертація є цілісним і завершеним науковим дослідженням. Структура роботи відповідає поставленій меті та завданням, а матеріал викладено послідовно і логічно. Усі розділи взаємопов'язані та спрямовані на розкриття основної наукової ідеї.

Поставлені у вступі завдання повністю виконані, а отримані результати узагальнені у висновках. Робота містить достатній обсяг теоретичних досліджень, доведень і результатів моделювання, що дозволяє вважати її завершеною.

8. Рекомендації щодо подальшого використання результатів дисертації в практиці

Отримані в дисертаційній роботі результати створюють ґрунтовну основу для подальшого розвитку теорії неградієнтного навчання нейронних мереж на багатозначних нейронах. Доцільним видається розширення математичного апарату CNNMVN на інші типи архітектур, зокрема рекурентні та гібридні мережі, а також дослідження можливостей поєднання неградієнтних методів

оптимізації з класичними градієнтними підходами у рамках комбінованих алгоритмів навчання. Окремий інтерес становить подальший розвиток частотних підходів до побудови нейронних мереж на основі MLMVN, зокрема дослідження альтернативних спектральних перетворень та методів субдискретизації.

Практичним напрямом подальших робіт може бути розширення застосувань розроблених моделей і алгоритмів до задач аналізу комплексних сигналів, обробки зображень і багатовимірних часових рядів, а також створення спеціалізованих програмних засобів і бібліотек для неградієнтного навчання нейронних мереж. Отримані результати можуть слугувати науковою базою для підготовки нових дисертаційних досліджень та розвитку відповідного наукового напрямку.

9. Зауваження щодо оформлення та змісту дисертації

За текстом дисертаційної роботи можна виділити такі зауваження:

– у першому розділі варто було навести узагальнене формулювання задачі моделювання залежностей перед розглядом відомих архітектур нейромереж як засобів її вирішення;

– до розділів дисертаційної роботи варто було додати проміжні висновки по кожному відповідному розділу, що спростило б аналіз зв'язку розділу із загальними висновками по роботі;

– у роботі варто було б приділити увагу порівняльному аналізу отриманих результатів для глибинних нейромереж та мілких архітектур, а також інших парадигм машинного навчання;

– у Висновках по роботі варто було б навести умови використання та обмеження розроблених методів і моделей, оцінки їхньої просторової та часової складності;

– у тексті дисертації наявна незначна кількість орфографічних, граматичних, типографських та стилістичних помилок.

10. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.

Аналіз матеріалів дисертаційної роботи, поданих на рецензування, не виявив фактів плагіату чи інших порушень принципів академічної доброчесності. Оформлення роботи відповідає чинним нормативним вимогам.

11. Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційна робота «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» відповідає галузі знань 11 – Математика та статистика, за змістом і оформленням відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а також вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40.

Вважаю, що автор дисертації Васько Олександр Юрійович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 11 Математика та статистика за спеціальністю 111 – Математика .

Офіційний опонент:
завідувач кафедри програмних засобів
Національного університету
"Запорізька політехніка",
д.т.н., професор

Документ підписано кваліфікованим
електронним підписом
Підписувач: Сергій СУББОТІН
Дата підпису: 27.12.2025

