

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора
БОДЯНСЬКОГО Євгенія Володимировича,
професора кафедри штучного інтелекту факультету комп'ютерних наук
Харківського національного університету радіоелектроніки
на дисертаційну роботу **ВАСЬКА Олександра Юрійовича**
на тему: «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових
мереж на багатозначних нейронах», подану до захисту в разову
спеціалізовану раду ДВНЗ «Ужгородський Національний університет» на
здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань
11 «Математика та статистика» за спеціальністю 111 «Математика»
30.12.2025

Ступінь актуальності обраної теми дисертаційного дослідження.

Актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена стрімким розвитком методів глибокого навчання та зростаючою потребою в адекватних математичних моделях для обробки складних типів даних. Згорткові нейронні мережі сьогодні є одним із базових інструментів комп'ютерного зору, аналізу сигналів, медичних зображень, спектральних та просторово-часових даних. Водночас переважна більшість існуючих CNN побудована на дійснозначному апараті та градієнтних методах оптимізації, що суттєво обмежує їх ефективність у задачах, де інформація має природну комплексну або фазово-амплітудну структуру. У таких прикладних галузях, як радіолокація, обробка аудіосигналів, спектральний аналіз, біомедична візуалізація та квантово-орієнтовані обчислення, ігнорування або непряма обробка фазової складової призводить до втрати інформативності та зниження якості моделей. Тому розробка згорткових нейронних мереж, здатних безпосередньо працювати з комплекснозначними даними, є надзвичайно актуальною науковою проблемою сьогодення.

Особливої актуальності дослідженню надає використання багатозначних нейронів та неградієнтної оптимізації як альтернативи класичному зворотному поширенню помилки. Градієнтні методи, хоча й домінують у сучасному глибокому навчанні, мають низку принципових обмежень – проблеми нестабільності, загасання або вибуху градієнтів, складність коректного визначення похідних у комплексному просторі.

Запропонований у дисертації неградієнтний підхід, заснований на принципі поділу помилки, дозволяє обійти ці труднощі та формує новий клас алгоритмів навчання, що є теоретично обґрунтованими й адаптованими до багатозначної природи сигналів. Важливою складовою актуальності є також розробка математичного апарату для корекції помилок у згорткових шарах, де одна й та сама система ваг формує множину виходів, а також адаптація процедур субдискретизації до комплекснозначних карт ознак. Такі результати мають не лише теоретичну цінність, а й безпосереднє практичне значення для побудови стійких і продуктивних моделей.

Крім того, актуальність роботи підсилюється міждисциплінарним характером дослідження та його орієнтацією на подальший розвиток теорії нейронних мереж. Поєднання просторового та частотного представлень, зменшення обчислювальної складності за рахунок частотної субдискретизації та підтвердження ефективності підходу на стандартних наборах даних свідчать про високий рівень відповідності теми сучасним науковим трендам. У цілому обрана тема є своєчасною, науково значущою та відповідає актуальним потребам розвитку математичного моделювання, теорії нейронних мереж і практичних застосувань штучного інтелекту.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна.

У вступі до дисертаційної роботи актуальність обраної теми достатньо й переконливо обґрунтована, чітко визначено напрям власних наукових досліджень дисертанта. Обрана мета дослідження полягає у розробці та теоретичному обґрунтуванні математичної моделі згорткової нейронної мережі на основі багатозначних нейронів, а також у створенні неградієнтних алгоритмів її навчання для розв'язання задач розпізнавання та класифікації образів. Для досягнення поставленої мети дисертантом сформульовано комплекс взаємопов'язаних завдань, які логічно охоплюють як теоретичні, так і прикладні аспекти дослідження та в повному обсязі виконані в межах дисертаційної роботи. Поставлені завдання спрямовані на формування цілісної

математичної основи CNNMVN, розробку алгоритмів зворотного поширення помилки, аналіз збіжності навчання та експериментальну перевірку запропонованих підходів.

Дисертант чітко визначив об'єкт і предмет дослідження, що свідчить про методологічну вивіреність роботи. Об'єктом дослідження є процеси інформаційного перетворення, моделювання та навчання в нейронних обчислювальних системах із комплекснозначними сигналами, а предметом – математичні моделі, принципи побудови та методи неградієнтної оптимізації згорткових нейронних мереж на багатозначних нейронах. У роботі вдало та обґрунтовано застосовано комплекс сучасних і відповідних меті дослідження методів наукового пізнання, зокрема методи математичного аналізу, теорії комплексних змінних, лінійної алгебри, дискретної математики, а також методи комп'ютерного моделювання та спектрального аналізу. Для побудови алгоритмів навчання дисертант обґрунтовано використав евристичний принцип поділу помилки, адаптований до специфіки згорткових шарів і багатозначних нейронів.

Достовірність наукових положень і висновків дисертації забезпечується логічною послідовністю викладу матеріалу, строгістю математичних міркувань, теоретичним аналізом запропонованих моделей та підтвердженням отриманих результатів експериментальними дослідженнями. Практична реалізація розроблених моделей і алгоритмів у середовищі MATLAB, а також їх апробація на загальновизнаних еталонних наборах даних MNIST та Fashion MNIST підтверджують збіжність навчальних алгоритмів, стабільність процесу навчання та ефективність запропонованих підходів. Важливим чинником достовірності є також публікація основних результатів дисертації у фахових наукових виданнях та їх апробація на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях.

Наукова новизна отриманих результатів

Дисертація містить суттєву наукову новизну. Зокрема, дисертантом уперше розроблено та математично обґрунтовано клас згорткових нейронних

мереж на багатозначних нейронах (CNNMVN), що поєднує переваги згорткової архітектури з принципами багатозначної та комплекснозначної обробки інформації. Уперше сформульовано та реалізовано неградієнтний алгоритм зворотного поширення помилки для згорткових шарів, який коректно враховує фазово-амплітудну природу сигналів і не потребує використання похідних. Обґрунтовано, що CNNMVN є узагальненням повнозв'язної мережі MLMVN, а також запропоновано новий підхід до реалізації згортки у частотній області на базі MLMVN, що розширює функціональні можливості нейронних моделей.

Поряд з тим у дисертації дістали подальшого розвитку підходи до субдискретизації комплекснозначних карт ознак, методи адаптивної нормалізації та регулювання швидкості навчання в неградієнтних моделях, а також уявлення про роль частотного аналізу у згорткових нейронних мережах. Питання, які є предметом активних досліджень сучасної наукової спільноти, у роботі дисертанта висвітлено з оригінальних методологічних позицій, що дозволяє стверджувати про наявність у дисертації необхідних і достатніх елементів наукової новизни, теоретичної значущості та практичної цінності.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів

Теоретичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у розвитку математичних основ теорії штучних нейронних мереж, зокрема у формуванні цілісної концепції згорткових нейронних мереж на базі багатозначних нейронів. Запропонований дисертантом підхід до поєднання згорткової архітектури з багатозначною та комплекснозначною природою сигналів дозволяє по-новому осмислити процеси інформаційного перетворення та навчання в глибоких нейронних моделях. Обґрунтований у роботі неградієнтний механізм зворотного поширення помилки розширює клас відомих методів оптимізації нейронних мереж і формує альтернативу традиційним градієнтним алгоритмам, що має принципове значення для подальшого розвитку теорії комплекснозначних і багатозначних нейронних систем. Теоретичні висновки дисертанта сприяють поглибленню уявлень про

збіжність неградієнтних алгоритмів навчання, особливості корекції помилок у згорткових шарах та роль просторового і частотного представлення даних у нейронних мережах.

Практичне значення одержаних результатів визначається можливістю їх безпосереднього використання при розробці та застосуванні нейронних моделей для задач розпізнавання та класифікації образів, обробки сигналів і спектрального аналізу. Запропоновані архітектури CNNMVN та MLMVN-FCNN, а також розроблені алгоритми навчання можуть бути використані при створенні програмних систем для аналізу зображень, аудіо- та радіосигналів, біомедичних і технічних даних, де важливою є фазово-амплітудна інформація. Прикладний характер дослідження проявляється у програмній реалізації моделей у середовищі MATLAB, що забезпечує можливість їх подальшої модифікації, експериментальної перевірки та адаптації до різних прикладних задач. Крім того, результати дисертації можуть бути використані в освітньому процесі закладів вищої освіти під час викладання дисциплін з математичного моделювання, штучного інтелекту, нейронних мереж і обробки сигналів, а також у науково-дослідній роботі аспірантів і здобувачів, які працюють у суміжних напрямках.

Оцінка оформлення дисертації

Стиль викладу, структура та зміст рукопису дисертації свідчать про належний рівень наукової культури дисертанта, його здатність до глибокого теоретичного аналізу та вміння коректно працювати з науковими джерелами з математики, теорії нейронних мереж і комп'ютерного моделювання. На основі опрацьованого матеріалу автор послідовно формулює власні теоретичні положення, обґрунтовані висновки та практичні результати.

У цілому дисертаційній роботі притаманні повнота викладу, системність структури та логічна послідовність подання матеріалу. Авторський стиль відповідає вимогам науковості, математичні формулювання є коректними та чіткими, а мова дисертації – зрозумілою й однозначною. Оформлення

дисертації здійснено відповідно до чинних нормативних вимог, що висуваються до робіт такого рівня.

Дані про відсутність текстових запозичень та інших порушень академічної доброчесності (академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації, фальсифікації)

За результатами вивчення дисертації Васька Олександра Юрійовича на тему «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» текстових запозичень, не супроводжених належними посиланнями, а також інших порушень академічної доброчесності, в тому числі випадків академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів дослідження не виявлено. Таким чином, можна зробити висновок, що дисертаційне дослідження є самостійною (власною) і оригінальною роботою здобувача, що дозволяє здійснити її публічне обговорення та захист на засіданні разової спеціалізованої вченої ради.

Зауваження щодо змісту дисертації.

Позитивно оцінюючи науковий рівень і практичну значущість дисертаційної роботи, слід зазначити окремі зауваження, які мають дискусійний характер і не знижують загальної цінності проведеного дослідження.

1. У роботі основна увага зосереджена на неградієнтних алгоритмах навчання згорткових мереж на багатозначних нейронах. Водночас доцільним було б ширше представити порівняльний аналіз запропонованих підходів із сучасними градієнтними методами навчання комплекснозначних згорткових нейронних мереж з точки зору обчислювальної складності та вимог до апаратних ресурсів.

2. Експериментальна частина дисертації ґрунтується на використанні стандартних еталонних наборів даних. Хоча цього достатньо для підтвердження працездатності запропонованих моделей, розширення експериментів на задачі обробки реальних комплекснозначних сигналів

(зокрема у частотній області) могло б додатково підсилити прикладну складову дослідження.

3. Окремі розділи, присвячені експериментальній перевірці моделей, могли б бути доповнені коротким обговоренням обмежень запропонованих підходів та умов їх ефективного застосування, що підвищило б практичну орієнтованість викладених результатів.

4. Деякі чисельні експерименти подано у вигляді узагальнених таблиць і графіків. Розширений аналіз впливу окремих гіперпараметрів моделей (зокрема розміру ядра згортки, кількості карт ознак або параметрів субдискретизації) дозволив би глибше проілюструвати властивості запропонованих алгоритмів.

Зазначені зауваження мають рекомендаційний характер і можуть розглядатися як напрями подальшого розвитку отриманих у дисертації результатів. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку роботи та не зменшують її наукової новизни й практичної значущості.

Висновки щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота Васька Олександра Юрійовича «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» є актуальним, завершеним науковим дослідженням, у якому здійснено розв'язання комплексу теоретичних і прикладних проблем математичного моделювання та теорії штучних нейронних мереж. Робота присвячена розробці та обґрунтуванню математичних моделей згорткових нейронних мереж на багатозначних нейронах, а також створенню та аналізу неградієнтних алгоритмів їх оптимізації, що мають суттєве значення для задач обробки та розпізнавання складних типів даних.

Поставлене наукове завдання виконано здобувачем на високому теоретичному та методологічному рівні, що свідчить про глибоке оволодіння автором сучасними методами математичного аналізу, теорії нейронних мереж і комп'ютерного моделювання. Основні наукові результати дисертації

відображені в опублікованих за її тематикою наукових працях та апробовані на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях.

Представлена до захисту дисертація в цілому відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження наукового ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами та доповненнями).

З урахуванням наведеного, можна дійти висновку, що дисертаційна робота Васька Олександра Юрійовича відповідає спеціальності 111 «Математика», а її автор заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії у галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 111 «Математика».

Офіційний опонент

професор кафедри штучного інтелекту

Харківського національного

університету радіоелектроніки

д.т.н., професор



Євгеній БОДЯНСЬКИЙ

Підпис Бодянського Є.В. засвідчую

Вчений секретар

Харківського національного

університету радіоелектроніки



Ірина ЖАРІКОВА