

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора кафедри протидії кіберзлочинності Навчально-наукового інституту № 4 (підготовки фахівців з інформаційно-аналітичного забезпечення та кібербезпеки Національної поліції України), провідного наукового співробітника відділення організації наукової роботи відділу організації наукової діяльності

Харківського національного університету внутрішніх справ,

Владова Сергія Ігоровича

на дисертаційну роботу

Васька Олександра Юрійовича

«Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація

згорткових мереж на багатозначних нейронах»

подану на здобуття ступеня доктора філософії

у галузі знань 11 «Математика та статистика»

за спеціальністю 111 Математика

Актуальність теми дослідження

Сучасна наука і практика стикаються з широким колом прикладних задач аналізу сигналів, обробки зображень, розпізнавання образів та дослідження багатовимірних даних, для яких характерною є складна просторово-частотна структура, наявність фазових співвідношень, а у низці випадків – комплексна природа самих даних. Ефективне розв'язання таких задач потребує побудови математичних моделей, здатних адекватно відображати зазначені властивості, забезпечувати стійкість обчислювальних процедур і передбачуваність процесу навчання. У цьому контексті принципового значення набуває строгий математичний опис алгоритмів обробки та навчання, аналіз їх збіжності, а також дослідження властивостей отримуваних розв'язків.

Одним із найбільш результативних інструментів розв'язання зазначеного класу задач є згорткові нейронні мережі, які дозволяють ефективно обробляти структуровані просторові та просторово-частотні дані. При цьому у багатьох прикладних задачах, зокрема в аналізі сигналів, радіолокації, обробці зображень у частотній області, інтерферометрії та фазочутливих вимірюваннях, дані мають природну комплексну форму, що включає як амплітудну, так і фазову складові. Водночас переважна більшість існуючих підходів до навчання згорткових мереж ґрунтується на градієнтних методах та дійснозначних поданнях, які не завжди забезпечують належну стійкість, збіжність і адекватне врахування фазових співвідношень. У цьому контексті особливої актуальності набуває розвиток альтернативних, неградієнтних підходів до оптимізації із залученням багатозначних нейронів, здатних безпосередньо обробляти природні комплекснозначні дані без їх спрощеного зведення до дійсної області. Поєднання згорткових архітектур із багатозначними нейронами створює теоретично обґрунтований та обчислювально ефективний інструментарій для розв'язання зазначених задач і відкриває нові можливості як для глибшого математичного аналізу моделей, так і для розширення спектра їх практичних застосувань.

З огляду на викладене, тема дисертації «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» є актуальною, науково обґрунтованою та такою, що відповідає сучасним тенденціям розвитку галузі знань 111 – Математика.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Дисертаційна робота є самостійним та завершеним науковим дослідженням, у якому послідовно реалізовано поставлену мету та розв'язано визначені завдання. Структура роботи є логічно вивіреною, а виклад матеріалу – системним і аргументованим.

Обґрунтованість основних наукових положень забезпечується коректним використанням апарату математичного аналізу, теорії оптимізації та теорії нейронних мереж. У роботі детально виведено математичні співвідношення для опису згорткових шарів на основі багатозначних нейронів, операцій субдискретизації та неградієнтного зворотного поширення помилки. Ключові твердження підтверджено строгими доведеннями, зокрема теоремою про збіжність запропонованого алгоритму навчання.

Достовірність отриманих результатів додатково підтверджується експериментальними дослідженнями, у ході яких проаналізовано вплив різних параметрів мережі та алгоритмів навчання на якість отриманих результатів. Результати моделювання подано у вигляді графіків, таблиць і схем, що забезпечує їх наочність та дозволяє зробити обґрунтовані узагальнення.

Дисертаційне дослідження містить анотації українською та англійською мовами, перелік публікацій автора, вступ, сім розділів, загальні висновки, список використаних джерел, що налічує 146 найменувань, а також два додатки. Загальний обсяг роботи становить 178 сторінок, у межах яких подано 43 рисунки, 21 таблицю та 50 формул.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розв'язанні важливої наукової задачі, що полягає у побудові та теоретичному дослідженні нового класу згорткових нейронних мереж із неградієнтним навчанням на основі багатозначних нейронів. Отримані результати спрямовані на розвиток математичних основ теорії нейронних мереж, розширення класу моделей із гарантованими властивостями збіжності та створення формалізованого апарату для аналізу згорткових архітектур у комплекснозначному просторі.

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 і локальних рецептивних полів. Запропонований підхід дозволив узагальнити існуючі неградієнтні моделі та адаптувати їх до згорткових структур.

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. Отримані співвідношення формують строгий теоретичний базис для побудови та аналізу неградієнтних алгоритмів навчання згорткових нейронних мереж.

Уперше показано, що згорткова нейронна мережа CNNMVN є узагальненням повнозв'язної мережі MLMVN, що дозволяє розглядати останню як окремий випадок запропонованої моделі та забезпечує спадкоємність отриманих результатів у межах єдиного математичного підходу.

Уперше запропоновано алгоритм корекції помилок у згорткових шарах для багатозначних нейронних мереж, який враховує особливості локальної обробки даних і забезпечує ефективну корекцію параметрів згорткових ядер у процесі навчання.

Суттєвим теоретичним результатом є формулювання та доведення теореми про збіжність розробленого алгоритму неградієнтного зворотного поширення та корекції помилок для мереж CNNMVN, що підтверджує коректність і стабільність запропонованого підходу з математичної точки зору.

Уперше розроблено механізм адаптивного навчання для неградієнтної моделі CNNMVN, який ґрунтується на двох принципово різних підходах до регулювання швидкості навчання та забезпечує підвищення ефективності й надійності процесу оптимізації.

Запропоновано інноваційний підхід до використання повнозв'язної мережі MLMVN як згорткової нейромережі у частотній області, а також метод субдискретизації у частотній області на основі перетворення Фур'є, що розширює можливості застосування багатозначних нейронних мереж у задачах обробки сигналів і зображень.

Практичне значення результатів дослідження

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у можливості застосування розроблених моделей і алгоритмів у задачах аналізу сигналів, зображень і багатовимірних даних, де доцільним є використання комплекснозначних представлень. Запропоновані неградієнтні алгоритми можуть бути корисними в умовах, коли градієнтні методи є нестабільними або важко формалізуються з теоретичної точки зору.

Отримані результати рекомендовано до застосування у навчальному процесі ДВНЗ «Ужгородський національний університет» при підготовці лекцій та практичних занять з дисципліни «Комплекснозначні мережі. Deep Learning», а також можуть бути використані у подальших наукових дослідженнях,

Кількість та обсяг публікацій, повнота опублікованих матеріалів

Основні наукові результати дисертаційного дослідження отримали належне відображення у публікаційній активності здобувача. Ключові теоретичні положення та методичні розробки, пов'язані з побудовою згорткових нейронних мереж на основі багатозначних нейронів, розробленням неградієнтного алгоритму навчання, аналізом процесів зворотного поширення та корекції помилки, а також дослідженням частотних представлень і субдискретизації,

викладено у трьох наукових статтях. З них дві опубліковано у фахових наукових виданнях України, а одна – у міжнародному науковому журналі, індексованому в наукометричній базі SCOPUS (квартиль Q2), що свідчить про визнання отриманих результатів на міжнародному рівні та їх відповідність сучасним науковим вимогам. Окремі аспекти дисертаційного дослідження були апробовані у п'яти публікаціях апробаційного характеру та представлені у доповідях на міжнародних наукових конференціях.

Аналіз змісту опублікованих праць свідчить, що вони повністю узгоджуються зі структурою та логікою дисертаційної роботи, відображають усі основні результати, винесені на захист, і розкривають їх з достатньою повнотою. Усі наукові положення та висновки, представлені в публікаціях, отримані автором особисто, що підтверджує самостійність виконаного дисертаційного дослідження.

Відсутність порушень академічної доброчесності

Аналіз дисертаційної роботи та наукових публікацій здобувача свідчить про дотримання принципів академічної доброчесності. У роботі відсутні некоректні текстові запозичення, а всі використані ідеї та результати інших авторів супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями.

Зауваження та дискусійні питання щодо змісту дисертації

Попри загальну цілісність, високий науковий рівень і завершеність дисертаційної роботи, її зміст може бути доповнений та уточнений у низці аспектів, що не знижує отриманих результатів, але окреслює напрями подальших досліджень і вдосконалення поданого матеріалу.

1. Алгоритм навчання для багатозначної згорткової нейронної мережі (CNNMVN) описано детально. Однак, доцільним було б більш докладно пояснити, як принцип поділу помилки адаптовано для CNNMVN, що надало змогу б краще зрозуміти специфічні проблеми, що виникають під час навчання, та те, як запропонований підхід забезпечує ефективне поширення помилки через різні типи шарів.

2. Хоча в дисертації стверджується, що метод неградієнтної оптимізації для CNNMVN має збіжність, додаткове теоретичне обґрунтування цього твердження удосконалило б науковий сенс. Зокрема, було б доцільно довести умови, за яких неградієнтна оптимізація сходиться до глобального мінімуму або хоча б до локального мінімуму.

3. У дисертації стверджується, що CNNMVN показує збіжність під час навчання, але в ній недостатньо обговорюється можливу нестабільність процесу навчання в глибоких мережах. Доцільним було б включення розв'язання завдання, як процедура навчання усуває проблеми, такі як зникнення градієнтів, особливо в глибоких нейронних мережах, і чи змінюється швидкість збіжності в залежності від глибини мережі.

4. У дисертації адаптовано традиційні методи пулінгу для комплекснозначних даних, зокрема усереднюючий пулінг та максимальний пулінг. Проте аналіз того, як ці методи впливають на швидкість збіжності

навчального процесу, є обмеженим. При цьому виникає питання: «Чи спостерігаються які-небудь відмінності в термінах швидкості або стабільності збіжності залежно від вибору методу пулінгу?»

5. Оскільки градієнтні методи є традиційними для CNN, було б доцільним здійснити порівняння ефективності неградієнтного підходу з швидкістю збіжності та точністю моделі, що надасть змогу відповісти на питання: «Чи є конкретні переваги або недоліки використання неградієнтного підходу, зокрема щодо обробки великих даних або складніших моделей?» Порівняння з відомими методами на основі градієнтів (наприклад, зворотне поширення помилки) щодо часу навчання, точності та стабільності надало б більше конкретизації про переваги запропонованого методу перед традиційними.

6. У дисертації визначено ефективність моделі CNNMVN на базі класичних наборів даних (MNIST та Fashion MNIST), але було б доцільним розглянути, як алгоритм навчання веде себе на більш складних або специфічних даних, зокрема в умовах аномальних даних або спектрального аналізу, що надало змогу б краще зрозуміти загальні можливості нейромережевої моделі та її здатність до узагальнення в реальних умовах застосування.

7. Для більш повної оцінки стабільності та надійності алгоритму навчання слід було б провести додаткові експерименти, що включають варіації гіперпараметрів, таких як швидкість навчання, кількість згорткових шарів тощо. Аналіз чутливості до змін цих параметрів надав би змогу краще зрозуміти, як алгоритм адаптується до різних умов навчання і як це впливає на стабільність збіжності.

8. Подання результатів у вигляді графіків і таблиць є наочним і інформативним, проте в окремих випадках можливе додаткове пояснення фізичного або прикладного змісту отриманих залежностей, особливо, для результатів, що стосуються фазово-амплітудних характеристик виходів мережі.

9. У деяких місцях дисертації наведено значну кількість формул і математичних викладок. Цьому контексті можливим напрямом удосконалення оформлення могло б бути додаткове введення узагальнювальних схем або таблиць для полегшення сприйняття матеріалу.

Зазначені зауваження мають дискусійний характер і не зменшують наукової та практичної цінності дисертаційної роботи, а лише підкреслюють перспективність тематики та можливості подальшого розвитку досліджень у цій галузі.

Загальні висновки та оцінка дисертації

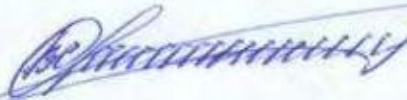
Дисертаційна робота Васька Олександра Юрійовича є цілісним, самостійним, завершеним науковим дослідженням, що вирішує важливі науково-прикладні завдання, має теоретичну і практичну цінність у галузі знань «Математика та статистика». Актуальність теми дисертації, її обґрунтованість не викликає сумнівів. За своїм змістом, структурою, обсягом та оформленням дисертаційна робота відповідає нормативним вимогам щодо дисертацій. На підставі вищезазначеного можна констатувати, що дисертаційна робота Васька Олександра Юрійовича на тему: «Математичне моделювання та неградієнтна

оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» відповідає «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44. Робота оформлена відповідно до вимог наказу Міністерства освіти та науки України «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» від 12 січня 2017 року № 40, а її автор – Васько Олександр Юрійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 111 «Математика» в галузі знань 11 «Математика та статистика».

Офіційний опонент

доктор технічних наук,
професор кафедри протидії кіберзлочинності
Харківський національний
університет внутрішніх справ

30.12.2025



Сергій ВЛАДОВ

Підпис Владова Сергія Ігоровича засвідчую
Учений секретар
секретаріату Вченої ради
Харківського національного
університету внутрішніх справ
доктор юридичних наук, професор

30.12.2025



Владислав НЕВЯДОВСЬКИЙ

**Сергій
ВЛАДОВ**

Digitally signed by
Сергій ВЛАДОВ
Date: 2025.12.30
16:08:34 +02'00'