

Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0825U004180

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 30-11-2025

Статус: Захищена

Реквізити наказу МОН / наказу закладу:



II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Васько Олександр Юрійович

2. Oleksandr Y. Vasko

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: 0009-0006-1527-505X

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 111

Назва наукової спеціальності: Математика

Галузь / галузі знань: математика та статистика

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: Математика

Дата захисту: 20-01-2026

Спеціальність за освітою: Математика

Місце роботи здобувача: ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ПРИВАТНИЙ ЗАКЛАД ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ «МЕЙН ПОІНТ АКЕДЕМІ»

Код за ЄДРПОУ: 45870596

Місцезнаходження: вул. Підградська, Ужгород, Ужгородський р-н., 88000, Україна

Форма власності: Приватна/недержавна

Сфера управління:

Ідентифікатор ROR:

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): PhD 11382

Повне найменування юридичної особи: Державний вищий навчальний заклад "Ужгородський національний університет"

Код за ЄДРПОУ: 02070832

Місцезнаходження: вул. Підгірна, Ужгород, Ужгородський р-н., 88000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Державний вищий навчальний заклад "Ужгородський національний університет"

Код за ЄДРПОУ: 02070832

Місцезнаходження: вул. Підгірна, Ужгород, Ужгородський р-н., 88000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 28.23.25, 27.47.23, 28.17.19, 28.23.19

Тема дисертації:

1. Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах
2. Mathematical modeling and non-gradient optimization of convolutional networks based on multivalued neurons

Реферат:

1. Роботу присвячено розробці та теоретичному обґрунтуванню математичної моделі згорткової нейронної мережі на основі багатозначних нейронів (CNNMVN), орієнтованої на розв'язання задач розпізнавання та класифікації образів. Сформовано цілісну математичну основу, що забезпечує формалізований опис згорткових шарів і їх функціонування. Запропоновано два типи згорткових ядер – одноканальні та багатоканальні, встановлено їх відмінності та вплив на складність і ефективність моделі. Показано, що багатоканальні ядра забезпечують стабільнішу роботу, узгоджену з класичними архітектурами CNN. Проаналізовано шари субдискретизації, адаптовані для комплекснозначних даних. Розглянуто усереднюючий та максимальний підходи, встановлено, що усереднення є більш природним для комплексних чисел, тоді як субдискретизація а максимумом потребує попереднього вибору характеристики (амплітуди або фази), що зумовлює суб'єктивність методу. Особливу увагу приділено механізмам зворотного

поширення помилки. Запропоновано неградієнтний підхід оптимізації у просторі комплексних чисел на основі різниці між бажаними та фактичними виходами моделі. Описано поширення помилки між повноз'язними та згортковими шарами, а також ситуації, коли між ними розміщено шари субдискретизації. Для узагальнення алгоритму навчання адаптовано принцип поділу помилки (error-sharing principle) оригінально запропонованого для MLMVN, що забезпечує оновлень ваг з урахуванням багатозначної природи нейронів. Показано, що згорткові шари CNNMVN є узагальненням повноз'язних шарів MLMVN: у разі коли розміри згорткового ядра та вхідних даних рівні, то операція згортки відтворює поведінку нейронів повноз'язної архітектури. Проаналізовано специфіку корекції помилок на згорткових шарах, де одне ядро формує множину виходів, що потребує агрегування отриманих помилок. Запропоновано універсальний алгоритм корекції, заснований на батчевому навчанні MLMVN. Окремо запропоновано новий підхід – використання повноз'язної мережі MLMVN як згорткової у частотній області. Теоретичне підґрунтя цього підходу спирається на теорему про згортку, яка встановлює еквівалентність між просторовим та частотним представленням сигналів і забезпечується використанням перетворення Фур'є. Це дозволяє інтерпретувати операцію згортки у частотній області як покомпонентне множення коефіцієнтів спектра Фур'є ядра згортки на відповідні коефіцієнтиспектра Фур'є сигналу. Метод обмежений неможливістю каскадування кількох згорткових шарів, але демонструє високу ефективність в задачах, де фазові складові формуються безпосередньо з інтенсивностей пікселів. Для зменшення обчислювальної складності запропоновано частотну субдискретизацію, яка передбачає використання лише частини спектра Фур'є та водночас покращує здатність моделі до розпізнавання. Для оцінювання узагальнюючої спроможності реалізовано програмне забезпечення на MATLAB та проведено експерименти на датасетах MNIST і Fashion-MNIST. Досліджено топології з одним і двома згортковими шарами, а також роботу адаптованих алгоритмів субдискретизації. Результати підтвердили ефективність моделей, збіжність процесу навчання та стабільність роботи CNNMVN. Експериментальні дослідження також продемонстрували, що на пізніх етапах навчання CNNMVN, коли точність класифікації мережі досягає відносно високих значень, рівень помилки поступово зменшується, і в системі спостерігається явище так званого «затухання помилок». Для зменшення впливу надмірної нормалізації було розроблено та запропоновано спеціальний механізм адаптивного навчання для CNNMVN. Його побудова враховує як ефект загасання помилок у глибоких шарах, так і вплив надмірної нормалізації, що часто призводить до уповільнення навчання та зниження здатності мережі до узагальнення. Він включає масштабування нормалізаційних коефіцієнтів та регулювання величини вагових корекцій залежно від поточної точності класифікації, забезпечуючи гнучкішу оптимізацію. З метою глибшого розуміння роботи згорткових шарів на багатозначних нейронах та здатності мережі до узагальнення було проведено аналіз згорток і ядер, сформованих у процесі навчання. Для цього застосовано методи спектрального аналізу, які дали змогу дослідити поведінку згорткових ядер як у просторовій, так і у частотній областях. Показано, що CNNMVN здатна виділяти ключові просторові ознаки зображень – контури, лінії та структурні елементи, а також виконувати фільтрацію частотних компонент, що розширює можливості її застосування у задачах спектрального аналізу.

2. This paper is devoted to the development and theoretical justification of a mathematical model of a convolutional neural network based on multi-valued neurons (CNNMVN), designed for pattern recognition and image classification tasks. A comprehensive mathematical framework is formulated, providing a formalized description of convolutional layers and their functional properties. Two types of convolutional kernels: single-channel and multi-channel are proposed, and their differences and impact on model complexity and performance are examined. It is shown that multi-channel kernels provide more stable behaviour, consistent with classical CNN architectures. Subsampling layers adapted for complex-valued data are analysed. Both average and max pooling approaches are considered, and it is shown that averaging is more natural for complex numbers, whereas max pooling requires prior selection of a characteristic (amplitude or phase), which introduces subjectivity into the method. Special attention is given to the mechanisms of error backpropagation. A non-gradient optimization approach in the complex domain is proposed, based on the discrepancy between the desired and actual outputs of the model. Error propagation between fully connected and convolutional layers is described, including cases

where subsampling layers are placed between them. To generalize the learning algorithm, the error-sharing principle originally introduced for MLMVN is adapted for CNNMVN, ensuring weight updates that properly account for the multi-valued nature of the neurons. It is demonstrated that convolutional layers in CNNMVN generalize fully connected layers of MLMVN: when the dimensions of the convolutional kernel match those of the input, the convolution operation reproduces the behaviour of a fully connected architecture. The specifics of error correction in convolutional layers are analysed, where a single kernel produces multiple outputs and thus requires aggregation of the resulting errors. A universal correction algorithm based on batch learning in MLMVN is proposed. A separate contribution is a novel approach in which a fully connected MLMVN network is used as a convolutional operator in the frequency domain. The theoretical foundation relies on the convolution theorem, which establishes the equivalence between spatial and frequency-domain representations via the Fourier transform. This allows convolution to be interpreted as element-wise multiplication of the Fourier spectra of the kernel and the signal. Although the method cannot directly support cascaded convolutional layers, it shows high effectiveness in tasks where phase components are derived from pixel intensities. To reduce computational complexity, frequency-domain subsampling is introduced, which uses only a subset of Fourier coefficients and simultaneously improves recognition capability. To assess generalization performance, MATLAB-based software was implemented, and experiments were conducted on the MNIST and Fashion-MNIST datasets. Network topologies with one and two convolutional layers were studied, as well as the behaviour of the adapted subsampling algorithms. The results confirm the efficiency of the models, the convergence of the learning algorithms, and the stable performance of CNNMVN. Experiments further show that at later stages of training, when classification accuracy becomes relatively high, the error level gradually decreases, producing an effect known as “error attenuation.” To mitigate the impact of excessive normalization, a dedicated adaptive learning mechanism is introduced for CNNMVN. This mechanism accounts for both the attenuation of errors in deeper layers and the effect of over-normalization, which often slows learning and reduces generalization ability. It combines scaling of normalization coefficients with adaptive adjustment of weight updates based on current classification accuracy, resulting in more flexible optimization. To deepen understanding of convolutional behaviour in multi-valued neuron networks and their generalization capability, convolution operations and trained kernels were analysed using spectral methods. This analysis enabled the study of kernel behaviour in both spatial and frequency domains. The results show that CNNMVN can extract key spatial features: contours, edges, and structural elements and can also filter frequency components, expanding its applicability to tasks involving spectral data analysis.

Державний реєстраційний номер ДіР:

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Не застосовується

Підсумки дослідження: Теоретичне узагальнення і вирішення важливої наукової проблеми

Публікації:

- 1. I. Aizenberg and A. Vasko, “Frequency-Domain and Spatial-Domain MLMVN-Based Convolutional Neural Networks”, Algorithms, vol. 17, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2024, doi: 10.3390/a17080361.
- 2. I. Aizenberg and A. Vasko, “Comparative analysis of CNNMVN and MLMVN as frequency domain CNN convolutions”, Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Physical and Mathematical Sciences, vol. 80, no. 1, pp. 89–96, July 2025, doi: 10.17721/1812-5409.2025/1.12.
- 3. A. Y. Vasko and A. Y. Bryla, “Adaptive learning rate for CNNMVN”, Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Математика і інформатика», vol. 46, no. 1, pp. 166–177, June 2025, doi: 10.24144/2616-

Наукова (науково-технічна) продукція:

Соціально-економічна спрямованість:

Охоронні документи на ОПВ:

Впровадження результатів дисертації: Впроваджено

Зв'язок з науковими темами:

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Брила Андрій Юрійович

2. Andrii Y. Bryla

Кваліфікація: к.ф.-м.н., доцент, 01.05.01

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-2518-9877

Додаткова інформація: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57200794566>;

<https://scholar.google.com/citations?user=BzdKdB4AAAAJ&hl=uk&authuser=1>;

<https://www.webofscience.com/wos/author/record/5361433>

Повне найменування юридичної особи: Державний вищий навчальний заклад "Ужгородський національний університет"

Код за ЄДРПОУ: 02070832

Місцезнаходження: вул. Підгірна, Ужгород, Ужгородський р-н., 88000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Владов Сергій Ігорович

2. Serhii I. Vladov

Кваліфікація: д.т.н., пров.н.с., 01.05.03

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-8009-5254

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 57204826154;

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=TEbolMwAAAAJ>

Повне найменування юридичної особи: Харківський національний університет внутрішніх справ

Код за ЄДРПОУ: 08571096

Місцезнаходження: пр-т Л. Ландау, Харків, Харківський р-н., 61080, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство внутрішніх справ України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Субботін Сергій Олександрович

2. Sergey O. Subbotin

Кваліфікація: д.т.н., професор, 05.13.23

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-5814-8268

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 7006531104;

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=S113KrgAAAAJ>

Повне найменування юридичної особи: Національний університет "Запорізька політехніка"

Код за ЄДРПОУ: 02070849

Місцезнаходження: вул. Жуковського, Запоріжжя, Запорізький р-н., 69063, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Бодянський Євгеній Володимирович

2. Yevgeniy V. Bodyanskiy

Кваліфікація: д.т.н., професор, 05.13.03

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-5418-2143

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 13105377000;

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=OrdVsWEAAAAJ>

Повне найменування юридичної особи: Харківський національний університет радіоелектроніки

Код за ЄДРПОУ: 02071197

Місцезнаходження: проспект Науки, Харків, Харківський р-н., 61166, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Білак Юрій Юрійович

2. Yurii Y. Bilak

Кваліфікація: к. ф.-м. н., доцент, 01.04.04

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-5989-1643

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 57213689747;
<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=xt3ckMEAAAAJ>

Повне найменування юридичної особи: Державний вищий навчальний заклад "Ужгородський національний університет"

Код за ЄДРПОУ: 02070832

Місцезнаходження: вул. Підгірна, Ужгород, Ужгородський р-н., 88000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VIII. Заключні відомості

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові
голови ради**

Лях Ігор Михайлович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові
головуючого на засіданні**

Лях Ігор Михайлович

**Відповідальний за підготовку
облікових документів**

Сабов Вікторія Іванівна

Реєстратор

Юрченко Тетяна Анатоліївна

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є
відповідальним за реєстрацію наукової
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна