

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Васька Олександра Юрійовича «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань

**11 Математика та статистика
за спеціальністю 111 «Математика»**

7 листопада 2025 року

1. Виконання освітньо-наукової програми

Здобувач ступеня доктора філософії, аспірант 4 курсу заочної форми навчання (надалі – Аспірант) Васько Олександр Юрійович у повному обсязі виконав індивідуальний навчальний план відповідно до освітньо-наукової програми аспірантури ДВНЗ «Ужгородський національний університет», що повністю відповідає вимогам Національної рамки кваліфікацій та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеню доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23.03.2016 № 261 (зі змінами).

Аспірант Васько Олександр Юрійович в процесі виконання освітньо-наукової програми здобув глибокі ґрунтовні знання за фахом, в повній мірі опанував чітко окреслений програмою обсяг загальнонаукових навичок та компетентностей, необхідних для реалізації послідовного обґрунтованого наукового дослідження, а також пов'язаних із формуванням у Аспіранта загальнонаукового світогляду та дотриманням норм професійної етики.

Аспірант в повному обсязі оволодів комплексом необхідних дослідницьких умінь та навичок, зокрема тих, які стосуються планування та формування дизайну дослідження, організації послідовності його виконання та безпосереднього проведення етапів у відповідності до попередньо сформульованих мети та завдання, застосування комплексу методів та

технологій, в тому числі і комп'ютерно-інформаційних, необхідних для отримання, структурування, аналітичного опрацювання та синтезу даних, перевірки достовірно отриманих результатів, їх систематизації та категоризації.

Аспірант в повній мірі оволодів необхідними мовними компетентностями для репрезентації результатів власного наукового дослідження англійською мовою в усній та письмовій формах, а також для повного розуміння та глибокого якісно-кількісного аналізу іноземних джерел наукової літератури з подальшою формалізацією отриманих даних.

2. Виконання індивідуального плану наукової роботи (наукова складова освітньо-наукової програми)

Індивідуальний план наукової роботи Аспіранта Васька Олександра Юрійовича затверджений рішенням вченої ради факультету математики та цифрових технологій Державного вищого навчального закладу «Ужгородський національний університет» (протокол № 3 від 18 жовтня 2018 року).

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та теорії оптимізації факультету математики та цифрових технологій ДВНЗ «УжНУ» Брила Андрій Юрійович.

Термін виконання роботи: 2018-2025 роки.

Аспірант Васько Олександр Юрійович послідовно виконав усі розділи затвердженого індивідуального плану наукової роботи у чітко встановлені терміни, що було підтверджено результатами обговорення відповідних проміжних, піврічних та річних звітів на засіданнях кафедри системного аналізу та теорії оптимізації та Вченої ради факультету математики та цифрових технологій ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

Дослідження проведені Аспірантом у чітко визначені терміни згідно затвердженого плану та графіку, в повному обсязі і у відповідності до основних стандартів та норм із застосуванням сучасних комп'ютерно-інформаційних підходів для статистичного аналізу даних.

3. Актуальність теми дослідження

У прикладному аспекті запропонована в дисертаційному дослідженні згорткова архітектура на основі багатозначних нейронів орієнтована на розв'язання задач, у яких фазова та багатозначна інформація відіграють вирішальну роль. До таких задач належать аналіз медичних зображень, радіолокаційних і гідролокаційних сигналів, розпізнавання образів та біометричних даних, а також моделювання хвильових і коливальних процесів у фізичних і технічних системах.

Аналіз наукових джерел засвідчив, що дійснозначні нейронні мережі не здатні повною мірою відтворювати й опрацьовувати фазові залежності, притаманні таким типам даних, де багатозначна структура є природною. Тому запропонований у дисертації підхід відкриває нові можливості для ефективної обробки комплекснозначної та фазової інформації, забезпечуючи підвищення точності розпізнавання, стійкості до шумів і здатності до узагальнення в задачах аналізу сигналів та зображень.

4. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідної роботи, яка виконувалась в межах робочого часу науково-педагогічних працівників кафедри системного аналізу та теорії оптимізації факультету математики та цифрових технологій Ужгородського національного університету «Моделі і методи системного аналізу» (номер державної реєстрації 0121U110806).

5. Формулювання наукового завдання (проблеми), нове розв'язання якого отримано в дисертації

Метою дослідження є розроблення узагальненої математичної моделі згорткової нейронної мережі на основі багатозначних нейронів (MVN), концепцію яких запропоновано Айзенбергом І.Н. Розроблена модель має забезпечити можливість ефективної обробки сигналів із фазово-амплітудною структурою для задач класифікації, розпізнавання й аналізу даних у комплекснозначному просторі.

Завдання дослідження полягає у формалізації принципів побудови згорткової мережі на багатозначних нейронах, розробленні математичного апарату її навчання та створенні алгоритму зворотного поширення помилки з подальшою корекцією вагових коефіцієнтів. Запропонований підхід описує процес неградієнтної оптимізації параметрів мережі, що забезпечує збіжність навчання без використання традиційних методів градієнтного спуску.

6. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом та їх новизна

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

- **Вперше** реалізовано поєднання згорткової архітектури з багатозначними нейронами. Як базовий механізм навчання використано алгоритм, розроблений для повнозв'язної мережі MLMVN з урахуванням специфіки згорткових ядер. Такий підхід дозволив формалізувати новий клас мереж – CNNMVN;

- **Вперше** математично описано процеси неградієнтного зворотного поширення помилки від повнозв'язних шарів до згорткових, а також зворотне поширення помилки між згортковими шарами, включно з випадками, коли між ними розміщено шари субдискретизації. Запропонований підхід формує основу неградієнтного алгоритму навчання для згорткових структур;

- **Вперше** було показано, що CNNMVN є узагальненням MLMVN;

- **Вперше** запропоновано алгоритм корекції помилок в згорткових шарах;

- Аспірантом сформульовано та доведено теорему про збіжність розробленого алгоритму зворотного поширення та корекції помилок для CNNMVN. Встановлено, що накопичувальний ефект послідовних корекцій ваг забезпечує поступове наближення фазово-амплітудних виходів моделі до цільових;

- **Вперше** розроблено механізм адаптивного навчання для неградієнтної моделі CNNMVN. Запропоновано два принципово різних підходи до адаптації швидкості навчання, що засновані на масштабуванні

нормалізаційних коефіцієнтів та адаптивному регулюванні вагових корекцій залежно від точності класифікації;

- **Вперше** запропоновано інноваційне застосування повнозв'язної мережі MLMVN як згорткової нейромережі у частотній області. Згідно з теоремою про згортку перший шар мережі можна інтерпретувати як згортковий шар в частотній області, що дозволило розширити функціональні можливості мережі;

- Аспірантом запропоновано метод субдискретизації у частотній області на основі перетворення Фур'є для згорткової мережі на основі MLMVN.

7. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

У дисертаційній роботі представлено дві математичні моделі згорткових нейронних мереж, призначені для обробки фазово-амплітудних даних: модель у просторовій області (CNNMVN) та модель у частотній області (MLMVN-FCNN). Кожна з моделей базується на використанні багатозначних нейронів і орієнтована на обробку сигналів із комплекснозначною структурою, що дозволяє зберігати та враховувати як амплітудну, так і фазову складові під час навчання та класифікації.

Достовірність і коректність запропонованих математичних моделей забезпечується не лише теоретичним доведенням збіжності алгоритмів неградієнтного навчання, а й практичною перевіркою їх ефективності на задачах класифікації та розпізнавання зображень. Проведені експерименти свідчать про стійкість моделей до шумів і фазових спотворень, а також про їх здатність забезпечувати точну і надійну обробку комплекснозначної інформації.

Отримані результати підтверджують адекватність розроблених моделей і демонструють їх практичну придатність для застосування в системах обробки сигналів, зображень та біометричних даних. Усі висновки, наукові положення, рекомендації та результати, що визначають наукову новизну та практичну цінність роботи, сформульовано особисто автором дисертації, що підкреслює самостійність і високий рівень виконаного дослідження.

8. Наукове та практичне значення дисертаційної роботи

В дисертаційній роботі виведено систему рівнянь навчання та корекції вагових коефіцієнтів для математичної моделі CNNMVN які описують процес неградієнтної оптимізації параметрів мережі. Ці рівняння формалізують та узагальнюють зворотне поширення помилки у для мереж на багатозначних нейронах та дають змогу здійснювати адаптацію ваг без використання традиційних градієнтних методів.

Практична значущість одержаних результатів полягає у створенні експериментальних моделей згорткових нейронних мереж CNNMVN і MLMVN-FCNN, придатних для класифікації зображень, фазово-амплітудних сигналів і біометричних даних. Розроблені моделі можуть слугувати теоретичною та методологічною основою для побудови нових нейронних систем аналізу сигналів у наукових і технічних застосуваннях. Створене програмне забезпечення реалізує запропоновані алгоритми навчання та може бути впроваджене в системи автоматичного розпізнавання й діагностики.

Результати дисертаційної роботи використані в навчальному процесі факультету математики та цифрових технологій ДВНЗ «Ужгородського національного університету»

9. Оцінка мови та стилю

Дисертаційну роботу виконано відповідно до сучасних вимог, що висуваються до наукових досліджень і дисертаційних праць, із послідовним і коректним використанням спеціальної та математичної термінології, а також відповідних мовностилістичних засобів. Виклад матеріалу носить науковий характер, відзначається логічною послідовністю, чіткою композиційною структурою та послідовним розвитком ідей. Між розділами дисертації, які відображають різні взаємопов'язані етапи комплексного дослідження, простежується обґрунтований причинно-наслідковий зв'язок, що забезпечує цілісність та наукову обґрунтованість викладеного матеріалу.

10. Відповідність діючим вимогам щодо оформлення дисертації

Дисертаційна робота на тему: «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» є завершеною науковою працею, яка за глибиною проведеного дослідження, його актуальністю, новизною, теоретичним та практичним значенням отриманих результатів, змістом, обсягом та оформленням відповідає вимогам встановленим до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 11 Математика та статистика за спеціальністю 111 «Математика».

Структура та обсяг дисертації визначаються метою, об'єктом, предметом та завданнями дослідження і складаються зі вступу, 7 розділів (розділ 1 «Огляд літератури» містить 6 підрозділів; розділ 2 «Комплекснозначна згорткова нейромережа у просторовій області – CNNMVN» містить 4 підрозділи; розділ 3 «Збіжність алгоритму навчання CNNMVN» містить 2 підрозділи; розділ 4 «Адаптивна нормалізація в CNNMVN»; розділ 5 «Розпізнавання зображень за допомогою CNNMVN та аналіз її роботи» містить 5 підрозділів; розділ 6 «Розпізнавання зображень за допомогою згортки у частотній області, реалізованої на MLMVN» містить 4 підрозділи; розділ 7 «Порівняльний аналіз результатів CNNMVN та MLMVN-FCNN з існуючими згортковими мережами»), висновків, списку використаних джерел та додатків.

Повний обсяг дисертації складає 178 сторінок, з них список використаних джерел займає 13 сторінок (містить – 146 джерел), додатки – 4 сторінки.

За формальними ознаками робота відповідає чинним вимогам, які висуваються до оформлення дисертації Міністерством освіти і науки України.

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності, з якої вона подається до захисту

Дисертація повністю відповідає паспорту спеціальності 111 «Математика».

12. Зауваження та рекомендації

В ході написання дисертаційної роботи Аспірантом було враховано абсолютно усі зауваження та рекомендації надані науково-педагогічними

працівниками кафедри системного аналізу та теорії оптимізації ДВНЗ «Ужгородський національний університет» в процесі попередніх обговорень роботи під час проміжних, піврічних та річних звітів Аспіранта на засіданнях кафедри. Відмічені зауваження та побажання носять суто рекомендаційно-консультативний характер і в жодній мірі не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, а також не зменшують рівнів її наукової новизни та практичної значимості, і відтак не є перешкодою для її подання в разову спеціалізовану вчену раду для офіційного захисту.

13. Відповідність дисертації вимогам, передбаченим Наказом Міністерства освіти і Науки України «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» № 40 від 12.01.2017р. (зі змінами та доповненнями)

Дисертаційна робота Васька Олександра Юрійовича на тему «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» повністю відповідає вимогам Наказу Міністерства освіти і Науки України «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» № 40 від 12.01.2017 р. (зі змінами та доповненнями).

14. Кількість наукових публікацій, повнота опублікування результатів дисертації та особистий внесок здобувача до всіх наукових публікацій, опублікованих співавторами та зарахованих за темою дисертації.

Основні наукові результати дисертаційної роботи висвітлено у 3 наукових публікаціях, з яких дві статті опублікованих у фахових журналах України та одна стаття опублікована у фаховому журналі, що проіндексовано у наукометричній базі SCOPUS кuartилію Q2 (відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank) та 5 праць апробаційного характеру.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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](https://doi.org/10.3390/a17080361).

DOI: <https://doi.org/10.3390/a17080361>

URL: <https://www.mdpi.com/1999-4893/17/8/361>

ISSN: 1999-4893

(Scopus, іноземне видання)

(I. Aizenberg – концептуалізація, методологія, аналіз результатів, рецензування та редагування (40%); A. Vasko – методологія, програмна реалізація, аналіз результатів, написання оригінального рукопису (60%)).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: convolutional neural networks; CNNMVN; complex-valued neural networks; multi-valued neuron; MLMVN; image recognition; frequency domain.

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](https://doi.org/10.17721/1812-5409.2025/1.12).

DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2025/1.12>

URL: <https://bphm.knu.ua/bphm/article/view/537>

ISSN: 2218-2055

(Scopus, українське видання)

(I. Aizenberg – концептуалізація, методологія, аналіз результатів, рецензування та редагування (40%); A. Vasko – концептуалізація, методологія, програмна реалізація, аналіз результатів, написання оригінального рукопису (60%)).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: convolutional neural networks, CNNMVN, complex-valued neural networks, multi-valued neuron, MLMVN, Image recognition, frequency domain.

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: [10.24144/2616-7700.2025.46\(1\).166-177](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2025.46(1).166-177)

DOI: [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2025.46\(1\).166-177](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2025.46(1).166-177)

URL: <http://visnyk-math.uzhnu.edu.ua/article/view/331889>

ISSN: 2616-7700

(Наукове фахове видання України)

(A. Y. Vasko – методологія, програмна реалізація, аналіз результатів, написання оригінального рукопису (80%); A. Y. Bryla – концептуалізація, методологія, аналіз результатів, рецензування та редагування (20%)).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: convolutional neural networks, complex-valued networks, multivalued neurons, CNNMVN, MLMVN, image recognition, frequency domain.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. I. Aizenberg and A. Vasko, “Convolutional Neural Network with Multi-Valued Neurons,” in *2020 IEEE Third International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, Lviv, Ukraine: IEEE, Aug. 2020, pp. 72–77. doi: [10.1109/DSMP47368.2020.9204076](https://doi.org/10.1109/DSMP47368.2020.9204076).

(Здобувачу належить провідна роль в опрацюванні результатів дослідження, їх систематизації, інтерпретації та підготовці публікації)

5. I. Aizenberg, J. Herman, and A. Vasko, “A Convolutional Neural Network with Multi-Valued Neurons: a Modified Learning Algorithm and Analysis of Performance,” in *2022 IEEE 13th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, New York, NY, NY, USA: IEEE, Oct. 2022, pp. 0585–0591. doi: [10.1109/UEMCON54665.2022.9965659](https://doi.org/10.1109/UEMCON54665.2022.9965659).

(Здобувачу належить провідна роль в опрацюванні результатів дослідження, їх систематизації, інтерпретації та підготовці публікації)

6. I. Aizenberg and A. Vasko, “MLMVN as a Frequency Domain Convolutional Neural Network,” in *2023 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, Dec. 2023, pp. 341–347. doi: [10.1109/CSCI62032.2023.00061](https://doi.org/10.1109/CSCI62032.2023.00061).
(Здобувачу належить провідна роль в опрацюванні результатів дослідження, їх систематизації, інтерпретації та підготовці публікації)
7. A. Vasko, “MLMVN як згорткова нейромережа в частотній області”, oral presentation, *78-ма підсумкова наукова конференція професорсько-викладацького складу ДВНЗ «Ужгородський національний університет»*, Uzhhorod, Ukraine, 26-29 Jan. 2023, unpublished.
(Здобувачу належить провідна роль в опрацюванні результатів дослідження, їх систематизації, інтерпретації та підготовці публікації)
8. A. Vasko and A. Bryla, “Згорткові нейромережі на базі MVN в просторовій та частотній області”, oral presentation in *XIX Міжнародної науково-практичної конференції студентів та молодих вчених*, Kharkiv, Ukraine, 6-7 May 2025, unpublished.
(Здобувачу належить провідна роль в опрацюванні результатів дослідження, їх систематизації, інтерпретації та підготовці публікації)

15. Результати перевірки роботи на академічний плагіат

Перевірка дисертаційної роботи проводилася сертифікованою програмою StrikePlagiarism.com. У ході перевірки дисертації запозичень матеріалу без посилання на відповідне джерело не виявлено. За допомогою програми StrikePlagiarism.com текстові співпадіння (цитування) не виявлено. Подані до захисту наукові матеріали є власним напрацюванням Аспіранта, текст дисертації є оригінальним. Робота визнається самостійною та рекомендується бути допущеною до захисту.

Положення дисертації апробовано на засіданні кафедри системного аналізу та теорії оптимізації (протокол № 5 від 7 листопада 2025 р.). За

результатами засідання ухвалено затвердити позитивний висновок про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів та рекомендувати до захисту в спеціалізованій вченій раді дисертаційну роботу Васька Олександра Юрійовича на тему «Математичне моделювання та неградієнтна оптимізація згорткових мереж на багатозначних нейронах» на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 111 «Математика».

Головуюча на засіданні:

завідувач кафедри системного аналізу та теорії оптимізації
факультету математики та цифрових технологій
ДВНЗ «УжНУ»

к.ф.-м.н., доцент

Мирослава ГЛЕБЕНА

Підпис к.ф.-м.н., доц. Глебени М.Г.

засвідчую

Вчений секретар ДВНЗ «УжНУ»

Олена МЕЛЬНИК

