

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента доктора технічних наук, професора,
професора кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Чорноморського національного університету імені Петра Могили
Олександра Миколайовича ТРУНОВА
на дисертаційну роботу Стрюка Олександра Сергійовича на тему:
«Оптимізація генеративних змагальних нейронних мереж в умовах апаратно-
параметричних обмежень», подану на здобуття наукового ступеня доктора
філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія
галузі знань 12 Інформаційні технології

Актуальність теми

Дисертаційне дослідження Олександра Сергійовича Стрюка присвячене розробці та удосконаленню методів оптимізації генеративних змагальних нейронних мереж (ГЗМ) з метою забезпечення їх ефективного функціонування на пристроях (Edge AI) за умов обмежених обчислювальних ресурсів.

Тема дослідження є актуальною та практично важливою для подальшого розвитку і ефективного функціонування сучасних автономних та автоматизованих виробничих систем і зокрема у таких галузях, як робототехніка, комп'ютерний зір і управління де потребується високошвидкісна обробка даних у режимі реального часу. Крім того, очікувана здатність моделей розгортатися на мікрокомп'ютерних платформах, обмеженого доступу без звернення через хмарні сервіси до існуючих хмарних архітектур формування рішень, що дозволяє уникнути затримок мережі та забезпечувати вимоги конфіденційності.

А роботі, на основі аналізу наукових джерел та наявних практичних рішень, показано, що традиційні підходи до використання ГЗМ орієнтовані на обчислювальні системи з дискретними графічними картами, тензорні блоки обробки та потужні хмарні архітектури, що обмежує їх ефективність для використання у вбудованих системах.

Запропонований у дисертації комплекс методів (каскадна та мультифазова оптимізація) дозволяє ефективно подолати зазначені обмеження завдяки багаторівневій адаптивній конвергенції. Розроблені методи відкривають принципово нові можливості для впровадження автономних засобів штучного інтелекту безпосередньо в локальні контури управління, системи комп'ютерного зору та механізми виявлення аномалій (Edge AI). При цьому гарантується їх висока швидкодія в умовах постійного дефіциту обчислювальних та енергетичних ресурсів.

Обґрунтованість наукових результатів, висновків і рекомендацій

Усі наукові положення, висновки та практичні рекомендації, сформульовані в дисертаційному дослідженні Стрюка О.С., характеризуються високим ступенем обґрунтованості та достовірності. Це підтверджується коректною постановкою наукової проблеми та цілісною структурою завдань, що повністю відповідають предмету дослідження в межах спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія».

Достовірність отриманих результатів базується на комплексному використанні сучасного математичного апарату, зокрема теорії генеративних змагальних мереж, методів машинного та глибокого навчання, апарату нечіткої логіки та теорії оптимізації. Автор демонструє глибоке володіння методологією системного аналізу, що дозволило поєднати теоретичні розробки з масштабними експериментальними дослідженнями.

Наукові висновки здобувача належним чином верифіковані шляхом апаратної імплементації розроблених алгоритмів на мікрокомп'ютерній платформі Raspberry Pi 5. Об'єктивність оцінювання забезпечена застосуванням широкого спектра кількісних метрик (FID, Loss Value, AUC, Recall, Inference Time), що дозволило провести репрезентативний порівняльний аналіз із наявними технічними рішеннями.

Додатковим підтвердженням достовірності результатів є їх узгодженість із фундаментальними принципами вбудованих інтелектуальних систем та апробація на провідних міжнародних науково-практичних конференціях (зокрема IEEE IDAACS та DESSERT), а також проходження рецензування у виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus.

Новизна наукових результатів дослідження

Ознайомлення зі змістом дисертації та аналіз основних публікацій здобувача, дозволяють дійти висновку, що основна наукова ідея роботи полягає у створенні цілісної теоретико-методичної бази для оптимізації архітектур генеративних змагальних нейронних мереж, що забезпечує їх стійке функціонування в умовах дефіциту обчислювальних ресурсів кордонних пристроїв.

Наукова новизна отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає у наступному:

- вперше розроблено математичну модель каскадної оптимізації ГЗМ, яка, на відміну від існуючих, базується на ієрархічній декомпозиції простору гіперпараметрів та врахуванні адаптивної динаміки навчання,

що дозволяє забезпечити необхідну точність та швидкість функціонування ГЗМ в умовах апаратно-параметричних обмежень кордонних пристроїв.

- вперше розроблено мультифазовий метод оптимізації навчання ГЗМ, який, на відміну від існуючих, базується на багаторівневому механізмі адаптивної конвергенції, що дозволяє запобігати колапсу моди та зникненню градієнтів функцій втрат без підвищення обчислювальної складності процедури навчання.
- удосконалено механізм адаптації ГЗМ, який ґрунтується на гібридному комбінуванні каскадного та мультифазового методів в поєднанні з апаратом нечіткої логіки, що дозволяє комплексно підвищити ефективність навчання та якість генерації штучних даних в задачах виявлення аномалій, біометрії та комп'ютерного зору, зокрема знизити функцію втрат генератора у 3,5 рази, уникнути перенавчання дискримінатора (на рівні ~92%), прискорити збіжність ГЗМ в 7,6 разів, покращити метрику FID у 2,3 рази та досягти точності виявлення аномалій $AUC = 0,92$ із забезпеченням повноти (Recall) на рівні 1,0.
- набув подальшого розвитку програмно-апаратний метод реалізації повного циклу функціонування ГЗМ на кордонних пристроях, який базується на інтеграції квантованого навчання та апаратно-орієнтованої каскадної оптимізації, що забезпечує реалізацію реконфігурованих архітектур ГЗМ з врахуванням апаратно-параметричних обмежень та їх функціонування в режимі реального часу зі зменшенням розміру імітаційної моделі в 3,9 рази та прискоренням процесу інференсу в 3,2 рази.

Теоретичне і практичне значення одержаних результатів

У дисертаційній роботі створено ґрунтовне теоретичне і алгоритмічно-апаратне підґрунтя (фреймворк) для адаптації та розгортання генеративних змагальних нейронних мереж на кордонних пристроях, як на комп'ютерно-інтегрованих системах з урахуванням їх жорстких обчислювальних та архітектурних обмежень.

Практична цінність дослідження підтверджується успішним впровадженням розроблених оптимізаційних рішень на базі мікрокомп'ютерної платформи Raspberry Pi 5. Експериментально доведено, що застосування оптимізованих архітектур у поєднанні з методами квантування ваг у тому числі і статистичного (INT8) та глибоким профілюванням обчислювальних графів, дозволяє забезпечити стійке функціонування ГЗМ у режимі реального часу. Це відкриває шляхи для

інтеграції розроблених моделей як базових інтелектуальних модулів у локальні контури управління пошуковими автоматизованими платформами, що значно усуває їх залежність від хмарної інфраструктури та підвищує загальну стабільність систем.

Запропоновані здобувачем методи та моделі (зокрема ADCGAN та EAWGAN) мають високий прикладний потенціал для впровадження у підсистеми комп'ютерного зору (для задач суперрезолюції), біометричної ідентифікації та комплекси виявлення аномалій, що є важливим для забезпечення кібербезпеки промислових мереж та платформ Інтернету речей (IoT).

Вагомість теоретичних і практичних здобутків беззаперечно підтверджується їх впровадженням у науково-дослідні проекти Інституту проблем штучного інтелекту МОН і НАН України та Саарландського університету (ФРН). Високий рівень роботи підтверджується тим, що результати дослідження інтегровані до державного проекту «Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні». Крім того, теоретичні положення та практичні рекомендації успішно впроваджено в освітній процес підготовки фахівців інженерних спеціальностей (123 «Комп'ютерна інженерія» та 122 «Комп'ютерні науки») у Чорноморському національному університеті імені Петра Могили, що підтверджено відповідними актами.

Зміст дисертації та оформлення роботи

Дисертація Стрюка О.С. являє собою завершенне, цілісне, самостійно виконане та логічне наукове дослідження. Структура роботи, послідовність викладу матеріалу та глибина наукової аргументації витримані у академічному стилі, що повною мірою відповідає сучасним стандартам подання науково-технічної інформації. Здобувач демонструє високу фахову обізнаність, вільно та коректно оперуючи складним понятійно-категоріальним апаратом у галузях комп'ютерної інженерії, штучного інтелекту та глибокого навчання.

За своїм змістом, структурою та рівнем оформлення дисертація задовольняє всі вимоги пп. 8–9 «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 р. № 44 (у редакції від 08.05.2024).

Аналіз публікацій

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження повною мірою висвітлено у 17 наукових працях. Здобувач демонструє високий рівень публікаційної активності: 11 праць індексуються у провідній міжнародній наукометричній базі Scopus.

Структура академічного доробку є репрезентативною та охоплює: 3 статті у фахових міжнародних наукових виданнях, 2 статті у фахових виданнях України (категорія «Б»), 2 розділи в англomовних наукових монографіях та 1 розділ у колективній монографії. Безперервна апробація результатів здійснювалася на авторитетних наукових майданчиках (6 доповідей на міжнародних та 3 на всеукраїнських науково-практичних конференціях).

Результати дослідження підтверджуються наукометричними показниками аспіранта: індекс Гірша складає при загальній кількості цитувань — 167 (згідно з базою даних Scopus).

Особистий внесок здобувача до наукових праць, опублікованих у співавторстві, є визначальним, чітко окресленим і полягає у наступному:

- здійснено математичну формалізацію розроблених методів оптимізації (каскадного та мультифазового) для генеративних змагальних нейронних мереж;
- самостійно розроблено програмно-алгоритмічну архітектуру моделей та реалізовано комплекс масштабних чисельних експериментів із застосуванням кількісних метрик оцінювання (FID, AUC, Recall тощо);
- проведено повний цикл апаратної імплементації розроблених рішень у контури кордонних пристроїв (на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi 5) із застосуванням методів квантування ваг (INT8) та профілювання обчислювальних графів;
- підготовлено фундаментальні аналітичні матеріали щодо стратегічного впровадження систем штучного інтелекту у сферах кібербезпеки, оборони та комплексної автоматизації (в межах роботи над державним проєктом «Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні»).

Усі зазначені публікації повністю відповідають темі дисертації, а відображені в них результати обґрунтовано захищуються як науковий здобуток автора.

Відповідність академічній доброчесності

Здобувач ступеня доктора філософії Стрюк О.С. у процесі підготовки дисертації повністю дотримався принципів академічної доброчесності. У роботі представлено ґрунтовний і неупереджений аналіз сучасного стану досліджень у сфері інженерії кордонних обчислень та штучного інтелекту,

при цьому результати попередніх науковців використано коректно й виключно як теоретичну основу для розроблення власних підходів.

Усі запозичені ідеї, математичні моделі та дані в тексті дисертації належним чином супроводжуються посиланнями на першоджерела, що повною мірою відображені у списку використаної літератури. Високий рівень прозорості та достовірності дослідження також підтверджується тим, що ключові наукові публікації автора пройшли процедуру рецензування (peer review), індексуються у провідних міжнародних наукометричних базах (зокрема, Scopus) та є доступними у відкритому доступі.

За результатами ретельного аналізу дисертаційної роботи ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів, а також інших порушень принципів академічної доброчесності не виявлено.

Недоліки та зауваження

Поряд із загальною позитивною оцінкою теоретичної та прикладної значущості дисертаційної роботи, слід виокремити низку дискусійних положень та висловити такі зауваження:

1. В аналітичній частині дисертаційної роботи (перший розділ), присвяченій огляду сучасного стану проблеми експлуатації ресурсомістких нейромережових архітектур, спостерігається певний дефіцит фактологічного матеріалу щодо існуючих індустріальних впроваджень. Практична цінність цього огляду суттєво зросла б за умови залучення ширшого спектра репрезентативних прикладів та успішних прецедентів розгортання інтелектуальних систем (Edge AI) на кордонних пристроях у реальних умовах експлуатації. Це дозволило б більш обґрунтовувати необхідність та представити переваги і конкурентоспроможність авторського підходу на тлі існуючих аналогів.
2. У процесі алгоритмічної формалізації каскадного та мультифазового методів оптимізації автор спирається на використання метрики FID (Fréchet Inception Distance) як ключового порогового критерію для оцінювання збіжності моделей. Проте, з огляду на специфіку задач, що вирішуються ГЗМ на кордонних пристроях, ця робота значно виграла б від глибшого аналітичного обґрунтування вибору саме цього показника. Доцільним було б розширити теоретичний базис дослідження шляхом розгляду можливості та доцільності застосування альтернативних порогових критеріїв для осцилюючих процесів, що додало б запропонованим методам більшої адаптивності та універсальності.
3. У контексті розв'язання задач виявлення аномалій зафіксовано відносно не досить високий показник точності класифікації аномальних зразків,

що вказує на наявність хибнопозитивних спрацювань. Для підвищення рівня доказовості та чіткого окреслення меж застосовності методу, доцільним було б розширити порівняльний аналіз, залучивши до нього не лише архітектури ГЗМ, але й детектори аномалій інших типів.

Наведені зауваження носять переважно дискусійно-рекомендаційний характер, не порушують концептуальної цілісності дисертаційного дослідження та жодним чином не знижують його високої науково-практичної цінності й загальної позитивної оцінки.

Висновок

Дисертаційна робота Стрюка Олександра Сергійовича являє собою завершену цілісну, системно вибудовану наукову працю, в якій акумульовано нові, методологічно обґрунтовані результати теоретичного та прикладного характеру. Сукупність отриманих автором результатів забезпечує ефективне розв'язання актуальної науково-практичної проблеми — підвищення ефективності навчання генеративних змагальних нейронних мереж та забезпечення їхнього належного функціонування при розгортанні в умовах жорстких апаратно-параметричних обмежень кордонних пристроїв.

Зміст дисертації повною мірою відповідає визначеній меті, поставлені здобувачем наукові завдання вирішені, і, таким чином, мету дослідження досягнуто. Основні положення дисертації, що задекларовані здобувачем, містять беззаперечні елементи наукової новизни. Робота повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» та вимогам до рівня наукової кваліфікації здобувача.

Публікації та апробації вичерпно відображають результати дисертації, а особистий внесок здобувача до наукових публікацій, що підготовлені у співавторстві, відображено коректно; усі вони можуть бути зараховані за темою дисертації. Наукові положення, висновки та рекомендації обґрунтовані та пройшли необхідну апробацію на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України, а саме: постанові Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (у редакції від 08.05.2024); наказу Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (у редакції від 12.07.2019).

З огляду на актуальність проблеми, високий рівень виконання дослідження, наукову зрілість та професійні якості автора, вважаю, що Стрюк Олександр Сергійович повністю заслуговує на присудження ступеня доктора філософії (PhD) з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія».

Рецензент

доктор технічних, професор
професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій
факультету комп'ютерних наук
Чорноморського національного
університету ім. Петра Могили

_____ Олександр ТРУНОВ

Дата: 01-05-2026