

## РЕЦЕНЗІЯ

рецензента

доктора технічних наук, професора, завідувачки кафедри комп'ютерної інженерії  
Чорноморського національного університету ім. Петра Могили

**Журавської Ірини Миколаївни**

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 Стрюка О.С. спрямоване на вирішення науково-практичної проблеми удосконалення, створення та впровадження методів оптимізації генеративних змагальних нейронних мереж (ГЗМ) з метою підвищення ефективності їх навчання та стабільної роботи на кордонних пристроях.

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю забезпечення автономної роботи систем штучного інтелекту в режимі реального часу, що вимагає розробки нових методів зменшення обчислювальної складності нейромереж для їх розгортання в умовах жорстких апаратно-параметричних обмежень.

Традиційний підхід до використання ресурсномістких генеративних архітектур полягає в їх жорсткій прив'язці до потужних хмарних обчислень. Також часто використовуються спрощені готові моделі, які втрачають здатність до якісної генерації складних даних. Але такі підходи не дають достатньої автономності та безпеки для систем, що працюють з конфіденційною інформацією (наприклад, у біометрії чи медицині). Особливо критично це проявляється при дефіциті оперативної пам'яті та енергобюджету на вбудованих пристроях, що унеможливорює використання класичних ГЗМ без суттєвої втрати швидкодії.

Як свідчить аналіз наукових джерел, проведений у дисертаційній роботі, існуючі алгоритмічно-організаційні процедури не забезпечують належний рівень стабілізації процесів навчання ГЗМ та практично не можуть вирішити проблеми зникнення градієнтів або колапсу моди при перенесенні моделей на мікрокомп'ютерні платформи.

У дисертації запропоновано комплекс методів (каскадна та мультифазова оптимізація, квантування ваг), який дозволяє подолати зазначені обмеження завдяки багаторівневій адаптивній конвергенції. Розроблені методи та програмно-апаратне забезпечення дають значне покращення ключових показників ефективності ГЗМ, таких як стабільність генерації, зменшення об'єму пам'яті моделі та прискорення процесу інференсу.

Таким чином, наукове завдання розробки методів оптимізації архітектур ГЗМ та відповідного фреймворку для їх реалізації на кордонних пристроях (на базі Raspberry Pi), що є основою дисертаційної роботи Стрюка О. С., відкриває нові можливості для впровадження інтелектуальних систем у сферах кібербезпеки, комп'ютерного зору та виявлення аномалій без критичної залежності від хмарної інфраструктури.

### **Обґрунтованість наукових результатів, висновків і рекомендацій**

Усі наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційному дослідженні Стрюка О. С., є обґрунтованими та достовірними. Це підтверджується коректною постановкою наукових та прикладних завдань, глибоким аналізом предметної області та використанням фундаментальних положень і принципів комп'ютерної інженерії.

Достовірність отриманих результатів спирається на коректне застосування сучасного математичного апарату, зокрема методів машинного та глибокого навчання, теорії нечітких множин, а також оптимізаційних алгоритмів. У роботі вдало поєднано методи теоретичного аналізу, математичного моделювання та масштабні експериментальні дослідження. Високий рівень об'єктивності та надійності результатів підтверджується практичною імплементацією розроблених моделей на мікрокомп'ютерній платформі (Raspberry Pi 5) із застосуванням методів квантування ваг (INT8), а також застосуванням комплексу сучасних метрик для кількісного аналізу ефективності (FID, AUC, Recall, Inference Time тощо).

Узгодженість отриманих результатів із відомими підходами та їх визнання науковою спільнотою підтверджується широкою апробацією на провідних міжнародних науково-практичних конференціях.

### **Новизна наукових результатів дослідження**

Ознайомлення зі змістом дисертації та основними публікаціями, а також за результатами міжкафедрального семінару дозволяє дійти висновку, що основна мета дослідження полягає у розробленні нових та вдосконаленні вже існуючих моделей і методів проєктування та оптимізації генеративних змагальних нейронних мереж (ГЗМ) для їх ефективного функціонування на кордонних пристроях в умовах жорстких апаратно-параметричних обмежень.

Це знайшло відображення в основних положеннях роботи, які сформульовані автором особисто та містять наукову новизну.

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 швидкодію 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  $\approx 92\%$ ), 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

Розроблено алгоритмічно-апаратний фреймворк для оптимізації навчання та розгортання ГЗМ на кордонних пристроях з урахуванням їх обчислювальних та архітектурних обмежень. Це дозволяє суттєво підвищити автономність систем штучного інтелекту та адаптувати їх для роботи в умовах дефіциту ресурсів.

Реалізовано можливість стійкого функціонування ГЗМ у режимі реального часу на базі мікрокомп'ютерної платформи Raspberry Pi 5 завдяки застосуванню методів квантування ваг (INT8) та профілювання обчислювальних графів. Це дозволяє інтегрувати розроблені моделі ГЗМ як базовий елемент інтелектуального контуру автономних IoT-платформ, що мінімізує локальне апаратне навантаження та усуває критичну залежність інфраструктури від хмарних обчислень.

Теоретичні положення та практичні рекомендації, які обґрунтовано в дисертаційній роботі, впроваджені в науково-технічні розробки Інституту

проблем штучного інтелекту МОН України і НАН України та Саарландського університету (ФРН). Крім того, результати дослідження щодо ГЗМ увійшли до державного проєкту «Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні», що відображено у відповідній колективній монографії.

Використано методику та результати досліджень при розробленні робочих програм і проведенні лекційних, практичних та лабораторних робіт з дисциплін «Проектування інтелектуальних СППР», «Нейромеревеві методи обчислювального інтелекту» та «Fuzzy models and methods for computational intelligence» для здобувачів вищої освіти на факультеті комп'ютерних наук ЧНУ ім. Петра Могили.

Результати дисертаційної роботи мають суттєве практичне значення в галузі знань 12 Інформаційні технології, маючи прикладний характер для впровадження в реальних IoT-системах та вбудованих компонентах систем контролю.

Запропоновані методи можуть бути використані в системах комп'ютерного зору, біометрії, для виявлення аномалій у системах кібербезпеки, корпоративних та промислових «розумних» просторах, платформах Інтернету речей (IoT), а також у навчальному процесі підготовки інженерних фахівців за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

### **Зміст дисертації та оформлення роботи**

Подана дисертаційна робота є цілком завершеним самостійним науковим дослідженням. Текст дисертації характеризується високим рівнем грамотності, логічною послідовністю та витриманий у строгому науково-технічному стилі, що повною мірою відповідає сучасним стандартам подання наукової інформації (ДСТУ 3008:2015, ДСТУ ISO 5807:2016, ДСТУ 8302:2013). Автор коректно та доречно використовує актуальну академічну термінологію в галузі комп'ютерної інженерії.

За своїм змістом, структурою та рівнем оформлення дисертація в основному задовольняє вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (у редакції від 12.07.2019).

### **Аналіз публікацій**

За темою дисертаційного дослідження опубліковано 17 наукових праць, серед яких 11 індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus. Основні наукові результати висвітлено у 3 статтях у міжнародних фахових журналах (індексуються у базі Scopus), 2 статтях у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»), розділах в 2 англійських колективних монографіях та в 1 колективній монографії українською мовою. Апробація результатів

підтверджується 6 доповідями на міжнародних та 3 тезами на всеукраїнських науково-практичних конференціях. Високий рівень наукового визнання результатів дослідження науковою спільнотою підтверджується індексом Гірша здобувача ( $h = 7$ ) та наявністю 167 цитувань у базі Scopus. Особиста участь автора в отриманні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі, полягає у наступному:

- здійснено повну математичну формалізацію каскадного та мультифазового методів оптимізації навчання ГЗМ;
- самостійно розроблено програмну архітектуру моделей (ADCGAN, EAWGAN) та проведено серію масштабних чисельних експериментів з різними наборами даних (MNIST, SOCOFing, Birds 400) із розрахунком комплексу статистичних метрик (FID, AUC, Recall тощо);
- запропоновано та реалізовано нові підходи до покращення якості зображень (суперрезолюції) та виявлення аномалій на основі адаптованих ГЗМ;
- проведено повний цикл апаратної імплементації та оптимізації розроблених рішень для кордонних пристроїв на базі мікрокомп'ютерної платформи Raspberry Pi 5 із застосуванням методів квантування ваг (INT8) та профілювання обчислювальних графів;
- підготовлено аналітичні матеріали щодо ключових напрямів досліджень та впровадження штучного інтелекту у сферах безпеки, оборони та промисловості в межах роботи над проєктом «Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні».

### **Відповідність академічній доброчесності**

Здобувач наукового ступеня доктора філософії Стрюк О. С. під час підготовки дисертації повною мірою дотримався принципів академічної доброчесності. Автором здійснено глибокий та об'єктивний аналіз сучасного стану досліджень у галузі інженерії кордонних обчислень та штучного інтелекту, при цьому здобутки попередників використані коректно і слугують виключно теоретичним підґрунтям для розробки власних методів.

У тексті дисертації всі запозичені ідеї, математичні моделі та дані супроводжуються належними посиланнями на першоджерела, які вичерпно представлені у списку використаної літератури. Високий рівень прозорості та достовірності дослідження додатково підтверджується тим, що ключові наукові публікації автора пройшли рецензування (peer-review), проіндексовані у провідних міжнародних наукометричних базах (зокрема, Scopus) та є у відкритому доступі.

За результатами детального вивчення дисертаційної роботи ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації даних, а також інших порушень академічної доброчесності не виявлено.

## Недоліки та зауваження

1. У підрозділі, присвяченому імплементації моделей на платформі Raspberry Pi 5, автор успішно застосовує метод статичного квантування після навчання (Post-Training Static Quantization) для переходу до 8-бітної точності (INT8). Однак, враховуючи високу чутливість ГЗМ до втрати точності (Precision Loss), дисертація значно виграла б від порівняльного аналізу з методом квантування під час навчання (Quantization-Aware Training, QAT) для оцінки впливу на фінальні показники.

2. У тексті дисертації (зокрема, в четвертому розділі) недостатньо розгорнуто обгрунтовано доцільність застосування саме нечіткого класифікаційного розподілу (апарату нечіткої логіки) в архітектурі виявлення аномалій. Розширення теоретичної аргументації посилює цей підрозділ.

3. Оцінюючи ефективність інференсу ГЗМ на мікрокомп'ютерних платформах, автор фокусується переважно на метриках швидкодії (Inference Time, Latency) та обсягу пам'яті (Model Size). Оскільки йдеться про розгортання систем в умовах апаратно-параметричних обмежень, практична цінність розділу була б вищою за умови додавання метрик енергоспоживання та оцінки температурного режиму при тривалому навантаженні.

4. Автор свідомо та обгрунтовано фокусується на реалізації інференсу виключно силами центрального процесора (CPU архітектури Cortex-A76), уникаючи використання спеціалізованих тензорних співпроцесорів, що підтверджує високу ефективність розроблених методів на бюджетних кордонних пристроях. Разом з тим, оскільки профілювання графа обчислень показало домінування операції матричного множення (`aten::addmm`), дисертація виграла б від глибшого аналізу утилізації кеш-пам'яті (L2/L3) та пропускну здатності оперативної пам'яті. Дослідження впливу «промахів» кешу (cache misses) на загальну затримку (latency) дозволило б ще точніше визначити межі продуктивності CPU-орієнтованих Edge-систем.

5. В Анотації і Вступі та у Висновках відрізняється наукова новизна одержаних у дисертації результатів, а саме: у Висновках написано, що «вперше розроблено каскадний та мультифазовий методи оптимізації» (с. 187), АЛЕ в науковій новизні в Анотації (с. 4) та у Вступі (с. 32) не зазначено згаданого «каскадного методу», проте йдеться про «математичну модель каскадної оптимізації».

6. До «Переліку праць, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації» (с. 16 та с. 206), помилково включено неодноосібний розділ у колективній монографії

*Striuk O. S., Kondratenko Y. P. Generative Adversarial Networks in Cybersecurity: Analysis and Response. In: C. Berger-Vachon, et al. (Eds). Artificial Intelligence in Control and Decision-*

*making Systems. Studies in Computational Intelligence. Cham : Springer, 2023. Vol. 1087. P. 373–388. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25759-9\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25759-9_18),*

що порушує вимоги § 4 п. 8 Постанови КМУ від 12 січня 2022 р. № 44.

Зазначену публікацію доцільно було навести у підрозділі «Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації» СПИСКУ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.

7. Відповідно до вимог § 1 п. 8 Постанови КМУ від 12 січня 2022 р. № 44 для кожної статті здобувача, що опублікована у співавторстві, мав бути у дисертації зазначений особистий внесок кожного автора (С. 34–35 та додаток А дисертації).

Вказані недоліки та зауваження мають переважно дискусійний та рекомендаційний характер. Вони жодним чином не знижують високого наукового рівня, достовірності та практичного значення одержаних у дисертаційній роботі результатів і не впливають на її загальну позитивну оцінку.

### **Висновок**

Дисертаційна робота Стрюка Олександра Сергійовича є завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати, що вирішують важливу науково-практичну задачу підвищення ефективності навчання генеративних змагальних нейронних мереж та забезпечення їх 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 результати апробації вичерпно відображають результати дисертації; 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 в основному відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України, а саме: пп. 6–9 Постанови 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 урахуванням актуальності теми, обсягу проведених досліджень, наукової зрілості та високих професійних якостей, вважаю, що здобувач Стрюк Олександр Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії (PhD) в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

**Рецензент**

доктор технічних, професор,  
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії  
Чорноморського національного університету  
ім. Петра Могили

Ірина ЖУРАВСЬКА