

## **ВІДГУК**

**офіційного опонента на дисертаційну роботу**

**Вдовиченка Руслана Олександровича на тему**

**«Розріджено-розподілене подання структур даних у нейронних мережах», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика**

### **Актуальність обраної теми**

Системи штучного інтелекту стають невід'ємною частиною сучасного технологічного комплексу. Вони знаходять застосування у багатьох галузях життєдіяльності. Концептуально важливим напрямком розробки штучного інтелекту є моделювання пам'яті живих організмів. Біологічна пам'ять характеризується здатністю відновлювати спогади із неповних зразків, асоціативністю, обробкою даних із складною структурою, абстрагуванням.

Для дослідження пам'яті живих істот часто використовуються феноменологічні підходи. До класичних прикладів відносяться розріджено-розподілена пам'ять (Sparse Distributed Memory, SDM) Канерви та бінарні розріджено-розподілені подання (Binary Sparse Distributed Representations, BSDR). Втім, між SDM Канерви та BSDR існує певна прогалина; BSDR вимагає використання очищуючої пам'яті, а SDM Канерви, як і інші класичні конструкції, погано підходять для роботи із розрідженими векторами.

Зауважимо також, що критичною вимогою до моделей пам'яті є сміність. Саме від сміності залежить застосовність моделі до практичних задач. Існуючі конструкції пам'яті не мають достатньої для розв'язання реальних задач ємності.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.** Наукові положення дисертаційної роботи, висновки, методичні рекомендації сформульовані достатньою мірою, обґрунтовані експериментальними даними і відповідають меті та завданням дослідження. Достовірність отриманих результатів забезпечується адекватністю методів меті і завданням роботи, достатнім обсягом і репрезентативністю емпіричного матеріалу, коректністю статистичної обробки даних.

**Теоретична і практична значущість результатів дослідження** полягає в побудові та дослідженні нової гібридної конструкції розріджено-розподіленої пам'яті CS-SDM. Ця модель вперше поєднала два різних методи моделювання пам'яті за рахунок інтеграції SDM та BSDR. Автором вперше застосовано теорію стискуючих вимірювань (Compressive Sensing, CS) до моделювання пам'яті для збільшення ємності моделі. Запропонована конструкція є першою нейронною мережею, ємність якої робить її практично придатною для збереження структурованих та семантичних даних.

Описані вище властивості CS-SDM роблять її корисною для застосування при різних задачах штучного інтелекту, або ж як компоненту більшого комплексу, що базується на штучному інтелекті. CS-SDM можна застосовувати для створення контенту, у робототехніці, медицині тощо. Також, в ході дисертаційного дослідження автором було розроблено бібліотеку для роботи із CS-SDM на платформі NVIDIA CUDA.

**Апробація результатів дисертації.** Варто зазначити, що результати досліджень, які викладені у дисертації, оприлюднені на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях і семінарах.

Результати дослідження опубліковано в 9 працях, при перерахунку за вимогами МОН – в 7 працях, з яких 3 – статті та матеріали доповідей, що проіндексовані у наукометричних базах Scopus, 3 – у фахових виданнях та у міжнародних виданнях, 1 авторське свідоцтво. Серед опублікованих праць 5

відображують основний зміст дисертації, 4 публікації апробаційного характеру.

**Оцінка змісту дисертації, її завершення в цілому.** Дисертаційну роботу викладено на 128 сторінках, вона складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних першоджерел (119 джерел, із яких 109 – іноземні). Робота проілюстрована 38 рисунками, 5 таблицями, 9 фрагментами програмного коду.

**Вступ** відображає стан наукової проблеми, її значущість, обґрунтування необхідності проведення дослідження, мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну, практичну значущість результатів та публікації.

У **першому розділі «Огляд літератури за темою дисертації»** здійснено аналіз наукових джерел, який розкриває історію розвитку галузі моделювання пам'яті живих істот, обговорює класичні результати галузі, розглядає проблеми та недоліки існуючих рішень. Проаналізовано феноменологічні підходи до моделювання пам'яті, детально розглянуто класичні конструкції SDM (Канерви, Джекела), BSDR (векторно-символьні архітектури, розбрижане кодування Канерви, розріджено-блокове кодування Сйодіна, кодвектори Рачковського), обговорено ключові моменти теорії стискаючих вимірювань (постановка задачі, умови обмеженої ізометрії RIP, методи розв'язання недовизначених систем лінійних рівнянь).

У **другому розділі «Гібридна модель нейронної пам'яті CS-SDM»** запропоновано конструкцію моделі розріджено-розподіленої пам'яті CS-SDM. Формально доведено відповідність CS-SDM вимогам стискаючих вимірювань, зокрема, умові обмеженої ізометрії. Побудовано алгоритми операцій, проаналізовано їх обчислювальну складність у послідовному та паралельному випадках. Наведено алгоритми постановки експериментів для великих пакетів векторів.

У третьому розділі «Обчислювальні експерименти» отримано ймовірнісні оцінки активації пам'яті. Наведено результати експериментів із розрідженими векторами для різної кількості властивостей. Продемонстровано, що рівень стискання можна підвищити без втрати якості відновлення використанням більш точних методів розв'язання недовизначених систем лінійних рівнянь. Проаналізовано використання пам'яті для обробки негомогенних векторів.

У четвертому розділі «Деталі програмної реалізації» обговорюється платформа паралельних обчислень NVIDIA CUDA, її програмна модель, типи пам'яті, мова програмування CUDA C/C++. Обґрунтовано вибір платформи NVIDIA CUDA для обчислювальних експериментів із CS-SDM. Наведено фрагменти програмного коду реалізації операцій CS-SDM. Запропоновано метод оптимізації обчислювальних експериментів за рахунок кешування результатів роботи алгоритмів розв'язку недовизначених систем лінійних рівнянь.

**Висновки** відповідають завданням дослідження та змісту основного тексту роботи.

Констатуючи високий науковий рівень виконаного дослідження, його безперечну теоретичну і практичну значущість, слід зауважити, що автору не вдалося уникнути певних недоліків у роботі, які переважно носять дискусійний характер:

1. З розділу «Конструкція CS-SDM» доречно було б перенести у відповідний розділ відомості оглядового характеру, а саме: формулювання лем Джонсона–Лінденштрауса, Ахілоптаса та інші. При розробці власне конструкції CS-SDM навести посилання на огляд існуючих підходів.

2. У дисертаційній роботі не описано, яким чином обирається розмірність проекційної матриці така, що забезпечує високу (близьку до оптимальної) точність зчитування з CS-SDM пам'яті.

3. При розробці конструкції CS-SDM автор використовує лему Ахілоптаса безпосередньо у формулюванні якої міститься можливість для визначення розмірності проєкційної матриці. Доречно було б у роботі експериментально дослідити можливість вибору розмірності проєкційної

матриці з використанням 
$$k \geq \frac{4 + 2\beta}{\varepsilon^2 / 2 - \varepsilon^3 / 3} \log(n).$$

4. Доречно було б провести оцінку обчислювальної складності розробленого алгоритму з урахуванням обчислювальної складності визначення розмірності проєкційної матриці близької до оптимальної.

5. В роботі не наведені вказівки як у реальних задачах обирати невідомі параметри (такі як: кількість бітів, що перевіряє маска; кількість векторів, що запам'ятовуються) таким чином, щоб забезпечити високу точність зчитування з CS-SDM пам'яті.

6. Як предмет дослідження вказано «феноменологічні моделі пам'яті людини і тварин». Вважаю більш доречним наступне «нейросіткові методи для роботи асоціативної пам'яті з розрідженими векторами великої розмірності».

7. В роботі вказано, що метою є розробка гібридних моделей пам'яті для представлення структурованих даних. Однак, ніякі методи, алгоритми або програмні модулі для формування власне структурованих даних в дисертаційній роботі не розглядаються (не розробляються), тому було б більш доречним звужити ціль роботи до – моделі пам'яті для роботи з розрідженими векторами великої розмірності.

8. У експериментах по дослідженню середньої відстані Хеммінга при зчитуванні за точною адресою в залежності від кількості записаних векторів з фіксованим числом ознак, (наприклад, рис 3.1) не наведено умови (кількість записаних векторів) при яких розроблена конструкція CS-SDM починає погано працювати.

9. Не наведено прикладу роботи розробленої конструкції CS-SDM в реальних технічних задачах. Де вхідні розріджені вектори великої розмірності не близькі до ортогональних.

Проте, представлені зауваження не знижують загального враження від науково-теоретичного рівня проведеного дослідження, його актуальності та практичної значущості.

**Висновок про відповідність дисертації вимогам.** Дисертаційна робота Вдовиченка Руслана Олександровича на тему «Розріджено-розподілене подання структур даних у нейронних мережах», є самостійною, завершеною науково-дослідною роботою, яка за актуальністю, науковою новизною, практичним значенням, обсягом проведених досліджень відповідає вимогам «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 №44 від 12 січня 2022 року, а її автор заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика (за спеціалізаціями).

Рецензент:

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник відділу  
нейросіткових технологій обробки інформації  
Міжнародного науково-навчального центру  
інформаційних технологій та систем  
Національної Академії Наук України та  
Міністерства Освіти та Науки України

*Рубина* РЕВУНОВА

