

УДК 004.272.25

**Т. Б. Маргинюк, д-р техн. наук, проф.; А. В. Кожем'яко, канд. техн. наук, доц.;
І. В. Булига; Д. О. Каташинський**

ГРАФІЧНА МОДЕЛЬ ПАРАЛЕЛЬНОЇ АСОЦІАТИВНОЇ ОБРОБКИ ЧИСЛОВИХ ДАНИХ

Популярними операціями у методах штучного інтелекту є операції асоціативної обробки даних, а саме, сортування та пошук конкретної інформації. Так пошук даних активно застосовується під час обробки значних масивів інформації у системах баз даних та мережах інтернет. А сортування числових даних є альтернативною операцією при реалізації принципу WTA (Winner Takes All) у нейромережах. В цьому випадку результат сортування векторного масиву чисел дозволяє не тільки визначити екстремальні (максимальний і мінімальний) елементи цього масиву, але й одночасно сформуванати ранги елементів відсортованих чисел масиву.

Метою цієї роботи є аналіз особливостей розпаралелювання методу асоціативної обробки числового масиву з формуванням різницевих зрізів. Наведено базові операції різницевих зрізів, що дозволяє сформувати результати не тільки згортки елементів масиву, але й сортування за зростанням їх значень. У роботі представлено приклад сортування групи чисел, а також інформаційний граф процесу сортування елементів векторного масиву чисел за методом різницевих зрізів. Ілюстративність процесу обробки числових даних через інформаційний граф забезпечує варіативність способів прискорення та апаратної реалізації його базових вузлів. У випадку сортування за методом різницевих зрізів це особливо актуально для реалізації базового циклу процесу обробки. Простота представлення процесу сортування числового масиву, яка подана за допомогою інформаційного графа, дозволяє ефективно використовувати перспективну елементну базу програмованих логічних ІС (ПЛІС) для реалізації відповідних обчислювальних засобів. Інформаційний граф, що ілюструє досліджений процес сортування чисел, наочно показує поступовість процесу за кількістю циклів, що не перевищує розмірність числового масиву, а також спрощення структурної організації обчислювальних засобів при реалізації сортування.

Ключові слова: сортування, різницевий зріз, інформаційний граф, асоціативна обробка.

Вступ

В обчислювальних інтелектуальних системах асоціативна обробка як числових, так і нечислових даних відіграє значну роль як складова методів штучного інтелекту [1 – 3]. А серед базових операцій асоціативної обробки числових даних особливий інтерес представляють такі операції, як сортування та вибірка екстремальних елементів числового масиву [4, 5].

Серед найактуальніших застосувань операції сортування числових даних можна відмітити базову процедуру у нейромережних структурах, а саме, реалізацію принципу WTA (Winner Takes All) [6 – 8]. Саме тут можливі різні способи реалізації як через конкретну нейромережу (MAXNET) [6, 8], так і через застосування від'ємних латеральних зв'язків у відповідному шарі, наприклад, багат шарового нейромережного класифікатора [7, 9].

Актуальність

Альтернативним підходом до застосування принципу WTA є можливість отримання відповідного результату в процесі сортування за зростанням елементів числового масиву, де визначається не тільки максимальний за значенням елемент, але й найближчі до нього [4]. А це, у свою чергу, полегшує формування рангів відсортованих елементів, наприклад, при класифікації об'єктів [2, 9, 10]. Отже, результат сортування числових даних можна в цьому випадку розглядати також як визначення, в першу чергу, екстремального числового значення максимізатором «1 з N» у складі нейромереж [11].

Разом з тим, необхідно зазначити, що важливим елементом наочності будь-якого числового обчислення є побудова його графічної моделі [12], особливо, якщо це стосується розпаралелювання відповідного процесу. Один з варіантів такого підходу до представлення паралельних алгоритмів згортки та алгебраїчного підсумовування елементів векторного масиву чисел за методом різницевих зрізів наведено у статті [13].

Мета

Метою цієї роботи є аналіз особливостей розпаралелювання методу асоціативної обробки числового масиву даних з формуванням різницевих зрізів.

Особливості сортування масиву чисел методом різницевих зрізів

Початковими даними для процесу сортування за методом різницевих зрізів (РЗ) є n -вимірний векторний масив числових даних вигляду $a_0 = \{a_{i,0}\}_1^n$. В результаті необхідно сформувані відсортований за зростанням значень елементів n -вимірний векторний масив чисел вигляду $a^s = \{a_i^s\}_1^n$.

Базовими операціями методу обробки за РЗ є такі дві операції [13]:

– виділення у поточному векторі a_j , де $j = \overline{1, N}$, внутрішнього порогу обробки q_j , який є найменшим ненульовим числом серед елементів вектора a_{j-1} вигляду:

$$q_j = \min a_{j-1} = \min \{a_{i,j-1}\}_1^n, \quad (1)$$

– формування поточного РЗ a_j вигляду:

$$a_j = \{a_{i,j}\}_1^n = \{a_{i,j-1} - q_j\}_1^n. \quad (2)$$

Отже, ці дві операції складають базовий цикл процесу сортування, причому вихід з останнього циклу визначається за умови:

$$q_j = 0, \quad j = \overline{1, N}, \quad (3)$$

де N – кількість циклів обробки.

Для отримання результатів сортування у вигляді відсортованого масиву a^s необхідно поступово підсумовувати елементи q_i , тобто:

$$a_i^s = \sum_{j=1}^i q_j, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

де a_i^s – i -ий елемент відсортованого масиву a^s .

Слушність виразу (4) математично доведено у монографії [14]. Для наочного підтвердження залежності (4) на рис. 1 наведено приклад сортування групи з п'яти чисел (11, 3, 5, 8, 15) за методом РЗ.

На рис. 1 показано сформовані поточні групи чисел a_j , поточний мінімальний елемент q_j у кожному j -му циклі, а також відсортовану послідовність елементів $a_1^s, a_2^s, \dots, a_5^s$. Групи чисел на рис. 1 показано у вигляді вектор-стовпців через збільшення ілюстративності процесу сортування по циклах. Кількість робочих циклів складає 5, тобто $N=n$, оскільки початкова група чисел не містить жоден елемент, що дорівнює нулю. Шостий цикл не є робочим, він використаний для визначення умови завершення процесу сортування ($q_6 = 0$).

Отже, базові операції (1) і (2) дозволяють визначити РЗ як масив чисел (2), кожний елемент якого формується як різниця однойменного елемента поточного масиву і конкретної

величини – порогу обробки q_j , який є величиною постійною у межах поточного циклу обробки і дорівнює найменшому ненульовому елементу попереднього масиву чисел (1). Причому елементи q_j приймають участь не тільки у формуванні поточних РЗ, але й у визначенні поступово всіх елементів відсортованого за їх зростанням масиву a^s (4).

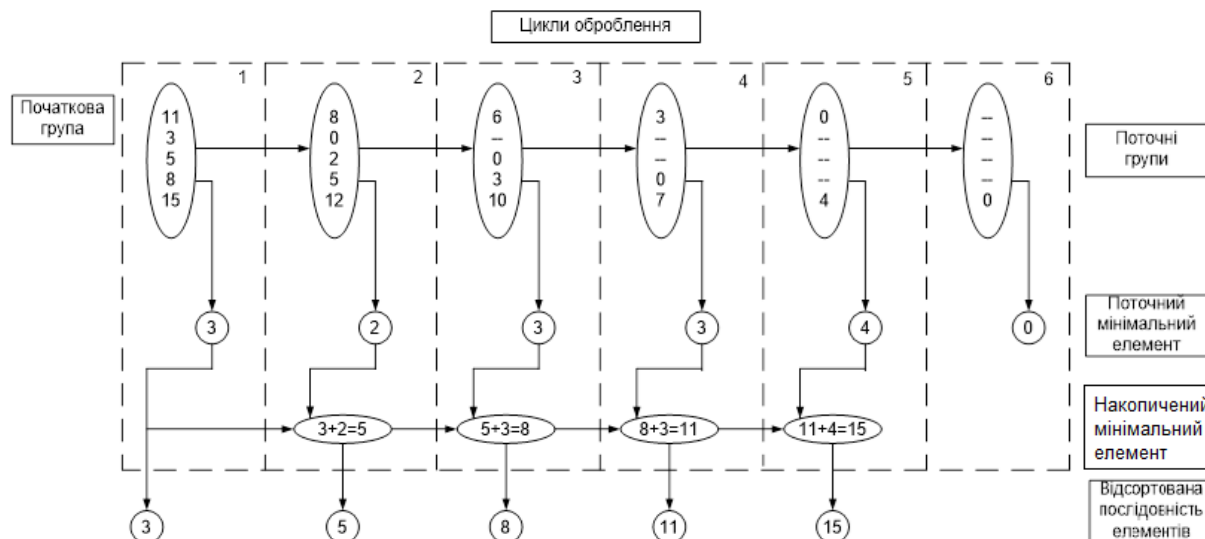


Рис. 1. Приклад сортування елементів векторного масиву чисел

Графічна модель процесу сортування чисел

Відомо, що будь-яка зв'язна структура даних може бути інтерпретована у вигляді різновиду абстракції – графа [12, 15]. Це стосується, в першу чергу, пошукових систем під час виявлення місцезоташування інформації, наприклад, у Web [12].

Разом з тим, навіть найпростіші алгоритми на графах мають достатню наочність особливо з метою їх подальшого комп'ютерного моделювання. Так, відомо базові властивості графа для алгоритму вирішення задачі топологічного сортування (topological sorting) [12]. Як приклад можна також навести графо-структурні моделі, використані у монографії [16] для ілюстрації та дослідження процесів цифрової обробки сигналів.

Для сортування числового масиву за методом РЗ інформаційний граф (ІГ) цього процесу представлено на рис. 2.

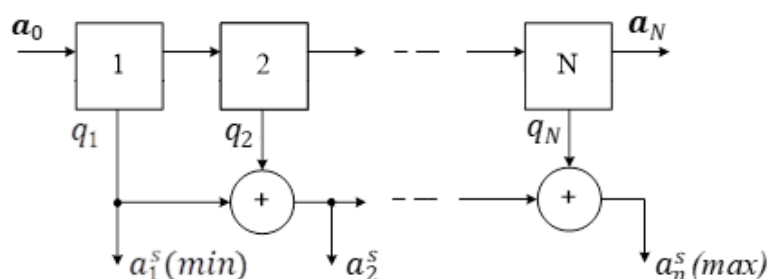


Рис. 2. Інформаційний граф процесу сортування чисел за методом РЗ

На рис. 2 базовий цикл обробки за РЗ, що містить операції (1) і (2), показано у вигляді квадратів з фіксацією номера циклу. А формування елементів a_i^s відсортованого масиву a^s показано функціонально як результат підсумовування відповідних елементів q_j .

Оскільки у загальному випадку попередньо обумовлюється, що всі елементи $a_{i,0}$ початкового масиву a_0 не є нульовим, то максимальна кількість робочих циклів N дорівнює розмірності n початкового масиву [14]. Тому на рис. 2 показано, що у N -му циклі формується останній найбільший елемент a_n^s відсортованого масиву a^s . Крім того, побічним результатом процесу сортування є можливість визначення екстремальних (максимального і мінімального) елементів початкового масиву a_0 .

У цьому випадку з рис. 2 видно, що відповідний ІГ сортування свідчить про простоту і поступовість процесу сортування, тобто без зворотних зв'язків, а також передбачає спрощену структуру обчислювальних засобів для його реалізації.

Подальший аналіз вузлів ІГ процесу сортування (рис. 2) дає можливість розглядати варіанти їх апаратної побудови. Так, одним із перспективних варіантів реалізації базових операцій (1) і (2) є їх суміщення, тобто одночасне формування як поточного РЗ a_j , так і поточного порогу обробки q_j . Така можливість існує при методі сортування з використанням операцій інкремента/декремента [17], які реалізуються на реверсивних лічильниках як елементах пам'яті для запису та обробки числового масиву a_j та порогу обробки q_j . В результаті досягається регулярність структури такого сортувальника, що забезпечує його компактне розміщення, наприклад, у мікросхемі ПЛІС (програмованих логічних ІС).

Висновки

1. Можливість реалізації не тільки процесу найбільш розповсюдженої операції – згортки елементів векторного масиву чисел, але й їх сортування свідчить про багатofункціональність методу обробки за різницеvими зрізами.

2. Використання інформаційного графа для конкретного процесу обробки числових даних забезпечує варіативність способів прискорення та апаратної реалізації його вузлів через ілюстративність самого процесу. Для сортування за методом різницеvих зрізів це стосується реалізації базового циклу процесу обробки.

3. Інформаційний граф для наведеного процесу сортування числового масиву демонструє простоту представлення (виконання) цього процесу, що гарантує ефективне використання перспективної елементної бази ПЛІС (програмованих логічних ІС) для реалізації відповідних обчислювальних засобів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jones M. T. *Al Application Programming*. Charles River Media inc, Hingham, Massachusetts, 2003. 363 p.
2. Гнатієнко Г. М., Снитюк В. С. Експертні технології сприйняття рішень. Київ, Україна: ТОВ "Маклаут", 2008. 444 с.
3. Мартинюк Т. Б., Кожем'яко А. В. Реалізація концепції різницеvих зрізів при обробленні зображень та розпізнаванні образів. *Опτικο-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2001. №1. С. 79-85.
4. Knuth D. T. *The Art of Computer Programming*. V. 3. Sorting and Searching. Addison-Wesley Longman inc, 1998. 785 p. URL: https://www.google.com.ua/books/edition/The_Art_of_Computer_Programming/cYULBAAAQBAJ?hl=uk&gbpv=1&dq=D.+T.+Knuth,+The+Art+of+Computer+Programming.+V.+3.&printsec=frontcover.
5. R. Sedgewick, *Algorithms in C++*. Part 1-4: Fundamentals, Data Structures, Sorting, Searching. Addison-Wesley Longman, 1999. URL: https://www.google.com.ua/books/edition/Algorithms_in_C++_Parts_1_4/ZCChAeprwvYC?hl=uk&gbpv=1&dq=R.+Sedgewick,+Algorithms+In+C%2B%2B.+Part+1-4:+Fundamentals,+Data+Structures,+Sorting,+Searching.+Addison-Wesley+Longman&pg=PT1&printsec=frontcover.
6. Haykin S. *Neural Networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall, Inc., 1999. 842 p.
7. Osowski S. *Sieci Neuronowe do Przetwarzania informacji*. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Poland: Warszawa, 2000. 344 p.
8. Callan R. *The Essence of Neural Networks*. Prentice Hall Europe, 1999. 232 p.
9. Neural network model of heteroassociative memory for the classification task / T. Martyniuk et al.

Radioelectronic and Computer systems. 2022. №2 (102). P. 108-117. DOI: 10.32620/recks. 2022.2.09.

10. Мартинюк Т. Б., Круківський Б. І., М'якішев О. А. Особливості моделей нейромережевого класифікатора для розпізнавання об'єктів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. №4 (163). С. 56-63. <https://doi.org/10.91649/1997-9266-2022-4-56-63>.

11. Структурні особливості нейроподібного класифікатора об'єктів. Т. Б. Мартинюк та ін.. *Наукові праці ВНТУ*. 2023. №4. С. 1-7. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2023-4-1-7>.

12. Sedgewick R. Algorithms in C++. Part 5: Graph Algorithms. Pearson Education, inc., 2002. URL: <https://dokumen.pub/algorithms-in-c-part-5-graph-algorithms-3rd-ed-0201361183-0785342361186-9780201361186.html>.

13. Особливості графічних моделей багатооперандних обчислювальних процесів / Т. Б. Мартинюк та ін.. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2018. №1 (35). С. 5-13.

14. Мартинюк Т. Б. Рекурсивні алгоритми багатооперандної обробки інформації. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. 25 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/19689/mart_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

15. Tsarev A. P. Algorithmic Models and Structures of High-Performance Processors of Digital Signal Processing. Szczecin, Poland: Informa, 2000. 112 p.

16. Николайчук Я. М. Теорія джерел інформації. Тернопіль, Україна: ТзОВ “Термо-Граф”, 2010. 536 с.

17. Martyniuk T. B., Krukivskiy B. I. Peculiarities of the Parallel Sorting Algorithm with Rank Formation. *Cybernetics and System Analysis*. 2022. №58 (1). P. 24-28. DOI: 10.1007/s10559-022-00431-8.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2024.

Стаття пройшла рецензування 27.12.2024.

Мартинюк Тетяна Борисівна – д-р техн. наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки.

Кожем'яко Андрій Вікторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки, e-mail: kvantron@gmail.com.

Булига Ігор Володимирович – аспірант кафедри обчислювальної техніки.

Каташинський Дмитро Олександрович – аспірант кафедри обчислювальної техніки.

Вінницький національний технічний університет.