https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-77-83

УДК 004.424.5

Т. Б. Мартинюк[1]
Б. І. Круківський[1]

КЛАСИФІКАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ СОРТУВАННЯ

[1]Вінницький національний технічний університет

Основною процедурою у багатьох пошукових системах є асоціативне оброблення, а саме процеси сортування, ранжування та вибірки за ключем. Ці процеси є важливими через необхідність прискорення роботи відповідних алгоритмів, де потрібно часто звертатися до певних елементів масиву даних. Потреба у паралельних методах та засобах асоціативного оброблення значних масивів даних пов'язана також з областю їхнього ефективного застосування, наприклад, у реляційних базах даних, базах знань, експертних системах, у разі аналізу семантичних мереж.

У роботі проаналізовано функціональні та реалізаційні можливості процесу сортування за відомими та альтернативними методами з урахуванням часових залежностей. Розглянуто прикладний аспект застосування операцій сортування і ранжування в таких областях як: медіанна фільтрація з попереднім обробленням сигналів і зображень, нейромережна класифікація об'єктів, підсистема підтримки прийняття рішень в експертних системах. Запропоновано класифікаційну модель методів сортування одновимірного масиву, які поділяються на дві групи за такими ознаками: застосування операції попарного порівняння та перекомутація елементів числового масиву. Першу групу складають класичні методи сортування, а друга група містить альтернативні методи сортування з позрізовим обробленням. У таблиці характеристики методів сортування першої групи розглянуто за такими ознаками, як загальна кількість порівнянь і середня кількість переміщень, які корелюють відповідно з часовими та апаратними витратами на їхню реалізацію. Наведено функціональну структуру вертикально-паралельного оброблення одновимірного масиву чисел з використанням операцій декремента і інкремента як приклад методу сортування другої групи. Водночас показано, що використання швидкісних операцій інкремента і декремента в результаті дає можливість визначити максимальний, мінімальний і середній елемент масиву за величиною. Порівняння наведених часових залежностей двох груп алгоритмів свідчить про те, що методи сортування другої групи мають більшу швидкодію або швидкодію, що не залежить від кількості елементів масиву, що сортується. При цьому, апаратна реалізація методів сортування обох груп у більшості випадків реалізується на засобах з достатнім рівнем регулярності структури, але з різним ступенем апаратних витрат.

Ключові слова: сортування, ранжування, числовий масив, часова залежність.

Вступ

Зацікавленість у методах асоціативного оброблення масивів даних не зменшується у наш час [1], [2]. Це стосується таких процедур, як пошук та вибірка за ключем, і, не в останню чергу, сортування одно- та двовимірних масивів даних [3], [4]. До того ж, у більшості публікацій пропонується вдосконалення відомих методів і засобів сортування [5], [6]. Особливо це стосується методів розпаралелювання процесу сортування, а отже, його прискорення [7], [8]. Разом з тим, з'являються публікації, де пропонуються альтернативні підходи до сортування, що відрізняються від класичних методів [9], [10]. Наприклад, організація мережної моделі сортування [11], [12].

Затребуваність паралельних методів та засобів асоціативного оброблення не в останню чергу пов'язана також зі сферою їхнього ефективного застосування, а саме у реляційних базах даних, базах знань, експертних системах, для аналізу семантичних мереж [13], [14].

Актуальність тематики

Сортування (впорядкування), а також пошук даних, які є базовими процедурами асоціативного оброблення [15], [16], активно використовуються в таких прикладних областях, як рішення економічних задач, управління базами даних (СУБД), сортування IP адрес в комп'ютерних мережах, обробка сигналів і зображень (з використанням нелінійної медіанної фільтрації зображень) [4], [7].

© Т. Б. Мартинюк, Б. І. Круківський, 2023

При цьому увага приділяється програмним засобам реалізації сортування значних масивів даних з високою швидкодією [1], [3].

Разом з тим, у перспективі існує можливість досягти високої продуктивності в апаратній реалізації асоціативного оброблення значних масивів даних в результаті комплексного застосування нейромережних технологій [12], [18] та новітніх досягнень в області елементної бази на прикладі ПЛІС [19], матриць смарт-пікселів [20], [21] та оптичних нейрочипів [22].

Крім того, значних результатів можна досягти, застосовуючи альтернативні методи асоціативного оброблення, зокрема для сортування числових даних. До прикладу, використовуючи швидкісні операції інкремента /декремента, які реалізуються на реверсивних лічильниках [9]. В результаті можна не тільки прискорити процес сортування елементів одновимірного масиву чисел [23], але й одночасно виконати їхнє ранжування [10], [24]. А це свідчить про розширення функціональних можливостей сортування у складі асоціативного процесора [9], [24].

Метою роботи є порівняльний аналіз функціональних та реалізаційних можливостей процесу сортування з урахуванням часових залежностей.

Особливості класифікації методів сортування

Всі методи сортування поділяються на два типи: внутрішнє і зовнішнє сортування [1]. Перше впорядковує масиви в оперативній (внутрішній) пам'яті комп'ютера, друге оперує з даними на зовнішніх носіях (файлами), об'єм яких не дозволяє записати їх цілком в оперативну пам'ять.

Під час апаратної реалізації сортування як операції препроцесування перевага надається тим методам сортування, які забезпечують максимально можливий паралелізм оброблення масиву даних, а також регулярність структурної організації та зручність зчитування результатів. Особливо це стосується тих методів сортування, в яких передбачено необхідність одночасного ранжування елементів числового масиву, що сортується.

Щодо асоціативно-логічних операцій сортування і ранжування — в табл. 1 наведено прикладний аспект їхнього задіяння у трьох найзатребуваніших у наш час сферах застосування:

– попереднього оброблення сигналів і зображень [17],

– класифікації об'єктів [25], [26],

– експертних технологіях [13].

В табл. 1 показано функціональне призначення, базову операцію та засоби апаратної реалізації двох операцій, що розглядаються. Так для медіанної фільтрації як базової процедури при попередньому обробленні сигналів і зображень функціонально вагомим є визначення середнього значення центрального пікселя «ковзного вікна» фільтра. Для цього прийнятнішим визнано сортування величин всіх пікселів «ковзного вікна» з визначенням серед них середнього за величиною [17]. Тому в цьому випадку доцільно застосувати сортувальник з формуванням рангів, що дозволить прискорити вибір за відповідним рангом значення для центрального пікселя [9].

Таблиця 1

Прикладний аспект застосування операцій сортування і ранжування

Сфера застосування	Функціональне призначення	Базова операція	Засіб реалізації
Медіанна фільтрація під час попереднього оброблення сигналів і зображень	визначення середнього значення центрального пікселя «ковзного вікна»	сортування з ранжуванням	сортувальник з формуванням рангів
Нейромережна класифікація об'єктів	реалізація механізму конкуренції «1 з N»	визначення максимального числового значення та його місцезнаходження	сортувальник
Підсистема підтримки прийняття рішень в експертних системах	визначення рангів входження об'єктів до класів розпізнавання	ранжування даних як результат сортування	ранжувальник

Під час виконання нейромережної класифікації об'єктів важливою є процедура реалізації механізму конкуренції вигляду «1 з N» [25], оскільки необхідно визначити максимальне числове значення, наприклад, для дискримінантної функції та її місцезнаходження [26]. В цьому випадку можливим є використання сортувальника, а не тільки відомих нейромереж типу MAXNET.

У підсистемах підтримки прийняття рішень у складі експертних систем особливу увагу приділяють визначенню рангів в процесі експертного оцінювання, до прикладу, входження об'єктів до певних класів розпізнавання [13]. А отже, необхідним засобом є ранжувальник, який дозволяє

визначити ранги об’єктів, наприклад, як результат їхнього сортування [10].

На рис. 1 показано розроблений варіант класифікації методів сортування, де вказано, за якими показниками зроблено їхній аналіз. Розглядаючи наведену класифікацію, можна виділити дві групи методів сортування одновимірного числового масиву за такою базовою ознакою, як необхідність виконання попарного порівняння та перекомутації елементів числового масиву. Отже, всі методи сортування за тією ознакою поділено на базові (класичні) методи та методи на базі зрізового вертикально-паралельного оброблення елементів числового масиву.

Рис. 1. Класифікаційна модель методів сортування

Базові методи сортування можна, у свою чергу, класифікувати за такими ознаками, по-перше, як спосіб оброблення елементів масиву, тобто послідовно (попарно) по словах і паралельно по розрядах та паралельно по словах і послідовно по розрядах (по слайзах) [15]. По-друге, як ознаку класифікації можна використати спосіб формування схеми пар елементів масиву, а саме поділити на декілька типів: деревоподібні, турнірні, сітьові (мережні), лінійні [3], [16].

Серед методів сортування першої групи можна виділити сім базових [16]: лінійного вибору, лінійного вибору з обміном, лінійного вибору з підрахунком, попарного обміну, стандартного обміну, просіювання, лінійної вставки. Разом з тим, всі відомі методи сортування входять до трьох основних категорій [1], [3], [16]:

– сортування включенням (by insertion);

– сортування вибором (by selection);

– сортування обміном (by exchange).

Результатом реалізації методів першої групи є відсортований числовий масив.

Альтернативні методи сортування другої групи базуються на зрізовому обробленні, яке можна охарактеризувати як вертикальний [27] та вертикально-паралельний [9], [24] методи. Серед цих методів можна виділити два напрямки: методи, що використовують операції різницево-зрізового оброблення [28], [29] і методи, що використовують операції інкремента/декремента [9], [10]. В методах обох напрямків результатом є відсортований числовий масив з можливістю формування рангів його елементів [10], [30].

Особливістю першого варіанта зрізового оброблення (рис.1), а саме, сортування за методом різницевих зрізів (РЗ), є використання у кожному циклі оброблення внутрішнього порогу як мінімального ненульового елемента серед поточного масиву чисел [28]. Видалення (віднімання) цього внутрішнього порогу у всьому масиві чисел формує новий РЗ. Послідовне застосування таких дій дозволяє поступово визначити елементи числового масиву, починаючи з найменшого і до найбільшого, тобто їх відсортувати [30]. Саме такий підхід до сортування дозволяє також визначитись з рангами чисел від «1» до «*n*», де *n* — розмірність масиву чисел [29]. Таким чином, результатом такого сортування є не тільки відсортований за зростанням числовий масив, але й відповідне ранжування його елементів.

Стосовного другого напрямку зрізового оброблення для детальнішого пояснення на рис. 2 показано два варіанти використання операцій інкремента і декремента з виділенням їх як базових операцій вертикально-паралельного оброблення даних, а також підсумковий числовий масив та отриманий результат сортування і ранжування. Отже, операція декремента відносно масиву чисел використовується в обох варіантах, оскільки власне тільки вона дозволяє визначитись з відсортованим масивом чисел [23], [24]. Стосовно операції інкремента, то вона використовується відносно масиву рангів у парі з операцією декремента і призначена для «вирощування» рангів [9], [10].

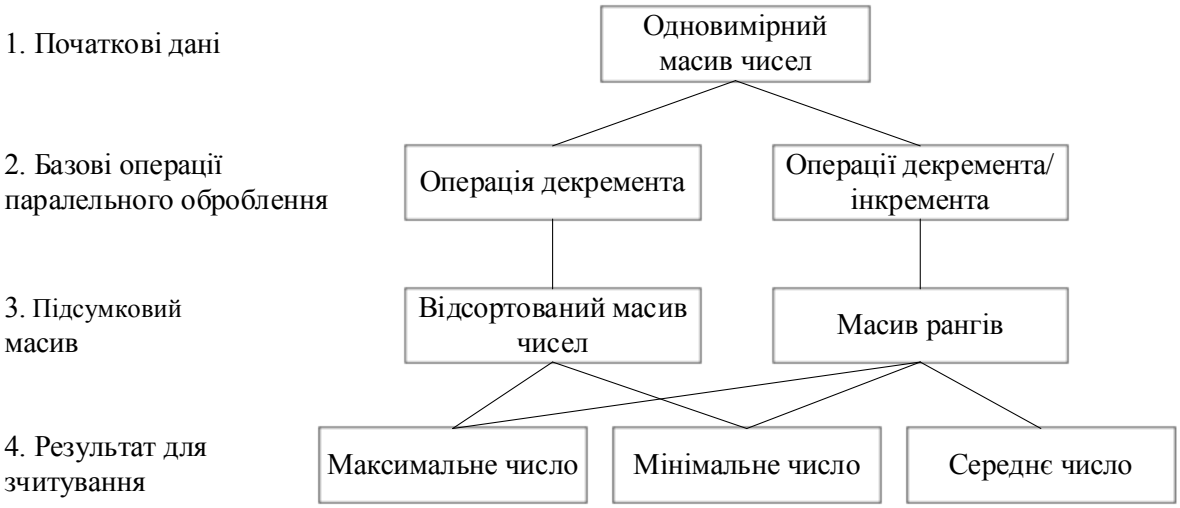

Рис. 2. Функціональна структура вертикально-паралельного оброблення

Таким чином, в цьому випадку об’єднання процесу сортування з ранжуванням елементів масиву чисел дозволяє розширити функціональні можливості методу вертикально-паралельного оброблення з визначенням не тільки екстремальних (мінімального/максимального) чисел, але й середнього серед них за величиною (рис. 2). Можливості визначення середнього за величиною елемента у числовому масиві в процесі їхнього сортування становить значний інтерес, насамперед під час медіанної фільтрації сигналів і зображень [17].

Характеристики методів сортування

Відомо, що для будь-якого алгоритму сортування важливим показником є часові витрати на його реалізацію [1], [3]. Для прикладу у табл. 2 для найзадіяніших методів сортування першої групи наведено оціночні характеристики, які корелюють з часовими та апаратними витратами на їхню реалізацію [31], [32].

Так загальна кількість порівнянь, що виконуються конкретним алгоритмом сортування, вказує на фактичні часові залежності, а середня кількість переміщень (транспозицій) свідчить про рівень апаратних витрат у разі реалізації алгоритму [31]. Отже, часові залежності для першої групи методів сортування (рис. 1) можна визначити у такому діапазоні: від $O(n)$ і $O(n \cdot \log_2 n)$ до $O(n^2)$, де

n — кількість елементів масиву [31], [32]. Причому, найкращий показник належить саме мережному алгоритму сортування та його модифікації [11], [33].

Для методів другої групи максимальна кількість циклів сортування складає:

– для сортування на базі різницево-зрізового оброблення — $O(n)$ [29], [34];

– для сортування на базі операцій інкремента/декремента — $O\left(a_i^{\max}\right)$, де $a_i^{\max}$ — числове значення максимального за величиною елемента a_i з n елементів масиву чисел [8], [10].

Для апаратної реалізації методів сортування першої групи використовують асоціативні процесори [15], [35], [36] або сортувальні мережі з різними підходами до паралельного оброблення [3], [17], [18]. Для апаратної реалізації методів сортування другої групи використовують або одновимірний систолічний масив (для різницево-зрізового оброблення) [37], або одновимірний масив лічильників (для зрізового оброблення за операцією декремента) [9], [24].

Отже, саме операції, які є базовими для виконання сортування, визначають основні апаратні витрати. Так у методах сортування першої групи, враховуючи такі базові операції як попарне порівняння та перекомутацію, використовують компаратори та комутатори у різних модифікаціях і з різною структурною організацією [4], [15].

Таблиця 2

Характеристики методів сортування

Метод сортування	Загальна кількість порівнянь	Середня кількість переміщень
Бульбашка (bubble)	$(n^2-n)/2$	$3(n^2-n)/2$
Лінійна вставка (linear insert)	$(n^2+n-2)/4$	$(n^2+9n-10)/4$
Простий вибір (simple choice)	$(n^2-n)/2$	$n(\ln n+g);\quad g=0{,}577216$
Попарний обмін (pair exchange)	$n^2/2$	$n^2/4$
Метод підрахунку (calculation)	$(n^2-n)/2$	$9n/4$
Турнірне сортування (tournament sorting)	$n\cdot\log_2 n$	—
Пірамідальне сортування (heap sort)	$n\cdot\log_2 n$	—
Просте злиття (simple merge)	$n\cdot\log_2 n$	—
Порозрядне сортування (radix sort)	$n\cdot\log_2 n$	—
Сітьовий попарний обмін (network pair exchange)	n	$n\cdot n/2$

Для методів сортування другої групи операції зрізового (вертикально-паралельного) оброблення є різними. Тому у методах сортування з операціями декремента/інкремента використовують лічильники у вигляді лінійного (вертикального) масиву [9], [24], а у методах з операціями різницево-зрізового оброблення використовують віднімачі та суматори у комірках лінійної систолічної (регулярної) структури [29], [37]. Крім того, методи сортування другої групи реалізуються на обчислювальних структурах з більшою регулярністю як базових вузлів, так і зв’язків між ними з однонапрямним (без транспозиції) потоком оброблення даних [24], [37].

Висновки

1. Аналіз найпоширеніших методів сортування дозволяє виділити дві групи їхньої реалізації. Першу групу складають класичні методи сортування, які використовують операцію попарного порівняння та перекомутацію елементів числового масиву. Друга група містить альтернативні методи сортування, які базуються на позрізовому обробленні одночасно всіх елементів числового масиву, що свідчить про їхній значний рівень паралелізму.

2. Порівняння наведених часових залежностей процедури сортування одновимірного (лінійного) числового масиву свідчить про те, що методи сортування другої групи мають більшу швидкодію або швидкодію, яка не залежить від кількості елементів масиву, що сортується. Апаратна реалізація методів сортування обох груп у більшості випадків реалізується на засобах з достатнім рівнем регулярності структури, але з різним ступенем апаратних витрат.

3. Стосовно функціональних можливостей розглянутих методів сортування необхідно відмітити, що методи першої групи виконують тільки сортування лінійного масиву чисел, а методи другої групи — сортування з ранжуванням елементів числового масиву, що свідчить про їхню функціо-

нальну потужність і пристосованість до використання у складних інтелектуалізованих системах, наприклад, у підсистемах підтримки прийняття рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Р. Седжвик, *Фундаментальные алгоритмы на С++. Анализ. Структура данных. Сортировка. Поиск*. СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002, 688 с.

[2] Е. А. Яценко, «Регулярные схемы алгоритмов адресной сортировки и поиска,» *Управляющие системы и машины*, № 5, с. 61-66, 2004.

[3] D. E. Knuth, *The Art of Computer Programming. V.3, Sorting and Searching*. Reading: Addison-Wesley Longman, Inc., 1998, 800 p.

[4] І. Г. Цмоць, *Інформаційні технології та спеціалізовані засоби обробки сигналів і зображень у реальному часі*, моногр. Львів, Україна: Видавництво УАД, 2005, 228 с.

[5] І. Г. Цмоць, і В. Я. Антонів, «Апаратні засоби сортування даних методом злиття в реальному часі,» *Інформаційні системи та мережі*, № 814, с. 171-185, 2015. https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/29774 .

[6] І. Г. Цмоць, і В. Я. Антонів, «Алгоритми та паралельні структури сортування даних методом вставки,» *Науковий вісник НЛТУ України*, вип. 26.1, с. 340-350, 2016. https://doi.org/10.15421/40260153 .

[7] Г. Е. Цейтлин, «Распараллеливание алгоритмов сортировки,» *Кибернетика*, т. 24, № 6, с. 67-74, 1989.

[8] В. П. Кожемяко, Т. Б. Мартынюк, и В. В. Хомюк, «Особенности структурного программирования синхронных алгоритмов сортировки,» *Кибернетика и системный анализ*, № 5, с. 122-133, 2006.

[9] Т. Б. Мартинюк, і Б. І. Круківський, «Модель паралельного сортувальника масиву чисел,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5 (152), с. 49-55, 2020. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-49-55.

[10] Т. Б. Мартинюк, і Б. І. Круківський, «Особливості паралельного алгоритму сортування з формуванням рангів,» *Кібернетика та системний аналіз*, т. 58, № 1, с. 31-36, 2022.

[11] Т. Б. Мартинюк, О. І. Черняк, Б. І. Круківський, і Мохамед Салем Нассер Мохамед, «Обчислювальна складність мережевої моделі сортування лінійного масиву чисел,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, с. 64-71, 2019. http://ir.lib.vntu.edu.ua//handle/123456789/30531 .

[12] Т. Б. Мартинюк, Мохамед Салем Нассер, і В. В. Власійчук, «Модель сортувальної мережі,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3, с. 217-220, 2005.

[13] Г. М. Гнатієнко, і В. Є. Снитюк, *Експертні технології прийняття рішень*, моногр. Київ, Україна: ТОВ «Маклаут», 2008, 444 с.

[14] А. Ш. Непомнящая, и М. А. Владыко, «Сравнение моделей ассоциативного вычислителя,» *Программирование*, № 6, с. 41-50, 1995.

[15] T. Kohonen, *Content-Addressable Memories*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987, 388 p.

[16] H. Lorin, *Sorting and Sort Systems*. Mass.: Addison-Wesley Publishing Company, 1975, 373 p.

[17] W. K. Pratt, *Introduction to Digital image Processing*. Reading: Taylor and Francis Group, Inc, 2014. 371 p.

[18] T. B. Martyniuk, et all, «Neural network approach to numeric array sorting,» *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments: Proceedings of SPIE* 11176, 111761N (6 November), 2019. https://doi.org/10.1117/12.2535916 .

[19] А. В. Палагин, и В. Н. Опанасенко, *Реконфигурируемые вычислительные системы.* Киев, Украина: Просвіта, 2006, 295 с.

[20] В. И. Осинский, Т. Б. Мартынюк, А. А. Козлов, и Мохамед Салем Нассер Мохамед, «Особенности оптоэлектронной реализации сортирующей нейросети,» *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, т. 18, № 2, с. 58-67, 2009.

[21] V. P. Kozhemyako, T. B. Martyniuk, R. A. Rasenko, and L. L. Pekhan, «Structure of optoelectronic sorting memory,» *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 1 (3), с. 26-30, 2002.

[22] В. Р. Григорьев, и С. П. Наумов, «Нейросетевая организация алгоритма сортировки на трехмерном оптическом нейрочипе,» *Автометрия*, № 3, с. 28-37, 1993.

[23] Т. Б. Мартинюк, Н. О. Денисюк, і Б. І. Круківський, «Асоціативні процесори з паралельно-послідовною обробкою даних,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1 (44), с. 27-36, 2019. https://doi.org/10.31649/1999-9941-2019-44-1-27-36 .

[24] Т. Б. Мартинюк, Л. В. Крупельницький, і Б. І. Круківський, «Регулярна обчислювальна структура для ранжування даних,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3 (52), с. 70-76, 2021. https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-52-3-70-76 .

[25] Т. Б. Мартинюк, Б. І. Круківський, і О. А. М'якішев, «Особливості моделей нейромережного класифікатора для розпізнавання об'єктів,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4 (163), с. 56-63, 2022. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-163-4-56-63 .

[26] T. B. Martyniuk, B. I. Krukivsyi, L. M. Kupershtein, and V. V. Lukichov, «Neural network model of heteroassociative memory for the classification task,» *Radioelectronic and Computer Systems*, № 2 (102), pp. 108-114, 2022. https://doi.org/10.32620/reks.2022.2.09 .

[27] А. Ш. Непомнящая, «Сравнение алгоритмов Прима-Дейкстры и Краскала с помощью ассоциативного параллельного процессора,» *Кибернетика и системный анализ*, т. 36, № 2, с. 19-27, 2000.

[28] Т. Б. Мартынюк, и В. В. Хомюк, «Особенности математической модели дискретного SM-преобразования,» *Математичні машини і системи*, № 4, с. 145-155, 2010. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/83330 .

[29] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, Б. І. Круківський, і А. Г. Буда, «Асоціативні операції на базі різницевозрізової обробки даних», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 4 (311), с. 159-163, 2022. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-311-4-159-163 .

[30] Т. Б. Мартинюк, Д. О. Каташинський, М. В. Микитюк, і М. О. Зайцев, «Особливості обчислювальних процесів

на базі SM-перетворення,» *Оптико-електронні та інформаційно-енергетичні технології*, № 2 (44), с. 32-37, 2022. https://doi.org/10.31649/1681-7893-2022-44-2-32-37 .

[31] В. Ф. Гузик, В. Е. Золотовский, и С. А. Чиненков, «Организация различных методов сортировки в вычислительных системах,» *Электронное моделирование*, № 3 (14), с. 25-28, 1992.

[32] А. С. Мельничук, С. П. Луценко, Д. С. Громовий, і М. В. Трофимова, «Аналіз методів сортування масиву чисел,» *Технологический аудит и резервы производства*, № 4/1 (12), с. 37-40, 2013.

[33] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, А. І. Колівошко, і О. В. Карась, «Дослідження ефективності кільцевої сортувальної мережі,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1, с. 68-71, 2015.

[34] Т. Б. Мартынюк, Л. И. Тимченко, А. В. Кожемяко, и Л. М. Куперштейн, «Эффективность посрезовой обработки векторных массивов данных,» *Математичні машини і системи,* № 2, с. 60-67, 2017. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/125561 .

[35] Т. Б. Мартынюк, «Организация ассоциативного процессора с поразрядно-последовательной обработкой информации», *Электронное моделирование*, т. 18, № 3, с. 28-31, 1996.

[36] T. Martyniuk, T. Vasilyeva, V. Suprigan, and M. AL-Heyari, «Features of sorting memory realization», *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, vol. 4425, pp. 89-91, 2001.

[37] Т. Б. Мартынюк, А. В. Кожемяко, и В. В. Хомюк, «Модели систолических массивов для обработки векторных данных по разностным срезам», *Управляющие системы и машины*, № 5, с. 46-55, 2009.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.08.2022

Мартинюк Тетяна Борисівна — д-р техн. наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки, e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com ;

Круківський Богдан Ігорович — аспірант кафедри обчислювальної техніки, e-mail: smiletex11@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

T. B. Martyniuk[1]
B. I. Krukivskyi[1]

Classification Analysis of Sorting Methods

[1]Vinnytsia National Technical University

The basic procedure in many search systems is associative processing, namely the processes of sorting, ranking, and selection by key. These processes are important due to the need to speed up the work of the corresponding algorithms, where certain elements of the data array need to be frequently accessed. The need for parallel methods and tools for associative processing of large data sets is also related to the area of their effective application, for example, in relational databases, knowledge bases, expert systems, and the analysis of semantic networks. In this article, the analysis of the functional and implementation possibilities of the sorting process by known and alternative methods, taking into account time dependencies, was carried out. The applied aspect of the application of sorting and ranking operations in such areas as median filtering during pre-processing of signals and images, neural network classification of objects, and decision support subsystem in expert systems is considered. A classification model of one-dimensional array sorting methods is proposed, which are divided into two groups according to such a feature as the use of the pairwise comparison operation and the permutation of the elements of the numerical array. The first group consists of classic sorting methods, and the second group contains alternative sorting methods with slice processing. In the table, the characteristics of the sorting methods of the first group are considered according to such characteristics as the total number of comparisons and the average number of moves, which correlate with the time and hardware costs of their implementation, respectively. The functional structure of vertically-parallel processing of a one-dimensional array of numbers using decrement and increment operations is given as an example of the sorting method of the second group. At the same time, it is shown that the use of high-speed operations of increment and decrement as a result makes it possible to determine the maximum, minimum, and average element of the array by size. A comparison of the given time dependences of the two groups of algorithms shows that the sorting methods of the second group have a higher speed or a speed that does not depend on the number of elements of the array being sorted. At the same time, the hardware implementation of the sorting methods of both groups is in most cases implemented on devices with a sufficient level of regularity of the structure, but with different degrees of hardware costs.

Keywords: sorting, ranking, numerical array, time dependence.

Martyniuk Tatiana B. **—** Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Computer Engineering, e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com ;

Krukivskyi Bohdan I. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Engineering, e-mail: smiletex11@gmail.com