

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Антонів Володимир Ярославович



УДК 004.424.4+004.424.5

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПАРАЛЕЛЬНОГО
СОРТУВАННЯ ТА ПОШУКУ ДАНИХ**

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованих систем управління Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Цмоць Іван Григорович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри автоматизованих систем управління

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Сеньківський Всеволод Миколайович,
Українська академія друкарства Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри комп’ютерних наук та інформаційних технологій

кандидат технічних наук, доцент
Гнатчук Єлизавета Геннадіївна,
Хмельницький національний університет Міністерства освіти і науки
України,
доцент кафедри комп’ютерної інженерії та системного програмування

Захист відбудеться “24” вересня 2021 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.14 Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 28а, ауд. 807, V навчальний корпус.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “20” серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



А.Є. Батюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Актуальність теми.

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій сортування та пошуку даних характеризується розширенням галузей їхнього застосування, значна частина з яких пов'язана з накопиченням, сортуванням і пошуком даних у реальному часі. До таких застосувань належать системи збирання та попередньої обробки телеметричних даних, управління складними об'єктами, автоматизовані системи багаторівневого управління технологічними процесами, де на нижніх рівнях накопичуються великі обсяги даних, які потребують попереднього опрацювання у реальному часі. При попередньому опрацюванні масивів даних найчастіше доводиться використовувати операції сортування та пошуку даних, які можуть займати до 40% із загального часу роботи з базами даних. Для ефективного опрацювання потоків даних необхідні інформаційні технології паралельного сортування та пошуку даних у реальному часі, що ґрунтуються на нових і вдосконалених методах, моделях, які повинні бути орієнтовані на паралельно-потокове надходження даних і на адаптацію до інтенсивності надходження даних. Ефективне сортування та пошук даних у реальному часі вимагає розроблення нових методів і алгоритмів, які орієнтовані на сучасну елементну базу (графічні процесори та програмовані логічні інтегральні схеми).

Для сортування і пошуку максимальних та мінімальних значень у реальному часі необхідне створення спеціалізованих апаратних засобів із високою ефективністю використання обладнання. Забезпечити такі вимоги можна розробленням методів паралельно-вертикального сортування і пошуку даних, особливістю яких є надходження даних паралельно-розрядними зрізами, використання однотипних процесорних елементів з регулярними та локальними зв'язками, суміщення у часі процесів приймання та опрацювання даних.

При створенні ефективних програмно-апаратних засобів інформаційних технологій сортування та пошуку максимальних і мінімальних значень у реальному часі необхідно розробити просторово-часові моделі з механізмами узгодження інтенсивності надходження даних з інтенсивністю виконання сортування та пошуку програмно-апаратними засобами. Процес переходу від моделей до структури апаратних засобів є складним і вимагає взаємної адаптації алгоритмів і структур.

З наведеного випливає, що розробляти інформаційні технології паралельного сортування та пошуку максимальних і мінімальних значень у реальному часі необхідно за інтегрованим підходом, який охоплює методи, моделі та засоби сортування та пошуку даних, методи їх розпаралелення, сучасну елементну базу, засоби автоматизованого проектування та автоматизації процесу програмування.

Розроблені у цій роботі інформаційні технології паралельного сортування та пошуку максимальних і мінімальних значень у реальному часі ґрунтуються на напрацюваннях відомих зарубіжних та українських вчених, які створили теоретичні та практичні засади їх побудови, таких як Г. Лорин, Р. Седжвик, Т. Б. Мартинюк, В. В. Пасічник, В. П. Гергель, К. Кущері, П. Пушнер, Д. Валенсія, М. Возняк та інші.

Отже, актуальним науковим завданням є розроблення нових та удосконалення існуючих методів, моделей і засобів інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження проводили згідно з планами науково-дослідних та навчальних робіт кафедри автоматизованих систем управління Національного університету «Львівська політехніка», в тому числі в межах держбюджетних науково-дослідницьких робіт:

- «Розвиток теорії синтезу нейронних мереж на НВІС-структурах для обробки сигналів у робототехнічних системах» (номер держ. реєстр. 0112U001204);
- «Інструментальні засоби та інтелектуальні компоненти синтезу інтегрованих автоматизованих систем управління» (номер держ. реєстр. 0113U003186);
- «Інтелектуальні інформаційні технології багаторівневого управління енергоефективністю регіону» (номер держ. реєстр. 0117U004450).

Результати дисертаційної роботи використано під час розроблення засобів збирання та попереднього опрацювання телеметричних даних на ДП «Львівський державний завод «ЛОРТА» та впроваджено у навчальний процес кафедри автоматизованих систем управління Національного університету «Львівська політехніка».

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розроблення нових та удосконалення існуючих методів, моделей і засобів інформаційних технологій паралельного сортування і пошуку даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

Досягнення поставленої мети передбачало вирішення таких завдань:

- аналіз інформаційних технологій сортування та пошуку даних і визначення напрямів їх розвитку;
- розроблення методу паралельно-вертикального сортування даних;
- розроблення методу паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел у масивах;
- удосконалення методу паралельно-потокowego сортування даних злиттям;
- розроблення інформаційної технології паралельного сортування даних;
- розроблення інформаційної технології паралельного пошуку даних;
- розроблення засобів інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних.

Об'єктом дослідження є процеси сортування та пошуку даних у реальному часі.

Предметом дослідження є методи, моделі, алгоритми і засоби інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних у реальному часі.

Методи дослідження.

У дисертаційній роботі використано: методи паралельного сортування – для розроблення апаратно-програмних засобів сортування масивів даних; методи паралельного пошуку максимальних і мінімальних значень – для розроблення апаратно-програмних засобів пошуку максимальних і мінімальних значень; елементи теорії графів, теорію та методи розпаралелення алгоритмів, теорію проектування та синтезу програмно-апаратних засобів – для розроблення паралельних програмно-апаратних засобів сортування та пошуку даних.

Наукова новизна отриманих результатів.

За результатами виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розв'язано актуальну наукову задачу – розроблено нові та вдосконалено існуючі методи, моделі і засоби інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання. При цьому отримано такі нові результати:

вперше розроблено:

- інформаційну технологію паралельного сортування даних, яка завдяки використанню розроблених і вдосконалених методів, функціональних моделей паралельно-потокowego сортування даних та врахуванню інтенсивності надходження даних, розмірів масивів даних і засобів реалізації забезпечує виконання сортування даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання;
- метод паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел у масивах, який внаслідок паралельного опрацювання i -го розрядного зрізу масиву чисел і паралельного формування слів управління забезпечує зменшення часу пошуку, який визначається в основному розрядністю чисел;

вдосконалено:

- метод паралельного сортування злиттям, який завдяки використанню базової операції об'єднання двох масивів з одночасним формуванням елементів зростаючого і спадаючого масивів забезпечує зменшення часу сортування;
- метод паралельно-вертикального сортування даних, який завдяки підрахунку одиниць у i -му вхідному розрядному зрізі та паралельному формуванню i -го розрядного зрізу відсортованого масиву чисел забезпечує зменшення часу сортування.

Практичне значення отриманих результатів.

Полягає у розробленні інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання, а саме:

1. Сортування одновимірних масивів даних на графічному процесорі GPU із використанням вдосконаленого методу паралельного сортування злиттям забезпечує зменшення часу сортування на 31%.

2. Використання процесу злиття двох масивів шляхом одночасного формування елементів зростаючого і спадаючого масивів забезпечує зменшення часу сортування вдвічі порівняно з послідовним злиттям.

3. Апаратна реалізація розробленого методу паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел забезпечує просте модульне нарощування кількості входів і зменшення часу пошуку, який в основному визначається розрядністю чисел.

4. Використання методу паралельно-вертикального сортування даних під час розроблення апаратних засобів забезпечує їх реалізацію з високою ефективністю використання обладнання та сортування інтенсивних потоків даних у реальному часі.

5. Використання розроблених інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних забезпечує виконання сортування та пошук даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

Особистий внесок здобувача.

Усі наукові результати дисертаційної роботи автор отримав самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [1] – розроблено метод паралельно-вертикального сортування масивів чисел; [2] – розроблено поточкові графи для методу паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел; [3] – удосконалено метод сортування злиттям для підвищення швидкодії сортування; [4] – розроблено структури пристрою сортування даних методом злиття; [5] – розроблено структури пристрою узгоджено-паралельного обчислення максимальних і мінімальних значень; [6] – розроблено метод паралельно-вертикального сортуванням одновимірних масивів даних злиттям; [7] – розроблено потоковий граф методу злиття та орієнтовано його на апаратну реалізацію; [8] – розроблено програмні рішення на графічному процесорі для підвищення швидкодії сортування; [9] – розроблено структури пристрою паралельно-вертикального сортування даних; [10] – розроблено структури пристрою сортування даних методом вставки; [11] – розроблено програмні засоби сортування на графічному процесорі; [12] – адаптовано метод паралельно-узгодженого сортування та апаратну реалізацію; [13] – розроблено метод паралельного сортування; [14] – реалізовано алгоритм сортування на графічному процесорі; [15] – адаптовано метод паралельно-вертикального сортування на графічний процесор; [16] – реалізовано метод пошуку мінімальних і максимальних чисел на НВІС; [17] – розроблено структури пристрою паралельно-вертикального сортування даних; [18] – розроблено структури процесорного елемента пристрою.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати наукових досліджень неодноразово доповідалися, обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, зокрема на: Міжнародній конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту», ISDMCI 2014 (28-31 травня. — Залізний Порт, 2014); Міжнародній конференції «Інтелектуальні системи

прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту», ISDMCI 2015 (25-28 травня. — Залізний Порт, 2015); XIV Міжнародному науковому семінарі «Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці, освіті» (29 червня – 2 липня. — Світязь – 2015); Міжнародній конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту», ISDMCI 2016 (24-28 травня. — Залізний Порт, 2016); 14th International Conference «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» CADSM (Polyana, February 21-25, 2017); XIIIth International Scientific and Technical Conference «Computer science and information technologies», CSIT'2018 (Lviv, 11-14 September, 2018); XV International Scientific and Technical Conference «Computer Science and Information Technologies», CSIT'2020 (Lviv, Ukraine, 23-26 September, 2020).

Публікації.

За темою дисертації опубліковано 18 друкованих праць, серед яких 8 статей у наукових фахових виданнях України та 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, 8 тез доповідей на міжнародних конференціях та 1 патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний зміст викладено на 206 сторінках друкованого тексту, включаючи 166 сторінок основного тексту, містить 67 рисунків, 8 таблиць. Список використаних джерел містить 150 найменування на 13 сторінках та 3 додатки на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні задачі досліджень, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими темами. Подано відомості про апробацію результатів роботи, особистий внесок автора та його публікації.

У **першому розділі** дисертаційної роботи проаналізовано галузі застосування, методи, моделі та засоби інформаційних технологій сортування та пошуку даних. Визначено, що в значній частині галузей застосування інформаційних технологій сортування та пошуку даних вимагається сортування та пошук максимальних і мінімальних значень у реальному часі при інтенсивному паралельному надходженні потоків даних.

Проаналізовано багаторівневі автоматизовані системи управління технологічними процесами, енергоефективністю тощо, на нижніх рівнях яких виконують збирання та попередню обробку технологічних даних. Основними операціями попередньої обробки є сортування та пошук даних, які необхідно виконувати в реальному часі. Результати сортування та пошуку даних передаються

на вищій рівні, де здійснюють їхнє накопичення та попереднє інтелектуальне опрацювання.

Проаналізовано та оцінено складність методів і алгоритмів сортування та пошуку даних та визначено, що їхня реалізація вимагає великої кількості операцій попарного порівняння та перестановки даних і у більшості випадків має квадратичну залежність. Показано, що більшість методів і алгоритмів сортування відрізняються вибором даних для попарного порівняння. Визначено, що для паралельної реалізації алгоритмів сортування та пошуку даних вони повинні бути добре структурованими з детермінованим переміщенням даних, ґрунтуватися на однотипних операціях із регулярними та локальними зв'язками.

Проаналізовано сучасну елементну базу та засоби розробки, які використовуються для створення програмно-апаратних засобів інформаційних технологій сортування та пошук даних у реальному часі. Запропоновано для виконання сортування та пошуку даних використовувати графічні процесори (GPU – Graphics Processing Unit), які є процесорами класу SIMD (Single Instruction Multiple Data) та програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС). Особливістю процесорів класу SIMD є те, що в них одну операцію використовують одночасно для опрацювання множини незалежних даних. Для розроблення програмного забезпечення сортування великих масивів даних, частина якого працює на CPU (центральний процесор), а частина на GPU, доцільно використати кросплатформову систему компіляції та виконання програм CUDA. Показано, що основними перевагами використання ПЛІС є: доступність, висока швидкодія, надійність, універсальність, різноманітність під час вибору напруг живлення і параметрів сигналів вводу/виводу, низьке енергоспоживання, наявність засобів автоматизованого проектування, які зменшують час проектування, налаштування та відлагодження апаратних засобів. Суттєвими особливостями останніх поколінь ПЛІС є забезпечення можливості часткової реконфігурації апаратних засобів у процесі роботи. Показано, що для апаратної реалізації алгоритмів сортування та пошуку даних однією із вимог є мінімізація кількості виводів інтерфейсу. Проаналізовано мови опису апаратури (VHDL, HDL, Verilog HDL, AHDL), які використовують для проектування та моделювання структур апаратних засобів сортування та пошуку даних. Мова опису апаратури дає можливість автоматично аналізувати, імітувати та тестувати розроблені пристрої сортування та пошуку даних.

На основі проведеного аналізу визначено перелік задач і досліджень, які необхідно виконати для вирішення наукового завдання, поставленого у дисертаційній роботі.

У другому розділі сформульовано вимоги до засобів інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних, основною з яких є забезпечення реального часу. Вдосконалено та орієнтовано методи сортування масиву чисел вставкою та злиттям на паралельне та паралельно-потоккове сортування одновимірного масиву. Розроблено функціональні моделі алгоритмів паралельного сортування потоків даних у реальному часі.

Сформульовано вимоги до засобів інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних, основною з яких є забезпечення реального часу. Для забезпечення режиму реального часу під час програмно-апаратного сортування та пошуку даних необхідно, щоб виконувалася така умова:

$$t_{cop/nou} \leq t_{nm}, \quad (1)$$

де $t_{cop/nou}$ – час сортування/пошуку даних; t_{nm} – час надходження масиву даних, який визначено так:

$$t_{nm} = \frac{Nn}{F_d k n_k}, \quad (2)$$

де N – розмір масиву даних; n – розрядність даних; F_d – частота надходження даних; k – кількість каналів; n_k – розрядність каналів надходження даних.

Визначено, що для програмно-апаратного сортування та пошуку даних продуктивність комп'ютерних засобів повинна бути:

$$П_{КЗ} = \frac{\lambda R_{cop/nou}}{t_{nm}}, \quad (3)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує особливості архітектури комп'ютерних засобів; $R_{cop/nou}$ – кількість операцій, необхідна для виконання алгоритму сортування (пошуку) даних.

При паралельно-потоківій апаратній реалізації алгоритмів сортування та пошуку даних режим реального часу забезпечується, коли виконується така умова:

$$P_d \leq P_{A3}, \quad (4)$$

де P_d – інтенсивність надходження даних; P_{A3} – інтенсивність сортування (пошуку) даних апаратними засобами.

Інтенсивність надходження даних та інтенсивність сортування (пошуку) даних апаратними засобами обчислено так:

$$P_d = F_d k n_k, \quad P_{A3} = F_d m_t n_t, \quad (5)$$

де m_t – кількість трактів сортування (пошуку) даних; n_t – розрядність трактів сортування (пошуку) даних.

Апаратні засоби інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних повинні мати високу ефективність використання обладнання, яку обчислюють так:

$$E = \frac{R_{cop/nou}}{t_{cop/nou} W_{cop/nou}}, \quad (6)$$

де $W_{cop/nou}$ – затрати обладнання на реалізацію апаратних засобів сортування/пошуку даних.

Ефективність використання обладнання зв'язує продуктивність апаратних засобів сортування/пошуку даних з витратами обладнання та оцінює елементи засобів за продуктивністю.

Сформульовано вимоги до алгоритмів паралельного сортування та пошуку даних у реальному часі. Визначено, що алгоритми паралельного сортування та пошуку даних у реальному часі повинні бути: структурованими з детермінованим переміщенням даних; ґрунтуватися на однотипних операціях попарного порівняння та перестановки даних з регулярними та локальними зв'язками; орієнтованими на реалізацію на множині взаємозв'язаних процесорних ядер; використовувати конвеєризацію та просторовий паралелізм.

Вдосконалено метод сортування масиву чисел вставкою та орієнтовано його на паралельне та паралельно-потоккове сортування одновимірного масиву $\{a_i\}_1^m$, де m – кількість чисел в масиві. Вдосконалення досягнуто завдяки зміні розрядності каналів надходження та сортування даних. Сортування масиву чисел $\{a_i\}_1^m$ вдосконалим методом вставки зводиться до отримання нового масиву чисел $\{b_i\}_1^m$, який складається із чисел a_i , переставлених у необхідній послідовності. Сортування масиву чисел $\{a_i\}_1^m$ методом вставки полягає в тому, що масив розбивається на дві частини: відсортовану та невідсортовану. Спочатку відсортована частина містить тільки перше число a_1 , яке само по собі є впорядковане. На кожному j кроці сортування беремо a_{i+1} число з невідсортованої частини та вставляємо його до відсортованої частини так, щоб вона не втратила впорядкованості. Базова операція Φ_{ji} алгоритму сортування масиву чисел $\{a_i\}_1^m$ методом вставки зводиться до виконання двох елементарних операцій: попарного порівняння вхідного числа a_{i+1} з i -м числом b_{ji} відсортованої частини та перестановки. Попарне порівняння виконують відповідно до виразу:

$$y_{ji} = \begin{cases} 0, & \text{при } a_{i+1} > b_{ji}, \\ 1, & \text{при } a_{i+1} \leq b_{ji}, \end{cases} \quad (7)$$

а за результатами порівняння перестановку виконують так:

$$b_{ji} = \begin{cases} b_{(j-1)i-1}, & \text{коли } y_{j(i-1)} = y_{ji} = 0 \\ a_{i+1}, & \text{коли } y_{j(i-1)} = 1, y_{ji} = 0 \\ b_{(j-1)k}, & \text{коли } y_{j(i-1)} = y_{ji} = 1 \end{cases}, \quad (8)$$

де $y_{j(i-1)}$ – результат попарного порівняння числа a_{i+1} з числом b_{i-1} . Поточковий граф алгоритму паралельного сортування методом вставки масиву із m чисел має висоту $h=m-1$, ширину $L=m$. При паралельному сортуванні масивів даних методом вставки зміни інтенсивності сортування досягають зміною розрядності надходження чисел і розрядності базової операції. Складність паралельного алгоритму сортування чисел методом вставки дорівнює $R = (\frac{m^2 + m}{2} - 1)$ базових операцій.

Вдосконалено та орієнтовано метод злиття на паралельне та паралельно-потоккове сортування масивів даних. Показано, що паралельне сортування упорядкованих масивів методом злиття ґрунтується на базових операціях об'єднання двох упорядкованих масивів $\{a_{1i}\}_{i=1}^m$ та $\{a_{2i}\}_{i=1}^m$ в один упорядкований масив $\{b_i\}_{i=1}^{2m}$, максимальні значення якого формуються на першому виході $\{b_{\max 1i}\}_{i=1}^m$, а мінімальні $\{b_{\min 2i}\}_{i=1}^m$ – другому виході. Для реалізації таких базових операцій використовують один процесорний елемент. Запропоновано вдосконалити базову операцію для випадку, коли $m \geq 2$, з використанням двох процесорних елементів. Перший виконує сортування за спаданням, другий – за зростанням. Показано, що для реалізації базової операції на базі одного процесорного елемента необхідно виконати $2m$ тактів, а при використанні двох процесорних елементів – m тактів. Під час паралельного сортування масиву розміром $Q=Nm$, де N – кількість упорядкованих масивів, m – довжина масиву, його розбивають на $N/2$ пар упорядкованих масивів довжиною m , які попарно об'єднують. Таке об'єднання реалізується на основі першого типу макрооперації (базової операції). У результаті виконання першого етапу формуються $N/4$ впорядкованих масивів довжиною $2m$. Для виконання другого етапу використовується макрооперація другого типу, яку виконують на базі трьох макрооперацій першого типу. Кількість етапів, необхідних для сортування N масивів чисел, визначають за формулою:

$$k = \lceil \log_2 N \rceil \quad (9)$$

Кожний s -й етап, де $s=1, \dots, k$, виконують на основі макрооперацій s -го типу, яка реалізується на трьох макроопераціях $(s-1)$ -го типу. Кількість базових операцій, необхідних для виконання макрооперації s -го типу, дорівнює 3^{s-1} , а для сортування N масивів довжиною m обчислюється за формулою:

$$Z_{BO} = \sum_{s=1}^k 3^{s-1} \frac{N}{2^s}. \quad (10)$$

Розроблено функціональні моделі алгоритмів паралельного сортування потоків даних у реальному часі. Вхідними даними таких моделей є інтенсивності надходження даних P_d , розміри масиву Q , методи сортування та засоби реалізації. Функціональні моделі алгоритмів сортування завдяки знаходженню просторово-часових співвідношень забезпечують отримання паралельного конкретизованого графа для виконання сортування потоків даних у реальному часі. Процес розроблення функціональної моделі паралельного сортування масиву розбивається на такі чотири етапи: декомпозиція алгоритму сортування масиву; проектування комунікацій між функціональними операторами; укрупнення функціональних операторів; планування процесу сортування даних. Розроблені функціональні моделі паралельного сортування даних методом злиття та вставки, які внаслідок використання механізму управління паралелізмом забезпечують отримання конкретизованого графу алгоритму, орієнтованого на сортування у реальному часі на заданих засобах.

У третьому розділі розроблено та вдосконалено методи, алгоритми та функціональні моделі паралельно-вертикального сортування даних у реальному часі. Розроблено метод та функціональні моделі паралельно-вертикального пошуку у реальному часі максимальних і мінімальних чисел у масивах з інтенсивним надходженням даних.

Вдосконалено та орієнтовано метод злиття на паралельно-вертикальне сортування даних у реальному часі. Вдосконалення досягнуто завдяки використанню базової операції, яка ґрунтується на попарному порозрядному порівнянні та перестановці трьох і більше чисел $r \geq 3$, які поступають старшими розрядами вперед. Використання такої базової операції забезпечує зменшення часу сортування.

Вдосконалено та орієнтовано метод вставки на паралельно-вертикальне сортування даних у реальному часі. При виконанні такого сортування вхідні дані надходять паралельно розрядними зрізами, починаючи зі старших розрядів. Для зміни інтенсивності сортування пропонується використовувати базову операцію з вертикально-груповим порівнянням та перестановкою чисел.

Розроблено метод паралельно-вертикального сортування одновимірного масиву із N чисел, які надходять паралельно розрядними зрізами, старшими розрядами уперед. Особливістю такого сортування є паралельне формування у кожному такті розрядного зрізу N відсортованих чисел. Сортування одновимірного масиву чисел $\{D_k\}_{k=1}^N$ за спаданням (більше число – вихід D_1^* , менше число – вихід D_N^*) здійснюється за n тактів, де n – розрядність чисел. У першому такті сортування формуються старші розряди усіх відсортованих чисел. Цей такт зводиться до виконання таких операцій: підрахунку кількості одиниць у розрядному зрізі $S_1 = \sum_{k=1}^N D_{1k} \wedge y_{1k}$, де D_{k1} – значення старшого розряду k -го числа масиву, y_{1k} – значення k -го розряду 1-го слова управління, яке дорівнює $y_{1k}=1$; формування одиниці для виходів $D_1^*, \dots, D_{s_1}^*$ і нуля для $D_{s_1+1}^*, \dots, D_N^*$; формування 2-го слова управління для групи виходів $D_1^*, \dots, D_{s_1}^*$ і для групи виходів $D_{s_1+1}^*, \dots, D_N^*$. Наступні такти сортування для кожної групи виходів виконуються незалежно та аналогічно до першого такту.

Розроблено функціональну модель паралельно-вертикального сортування одновимірного масиву чисел, яку наведено на рисунку 1, де Φ_1 і Φ_y – відповідно функціональний та управляючий оператори; r_{ki} – сигнали для підрахунку кількості одиниць; u_{ki} – k -й розряд i -го слова управління; h_{ki} – сигнал, який використовують для поділу на групи.

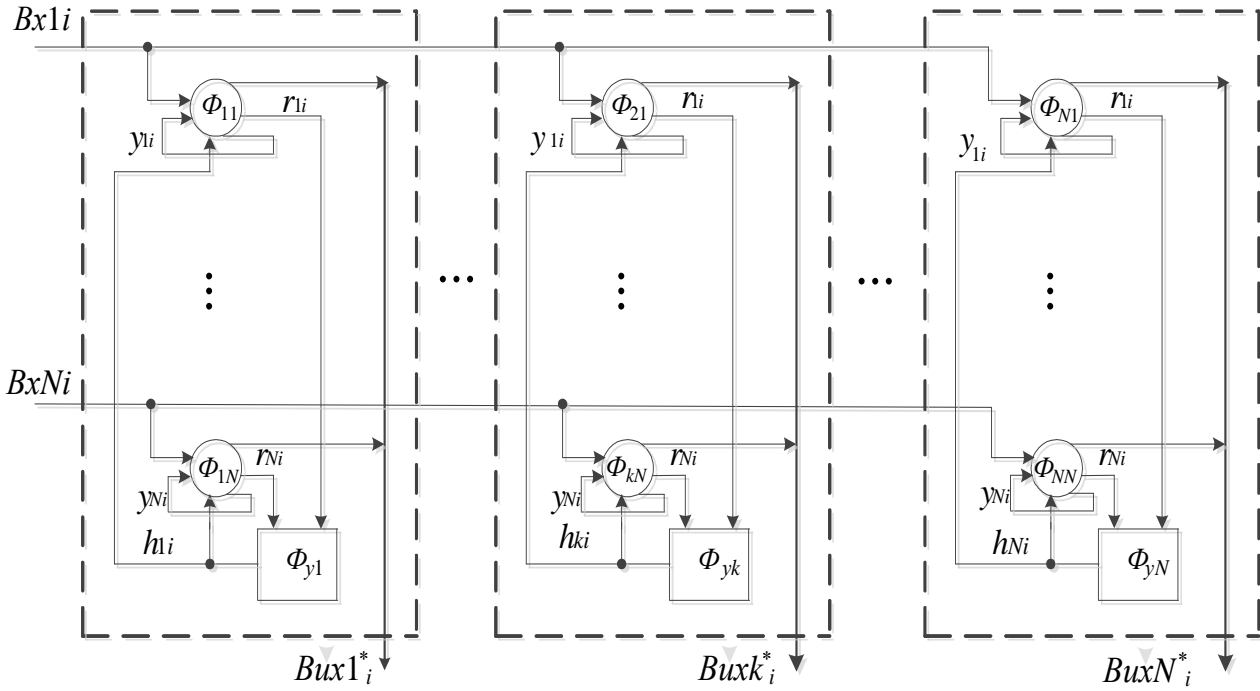


Рисунок 1 – Функціональна модель паралельно-вертикального сортування одновимірного масиву чисел

При виконанні кожного i -го ($i=1, \dots, n$) такту сортування масиву чисел одночасно виконується N базових операцій, які забезпечують формування i -х розрядів N відсортованих чисел. За кожний i -й такт роботи на $Buxk_i^*$ формується i -й розряд відсортованого k -го числа. Найбільше відсортоване число формується на виході $Bux1_i^*$, а найменше – на виході $BuxN_i^*$. Базова операція реалізується на основі N функціональних операторів $\Phi_{ki} = D_{ki} \wedge y_{ki}$ одного оператора управління Φ_y , який розбиває масив на групи.

Розроблено метод паралельно-вертикального пошуку максимального D_{max} і мінімального D_{min} чисел у одновимірному масиві $\{D_k\}_{k=1}^N$, реалізація якого передбачає паралельне надходження N чисел розрядними зрізами старшими розрядами уперед. Пошук максимального числа D_{max} ґрунтується на базовій операції, яка зводиться до: формування значення i -го розрядного ($i=1, \dots, n$) зрізу

$P_i = \bigvee_{k=1}^N D_{ik} \wedge y_{ik}$, де D_{ik} – значення i -го розряду k -го числа вхідного масиву; y_{ik} – значення k -го розряду i -го слова управління, значення 1 -го слова управління дорівнює $y_{11}=y_{12}=\dots=y_{1k}=\dots=y_{1N}=1$; визначення i -го розряду максимального числа

$D_{max i} = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_i = 0 \\ 1, & \text{коли } P_i = 1 \end{cases}$; формування k розрядів $(i+1)$ -го слова управління за формулою:

$$y_{(i+1)k} = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_i = 1, D_{ki} \neq y_{ik} \\ 1, & \text{коли } P_i = D_{ki} = y_{ki} = 1 \\ y_{ki}, & \text{коли } P_i = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Пошук мінімального числа D_{min} в одновимірному масиві $\{D_k\}_{k=1}^N$ виконується аналогічно з використанням базової операції, яка зводиться до: формування значення i -го розрядного зрізу $P_i = \bigvee_{k=1}^N \bar{D}_{ik} \wedge y_{ik}$, де \bar{D}_{ik} – інверсне значення i -го розряду k -го числа масиву; y_{ik} – значення k -го розряду i -го слова управління, значення 1 -го слова управління дорівнює $y_{11}=y_{12}=\dots=y_{1k}=\dots=y_{1N}=1$; визначення i -го розряду мінімального числа $D_{min i} = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_i = 1 \\ 1, & \text{коли } P_i = 0 \end{cases}$; формування k розрядів $(i+1)$ -го слова управління відповідно до виразу:

$$y_{(i+1)k} = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_i = 1, \bar{D}_{ki} \neq y_{ik} \\ 1, & \text{коли } P_i = \bar{D}_{ki} = y_{ki} = 1 \\ y_{ki}, & \text{коли } P_i = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Особливістю розробленого методу паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел у масивах є: використання однієї базової операції; можливість нарощування розмірності масиву N ; час пошуку в основному визначається розрядністю чисел n , а не їх кількістю N .

Показано, що пошук максимального D_{max} та мінімального D_{min} чисел у двовимірному масиві $\{D_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ ґрунтується на базових операціях, які використовують під час пошуку максимального та мінімального чисел в одновимірному масиві. Різниця визначення максимального D_{max} (мінімального D_{min}) чисел у двовимірному масиві $\{D_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ полягає у тому, що після виконання кожних n базових операцій над одновимірним масивом із $(N+1)$ до участі в обчисленні залучають максимальне (мінімальне) число нового j -го одновимірного масиву та записують одиниці до всіх розрядів регістра управління. Обчислення максимального (мінімального) числа в двовимірному масиві $\{D_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ вимагає виконання $M \times n$ базових операцій. Запропоновано для збільшення інтенсивності пошуку максимального D_{max} та мінімального D_{min} чисел використовувати одночасне надходження та опрацювання групових розрядних зрізів. Збільшення кількості розрядів у групах до q забезпечує зменшення у q разів кількості тактів пошуку.

Розроблено функціональну модель паралельно-вертикального пошуку максимальних (мінімальних) чисел, яку наведено на рисунку 2, де y_{ik} – значення k -го розряду i -го слова управління; D_{ki} – i -й розряд k -го числа; Φ_{MV} – макрооператор управління; Φ_1, Φ_2 – функціональні оператори, які виконують операції відповідно

$$P_{ik} = D_{ik} \wedge y_{ik}, y_{(i+1)k} = (P_i \wedge D_{ki} \wedge y_{ik}) \vee (\bar{P}_i \vee y_{ik}), P_i = \bigvee_{k=1}^N P_{ik}.$$

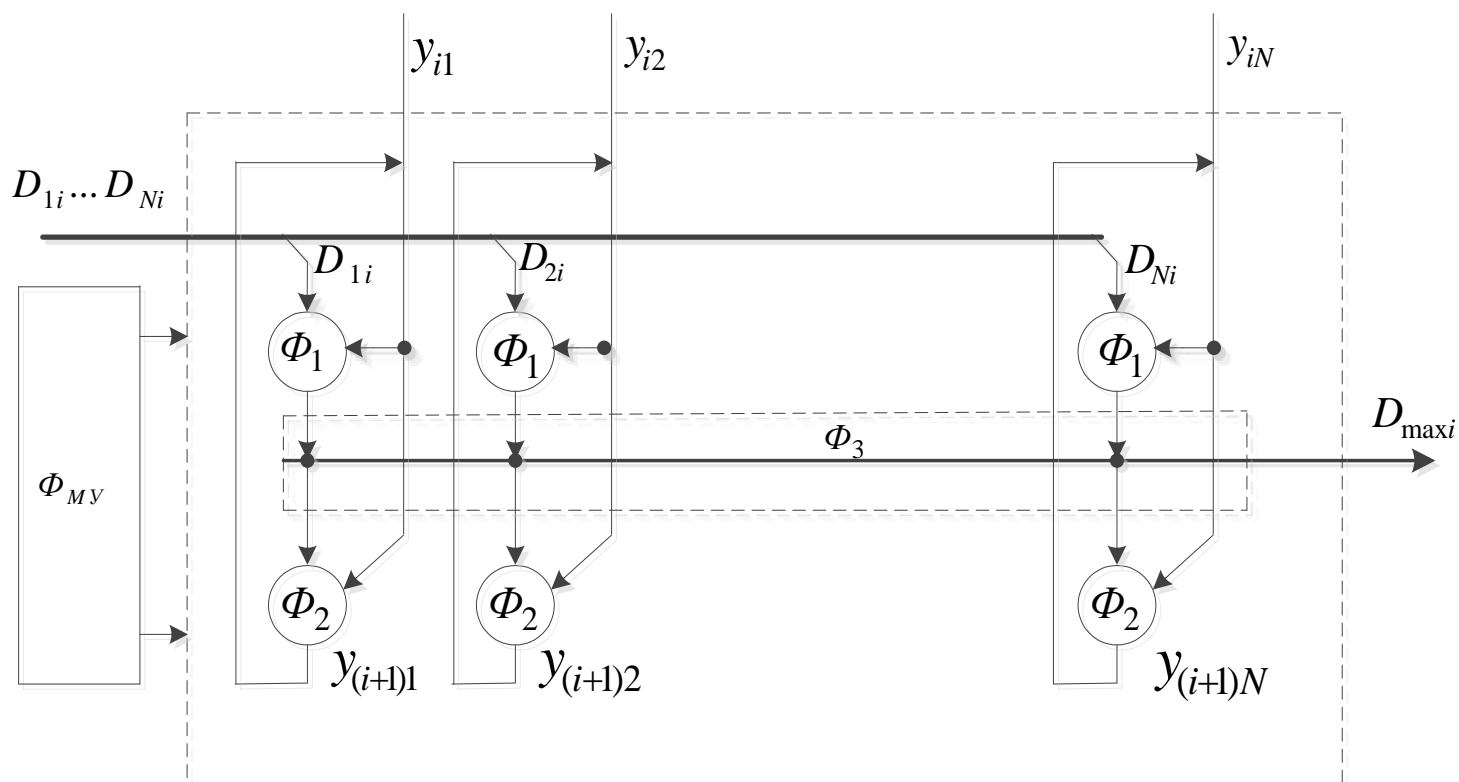


Рисунок 2 – Функціональна модель паралельно-вертикального пошуку максимальних (мінімальних) чисел

Особливостями алгоритмів реалізації методів паралельно-вертикального пошуку максимальних (мінімальних) чисел є однотипність і простота базових операцій, локальність і регулярність зв'язків між ними. Методи паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел у масивах завдяки паралельному опрацюванню розрядного зрізу всіх чисел та використанню спільної магістралі для формування i -х розрядів максимального і мінімального чисел забезпечують підвищення швидкодії. Час пошуку максимальних і мінімальних значень у масиві чисел з використанням методів паралельно-вертикального пошуку визначається розрядністю чисел, а не їх кількістю.

У четвертому розділі розроблено інформаційну технологію паралельного сортування даних та інформаційну технологію паралельного пошуку даних. Реалізовано з використанням технології CUDA програмні засоби паралельного сортування масивів даних вдосконаленим методом злиття та методом паралельно-вертикального сортування масивів даних. Розроблено на базі ПЛІС фірми Altera та середовища проектування Quartus II апаратні засоби паралельно-вертикального сортування та пошуку максимального числа в одновимірному масиві даних.

Розроблено інформаційну технологію паралельного сортування даних, яка ґрунтується на інтегрованому підході, який охопив: дослідження, розроблення методів і алгоритмів паралельного сортування масивів даних; розроблення функціональних моделей алгоритмів паралельного сортування потоків даних у реальному часі; сучасну елементну базу (GPU, ПЛІС) та засоби автоматизованого проектування; нові архітектурні рішення, орієнтовані на технології надвеликих

інтегральних схем. Розроблену схему інформаційної технології паралельного сортування даних наведено на рисунку 3, де P_d – інтенсивність надходження даних; P_c – інтенсивність сортування даних; s – кількість трактів сортування; n_s – розрядність трактів сортування; T_k – такт сортування; L – коефіцієнт узгодженості; ν – коефіцієнт врахування особливостей засобів реалізації; t_m – час накопичення масиву даних; $R(O)$ – складність алгоритму сортування у кількості операцій попарного порівняння та перестановки даних; E_o – ефективність використання обладнання.

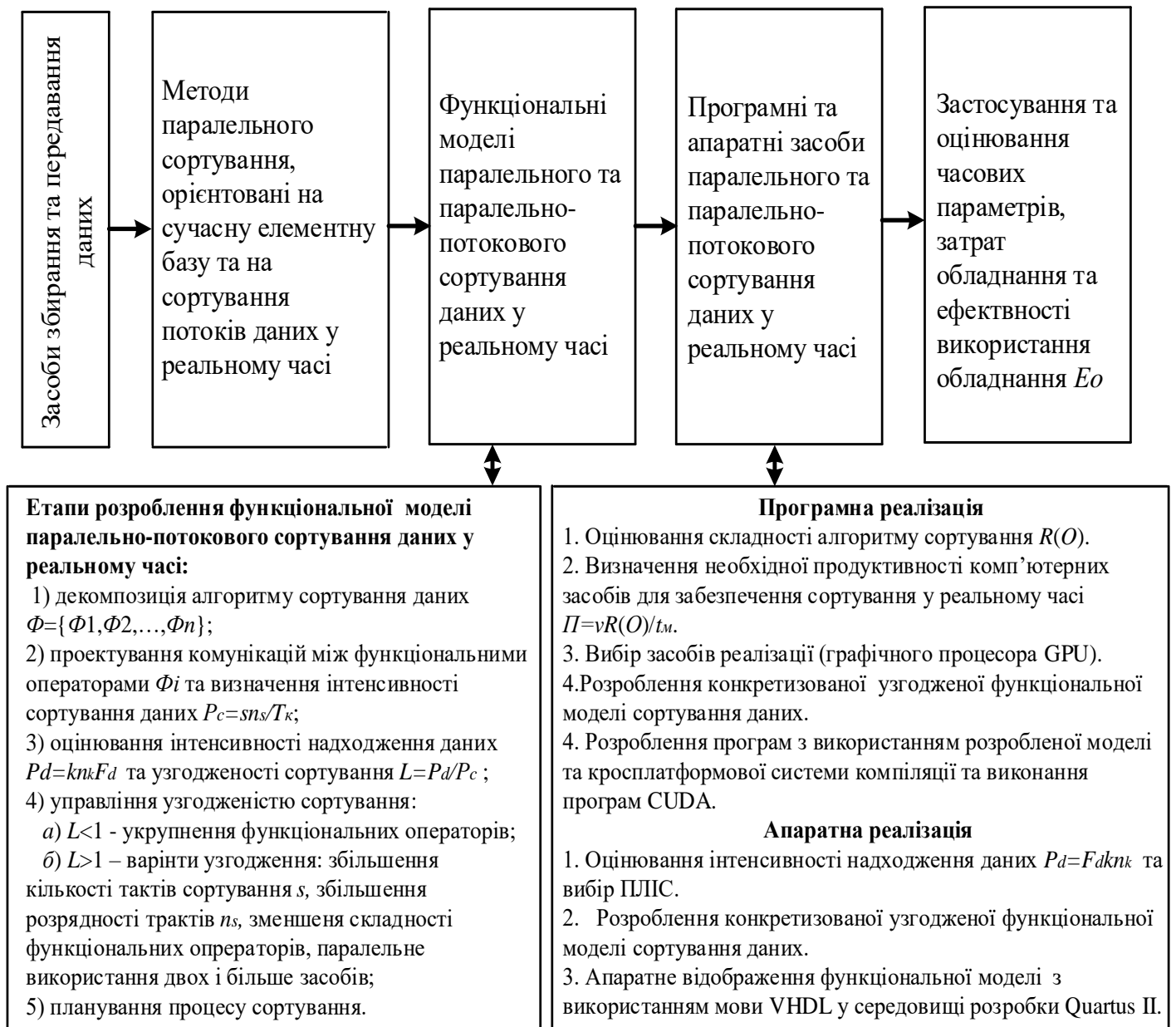


Рисунок 3 – Схема інформаційної технології паралельного сортування даних

Реалізована інформаційна технологія паралельного сортування даних ґрунтується на розроблених і вдосконалених методах сортування даних, функціональних моделях і враховує інтенсивність надходження даних, розміри масивів даних, особливості засобів реалізації та забезпечує сортування даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

Розроблено інформаційну технологію паралельного пошуку даних, основними компонентами якої є: засоби збирання та передавання даних розрядними зрізами; розроблені методи паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел; функціональні моделі пошуку у реальному часі максимальних і мінімальних чисел у масивах; засоби автоматизованого проектування апаратного і програмного забезпечення; програмні та апаратні засоби пошуку даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

Для розроблення апаратного і програмного забезпечення інформаційних технологій паралельного сортування і пошуку даних пропонується використовувати засоби автоматизованого проектування: MAX+PLUS II або Quartus II, мови опису апаратури AHDL, VHDL, VERILOG HDL та кросплатформову систему компіляції та виконання програм CUDA. Для реалізації апаратних засобів пропонується використовувати ПЛІС фірми Altera, а програмні засоби розроблено для графічних процесорів фірми Nvidia. Використання розроблених засобів інформаційної технології паралельного сортування потоків даних забезпечує сортування у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

Розроблено програмний засіб паралельного сортування масивів даних, який завдяки використанню CUDA та вдосконаленого методу злиття зменшує час сортування на 31% порівняно з існуючими програмними засобами сортування злиттям (рисунок 4).

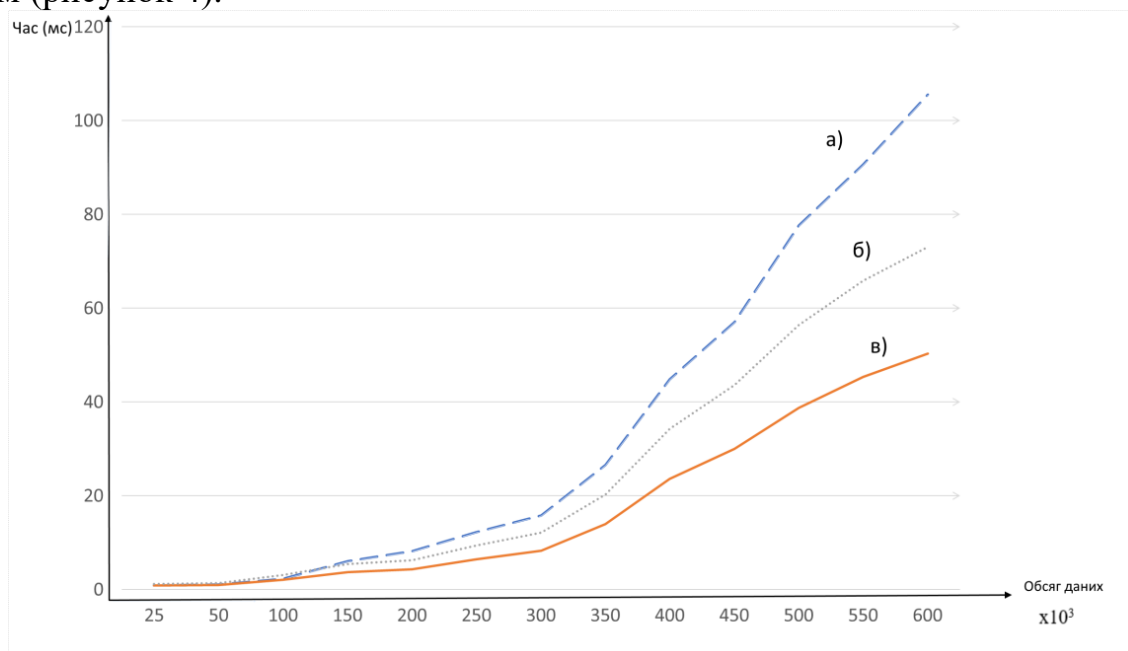


Рисунок 4 – Графік часу сортування даних методом злиття:

- а) послідовне злиття; б) паралельне злиття з використанням базової операції послідовного об'єднання двох масивів; в) паралельне злиття з використанням вдосконаленої базової операції об'єднання двох масивів

На основі технології CUDA розроблено програмний засіб для паралельно-вертикального сортування даних методом підрахунку одиниць у розрядному зрізі. Порівняно час сортування масивів даних цим програмним засобом з часом сортування програмою, яку виконують тільки на CPU. Показано, що паралельно-

вертикальне сортування масивів даних на основі підрахунку одиниць у розрядному зрізі, яке реалізується на GPU з використанням програмної моделі CUDA, виконується за час у 4 рази менший, ніж час його реалізації на CPU. Розроблено програмні засоби для реалізації паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних значень із застосуванням локальних бар'єрів та із застосуванням ітеративного підходу з комбінуванням CPU та GPU. Показано підхід із застосуванням локальних бар'єрів, ефективний для невеликих масивів даних, які ми можемо повністю завантажити у пам'ять GPU і тим самим забезпечити ефективну обробку без постійного обміну з пам'яттю CPU. Підхід з комбінуванням CPU та GPU є ефективним для пошуку максимальних і мінімальних значень у великих масивах даних та вимагає постійного обміну даних між CPU та GPU.

Вибрано для реалізації апаратних засобів інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку ПЛІС фірми Altera та автоматизовану систему проектування Quartus II. Показано, що перевагами технології проектування пристроїв на основі ПЛІС є такі: мінімальний час розроблення схеми реалізації операцій сортування та пошуку даних (необхідно тільки занести в пам'ять ПЛІС конфігураційний код); на відміну від звичайних елементів цифрової схемотехніки не потрібно розробляти і виготовляти складні друковані плати; швидке перетворення однієї конфігурації схеми на іншу (заміна коду конфігурації схеми в пам'яті); апаратні засоби на основі ПЛІС створюють записом конфігурації у пам'ять. Середовище розробки Quartus II підтримує увесь процес проектування апаратних засобів інформаційних технологій сортування та пошуку, починаючи з введення проекту користувачем і завершуючи програмуванням ПЛІС, налагодженням як самої мікросхеми, так і пристрою загалом.

Розроблено структуру пристрою для паралельно-вертикального сортування одновимірного масиву із N чисел методом підрахунку кількості одиниць у розрядному зрізі та реалізовано його на ПЛІС FPGA EP3C16F484 сімейства Cyclone III фірми Altera. Розроблено структури для паралельно-вертикального сортування одновимірного масиву довжиною $M=N \times b$ на базі реалізованого на ПЛІС пристрою паралельно-вертикального сортування одновимірного масиву із N чисел. Для такого сортування використано паралельне сортування методом злиття, в основу якого покладено макрооперацію об'єднання двох упорядкованих масивів розміром $2^{k-1}N$ в один упорядкований масив розміром 2^kN . Розроблено структуру для сортування двовимірного масиву чисел розміром $\{D_{hj}\}_{h=1; j=1}^{N/2; M}$ з використанням реалізованого на ПЛІС пристрою паралельно-вертикального сортування N чисел. У такій структурі вхідні дані надходять паралельно $N/2$ каналами, а сортування чисел виконується методом витіснення. Для сортування двовимірного масиву чисел розміром $\{D_{hj}\}_{h=1; j=1}^{N/2; M}$ використовується M послідовно з'єднаних процесорних елементів (ПЕ), які реалізуються на базі пристрою паралельно-вертикального сортування N чисел.

Розроблено структуру апаратного засобу для одночасного паралельно-вертикального пошуку максимального та мінімального чисел як у одновимірному $\{D_k\}_{k=1}^N$, так і двовимірному $\{D_k\}_{k=1; j=1}^{N; M}$ масивах даних, яку наведено на рисунку 5, де

TI – тактові імпульси; $ПУ$ – початкова установка; Tr – тригер; D_{kji} – k -й вхід j -го одновимірного масиву i -го розряду; Pr – зсувний регістр; D_{max} – вихід максимального числа; D_{min} – вихід мінімального числа.

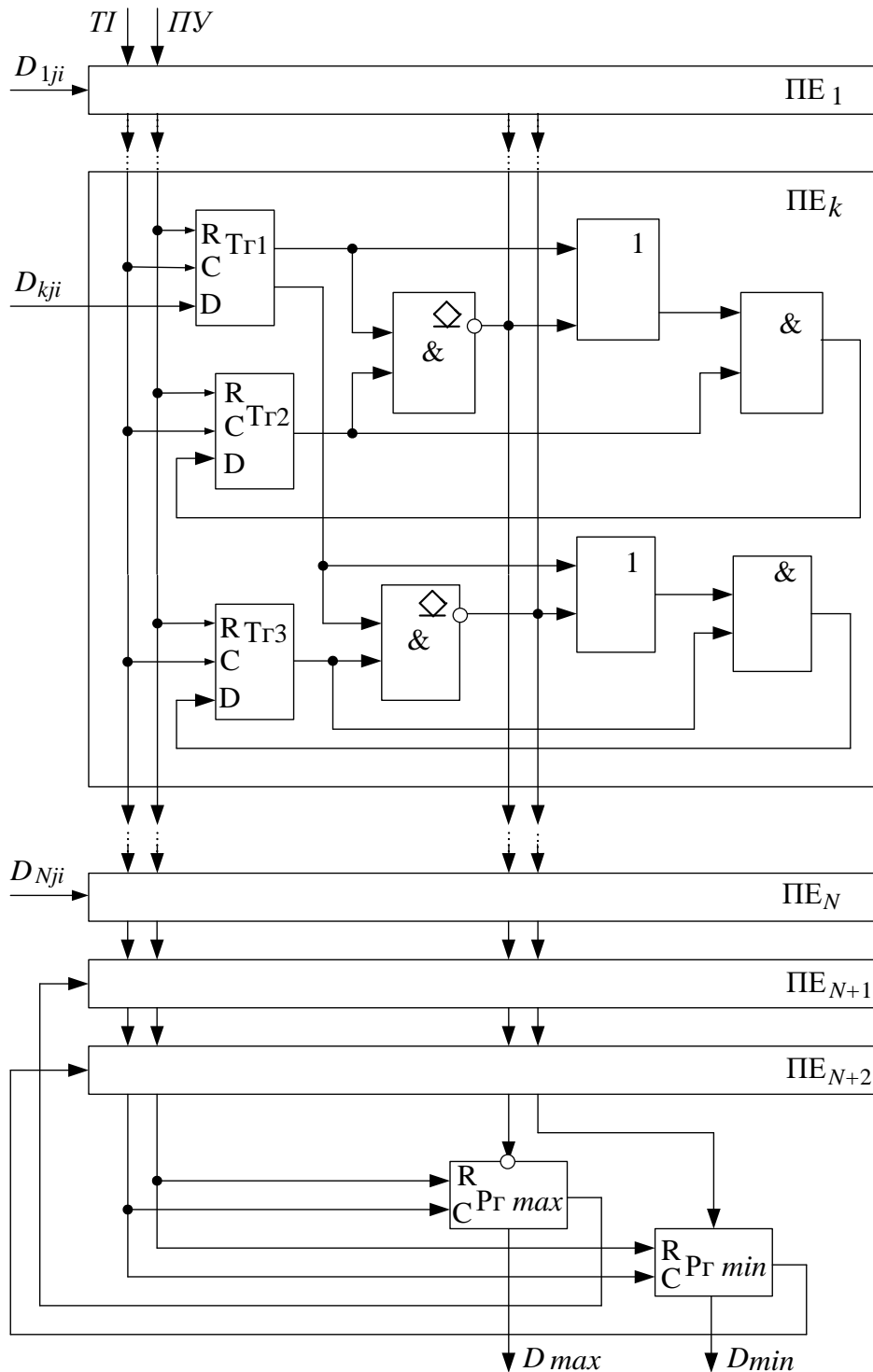


Рисунок 5 – Структура апаратного засобу для одночасного паралельно-вертикального пошуку максимального та мінімального чисел

Особливістю структури апаратних засобів одночасного паралельно-вертикального пошуку максимального та мінімального чисел у масивах є використання двох спільних шин для формування максимального та мінімального

значень. Використання спільних шин забезпечує розпаралелення процесу опрацювання розрядного зрізу, час опрацювання якого визначає такт роботи пристрою, який дорівнює $T_n = t_{T_2} + 3t_I$, де t_{T_2} – час спрацювання тригера; t_I – час затримки на логічному елементі типу «І». У розроблених апаратних засобах максимальне число у одновимірному масиві шукають за $(n+1)$ тактів, а у двовимірному – за $(n+1) \times M$ тактів, де n – розрядність даних.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальне наукове завдання: розроблено нові та вдосконалено існуючі методи, моделі та програмно-апаратні засоби інформаційних технологій паралельного сортування та пошуку даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання. При цьому отримано такі основні результати:

1. Проаналізовано інформаційні технології сортування та пошуку даних, визначено основні напрями розроблення методів, моделей та засобів ефективного сортування та пошуку даних, що дало змогу сформулювати задачі дисертаційного дослідження.

2. Розроблено метод паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел у масивах, який завдяки паралельному опрацюванню i -го розрядного зрізу масиву чисел і паралельному формуванню слів управління зменшує час пошуку, що визначається в основному розрядністю чисел.

3. Удосконалено метод паралельного сортування даних злиттям, який внаслідок використання базової операції об'єднання двох масивів із одночасним формуванням елементів зростаючого і спадаючого масивів забезпечує зменшення часу сортування даних приблизно удвічі.

4. Удосконалено метод паралельно-вертикального сортування даних, який завдяки підрахунку одиниць у i -му вхідному розрядному зрізі та паралельному формуванню i -го розрядного зрізу відсортованого масиву чисел зменшує час сортування на 17%.

5. Розроблено інформаційну технологію паралельного сортування даних, яка завдяки використанню розроблених і вдосконалених методів, функціональних моделей паралельно-потокowego сортування даних та врахуванню інтенсивності надходження даних, розмірів масивів даних і вибору засобів реалізації забезпечує сортування даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

6. Розроблено інформаційну технологію паралельного пошуку даних, яка завдяки використанню розробленого методу паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел, функціональних моделей та врахуванню інтенсивності надходження даних і вибору засобів реалізації забезпечує пошук даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

7. Розроблено засоби сортування масивів даних на базі графічного процесора з використанням вдосконаленого методу паралельного сортування даних злиттям, які зменшують час сортування на 31%.

8. Розроблено на ПЛІС FPGA EP3C16F484 сімейства Cyclone III фірми Altera апаратний засіб для паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних значень, який працює з тактом, що дорівнює часу спрацювання тригера та трьох логічних елементів типу “І”.

9. Результати дисертаційної роботи використано для розроблення засобів збирання та попереднього опрацювання телеметричних даних на ДП “Львівський державний завод “ЛОРТА” та впроваджено у навчальний процес кафедри автоматизованих систем управління Національного університету “Львівська політехніка”.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Цмоць І. Г., Антонів В. Я. Вертикально-паралельний метод сортування масивів чисел // Збірник наукових праць “Моделювання та інформаційні технології”. Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. 2016, Випуск 77. С. 186 – 192.
2. Цмоць І. Г., Антонів В. Я., Рабик В. Г. Метод вертикально-паралельного обчислення максимальних і мінімальних чисел у масивах // Збірник наукових праць “Моделювання та інформаційні технології”. Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. 2016, Випуск 76. С. 190 – 196.
3. Цмоць І. Г., Антонів В. Я. Удосконалення паралельного сортування масивів чисел методом злиття // Науковий вісник НЛТУ України : збірник наукових праць. Львів, 2020, Т. 30, № 4. С. 134 – 142.
4. Ivan Tsmots, Oleksa Skorokhoda, Volodymyr Antoniv. Parallel algorithms and structures for implementation of merge sort // International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 5 Issue 3, March 2016. Pp. 798 – 807.
5. Цмоць І. Г., Скорохода О. В., Красовський В. Б., Антонів В. Я. Методи та НВІС-структури узгоджено-паралельного обчислення максимальних і мінімальних значень // Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. 2014, Випуск 70. С.38 – 48.
6. Цмоць І. Г., Парубчак В. О., Антонів В. Я. Паралельно-вертикальне сортуванням одновимірних масивів даних методом злиття з використанням підрахунку // Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. 2013, Випуск 68. С.92 – 100.

7. Цмоць І. Г., Антонів В. Я. Апаратні засоби сортування даних методом злиття в реальному часі // Вісник національного університету “Львівська політехніка” Збірник наукових праць, 2015, № 814. - С. 171 – 186.
8. Цмоць І. Г., Кісь Я. П., Антонів В. Я. Застосування графічного процесора для підвищення швидкодії процесу сортування великих масивів даних // Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.6. – С. 328 – 334.
9. Ivan Tsmots, Oleksa Skorokhoda, Vasyl Rabyk, Volodymyr Antoniv Vertically-Parallel Method and VLSI-Structure sorting of Arrays of Numbers // Advances in Intelligent Systems and Computing III. Springer International Publishing AG 2019. Pp.267 – 284.
10. Цмоць І. Г., Антонів В. Я. Алгоритми та паралельні структури сортування даних методом вставки // Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.1. – С. 340 – 350.
11. Ivan Tsmots, Oleksandr Kuzmin, Vasyl Dubuk, Volodymyr Antoniv Improvement and orientation of method of data arrays sorting by confluence on architecture of graphic processor unit // Advances in Intelligent Systems and Computing V. International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2020, September 23-26, 2020, Zbarazh, Ukraine. Pp. 276 – 286.
12. Цмоць І. Г., Антонів В. Я. Метод розробки апаратних засобів паралельно-узгодженого сортування масивів даних у реальному часі // Матеріали міжнародної конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» ISDMCI 2015, 25–28 травня. — Залізний Порт, 2015. – С.221 – 222.
13. Парубчак В. О., Антонів В. Я. Методи паралельного сортування одновимірних масивів даних // Матеріали міжнародної конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» ISDMCI 2014, 28-31 травня. — Залізний Порт, 2014. – С.23 – 24.
14. Цмоць І. Г., Антонів В. Я. Застосування графічного процесора для підвищення швидкодії сортування великих масивів даних // Матеріали XIV Міжнародного наукового семінару «Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці, освіті», Світязь. – 2015. – С.90 – 92.
15. Цмоць І. Г., Антонів В. Я. Методи та апаратно-програмні засоби паралельно-вертикального сортування масивів чисел // Збірник наукових праць міжнародної наукової конференції “Інтелектуальні системи прийняття рішень

та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2016". – Залізний Порт, 2016. – С. 226 – 227.

16. Tsmots I., Rabyk V., Skorokhoda O., Antoniv V. FPGA implementation of vertically parallel minimum and maximum values determination in array of numbers // 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). PROCEEDINGS. Polyana. February 21-25, 2017. Pp. 234 – 236.
17. Tsmots I., Skorokhoda O., Antoniv V., Rabyk V. Vertically-Parallel Method and VLSI-Structure for Sorting of One-Dimensional Arrays // Computer Sciences and Information Technologies. In Proceedings of 13th International Scientific and Technical Conference CSIT 2018. Pp. 112 – 116.
18. Цмоць І. Г., Скорохода О. В., Медиковський М. О., Антонів В. Я. Пристрій для визначення максимального числа з групи чисел. Патент України на винахід №110187, 25.11.2015, Бюл. №22.

АНОТАЦІЯ

Антонів В. Я. Інформаційні технології паралельного сортування та пошуку даних. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання – розробленню нових та удосконаленню існуючих методів, моделей і засобів інформаційних технологій паралельного сортування і пошуку даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання. Обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні завдання досліджень, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок роботи із науковими темами. Подано відомості про апробацію результатів роботи, особистий внесок автора та його публікації.

Для забезпечення операцій сортування та пошуку даних у реальному часі розроблено інформаційну технологію паралельного сортування даних, яка завдяки використанню розроблених і вдосконалених методів, функціональних моделей паралельно-потокowego сортування даних та врахуванню інтенсивності надходження даних, розмірів масивів даних і засобів реалізації забезпечує сортування даних у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання. Розроблено метод паралельно-вертикального пошуку максимальних і мінімальних чисел у масивах, який внаслідок паралельного опрацювання i -го розрядного зрізу масиву чисел і паралельного формування слів управління зменшує час пошуку, що визначається в основному розрядністю чисел. Також було удосконалено метод паралельного сортування злиттям, який завдяки використанню базової операції об'єднання двох масивів з одночасним формуванням елементів

зростаючого і спадаючого масивів зменшує час сортування та удосконалено метод паралельно-вертикального сортування даних, який завдяки підрахунку одиниць у i -му входному розрядному зрізі та паралельному формуванню i -го розрядного зрізу відсортованого масиву чисел зменшує час сортування.

Ключові слова: інформаційна технологія; потоковий граф; паралельне сортування; метод злиття; метод вставки; алгоритми сортування; алгоритми пошуку; паралельний пошук; попарне порівняння; масив даних; графічний процесор, режим реального часу.

АННОТАЦІЯ

Антонив В. Я. Информационные технологии параллельной сортировки и поиска данных. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Национальный университет «Львовская политехника», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи: разработке новых и совершенствованию существующих методов, моделей и программно-аппаратных средств информационных технологий параллельной сортировки и поиска данных в реальном времени с высокой эффективностью использования оборудования. Обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследований, определены научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов, показана связь работы с научными темами. Даются сведения об апробации результатов работы, личном вкладе автора и его публикациях.

Для обеспечения операционной сортировки и поиска данных в реальном времени разработана информационная технология параллельной сортировки данных, которая за счет использования разработанных и усовершенствованных методов, функциональных моделей параллельно-поточковой сортировки данных и учета интенсивности поступления данных, размеров массивов данных и средств реализации обеспечивает выполнение сортировки данных в реальном времени с высокой эффективностью использования оборудования. Разработан метод параллельно-вертикального поиска максимальных и минимальных чисел в массивах, который за счет параллельной обработки i -го разрядного среза массива чисел и параллельного формирования слов управления уменьшает время поиска, которое определяется в основном разрядностью чисел. Усовершенствован метод параллельной сортировки слиянием, который за счет использования базовой операции объединения двух массивов с одновременным формированием элементов растущего и убывающего массивов обеспечивает уменьшение времени сортировки. Усовершенствован метод параллельно-вертикальной сортировки данных, который благодаря подсчету единиц в i -м входном разрядном срезе и параллельному формированию i -го разрядного среза отсортированного массива чисел уменьшает время сортировки.

Ключевые слова: информационная технология; потоковый граф; параллельная сортировка; метод слияния; метод вставки; алгоритмы сортировки; алгоритмы поиска; параллельный поиск; попарное сравнение; массив данных; графический процессор, режим реального времени.

SUMMARY

Antoniv V. Ya. Information technologies of parallel sorting and data searching.

– Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences in the specialty 05.13.06 – information technologies. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

In the dissertation work the important scientific task is solved – development new and improvement the existing methods, models and software and hardware of information technologies for parallel sorting and data searching in real-time with high efficiency of equipment.

The current stage of development of information technology for sorting and searching data is characterized by the expansion of their applications, much of which is associated with the accumulation of large data sets and parallel-stream sorting and data searching in real-time. Such applications include automated systems for multi-level control of technological processes and complex objects, where at the lower levels of such systems is the accumulation of large data sets and their processing in real time. When processing data arrays often must use sorting and data searching operations, which can take up to 40% of the total time working with databases. Effective processing of data flows requires the creation of information technologies for parallel sorting and data searching in real-time based on new and improved methods, models and equipment. Methods and models of information technologies for sorting and data searching in real-time should be focused on parallel-data flow and adaptation to the intensity of data. Effective sorting and data searching in real-time requires the development, improvement and orientation of methods to a modern element base (graphics processors and programmable logic devices).

To ensure data sorting in real-time information technology for parallel data sorting was developed, that by using the created and improved methods, functional models of parallel-stream data sorting and taking into account the intensity of data, the size of data arrays and equipment for implementation provides real-time data sorting with high efficiency of equipment. Also, the information technology of parallel data was developed, which provides real-time data searching with high efficiency of equipment by using the developed method of parallel-vertical searching of maximum and minimum numbers, functional models and taking into account data intensity and choice of implementation equipment.

In the thesis was developed the method of parallel-vertical searching of maximum and minimum numbers in arrays, which due to parallel processing of the first bit of an array of numbers and parallel formation of control words provides reduction of search time, which is mainly determined by bit numbers. The method of parallel merge sorting was improved, which due to the use of the basic operation of combining two arrays with

simultaneous formation of elements of ascending and descending arrays provides a reduction of data sorting time in about two times. Also, the method of parallel-vertical data sorting was improved, which due to the calculation of units in the i -th input bit slice and parallel formation of the i -th bit slice of the sorted array of numbers provides reduction of sorting time in 17%.

Developed software for sorting data arrays based on a graphics processor. Whereby using the improved method of parallel merge sorting, provides a time reduction of 31%. The development of software for parallel sorting and data searching is based on using the integrated approach, which includes: research, improvement, and development of methods and algorithms for parallel sorting and data searching; flow graphs of parallel algorithms; GPU architecture and CUDA software model.

Also, the hardware for parallel-vertical search of maximum(minimum) values on FPGA EP3C16F484 family Cyclone III company Altera was developed. The hardware works with a clock equal to the time of operation of the trigger and three logical elements of type "AND".

Key words: information technology; flow graph; parallel sorting; merge method; insertion method; sorting algorithms; search algorithms; parallel searching; pairwise comparison; data array; graphics processor, real time mode.

Підписано до друку 13.08.21
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Зам. №13/08-1
Ум. друк. арк. 0,9
Наклад 100 прим.

Видавництво “Галич-Прес”
Видавець ФОП Король І.В.
м. Львів, вул. Гнатюка, 17
Ел. пошта: lvivprint@ukr.net. Тел. 096-59-88-924
Свідоцтво ДК №5353 від 24.05.2017 р.