

**I. Г. Цмоць, В. Я. Антонів**

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВЕРТИКАЛЬНО-ПАРАЛЕЛЬНОГО ПОШУКУ В МАСИВАХ МАКСИМАЛЬНИХ І МІНІМАЛЬНИХ ЧИСЕЛ

Проведено аналіз останніх досліджень та публікацій, який показав, що недоліком наявних методів та алгоритмів пошуку максимального і мінімального чисел в одновимірному та двовимірному масивах є те, що вони не орієнтовані на апаратну реалізацію з використанням програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) типу FPGA. Показано, що розроблення високошвидкісних апаратних засобів для пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірному та двовимірному масивах доцільно здійснювати при інтегрованому підході, який охоплює методи, алгоритми, структури та сучасні ПЛІС і ґрунтується на використанні таких принципів: однорідності та регулярності структури; локалізації та спрощення зв'язків між елементами; модульності побудови; конвеєризації та просторового паралелізму опрацювання даних; узгодженості інтенсивності надходження розрядних зрізів із інтенсивністю їх опрацювання у пристрої. Виділено базові операції для реалізації алгоритмів вертикально-паралельного пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірних і двовимірних масивах і показано, що вони ґрунтуються на однотипних базових операціях з локальними та регулярними зв'язками. Розроблено вертикально-паралельний метод одночасного пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірних масивах, який за рахунок паралельного опрацювання i -го розрядного зрізу масиву чисел і паралельного формування слів управління забезпечує зменшення часу пошуку, який в основному визначається розрядністю чисел. Вдосконалено вертикально-паралельний метод одночасного пошуку максимальних і мінімальних чисел у двовимірних масивах, який за рахунок одночасного опрацювання p одновимірних масивів і використання методу витіснення забезпечує зменшення тривалості пошуку у p разів порівняно з наявним методом. Показано, що час вертикально-паралельного пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірному та двовимірному масивах визначається розрядністю чисел, а не їх кількістю. Визначено, що використання спільної шини для формування i -го розряду максимального (мінімального) числа та паралельне формування слів управління забезпечує підвищення частоти опрацювання розрядних зрізів одновимірному масиву. Визначено, що кількість апаратних ресурсів FPGA необхідних для реалізації пристрою вертикально-паралельного пошуку максимального і мінімального чисел у одновимірному масиві в основному залежить від розміру масиву чисел, а тривалість пошуку від їх розрядності.

Ключові слова: методи вертикально-паралельного пошуку; максимальне число; мінімальне число; структури; апаратна реалізація; масиви чисел; базові операції.

Вступ / Introduction

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується накопиченням великих масивів даних. При опрацюванні таких масивів найчастіше доводиться використовувати операції сортування та пошуку даних, які можуть займати до 40 % із загального часу роботи з базами даних [12]. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває задача зменшення часу виконання таких операцій, окрім цього у значній частині застосувань вимагається виконання пошуку максимальних і мінімальних чисел у реальному часі у масивах, які надходять з різною інтенсивністю.

Створення високошвидкісних засобів пошуку максимальних і мінімальних чисел вимагає розроблення

нових, вдосконалення наявних методів і алгоритмів, які орієнтовані на апаратну реалізацію з використанням сучасної елементної бази – програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС). Зменшити тривалість виконання операцій пошуку максимальних і мінімальних чисел можна забезпечити шляхом використання розпаралелювання і конвеєризації процесів пошуку. Режим реального часу при пошуку максимальних і мінімальних значень у масивах з високою інтенсивністю надходження даних досягається апаратною реалізацією даних операцій на базі ПЛІС. Створення апаратних засобів пошуку максимальних і мінімальних значень вимагає розроблення методів, алгоритмів і структур, що мають мінімальну кількість виводів інтерфейсу та реалізуються на

базі однотипних процесорних елементів з регулярними та локальними зв'язками.

З наведеного випливає, що високоефективні засоби пошуку максимальних і мінімальних значень у масивах з високою інтенсивністю надходження даних найдоцільніше створювати за інтегрованим підходом, який охоплює методи та засоби пошуку даних, методи розпаралелювання, сучасну елементну базу та засоби автоматизованого проектування.

Отже актуальною задачею є розроблення методів і структур, орієнтованих на апаратну реалізацію пошуку максимальних і мінімальних значень у одновимірних і двовимірних масивах чисел.

Об'єкт дослідження – процеси пошуку максимальних і мінімальних значень у одновимірних і двовимірних масивах чисел.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та структури пошуку максимальних і мінімальних значень у одновимірних і двовимірних масивах чисел.

Мета роботи – розроблення методів, структур вертикально-паралельного пошуку максимальних, мінімальних значень у одновимірних і двовимірних масивах чисел та їх апаратна реалізація на ПЛІС.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- аналіз останніх досліджень та публікацій;
- розроблення та вдосконалення методів вертикально-паралельного пошуку максимальних і мінімальних значень у одновимірних і двовимірних масивах чисел;
- вибір принципів побудови та розроблення структур пристроїв вертикально-паралельного пошуку максимального та мінімального чисел у одновимірних і двовимірних масивах чисел;
- апаратна реалізація на ПЛІС операції пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірному та двовимірному масивах чисел.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз публікацій [4], [12] показує, що наявні методи пошуку максимального та мінімального чисел із одновимірного масиву чисел ґрунтуються на послідовному попарному порівнянні значення кожного числа, починаючи з другого, із поточним значенням максимального (мінімального) числа, яке на першому кроці приймає значення першого числа. Якщо число більше (менше) за поточне максимальне (мінімальне) число, то воно стає поточним максимальним (мінімальним) числом. Отже, на кожній ітерації пошуку у поточному значенні максимального (мінімального) числа міститиметься найбільше (найменше) значення з пройденої частини масиву, а по завершенні обчислення поточне значення буде максимальним (мінімальним) числом у всьому масиві [1], [16]. Кількість операцій попарного порівняння та формуванні біжучого максимального (мінімального) числа в основному визначається розмірністю масиву [5], [15]. Недоліком методів пошуку максимального та мінімального чисел у одновимірному масиві на базі операцій попарного порівняння є те, що вони не орієнтовані на апаратну реалізацію [2], [23].

У літературі [11], [12] розглянуті методи та алгоритми порозрядного пошуку максимального і мінімального чисел для одновимірного масиву. Дані методи та алгоритми пошуку в основному орієнтовані матричні структури. Недоліком таких структур є неможливість одно-

часного опрацювання розрядного зрізу чисел одновимірного масиву, що збільшує тривалість пошуку максимального і мінімального чисел.

Аналіз сучасних елементної бази [6], [19], [24], показує, що для апаратної реалізації алгоритмів пошуку максимального і мінімального чисел в одновимірному та двовимірному масивах доцільно використовувати ПЛІС типу FPGA. Для проектування на ПЛІС типу FPGA пристроїв пошуку максимального і мінімального чисел в одновимірному та двовимірному масивах використовуються автоматизовані засоби розробки та опису схем [3], [13], [18].

У роботах [10], [14], [17] показано, що зменшення тривалості пошуку максимальних і мінімальних чисел можна забезпечити його розпаралелюванням, конвесризацією та апаратною реалізацією шляхом використання ПЛІС.

З проведено аналізу літературних джерел видно, що недоліком наявних методів та алгоритмів пошуку максимального і мінімального чисел в одновимірному та двовимірному масивах є те, що вони не орієнтовані на апаратну реалізацію з використанням ПЛІС типу FPGA.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Методи вертикально-паралельного пошуку максимальних і мінімальних значень у одновимірних і двовимірних масивах чисел. Метод вертикально-паралельного пошуку максимального A_{max} і мінімального A_{min} чисел у одновимірному $\{A_k\}_{k=1}^N$ масиві передбачає паралельне надходження N чисел розрядними зрізами старшими розрядами уперед. Пошук максимального A_{max} і мінімального A_{min} чисел у одновимірному масиві $\{A_k\}_{k=1}^N$ за даним методом ґрунтується на виконанні n однотипних базових операцій, де n – розрядність чисел.

Базова операція пошуку максимального числа D_{max} у одновимірному масиві $\{A_k\}_{k=1}^N$ передбачає виконання таких операцій:

- формування значення i -го розрядного ($i=1, \dots, n$) зрізу P_i за формулою:

$$P_i = \bigwedge_{k=1}^N A_{ik} \wedge y_{ik}; \quad (1)$$

- визначення i -го розряду максимального числа D_{maxi} за виразом:

$$A_{maxi} = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_i = 1; \\ 1, & \text{коли } P_i = 0; \end{cases} \quad (2)$$

- формування $(i+1)$ -го розряду управління для k -го числа за формулою:

$$y_{(i+1)k} = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_i = 0, \quad A_{ki} \neq y_{ik}; \\ 1, & \text{коли } P_i = 0, \quad A_{ki} = y_{ki} = 1; \\ y_{ki}, & \text{коли } P_i = 1, \end{cases} \quad (3)$$

де: A_{ik} – значення i -го розряду k -го числа масиву, y_{ik} – значення i -го розряду управління для k -го числа, значення 1-го розряду управління для всіх чисел дорівнює $y_{11} = y_{12} = \dots = y_{1k} = \dots = y_{1N} = 1$.

Обчислення мінімального числа A_{min} у одновимірному масиві $\{A_k\}_{k=1}^N$ ґрунтується на базовій операції, яка передбачає виконання таких операцій:

- формування значення i -го розрядного зрізу P_i , яке виконується за формулою:

$$P_i = \bigwedge_{k=1}^N \overline{A_{ik}} \wedge y_{ik}, \quad (4)$$

- визначення i -го розряду мінімального числа $A_{\min i}$ за виразом:

$$A_{\min i} = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_i = 0; \\ 1, & \text{коли } P_i = 1; \end{cases} \quad (5)$$

- визначення $(i+1)$ -го розряду управління для k числа виконується за формулою:

$$y_{(i+1)k} = \begin{cases} 0, & \text{коли } P_i = 0, \overline{A_{ki}} \neq y_{ik}; \\ 1, & \text{коли } P_i = 0, \overline{A_{ki}} = y_{ik} = 1; \\ y_{ki}, & \text{коли } P_i = 1, \end{cases} \quad (6)$$

де: $\overline{A_{ik}}$ – інверсне значення i -го розряду k -го числа масиву; y_{ik} – значення i -го розряду управління для k -го числа управління, значення 1-го розряду управління для всіх чисел дорівнює $y_{11} = y_{12} = \dots = y_{1k} = \dots = y_{1N} = 1$.

Для пошуку максимального A_{\max} (мінімального A_{\min}) числа в двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ використаємо підхід, який ґрунтується на методі вертикально-паралельного пошуку та методі витіснення. Пошук максимального (мінімального) числа в двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ на основі такого підходу полягає в тому, що кожний j -й одновимірний масив доповнюється максимальним (мінімальним) числом $(j-1)$ -го одновимірного масиву. Перший одновимірний масив у випадку пошуку максимального числа доповнюється n розрядним числом у всіх розрядах якого записаний 0, а при пошуку мінімального числа – n розрядним числом у всіх розрядах якого записана 1. Перед початком пошуку максимального (мінімального) числа в j -му одновимірному масиві із $(N+1)$ чисел здійснюється запис одиниць у всі розряди регістра управління. Для пошуку максимального (мінімального) числа в j -му одновимірному масиві із $(N+1)$ чисел необхідно виконати n базових операцій (формули 1–3, або 4–5). Кількість необхідних базових операцій для пошуку максимального (мінімального) числа в двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ дорівнює:

$$Q = n \times M. \quad (7)$$

Дані базові операції виконуються послідовно, а їх кількість визначає тривалість пошуку. Зменшити тривалість пошуку максимального (мінімального) числа в двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ пропонується здійснити за рахунок розпаралелювання процесу пошуку. Для розпаралелювання пошуку двовимірний масив $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ розбивається на P підмасивів розміром $\{A_{kh}\}_{k=1; h=1}^{N;S}$ чисел, де $S = M / P$, $h = 1, \dots, S$. Пошук максимального (мінімального) числа для h -х P одновимірних масивів виконується паралельно. Знайдені P максимальних (мінімальних) чисел доповнюються максимальним числом $(h-1)$ -х P одновимірних масивів, серед яких визначається максимальне число. Пошук максимальних (мінімальних) чисел ґрунтується на використанні базові операції (формули 1–3, або 4–5). Для пошуку максимального (мінімального) числа в двовимірному

масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ за даним методом необхідно послідовно виконати таку кількість базових операцій:

$$R = n \times S. \quad (8)$$

Особливістю розглянутих методів вертикально-паралельного пошуку максимального (мінімального) числа у масивах є:

- використання однотипних базових операцій;
- можливість розпаралелення та конвеєризації процесу пошуку;
- можливість одночасного опрацювання N розрядних зрізів чисел, які надходять старшими розрядами вперед;
- тривалість пошуку максимального (мінімального) числа в одновимірному масиві в основному визначається розрядністю чисел n , а не їх кількістю N .

Принципи побудови та структури пристроїв вертикально-паралельного пошуку максимального та мінімального чисел. Однією з основних вимог, що ставиться до пристроїв пошуку максимального (мінімального) числа із масиву чисел є забезпечення високої швидкодії. Така проблема виникає при використанні пристроїв для пошуку максимального (мінімального) числа в реальному часі, що накладає обмеження на тривалість пошуку. Для забезпечення пошуку максимального (мінімального) числа у реальному часі необхідно виконання наступної умови:

$$P_d \leq D_{\text{ПР}}, \quad (9)$$

де: P_d – інтенсивність надходження даних, $D_{\text{ПР}}$ – інтенсивність пошуку максимального (мінімального) числа пристроєм. Інтенсивність надходження даних визначається так:

$$P_d = N n_k F_d, \quad (10)$$

де: N – кількість каналів надходження даних; n_k – розрядність каналів надходження даних; F_d – частота надходження даних. Інтенсивність пошуку максимального (мінімального) числа пристроєм визначають так:

$$D_{\text{ПР}} = \frac{N n_{\text{ПР}}}{T_k}, \quad (11)$$

де $n_{\text{ПР}}$ – розрядність каналів пошуку максимального (мінімального) числа у пристрої; T_k – такт роботи пристрою.

Задача розроблення високоефективних пристроїв вертикально-паралельного пошуку максимального та мінімального чисел із масиву чисел, орієнтованих на реалізацію з використанням ПЛІС, зводиться до мінімізації апаратних затрат при забезпеченні режиму реального часу.

Для розроблення пристроїв вертикально-паралельного пошуку максимального та мінімального чисел із масиву чисел пропонується використати такі принципи:

- однорідності та регулярності структури;
- локалізації та спрощення зв'язків між елементами;
- модульності побудови;
- конвеєризації та просторового паралелізму опрацювання даних;
- узгодженості інтенсивності надходження даних із інтенсивністю пошуку максимального (мінімального) числа у пристрої.

Основними компонентами, на базі яких синтезуються пристрої вертикально-паралельного пошуку максимального та мінімального чисел, є процесорні елементи (ПЕ) [20]. Структури ПЕ, які реалізують базові операції

пошуку максимального та мінімального чисел, наведені на рис. 1, де ТІ – тактовий вхід, ПУ – вхід початкової установки, Тг – тригер.

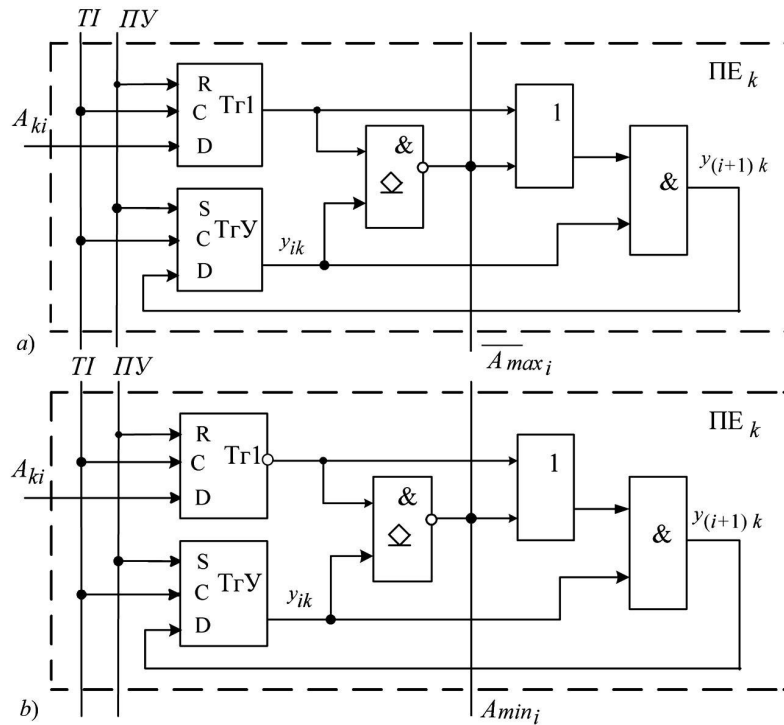


Рис. 1. Структури ПЕ для пошуку: а) максимального числа; б) мінімального числа / Structures of processor elements for searching: а) maximum number; б) minimum number

Для синтезу пристроїв вертикально-паралельного одночасного пошуку максимального та мінімального чисел у масиві розроблений ПЕ, структура якого наведена на рис. 2.

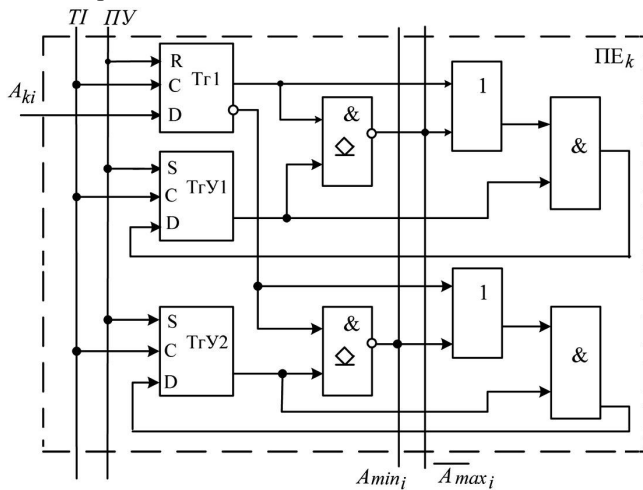


Рис. 2. Структури ПЕ для одночасного пошуку максимального та мінімального чисел / Structures of processor elements for simultaneous searching of maximum and minimum numbers

Особливістю розроблених ПЕ для синтезу пристроїв вертикально-паралельного пошуку максимального та мінімального чисел є використання спільних шин результатів, під'єднання до яких здійснюється за допомогою логічних елементів 2І-НЕ з відкритим колектором. Використання спільної однорозрядної шини результатів забезпечує можливість збільшення розміру одновимірного масиву чисел, у якому виконується пошук максимального та мінімального чисел. У розроблених ПЕ максимальне та мінімальне числа отримуємо в кожному такті порозрядно починаючи з старших розрядів. Особливістю ПЕ (рис. 1,а) є формування інверсного значен-

ня максимального числа. Використання спільної шини результату та паралельне опрацювання i -их розрядів всіх чисел масиву, що забезпечує високу швидкодії, яка не залежить від кількості чисел у масиві, а залежить від їх розрядності.

На основі ПЕ (рис. 2) синтезована структура пристрою паралельно-вертикального одночасного пошуку максимального і мінімального числа у одновимірному масиві $\{A_k\}_{k=1}^N$ [21]. Структура такого пристрою наведена на рис. 3.

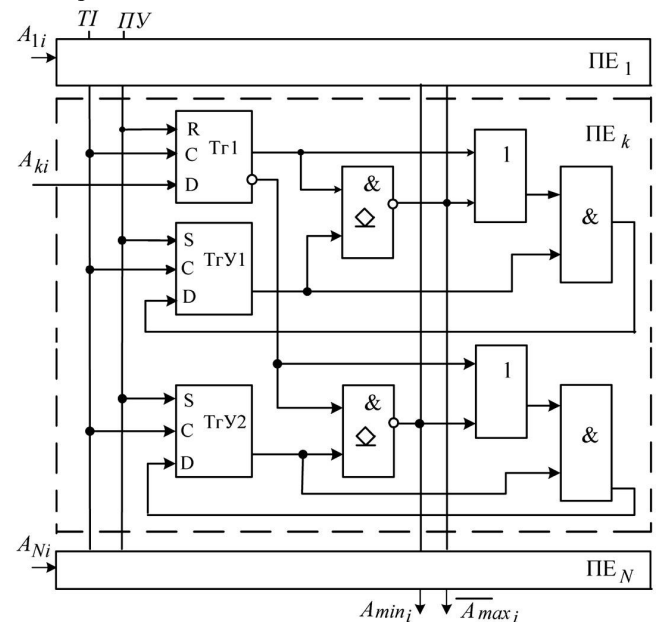


Рис. 3. Структура пристрою паралельно-вертикального одночасного пошуку максимального і мінімального чисел / The structure of the device for simultaneous parallel-vertical searching of the maximum and minimum numbers

Пристрій паралельно-вертикального одночасного пошуку максимального і мінімального чисел працює так. Перед початком роботи імпульсом початкової установки, який надходить із входу ПУ у всіх ПЕ тригери Тг1 встановлюються у лог.0., а тригери ТгУ1 і ТгУ2 у лог.1. Числа одновимірного масиву надходять у пристрій паралельно розрядними зрізами починаючи з старших розрядів. Так у i -у такті роботи пристрою в тригери Тг1 з інформаційних входів записуються i -і розряди чисел A_{ki} , в тригери управління (ТгУ1, ТгУ2) – $(i+1)$ -і розряди $y_{k(i+1)}$ управління. За n тактів, де n – розрядність чисел, на виході $\overline{A_{\max i}}$ отримуємо інверсне значення максимального числа, а на виході $A_{\min i}$ – мінімальне значення числа із одновимірного масиву з N чисел.

Тривалість одночасного пошуку максимального та мінімального чисел у одновимірному масиві $\{A_k\}_{k=1}^N$ у пристрої (рис. 3) становить:

$$t_1 = (t_{T_2} + 3t_1)n, \quad (12)$$

де t_{T_2} – час звертання до тригера, t_1 – час затримки інформації при проходженні через логічні елементи типу АБО, І, І-НЕ.

Затрати обладнання на реалізацію пристрою паралельно-вертикального одночасного пошуку максимального і мінімального чисел у одновимірному масиві рівні:

$$W_1 = (3W_{T_2} + 6W_I)N \quad (13)$$

де W_{T_2} – затрати обладнання на реалізацію тригера, W_I – затрати обладнання на реалізацію логічних елементів типу АБО, І, І-НЕ.

Для одночасного паралельно-вертикального пошуку максимального і мінімального чисел у двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ розроблено структуру пристрою [22], яка наведена рис. 4, де Рг –регістр.

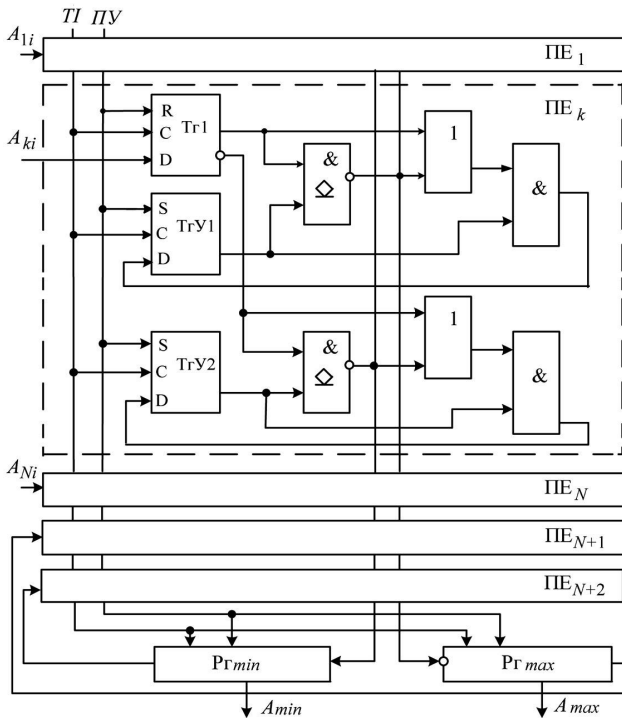


Рис. 4. Структура пристрою одночасного паралельно-вертикального пошуку максимального і мінімального чисел у двовимірному масиві / The structure of the device for simultaneous parallel-vertical searching of the maximum and minimum numbers in a two-dimensional array

Особливістю даного пристрою є те, PE_{N+1} реалізує базову операцію пошуку тільки максимального числа (рис. 1,a), а PE_{N+2} – базову операцію пошуку тільки мінімального числа (рис. 1,b). Перед початком роботи імпульсом початкової установки, який надходить із входу ПУ у всіх ПЕ виконується установка: тригерів Тг1 у лог.0, тригерів ТгУ1, ТгУ2 у лог.1, регістра Рг_{max} у лог.0, а всіх розрядів регістра Рг_{min} у лог.1.

Числа двовимірного масиву $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ надходять у пристрій паралельно розрядними зрізами починаючи з старших розрядів. За $(n+1)$ тактів, де n – розрядність чисел, в регістрах Рг_{max} і Рг_{min} отримуємо відповідно максимальне і мінімальне число першого одновимірного масиву. Інформація з виходів регістрів Рг_{max} і Рг_{min} використовується для одночасного визначення максимального та мінімального чисел з наступного одновимірного масиву. Кількість тактів для одночасному визначення максимального та мінімального чисел в двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ для даного пристрою (рис. 4) дорівнює $(n+1) \times M$. Тривалість обчислення максимального та мінімального чисел у двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ з допомогою пристрою (рис. 4) дорівнює:

$$t_2 = (t_{T_2} + 3t_1)(n+1)M. \quad (14)$$

Затрати обладнання на реалізацію пристрою паралельно-вертикального одночасного пошуку максимального і мінімального чисел у двовимірному масиві рівні:

$$W_2 = (3W_{T_2} + 6W_I)(N+2) + 2W_{P_2}, \quad (15)$$

де $N+2$ – кількість чисел, що опрацьовуються одночасно, W_{P_2} – затрати на реалізацію n -розрядного зсувного регістра.

Зменшення часу одночасного пошуку максимального та мінімального чисел в двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ можна досягнути розпаралелюванням процесу пошуку. Структура пристрою, який реалізує розпаралелювання процесу одночасного паралельно-вертикального пошуку максимального і мінімального чисел у двовимірному масиві на рівні одновимірних масивів наведена на рис. 5, де ПУ1, ПУ2 і ПУ3 – перший, другий і третій входи початкової установки, ТП1, ТП2 і ТП3 – перший, другий і третій тактові входи, Бл1, ..., Бл p – перший, ..., p блоки пошуку max/min чисел, Рг – регістр, Бл_{max} – блок пошуку max числа, Бл_{min} – блок пошуку min числа.

Перед початком роботи імпульсом початкової установки, який надходить із входу ПУ2, тригери у всіх ПЕ_{max/min} Бл1, ..., Бл p , ПЕ_{max} і ПЕ_{min} встановлюються у лог.1. Імпульсом початкової установки, який надходить із входу ПУ1, регістр Рг_{max} скидається у нуль, а у регістрі Рг_{min} всі розряди устанавлюється в лог.1. Для визначення максимального та мінімального чисел у двовимірному масиві $\{A_{kh}\}_{k=1; h=1}^{N;S}$ необхідно даний масив розбити на p підмасивів розміром $\{A_{kh}\}_{k=1; h=1}^{N;S}$ чисел, де $S = M / p$, $h = 1, \dots, S$. Числа у пристрій (рис. 5) надходять порозрядно старшими розрядами вперед з $p \times N$ входів. Розряди g -го одновимірного масиву, де $g = 1, \dots, p$, надходить на входи Бл g для пошуку максимального та мінімального чисел. Знайдені p розрядів

максимальних чисел надходять у Бл1 для пошуку максимального числа з p чисел, а розряди p мінімальних чисел надходять у Бл2 для пошуку мінімального числа. Знайдений розряд максимального числа із p чисел записується у $РГ_{\max}$, а розряд мінімального із p чисел записується у $РГ_{\min}$. Пошук максимального та мінімального

чисел для p одновимірних масивів виконується за $(n+2)$ такти. Для пошуку максимального та мінімального чисел у двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1,j=1}^{N;M}$ необхідно виконати $S(n+2)$ тактів.

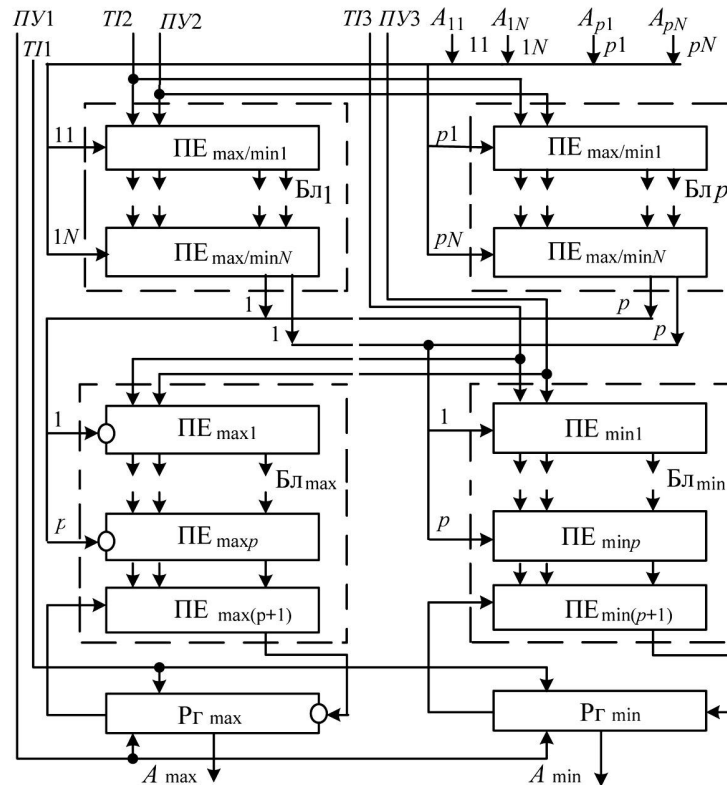


Рис. 5. Структура пристрою з розпаралелюванням процесу одночасного паралельно-вертикального пошуку максимального і мінімального чисел у двовимірному масиві / The structure of the device with parallelization of the process of simultaneous parallel-vertical searching of maximum and minimum numbers in a two-dimensional array

У даному пристрої (рис. 5) тривалість одночасного визначення максимального та мінімального чисел у двовимірному масиву $\{A_{kj}\}_{k=1,j=1}^{N;M}$ дорівнює:

$$t_3 = (t_{Tr} + 3t_1)(n + 2)S, \quad (16)$$

де S – кількість підмасивів, n – розрядність чисел, t_{Tr} – час запису інформації у тригер, t_1 – час затримки інформації при проходженні через логічні елементи типу АБО, І, І-НЕ.

Апаратна реалізація пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірному та двовимірному масивах чисел. Розвиток інтегральних технологій робить можливою апаратну реалізацію пристрою для пошуку максимального та мінімального чисел у одновимірному та двовимірному масивах. Процес апаратної реалізації пристрою для пошуку максимального та мінімального значень у одновимірному масиві зводиться до створення $PE_{\max/\min}$, які реалізують структуру наведену на рис. 2. Кількість $PE_{\max/\min}$ необхідних для синтезу пристрою паралельно-вертикального одночасного пошуку максимального і мінімального чисел визначається розміром масиву. Особливістю такого пристрою є спільні шини для формування розрядів максимального та мінімального чисел, які забезпечують одночасне опрацювання бітового зрізу всіх чисел масиву.

Розробку пристрою одночасного пошуку максимального і мінімального чисел будемо виконувати в інтегрованому середовищі Quartus II для FPGA EP3C16

F484 з сімейства Cyclone III мовою опису обладнання VHDL. Пошук максимального і мінімального чисел виконується опрацюванням бітових зрізів чисел A_1, A_2, \dots, A_N , починаючи із старших розрядів. Розроблені пристрої можуть працювати з різною кількістю чисел масиву, розрядність яких може бути 8 і 16 розрядів.

Зовнішній вигляд вертикально-паралельного пристрою одночасного пошуку максимального і мінімального чисел для масиву $N=64$ числа і розрядністю $n=16$ (Max_Min_64_16) наведено на рис. 6. Він відрізняється від наведеного вище PE – фактично поєднує N PE, тобто визначення максимальне та мінімальне значення виконуються паралельно для i -го бітового зрізу A_i розміром N .

Зовнішній вигляд пристрою для одночасного пошуку максимального і мінімального чисел Max_Min_64_16 містить: вхід синхронізації Clk, вхід Reset для ініціалізації вертикально-паралельного пристрою, входи $A_IN[64.1]$ для бітових зрізів A_i , та з виходами максимального Max_Out[16.1] і мінімального Min_Out[16.1] чисел.

Перед початком пошуку імпульсом Reset=1 встановлюються початкові значення контрольних слів Y_k і Z_k , розрядність яких збігається з розміром масиву N чисел. Одночасний пошук максимального та мінімального чисел виконується за n тактів. Під час кожного такту виконується зчитування та оброблення розрядного зрізу всіх N чисел. Синхронізація роботи пристрою здійсню-

ється переднім фронтом тактового сигналу Clk. На рис. 7 наведена діаграма часу роботи пристрою для одночасного пошуку максимального і мінімального чисел серед чотирьох восьми розрядних чисел ($N=4$; $n=8$): 0xE5, 0xDC, 0x1B, 0x9D. Знайдено максимальне число масиву – 0xE5 та мінімальне число – 0x1B. Розрядні фрагменти

чисел мають такий вигляд: 0xD, 0xC, 0x8, 0x7, 0x7, 0xD, 0x2, 0xB. Тривалість одночасного пошуку розрядів максимального та мінімального чисел для кожного розрядного зрізу масиву чисел приблизно рівний 7 нс, а тривалість пошуку максимального та мінімального чисел близько 65 нс.

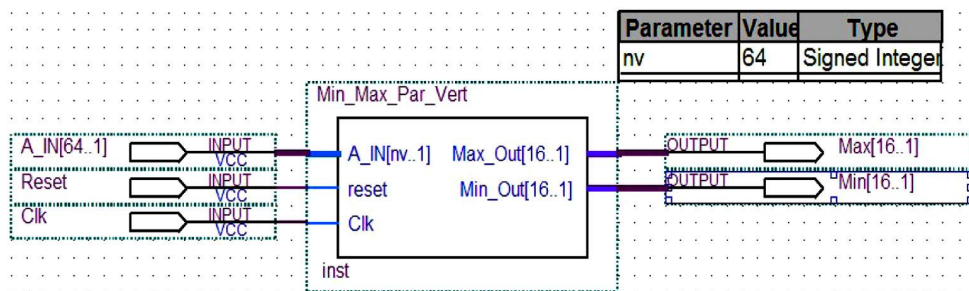


Рис. 6. Зовнішній вигляд пристрою для одночасного пошуку максимального і мінімального чисел Max_Min_64_16 / Appearance of the device for simultaneous searching of the maximum and minimum numbers Max_Min_64_16

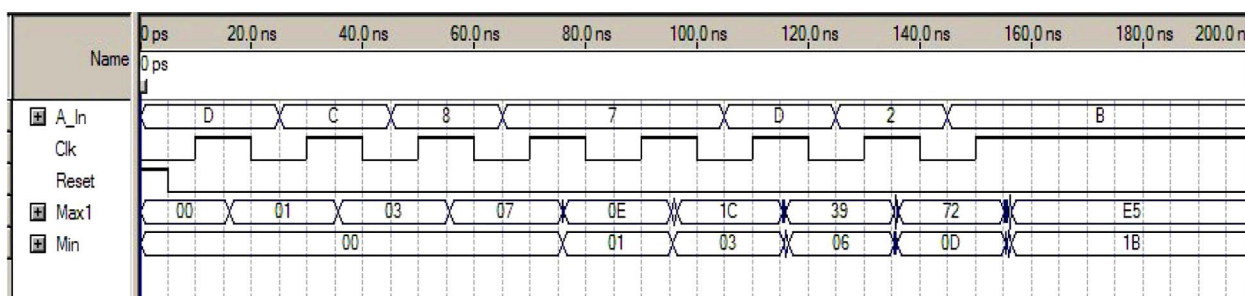


Рис. 7. Часова діаграма пристрою Max_Min_4_8 / Time chart of the device Max_Min_4_8

Кількість апаратних ресурсів FPGA необхідних для реалізації пристрою вертикально-паралельного пошуку максимального і мінімального чисел у одновимірному масиві залежно від розмірів масиву та розрядності чисел наведена на рис. 8. Одиницями вимірювання апаратних затрат є кількість логічних елементів (LE) і кількість контактів FPGA.

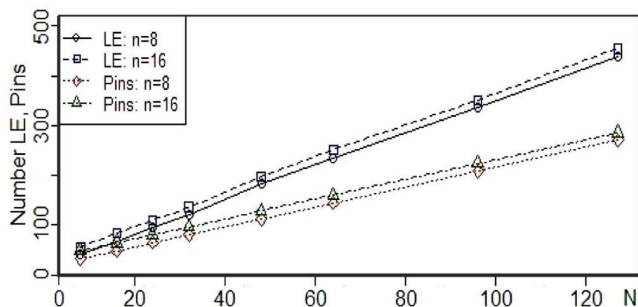


Рис. 8. Графік залежності апаратних затрат на реалізацію пристрою вертикально-паралельного пошуку максимального і мінімального чисел / Dependence chart of hardware costs for the implementation of the device for vertical-parallel searching of the maximum and minimum numbers

З графіка видно, що апаратні затрати збільшуються лінійно з кількістю елементів у масиві. Так для $N=127$ чисел розрядністю $n=16$ у кількість LE та контактів FPGA, необхідних для реалізації цього пристрою, становить відповідно 454 та 161. Кількість необхідних логічних елементів LE в основному не залежить від розрядності чисел у масиві.

Для вертикально-паралельного пошуку максимального і мінімального чисел у двовимірному масиві $\{A_{kj}\}_{k=1; j=1}^{N;M}$ синтезовано пристрій Max_Min_ $N \times M$ $_n$. Схе-ма одного з пристроїв показана на рис. 4. Він призначе-

ний для обчислення максимальних і мінімальних 8-розрядних значень серед елементів матриці D (4×2) і має аналогічні входи та виходи, що й пристрій, показаний на рис. 9.

Пристрій пошуку максимального і мінімального чисел у двовимірному масиві працює аналогічно пристрою пошуку мінімального та максимального чисел у одновимірному масиву чисел. Особливістю даного пристрою є додаткові два регістри зсуву з розрядністю n . Робота пристрою синхронізується тактовими імпульсами Clk. Імпульс Reset=1 використовується перед початком пошуку максимального та мінімального чисел кожного рядка двовимірного масиву.

Розроблено пристрій пошуку максимального і мінімального чисел у двовимірному масиві D (4×2). Перший рядок масиву складається з чисел 0xE5, 0xDC, 0x1B, 0x9D, а другий – з чисел 0x94, 0x3C, 0x7D, 0xA6. Часова діаграма роботи пристрою наведена на рис. 10.

Внаслідок пошуку у двовимірному масиві D (4×2) знайдено максимальне 0xE5 та мінімальне 0x1B числа. Після $M \times n$ (2×8) тактів на виході Max_Out отримаємо максимальне число, а на виході Min_Out мінімальне число.

Обговорення отриманих результатів дослідження. Аналіз реалізації розроблених структур пристроїв на базі ПЛІС типу FPGA показує складність реалізації спільної магістралі для формування i -х розрядів максимального і мінімального чисел. Апаратну реалізацію виконано в інтегрованому середовищі Quartus II для FPGA EP3C16F484 з сімейства Cyclone III мовою опису обладнання VHDL. Тестування розроблених пристроїв пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірному та двовимірному масивах підтвердило правильність їх роботи.

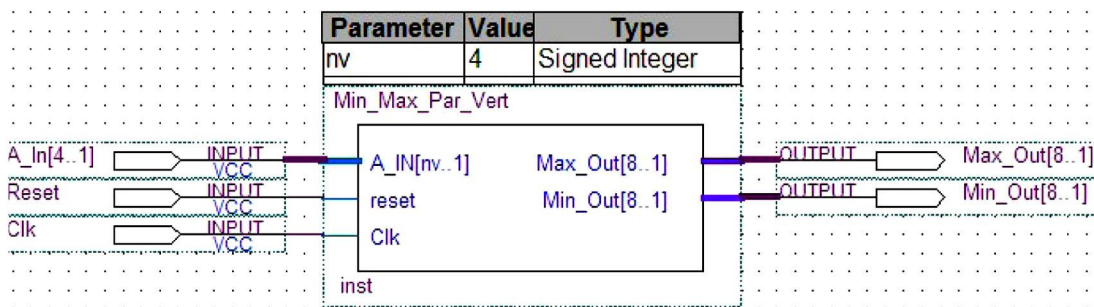


Рис. 9. Зовнішній вигляд пристрою пошуку максимального і мінімального чисел у двовимірному масиві / Appearance of the device for searching the maximum and minimum numbers in a two-dimensional array

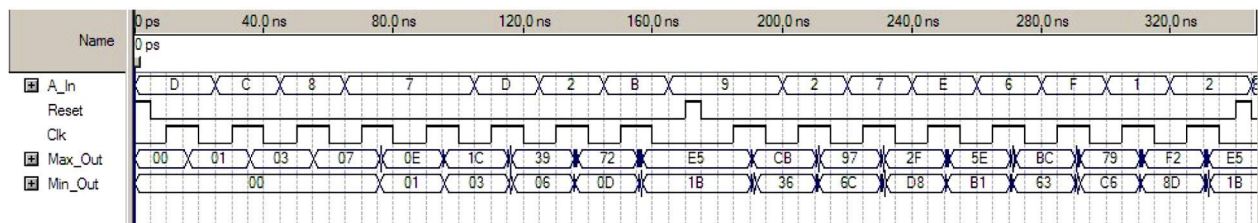


Рис. 10. Часова діаграма роботи пристрою Max_Min_4x2_8 / Time diagram of the device Max_Min_4x2_8

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження. Розроблено вертикально-паралельний метод одночасного пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірних масивах, який за рахунок паралельного опрацювання i -го розрядного зрізу масиву чисел і паралельного формування слів управління забезпечує зменшення часу пошук, який в основному визначається розрядністю чисел. *Вдосконалено* вертикально-паралельний метод одночасного пошуку максимальних і мінімальних чисел у двовимірних масивах, який за рахунок одночасного опрацювання p одновимірних масивів і використання методу витіснення забезпечує зменшення тривалості пошуку у p разів порівняно з наявним методом.

Практична значущість результатів дослідження. Використання розробленого вертикально-паралельного методу одночасного пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірних масивах для апаратної реалізації забезпечує однорідність структури, високу частоту надходження розрядних зрізів чисел масиву, просте нарощування кількості входів і зменшення тривалості пошуку, який в основному визначається розрядністю чисел, а не їх кількістю. Використання вдосконалено вертикально-паралельного методу одночасного пошуку максимальних і мінімальних чисел у двовимірних масивах забезпечує зменшення тривалості пошуку шляхом збільшення кількості одновимірних масивів, які опрацьовуються одночасно.

Висновки / Conclusions

Показано, розроблення високошвидкісних апаратних засобів для пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірному та двовимірному масивах доцільно здійснювати при інтегрованому підході, який охоплює методи, алгоритми, структури та сучасні ПЛІС і ґрунтується на використанні таких принципів: однорідності та регулярності структури; локалізації та спрощення зв'язків між елементами; модульності побудови; конвеєризації та просторового паралелізму опрацювання даних; узгодженості інтенсивності надходження роз-

рядних зрізів із інтенсивністю їх опрацювання у пристрої.

Показано, що алгоритми вертикально-паралельного пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірних і двовимірних масивах ґрунтуються на однотипних базових операціях з локальними та регулярними зв'язками.

Розроблено вертикально-паралельний метод одночасного пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірних масивах, який за рахунок паралельного опрацювання i -го розрядного зрізу масиву чисел і паралельного формування слів управління забезпечує зменшення часу пошук, який в основному визначається розрядністю чисел.

Вдосконалено вертикально-паралельний метод одночасного пошуку максимальних і мінімальних чисел у двовимірних масивах, який за рахунок одночасного опрацювання p одновимірних масивів і використання методу витіснення забезпечує зменшення тривалості пошуку у p разів порівняно з наявним методом.

Показано, що час вертикально-паралельного пошуку максимальних і мінімальних чисел у одновимірному та двовимірному масивах визначається розрядністю чисел, а не їх кількістю.

Визначено, що використання спільної шини для формування i -го розряду максимального (мінімального) числа та паралельне формування слів управління забезпечило підвищення частоти опрацювання розрядних зрізів одновимірного масиву.

Визначено, що кількість апаратних ресурсів FPGA необхідних для реалізації пристрою вертикально-паралельного пошуку максимального і мінімального чисел у одновимірному масиві в основному залежить від розміру масиву чисел, так для $N=127$ чисел розрядністю $n=16$ у кількість LE та контактів FPGA, необхідних для реалізації цього пристрою, становить відповідно 454 та 161.

References

- [1] Aho, A., Ullman, J., & Hopcroft, J. (2001). Data Structures and Algorithms. Pearson India, 384 p.
- [2] Altera Corporation. MAX FPGA Evaluation Kit. Guide. Retrieved from: http://itcj.sethost.net/pdf/epivt_2_1_36.pdf.

- [3] Ashenden, P. J. (2010). The designers guide to VHDL. Third Edition. Morgan Kaufmann, 936 p.
- [4] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). Introduction to Algorithms (3rd ed.). MIT Press and McGraw-Hill, 296 p.
- [5] Date, C. J. (2003). An introduction to database systems (8th Edition). Pearson, 328 p.
- [6] Grushvitsky, R. I., Mursaev, A. Kh., & Ugryumov, E. P. (2002). Designing systems based on programmable logic chips. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 219, 148, 287–288pp. [In Russian].
- [7] Hrytsiuk, Yu. I., & Buchkovska, A. Yu. (2018). Visualization of the results of expert evaluation of software quality using polar diagrams. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(10), 137–145. <https://doi.org/10.15421/40271025>
- [8] Hrytsiuk, Yu. I., & Dalyavskyy, V. S. (2018). Using Petal Diagram for Visualizing the Results of Expert Evaluation of Software Quality. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(9), 97–106. <https://doi.org/10.15421/411832>
- [9] Hrytsiuk, Yu. I., & Nemova, E. A. (2018). Management Features Process of Developing Software Requirements. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(8), 161–169. <https://doi.org/10.15421/40280832>
- [10] Jiang, Q., Guo, Y., Yang, Z., & Zhou, X. (2020). A parallel whale optimization algorithm and its implementation on FPGA. IEEE Xplore: IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). <https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185737>
- [11] Kleinberg, J., & Tardos, E. (2006). Algorithm Design. Pearson, 800 p.
- [12] Knuth, E. D. (1998). Art of computer programming, The: Volume 3: Sorting and Searching (Second edition). Addison-Wesley Professional, 832 p.
- [13] Komolov, D. A., Myalk, R. A., Zobenko, A. A., & Filippov, A. S. (2002). Computer-aided design systems from Altera MAX+plus II and Quartus II. Moscow: RadioSoft. [In Russian].
- [14] Kopeczyński, M., & Grześ, T. (2021). Hardware rough set processor parallel architecture in FPGA for finding core in big datasets. University of Social Sciences. Information Technology Institute: Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research Vol. 11, No. 2. 99–110 pp. <https://doi.org/10.2478/jaiscr-2021-0007>
- [15] Krenevich, A. P. (2021). Algorithms and data structures. Kyiv: PPC "University of Kyiv", 200 p. [In Ukrainian].
- [16] Levitin, A. V. (2006). Algorithms: introduction to development and analysis. Moscow: Williams, 215–218pp. [In Russian].
- [17] Mizutani, K., Yamaguchi, H., Urino, Y., & Koibuchi, M. (2022). Accelerating parallel data processing using optically tightly coupled FPGAs. Journal of Optical Communications and Networking Vol. 14, Issue 2, A166–A179 pp. <https://doi.org/10.1364/JOCN.448626>
- [18] Ott, D. E., & Wilderrotter, T. J. (2010). A designers guide to VHDL synthesis. Springer Publisher, 336 p.
- [19] Palagin, A., & Opanasenko, V. (2006). Reconfigurable computing systems. Kyiv: Prosvita. 280 p. [In Ukrainian].
- [20] Rashkevich, Y. M., Tsmots, I. G., & Zerbino, D. D. (2000). Device for determining the maximum number from a group of numbers. Ukrainian patent for invention № 29700. Bull. № 6–11. [In Ukrainian].
- [21] Tsmots, I. G., & Skoroshoda, O. V. (2013). Device for determining the maximum number from a group of numbers. Patent of Ukraine for utility model № 103106, 10.09.2013, Bull. № 17. [In Ukrainian].
- [22] Tsmots, I. G., Skoroshoda, O. V., Medikovsky, M. O., & Antoniv, V. Ya. (2015). Device for determining the maximum number from a group of numbers. Patent of Ukraine for the invention № 110187, 25. Bull. № 22. [In Ukrainian].
- [23] Walus, K., Dysart, T. J., Jullien, G. A., & Budiman, R. A. QCA Designer. Retrieved from: <http://www.mina.ubc.ca/qca-designer>.
- [24] Zotov, V. (2010). Features of the architecture of a new generation of FPGAs with architecture from Xilinx. Finestreet Publishing: Components and technologies № 12, 17–24 pp. [In Russian].

I. H. Tsmots, V. Ya. Antoniv

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

METHODS AND TOOLS FOR VERTICAL-PARALLEL SEARCHING OF MAXIMUM AND MINIMUM NUMBERS IN ARRAYS

The current stage of development of information technology is characterized by the expansion of the applications, much of which is associated with the accumulation of large data sets and parallel 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. The main source in these systems are different sensors and devices that generate telemetric data. That is why it is very crucial to preprocess this data in real-time for finding further issues. One of the optimal ways for implementing it, is to use hardware approach like programmable logic device (PLD) with FPGA type. For resolving this issue in the article were analyzed the recent research and publications and has shown that the disadvantage of existing methods and algorithms for finding the maximum and minimum numbers in one-dimensional and two-dimensional arrays is that they are not focused on hardware implementation by using PLD with FPGA type. It is shown that the development of high-speed hardware for finding maximum and minimum numbers in one-dimensional and two-dimensional arrays should be carried out with an integrated approach, which includes methods, algorithms, structures and modern LPD and should be based on the following principles: homogeneity and regularity of structure; localization and simplification of connections between elements; modularity of construction; pipeline and spatial parallelism of data processing; consistency of the intensity of the discharge of bit sections with the intensity of their processing in the device. The basic operations for the implementation of algorithms for vertical-parallel search of maximum and minimum numbers in one-dimensional and two-dimensional arrays are highlighted and it is shown that they are based on the same type of basic operations with local and regular connections. In the article was developed the method of vertical-parallel 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. Improved vertical-parallel method of simultaneous search of maximum and minimum numbers in two-dimensional arrays, which due to the simultaneous processing of p one-dimensional arrays and the use of the displacement method reduces the search time by p times compared to the existing method. It is shown that the time of vertical-parallel search of maximum and minimum numbers in one-dimensional and two-dimensional arrays is determined by the bit size of numbers, not their numbers. It is determined that the use of a common bus for formatting of the i -th bit of the maximum (minimum) number and the parallel formation of control words provides an increasing in the processing frequency of bit slices of one-dimen-

sional array. It is determined that the amount of FPGA hardware resources that required for implementation a device for vertical-parallel searching of maximum and minimum numbers in a one-dimensional array mainly depends on the size of the array of numbers, and search time on their bit size.

Keywords: methods of vertical-parallel search; maximum number; minimum number; structures; hardware implementation; arrays of numbers; basic operations.

Інформація про авторів:

Цмоць Іван Григорович, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизованих систем управління. **Email:** ivan.tsmots@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4033-8618>

Антонів Володимир Ярославович, канд. техн. наук, асистент, кафедра автоматизованих систем управління. **Email:** volodya.antoniv@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4544-4612>

Цитування за ДСТУ: Цмоць І. Г., Антонів В. Я. Методи та засоби вертикально-паралельного пошуку в масивах максимальних і мінімальних чисел. *Український журнал інформаційних технологій*. 2022, т. 4, № 1. С. 68–77.

Citation APA: Tsmots, I. H., & Antoniv, V. Ya. (2022). Methods and tools for vertical-parallel searching of maximum and minimum numbers in arrays. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 4(1), 68–77. <https://doi.org/10.23939/ujit2022.01.0068>