

DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.036>
УДК 004.272

Т.Б. Мартинюк, д-р техн. наук, **Л.В. Крупельницький**, канд. техн. наук,
М.В. Микитюк, аспірант, **М.О. Зайцев**, аспірант
Вінницький національний технічний університет
Україна, 21021, Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com; e-mail: krupost@gmail.com
e-mail: maksym.mykytiuk@gmail.com; e-mail: mrnikolayzv@gmail.com

Систолічна архітектура матричного обчислювача для класифікатора об'єктів

Розглянуто один з відомих методів класифікації об'єктів, в якому реалізовано критерій класифікації за максимумом дискримінантних функцій. Цей метод ефективно застосовується як класична обчислювальна модель, зокрема, у медицині при діагностуванні захворювань. Процес класифікації за цим методом можна реалізувати як просторово-розподілену обробку по стовпцях і рядках матриці у вигляді регулярних ітеративних алгоритмів. Це дозволяє відобразити їх на двовимірний систолічний масив матричного обчислювача у складі класифікатора об'єктів з подальшим розміщенням у ПЛІС. Запропонований матричний обчислювач функціонує в двох режимах і має низку специфічних властивостей, а саме виконання операції декремента одночасно над усіма елементами в кожному стовпці матриці обчислювача, а також використання сигналів ознаки нуля (обнуління) елементів в кожному рядку і кожному стовпці матриці як результатів обробки елементів дискримінантних функцій і для синхронізації самого процесу обробки. В подальшому за результатами обробки у матричному обчислювачі формуються вихідні сигнали класифікатора з визначенням конкретного класу об'єктів.

К л ю ч о в і с л о в а: систолічна архітектура, дискримінантна функція, класифікатор об'єктів.

Дотепер не втратила актуальності розробка систолічних спецобчислювачів для широкого кола прикладних задач [1—3]. Це пов'язано з ефективністю використання апаратних засобів, які з досить високим ступенем відповідності відображають потактні дії регулярних ітеративних алгоритмів (РІА) [4—7]. Такий підхід є перспективним для обробки одновимірних і двовимірних масивів даних [4, 5, 8, 9].

Вибір систолічних спецобчислювачів для РІА пов'язаний з такими їх перевагами, як регулярність структури, однотипність процесорних елементів (ПЕ), локальність зв'язків між ними, конвеєрний спосіб просування

© Мартинюк Т.Б., Крупельницький Л.В., Микитюк М.В., Зайцев М.О., 2021

даних на фоні паралельних обчислень [6,7]. Все це дозволяє ефективно реалізувати одно- та двовимірні систолічні масиви на основі ПЛІС [4, 10], що, в свою чергу, гарантує компактність, надійність і швидкодію таких структур.

Метою дослідження є адекватне відображення алгоритму обробки двовимірного масиву даних при класифікації об'єктів на систолічну матричну структуру.

Особливості двовимірної обробки даних в класифікаторі об'єктів. У роботі [11] наведено альтернативний варіант двовимірної обробки елементів дискримінантних функцій (ДФ) в процесі класифікації біомедичних даних [12]. Використання ДФ є однією з класичних обчислювальних моделей при класифікації об'єктів [13,14], що дозволяє обмежитися статистичним описом вхідних даних без використання їх імовірнісних моделей. Так, i -у лінійну ДФ (ЛДФ) можна подати у вигляді

$$\text{ЛДФ}_i = w_{i1}x_1 + \dots + w_{ij}x_j + \dots + w_{in}x_n, \quad i = \overline{1, m},$$

де x_j — j -й елемент вхідного вектора X ; w_{ij} — коефіцієнт (вага) j -го елемента x_j ; m — кількість класів (груп).

При порівнянні між собою значень m ЛДФ _{i} [11] з подальшим виділенням серед них максимального бачимо, що алгоритм паралельного обчислення має деякі властивості РІА [6]. Разом з тим, для обробки матриці розмірністю $m \times n$, сформованої з n елементів m ЛДФ _{i} [11], можна застосувати відомий метод різницево-зрізової обробки векторних даних [15], який передбачає просторово-розподілений підхід до обробки як стовпців, так і рядків матриці [11] і має властивості РІА [6,7].

У цьому випадку основними операціями, які здійснюються над елементами a_{ij}^0 вхідної матриці A^0 вигляду

$$a_{ij}^0 = w_{ij}x_j, \quad (1)$$

є такі три операції:

- визначається метрика як міра подібності елементів кожного j -го стовпця $t-1$ поточної матриці A^{t-1} , де $t = \overline{1, N}$:

$$q_j^t = \min A_j^{t-1} = \min a_{ij}^{t-1}, \quad i = \overline{1, m}; \quad (2)$$

тут a_{ij}^{t-1} — елемент матриці A^{t-1} ; N — кількість ітерацій;

- виконується корекція елементів стовпців матриці A^{t-1} :

$$\overline{a}_{ij}^t = a_{ij}^{t-1} - q_j^t, \quad (3)$$

тобто формується матричний (двовимірний) різницевий зріз:

$$\overline{A^t} = \{\overline{a_{ij}^t}\}; \quad (4)$$

• виконується впорядкування матриці $\overline{A^t}$ (4) в процесі транспозиції (просування) праворуч до краю нульових елементів $\overline{a_i^t}$ у всіх рядках $\overline{A_i^t}$ і формування впорядкованого двовимірного різницевого зрізу A^t :

$$A_i^t = \text{Tr}(\overline{A_i^t}). \quad (5)$$

Перед кожною транспозицією (5) перевіряється умова наявності хоча б одного нульового рядка $\overline{A_i^t}$, тобто

$$\exists \overline{A_i^t} = 0, \quad t = \overline{1, N}, \quad (6)$$

а також умова обнуління всіх рядків $\overline{A_i^t}$ матриці $\overline{A^t}$:

$$\forall \overline{A_i^t} = 0. \quad (7)$$

Виконання умови (6) є ознакою оптимальної суми елементів i -го рядка A_i^0 вхідної матриці A^0 , а виконання умови (7) свідчить про завершення процесу обробки. При цьому останній обнулений l -й рядок A_l^N відповідає максимальній сумі елементів l -го рядка A_l^0 вхідної матриці A^0 [11].

Отже, весь процес обробки елементів вхідної матриці A^0 виконується до повного обнуління її рядків A_i^0 , а сигнали ознаки нуля елементів цих рядків в подальшому використовуються для формування вихідних сигналів y_i класифікатора об'єктів за вирішальним правилом

$$y_l = \{1 \mid \max \overline{A_l^0}, \quad l = \overline{1, m}\} \Rightarrow X \in C_l,$$

де X — вхідний вектор ознак об'єкта; $\overline{C} = \{\overline{C_1}, \dots, \overline{C_m}\}$ — множина класів; $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ — вихідний вектор класифікації.

Особливістю даного підходу до класифікації є використання векторної метрики $q^t = \{q_1^t, \dots, q_n^t\}$, де q_j^t — мінімальний ненульовий елемент a_{ij}^{t-1} (2) стовпця A_j^{t-1} , що також свідчить про просторово-розподілену обробку за стовпцями матричних даних. Таким чином, операція (2) виконується одночасно у всіх n стовпцях A_j^{t-1} поточної матриці A^{t-1} , операція (5) — одночасно у всіх m рядках $\overline{A_i^t}$ невпорядкованої матриці $\overline{A^t}$.

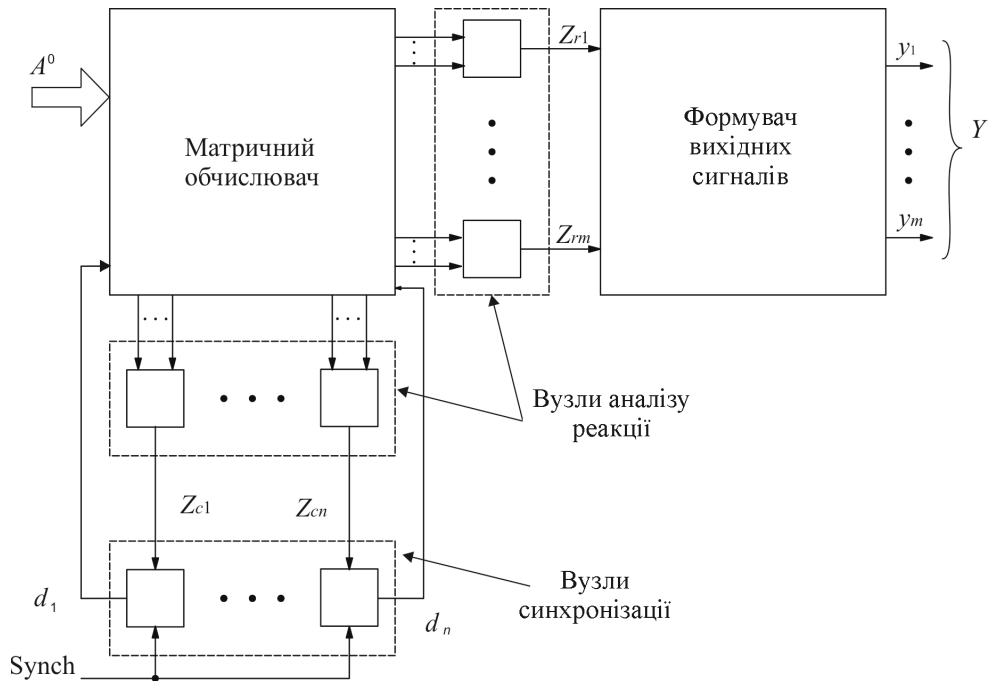


Рис. 1. Структурна схема класифікатора об'єктів

Особливості структурної організації матричного обчислювача.

Аналіз операцій (2) і (3) засвідчив, що при апаратній реалізації їх можна виконувати одночасно, якщо застосувати відому операцію декремента, тобто одночасного зменшення на одиницю всіх елементів a_{ij}^{t-1} відповідного стовпця A_j^{t-1} до обнуління хоча б одного з його елементів. Такі дії виконуються одночасно для всіх n стовпців поточної матриці A^{t-1} . Таку просторово-розподілену обробку можна розглядати як варіант різницево-зрізової обробки [15], поширеної на матричну обробку двовимірного масиву даних.

На рис. 1 наведено структурну схему класифікатора об'єктів з матричним обчислювачем як базовим блоком. Тут не показано блок формування елементів a_{ij}^0 (1) вхідної матриці A^0 , але зображено вузли аналізу реакцій, входами яких є сигнали ознаки нуля елементів рядків і стовпців матричного обчислювача, а також вузли синхронізації для запуску і зупинки сигналів декремента окремо в кожному стовпці матричного обчислювача.

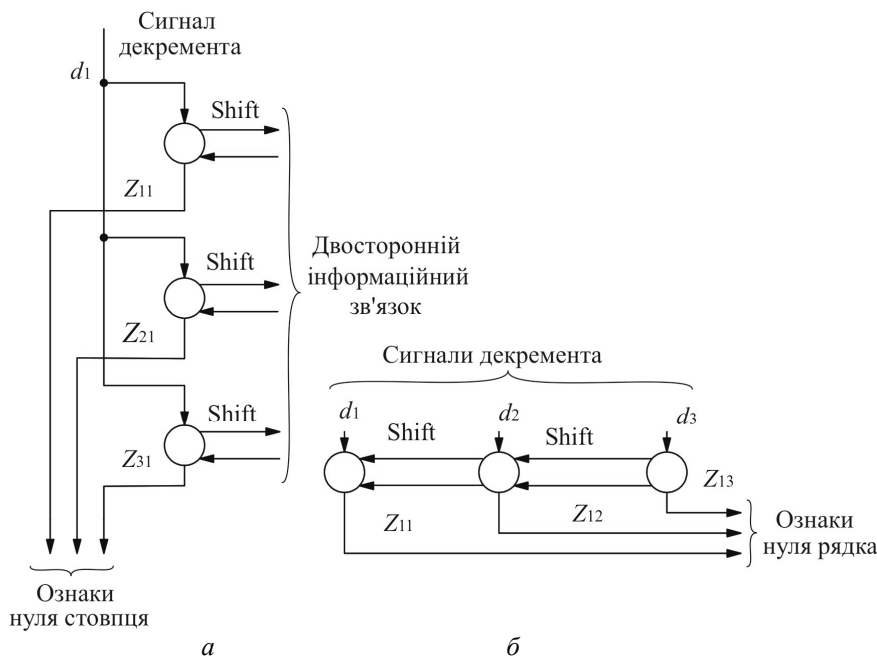


Рис. 2. Стовпець (а) і рядок (б) трьох ПЕ матричного обчислювача

Таким чином, для матричного обчислювача вхідними даними є елементи вхідної матриці A^0 розмірністю $m \times n$, вхідними даними для формувача вихідних сигналів — вектор сигналів обнуління Z_{r1}, \dots, Z_{rm} m рядків матричного обчислювача, які формуються відповідними вертикальними вузлами аналізу реакції, а вхідними даними для n вузлів синхронізації — вектор сигналів обнуління Z_{c1}, \dots, Z_{cn} n стовпців матричного обчислювача, які формуються відповідними горизонтальними вузлами аналізу реакцій. Вузли синхронізації формують сигнали для операції декремента d_1, \dots, d_n відповідно для стовпців матричного обчислювача за загальним сигналом синхронізації Synch.

На рис. 2, а, показано сигнал d_1 операції декремента для трьох ПЕ першого стовпця матричного обчислювача з формуванням відповідних сигналів ознаки нуля Z_{i1}, \dots, Z_{31} і вказівкою напрямку двостороннього інформаційного зв'язку Shift для транспортного оператора транспозиції (5). Сигнали Z_{i1}, \dots, Z_{31} в подальшому надходять на входи відповідного першого горизонтального вузла аналізу реакцій (див. рис. 1). На рис. 2, б, показано аналогічні сигнали d_1, \dots, d_3 для трьох ПЕ першого рядка мат-

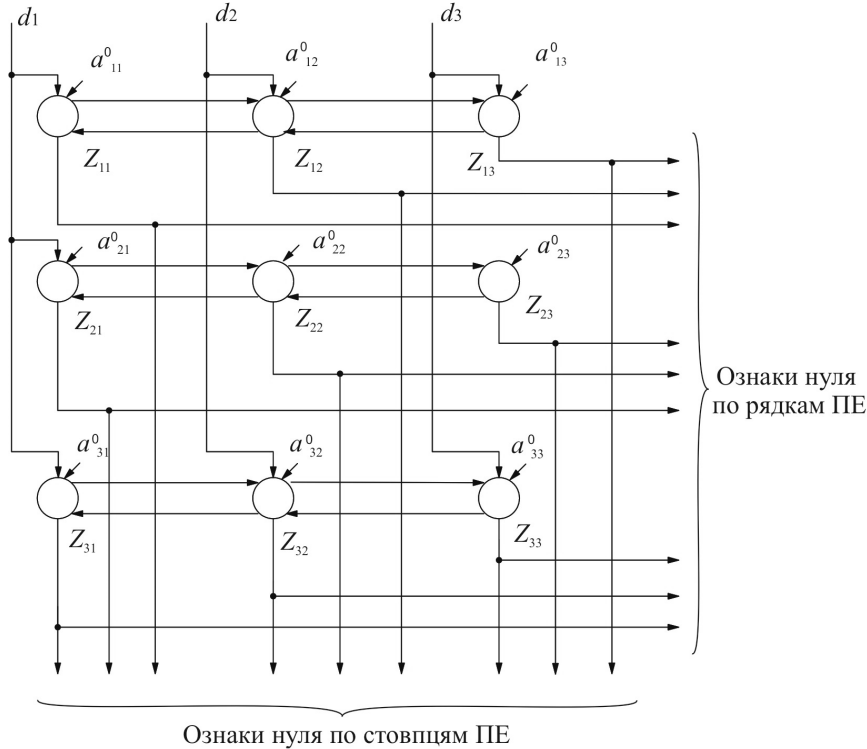


Рис. 3. Узагальнена структурна схема матричного обчислювача 3×3 ПЕ

ричного обчислювача. Сигнали Z_{i1}, \dots, Z_{i2} в подальшому надходять на входи відповідного першого вертикального вузла аналізу реакцій (див. рис. 1).

На рис. 3 наведено узагальнену структурну схему матричного обчислювача розмірністю 3×3 ПЕ, в якій передбачено введення елементів a_{ij}^0 вхідної матриці A^0 до відповідного ПЕ матричного обчислювача. Такий матричний обчислювач фактично функціонує у двох режимах:

- режим I передбачає виконання операції декремента у всіх n стовпцях одночасно, але з різною тривалістю $t_j(\text{dec})$ залежно від мінімального нульового елемента a_{ij}^{t-1} в j -му стовпці поточної матриці A^{t-1} ;

- режим II забезпечує виконання операції транспозиції елементів a_{ij}^{t-1} у всіх m рядках, але з різною тривалістю $t_i(\text{tr})$ в кожному i -му рядку матричного обчислювача, що також залежить від співвідношення числових значень елементів a_{ij}^{t-1} в рядках і стовпцях поточної матриці A^{t-1} .

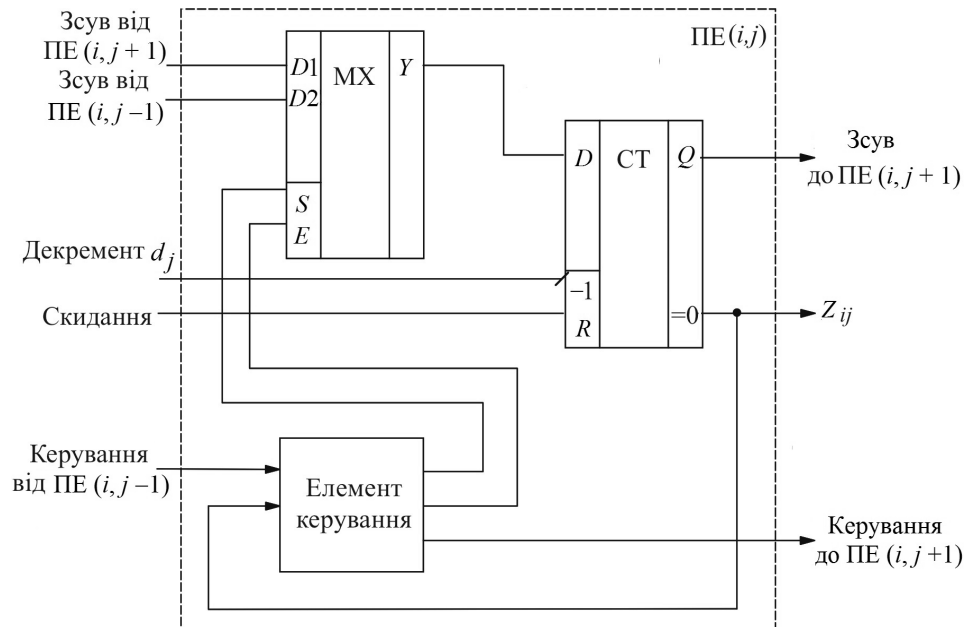


Рис. 4. Функціональна схема ПЕ матричного обчислювача

Результати досліджень засвідчили, що особливостями систолічного принципу організації обчислень в запропонованій структурі матричного обчислювача є наступне:

- наявність двостороннього інформаційного зв'язку між ПЕ тільки в рядках матричного обчислювача для спрямованого транзиту (транспозиції) даних;
- відсутність інформаційного зв'язку між ПЕ у стовпцях матричного обчислювача;
- наявність загального керуючого зв'язку для ПЕ в кожному стовпці матричного обчислювача для виконання операції декремента;
- виведення сигналів обнуління у всіх ПЕ матричного обчислювача як результат обробки даних;
- «плаваючий» характер тривалості часу обробки даних як по стовпцях, так і по рядках матричного обчислювача;
- самокерування процесом обробки даних з урахуванням появи сигналів обнуління відповідних ПЕ матричного обчислювача.

З урахуванням зазначених особливостей функціонування ПЕ матричного обчислювача побудовано функціональну схему ПЕ (рис. 4). Лічильник СТ, який є в ij -му ПЕ, призначений для зберігання даних і виконання операцій декремента над його вмістом. Інформаційний вихід лічильника СТ використовується для передачі даних, а сигнал ознаки нуля

Z_{ij} — для керування процесом обробки в матричному обчислювачі, а також як його результуючий сигнал. Крім того, на вхід скидання лічильника СТ надходить сигнал Reset, а на вхід лічби на спадання (-1) — сигнал синхронізації d_j .

Для двостороннього інформаційного зв'язку з сусідніми ПЕ до складу ij -го ПЕ введено мультиплексор МХ і елемент керування (рис. 4). При цьому в ПЕ передбачено інформаційні зв'язки від сусіднього зліва і справа ПЕ, а ij -й ПЕ формує керуючий сигнал для сусіднього справа ПЕ і приймає керуючий сигнал від сусіднього зліва ПЕ.

Структурну схему матричного обчислювача (див. рис. 1) з використанням САПР Xilinx ISE Design Suite 13.2 було спроектовано і розміщено на ПЛІС XC6S1X45T сімейства Spartan-6. В результаті регулярний сегмент матричного обчислювача розмірністю 4×8 ПЕ і розрядністю 8 біт показав час спрацювання приблизно 10,5 мс при частоті 100 МГц, значній завантаженості ресурсів введення (виведення) (88 %) і незначній завантаженості інших ресурсів (10 %).

Висновки

Запропонований матричний обчислювач, призначений для класифікатора об'єктів з використанням дискримінантних функцій, орієнтований на апаратну реалізацію у мікросхемі ПЛІС. Такий обчислювач можна ефективно використовувати як прискорювач в системах розпізнавання, де необхідними вимогами є спрацювання в реальному часі, можливість швидкого переналаштування при зміні розмірності обчислювальної матриці, компактність і надійність апаратної реалізації.

Розглянутий алгоритм реалізує просторово-розподілену обробку двовимірному масиву елементів дискримінантних функцій на основі принципу різницевих зрізів. Такий підхід до обробки елементів матричного масиву чисел дозволяє використати швидкісну операцію декремента паралельно для всіх елементів у кожному стовпці матриці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Meribout M., Firadus A. A new systolic multiprocessor architecture for real-time soft tomography algorithms//Parallel Computing, 2016, Vol. 52, pp. 144—155. <https://doi.org/10.1016/j.parco.2016.01.002>.
2. Bagavathi C., Saraniya O. Evolutionary Mapping Techniques for Systolic Computing System. Deep Learning and Parallel Computing Environment for Bioengineering Systems, Academic Press, 2019, pp. 207-223, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816718-2.00020-8>.
3. Корченко А.Г., Кинзерявий В.Н., Гнатюк С.А., Панасюк А.Л. Систолический криптопроцессор. Міжнародна науково-практична конф., 19—21 травня 2010 «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». Вінниця: ВНТУ, 2010, с. 187—188.

4. Мартинюк Т.Б., Кожемяко А.В., Хомюк В.В. Модели систолических массивов для обработки векторных данных по разностным срезам // Управляющие системы и машины, 2009, № 5, с. 46—55.
5. Яджак М.С. Особенности реализации штучных нейронных сетей одного типа на квазисистолических обчислювальних структурах. Computational Intelligence (Results, Problems and Perspectives); Proceedings of the First International Conference, 10—13 May 2011, Cherkasy, McLaut, pp. 134—135.
6. Кун С. Матричные процессоры на СБИС. М.: Мир, 1991, 672с.
7. Каневский Ю.С. Систолические процессоры. Київ: Техніка, 1991, 173с.
8. Тимченко Л.И., Мартинюк Т.Б., Загоруйко Л.В. Подход к организации многоуровневой схемы систолических вычислений // Электрон. моделирование, 1998, **20**, № 5, с. 33—42.
9. Яджак М.С. Моделирование нейронных сетей с проективными та латеральними зв'язками на квазисистолических структурах // Відбір і обробка інформації, 2005, вип. 23 (99), с. 122—127.
10. Мартинюк Т.Б., Кожемяко А.В., Крупельницький Л.В. та ін. Реалізаційні моделі матричного обчислювача для класифікатора біомедичних даних // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 2016, № 2(36), с. 43—51.
11. Мартинюк Т.Б., Буда А.Г., Хомюк В.В. та ін. Классификатор биомедицинских сигналов // Искусственный интеллект, 2010, № 3, с. 88—95.
12. Рангайян Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход. М: Физматлит, 2007, 400с.
13. Юнкеров В.И., Григорьев С.Г. Математико-статистическая обработка данных медицинских исследований. СПб.: ВМедА, 2002, 266с.
14. Дискриминантный анализ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stdiscan.html>.
15. Мартинюк Т.Б., Кожемяко А.В., Куперштейн Л.М. Аспекты разностно-срезовой обработки данных в нейроструктурах. LAMBERT Academic Publishing RU, 2018, 60 с.

Отримано 22.02.21

REFERENCES

1. Meribout, M. and Firadus, A. (2016), “A new systolic multiprocessor architecture for real-time soft tomography algorithms”, *Parallel Computing*, Vol. 52, pp. 144-155, available at: <https://doi.org/10.1016/j.parco.2016.01.002>.
2. Bagavathi, C. and Saraniya O. (2019), “Evolutionary Mapping Techniques for Systolic Computing System. Deep Learning and Parallel Computing Environment for Bioengineering Systems”, *Academic Press*, pp. 207-223, available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816718-2.00020-8>.
3. Korchenko, A.H., Kynzeryaviy, V.N., Hnatyuk, S.A. and Panasyuk, A.L. (2010), *Sistolicheskii kriptoprotsessor* [Systolic Crypto Processor], *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya* [International scientific and practical conference], *Informatsiyeni tekhnologiyi ta kompyuterna inzheneriya* [Information technology and computer engineering], Vinnytsya, VNTU, May 19-21, 2010, pp. 187–188.
4. Martyniuk T.B., Kozhemiako A.V. and Khomyuk V.V. (2009), “Systolic Array Models for Processing Vector Data Using Difference Slices”, *Upravlyayushchiye sistemy i mashiny*, Vol. 5, pp. 46-55.
5. Yadzhak, M.S. (2011), “Features of realization of artificial neural networks of one type on quasi systolic computing structures”, *Computational Intelligence (Results, Problems and*

- Perspectives*), *Proceedings of the First International Conference*, McLaut, Cherkasy, Ukraine, pp. 134-135.
6. Kun, S. (1991), *Matrychnye protsessory na SBIS* [VLSI array processor], Myr, Moscow, USSR.
 7. Kanevskiy Yu.S. (1991), *Sistolicheskiye protsessory* [Systolic processors], Tekhnika, Kiev, USSR.
 8. Tymchenko, L.I., Martyniuk, T.B. and Zahoruyko, L.V. (1998), "An approach to organizing a multilayered systolic computation scheme", *Elektronnoye modelirovaniye*, Vol. 20, № 5, pp. 33-42.
 9. Yadzhak, M.S. (2005), "Modeling of neural networks with projective and lateral connections on quasi-systolic structures", *Vidbir i obrobka informatsiyi*, Vol. 23, № 99, pp. 122-127.
 10. Martyniuk, T.B., Kozhemiako, A.V., Krupelnytskyi, L.V., Perebeynis, O.M. and Bezkravnyy, O.S. (2016), "Implementation models of a matrix processor for a biomedical data classifier", *Informatsiyi tekhnolohiyi ta kompyuterna inzheneriya*, Vol. 2, № 36, pp. 43-51.
 11. Martyniuk, T.B., Buda, A.H., Khomyuk, V.V., Kozhemiako, A.V. and Kupershtein L.M. (2010), "Biomedical Signal Classifier", *Iskusstvennyy intellekt*, Vol. 3, pp. 88-95.
 12. Rahnayyan, R.M. (2007), *Analiz biomeditsinskikh signalov. Prakticheskiy podkhod* [Analysis of biomedical signals. A hands-on approach], FIZMATLIT, Moscow, Russia.
 13. Yunkerov, V.Y. and Grigoriev, S.H. (2002), *Matematiko-statisticheskaya obrabotka dannykh meditsinskikh issledovaniy* [Mathematical-statistic processing of medical research data], VMedA, Saint Petersburg, Russia.
 14. *Diskriminantnyy analiz* [Discriminant analysis], available at: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stdiscan.html>.
 15. Martyniuk, T.B., Kozhemiako, A.V. and Kupershtein, L.M. (2018), *Aspekty raznostno-srezovoy obrabotki dannykh v neyrostrukturakh* [Aspects of difference-slice data processing in neurostructures], LAMBERT Academic Publishing RU.

Received 22.02.21

T.B. Martyniuk, L.V. Krupelnytskyi, M.V. Mykytiuk, M.O. Zaitsev

SYSTOLIC ARCHITECTURE OF MATRIX PROCESSOR FOR CLASSIFIER OF OBJECTS

One of the known methods of object classification is considered, in which the criterion of classification by the maximum of discriminant functions is realized. This method has found effective application as a classical computational model, in particular in the medical diagnosis of diseases. The process of classification by this method can be implemented as spatially distributed processing on columns and rows of the matrix, which can be described as regular iterative algorithms. This allows you to display them on a two-dimensional systolic array of the matrix processor as part of the classifier of objects with subsequent placement in the FPGA. The proposed matrix processor works in two modes and has a number of specific properties, such as performing the decrement operation simultaneously for all elements in each column of the processor matrix, as well as the use of zero signal (zero) of elements in each row and each matrix column as a result of processing of discriminant functions and for synchronization of the process. In the future, based on the results of processing in the matrix processor, the output signals of the classifier are formed with the definition of a specific class of objects.

Key words: systolic architecture, discriminant function, classifier of objects.

МАРТИНЮК Тетяна Борисівна, д-р техн. наук, професор кафедри обчислювальної техніки Інституту інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Вінницького Національного технічного університету. В 1977 р. закінчила Вінницький політехнічний інститут. Область наукових досліджень — паралельні методи та засоби обробки, аналізу та розпізнавання сигналів (зображень) з використанням нейротехнологій.

КРУПЕЛЬНИЦЬКИЙ Леонід Віталійович, канд. техн. наук, доцент кафедри обчислювальної техніки Інституту інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Вінницького Національного технічного університету. В 1984 р. закінчив Вінницький політехнічний інститут. Область наукових досліджень — самокорегуючі аналого-цифрові вимірювально-інформаційні та моніторингові системи, спеціалізоване обладнання для телерадіомовлення.

МИКИТЮК Максим Васильович, аспірант (магістр) Інституту інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Вінницького Національного технічного університету. В 2019 р. закінчив Вінницький національний технічний університет. Область наукових досліджень — програмна реалізація аналізу багаторівневих масивів даних.

ЗАЙЦЕВ Микола Олександрович, аспірант (магістр) Інституту інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Вінницького Національного технічного університету. В 2019 р. закінчив Вінницький національний технічний університет. Область наукових досліджень — комп'ютерні методи програмного аналізу багатоканальних аудіосигналів.