
МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.8

Т.Б. МАРТИНЮК, Д.О. КАТАШИНСЬКИЙ

ОСОБЛИВОСТІ АСОЦІАТИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Вінницький національний технічний університет,

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: katashinskydmitry@gmail.com

Анотація. Асоціативні операції представляють собою обчислювальні масово-паралельні процедури над значними масивами даних. Саме цим пояснюється їх широке застосування у таких прикладних областях, як системи управління базами даних (СУБД), пошук і сортування IP-адрес в комп'ютерних мережах, а також ранжування даних, наприклад, у підсистемах прийняття рішень у складі інтелектуальних систем, зокрема, для медичного діагностування. Це пов'язано, не в останню чергу, з тим, що до складу асоціативних операцій входять вибірка за зовнішнім ключем, пошук даних за аналогією, сортування і ранжування елементів масиву даних. В даній роботі наведено результати аналізу особливостей застосування методів асоціативного оброблення даних для вирішення задач в інтелектуальних системах. Розглянуто означення інтелектуальної пам'яті як такої, що розширена за рахунок функціональних можливостей асоціативної пам'яті, тобто пам'яті з адресацією за змістом. В цьому випадку асоціативне оброблення даних містить не тільки пошук за асоціацією, тобто за зовнішнім ключем, але й пошук екстремального (максимального/мінімального) елемента у числовому масиві. Ще одним прикладом застосування асоціативного оброблення даних є різновиди нейромереж, які виконують функції авто- та гетероасоціативної пам'яті. Особливо актуальним у теперішній час є використання нейромереж в інтелектуальних системах керування мобільних роботів, оскільки їх структура забезпечується асоціативними рівнями оброблення. Ще одним затребуваним підходом є використання класифікатора з розширеними функціональними можливостями у складі підсистем підтримки прийняття рішень для експертних систем різного призначення. Ці приклади свідчать про конкретний зв'язок методів асоціативного оброблення даних і впровадження нейротехнологій у створення інтелектуальних систем різного призначення.

Ключові слова: асоціативне оброблення, асоціативна пам'ять, розпізнавання образів, інтелектуальна система, сортування, ранжування.

Abstract. Associative operations are computational massively parallel procedures over large data sets. This explains their widespread use in such application areas as database management systems (DBMS), searching and sorting IP addresses in computer networks, and ranking data, for example, in decision-making subsystems as part of intelligent systems, in particular, for medical diagnostics. This is due, not least, to the fact that associative operations include selection by foreign key, searching for data by analogy, sorting and ranking of elements of a data set. This paper presents the results of an analysis of the features of the application of associative data processing methods for solving problems in intelligent systems. The definition of intelligent memory is considered as one that is expanded due to the functional capabilities of associative memory, i.e. memory with content-addressing. In this case, associative data processing includes not only a search by association, that is, by a foreign key, but also a search for an extreme (maximum/minimum) element in a numerical array. Another example of the application of associative data processing are varieties of neural networks that perform the functions of auto- and heteroassociative memory. The use of neural networks in intelligent control systems of mobile robots is especially relevant today, since their structure is provided by associative processing levels. Another popular approach is the use of a classifier with extended functional capabilities as part of decision support subsystems for expert systems for various purposes. These examples indicate a specific connection between associative data processing methods and the implementation of neurotechnologies in the creation of intelligent systems for various purposes.

Keywords: associative processing, associative memory, pattern recognition, intelligent system, sorting, ranking.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-44-52

© Т.Б. МАРТИНЮК, Д.О. КАТАШИНСЬКИЙ, 2025

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВСТУП

Очевидним є зв'язок асоціативного оброблення даних, яке містить такі необчислювальні операції, як вибірка за ключем, пошук за аналогією, сортування, а також ранжування елементів масиву даних [1,2] з технологіями штучного інтелекту [3-6]. При цьому, необхідність подальшого розвитку асоціативних принципів оброблення даних пов'язано, не в останню чергу, з використанням автоматизованих систем збереження та паралельного оброблення значних масивів даних за їх символічними іменами або за їх змістом, тобто за так званими «асоціаціями» [7,8]. Тому областями широкого застосування асоціативного оброблення даних є, зокрема, системи управління базами даних (СУБД), пошук і сортування IP-адреси у комп'ютерних мережах і підсистеми підтримки прийняття рішень в інтелектуальних системах [9-11].

В обчислювальній техніці асоціативне оброблення виконується у більшості випадків над елементами числового масиву [2]. Разом з тим, такі асоціативно-логічні операції як сортування і ранжування [1,2,12] активно використовуються в нейротехнологіях, зокрема, при побудові окремих типів нейромереж [4,5,13]. Наприклад, у нейромережних класифікаторах відому процедуру “1 з N” для реалізації конкуренції у шарах нейромереж можна виконати не тільки із застосуванням структур нейромереж типу MAXNET [6], але й в процесі сортування векторного (лінійного) масиву чисел з визначенням максимального елемента [9,14].

Крім того, разом з широко використовуваним програмним забезпеченням певну зацікавленість викликають апаратні методи реалізації асоціативного оброблення даних [15], оскільки асоціативні операції задіяно в інтелектуальних системах різного призначення [16,17].

МЕТА

Метою роботи є аналіз особливостей застосування методів асоціативного оброблення даних для вирішення задач в інтелектуальних системах.

1. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПАМ'ЯТЬ ТА АСОЦІАТИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ

Особливістю пам'яті людини є її асоціативний характер, що містить такі властивості [7]:

- пошук інформації базується на мірі схожості із ключовим образом;
- образи зберігаються як структуровані послідовності;
- вибірка інформації представляє собою динамічний процес.

Крім того, одне із узагальнених понять “асоціації” містить таке пояснення: це явище, коли одне представлення викликає інше за схожістю, суміжністю або протилежністю [7]. В обчислювальній техніці, до речі, вважається що поняття “асоціативний” відображає лише факт наявності взаємозв'язків між даними і не має відношення до механізму збереження інформації у пам'яті [7]. Таким чином позначається розмежування понять “асоціативне оброблення” і “асоціативна пам'ять”.

Останнє поняття відноситься до так званої “пам'яті з адресацією за змістом”. Отже, асоціативне оброблення числової інформації, в першу чергу, передбачає пошук за асоціацією, тобто за зовнішнім ключем [1,7]. Але, разом з тим, може виконуватись оброблення даних без зовнішньої ключової інформації, зокрема, при пошуку максимального або мінімального числа, тобто як результат сортування даних. Крім того, існує такий варіант пошуку, коли серед деякої сукупності даних необхідно знайти такі, що найкраще відповідають ключовому зразку. У цьому випадку асоціативна вибірка відповідає певним чином процесу розпізнавання образів [3-6].

Отже, введення у перелік виконуваних асоціативно-логічних операцій інших, які не пов'язані з вибіркою за змістом, розширює функціональні можливості асоціативної пам'яті, що робить доречним позначення її як інтелектуальної пам'яті. До додаткових операцій такої пам'яті можна віднести такі розповсюджені масово-паралельні операції над елементами векторів, як визначення мінімального або максимального елемента та середнього k чисел [18].

2. НЕЙРОМЕРЕЖНА АСОЦІАТИВНА ПАМ'ЯТЬ

Серед відомих класичних структур нейромереж, які виконують функції асоціативної пам'яті, необхідно відмітити, в першу чергу, мережу Хопфілда, мережу Хеммінга і мережу ВАР – двоспрямовану асоціативну пам'ять [4-6]. Базовими функціями такої пам'яті є запам'ятовування, відтворення та забування образів, на яких вона навчалась [19]. При цьому треба розрізняти автоасоціативну пам'ять у вигляді мережі Хопфілда і мережі ВАР [5,6], на відміну від

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

гетероасоціативної пам'яті у вигляді мережі Хеммінга [4,5], тобто мережа з функцією класифікації образів (рис1).



Рисунок 1 - Моделі нейромережної асоціативної пам'яті.

В даному випадку доцільно показати взаємозв'язок між асоціативною вибіркою у розподіленій асоціативній пам'яті і процесом розпізнавання образів у нейромережах. Об'єднуючим їх фактором є здатність як асоціативної пам'яті, так і нейромереж до селективної видачі інформації у відповідь на вхідні образи, які в даному випадку розглядаються як аргументи пошуку [7]. Цей взаємозв'язок підтверджують базові математичні залежності процесів, що відбуваються у двох способах асоціативного оброблення даних, що розглядаються.

Для асоціативної вибірки у відповідній пам'яті характерним є векторно-матричне множення у вигляді [7]:

$$Y = M \cdot X = \sum \gamma_k \cdot Y_k, \quad (1)$$

де X - вхідний образ (вектор) як функція пошукового аргументу; M - матриця, що визначає структуру асоціативної пам'яті; Y - вихідний образ (вектор) як деякий "спогад" у пам'яті M ; γ_k - коефіцієнт лінійної регресії X на множині $\{X_k\}$.

Для нейромереж як моделей асоціативної пам'яті також можна використовувати векторно-матричне множення, щоб показати асоціацію між ключовими векторами X_k і запам'ятовуваним вектором Y_k у вигляді [6]:

$$Y_k = W_k \cdot X_k, \quad k = 1, \dots, 9, \quad (2)$$

де W - вагова матриця, яка визначається навчальними парами (X_k, Y_k) .

В результаті суми матриць вагових коефіцієнтів всього набору асоціацій можна розглядати як матрицю "пам'яті", а саме, як "досвід", отриманий при навчанні нейромереж [6], тобто встановити таке співвідношення:

$$M = \sum_{k=1}^9 W_k. \quad (3)$$

При цьому, необхідно додати, що разом з тим особливий інтерес для нейромереж представляє використання такої асоціативно-логічної операції, як сортування елементів векторного лінійного масиву чисел при реалізації процедури "1 з N". У більшості випадків вона реалізується у нейромережних класифікаторах як механізм конкуренції нейронів через їх від'ємні латеральні зв'язки у конкурентному

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

шарі нейромереж [4-6]. При цьому заміна цієї процедури, наприклад, на один з перспективних методів сортування на базі швидкісних операцій інкремента/декремента дозволить не тільки прискорити процес сортування, але й розширити функціональні можливості класифікатора за рахунок ранжування результатів [20].

3. АСОЦІАТИВНІ РІВНІ ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Одним з найбільш наочних прикладів ефективного застосування асоціативного оброблення даних є інтелектуальні системи керування у робототехніці [21, 22]. Для таких систем керування доцільним є забезпечення таких базових умов [23, 24]:

- апаратна підтримка процедур керування;
- відстеження та класифікація (розпізнавання) поточного стану у реальному часі;
- прийняття рішення у реальному часі.

В результаті за таких умов найбільш прийнятним є використання нейромережних методів [21, 23]. Саме для оброблення сенсорної інформації використовуються такі процедури, як пошук асоціацій між образами, ситуаціями та їх позначеннями, що у певній мірі відповідає інтелектуалізації керування мобільними роботами [21,23,24]. При цьому необхідно відмітити, що для створення інтелектуальних систем керування роботами активно впроваджуються нейронні елементи та їх базові складові на новітніх технологіях [25-27].

Ще одним наочним прикладом використання як нейротехнологій, так і асоціативних операцій можна розглядати принципи функціонування класифікаторів об'єктів [13, 17], які, як правило, задіяні у підсистемах підтримки прийняття рішень [10-12, 28]. Особливо це актуально для процесу медичного діагностування [29,30]. На рис.2 схематично показано, як задіяно методи асоціативного оброблення даних в процесі медичного діагностування.

Для цього випадку як приклад можна навести класичну модель класифікації за лінійними дискримінантними функціями (ЛДФ) у вигляді таких базових співвідношень [29,31,32]:

$$g_i(X) = \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot x_j - w_{io} \cdot x_o, i = \underline{1, m} \quad (4)$$

$$X \in C_k \Leftrightarrow k = \operatorname{argmax}\{g_i(X)\}, k = \underline{1, m} \quad (5)$$

де x_j - j -й елемент n -вимірний вхідного вектора ознак X ; w_{ij} - ваговий коефіцієнт j -го входу i -ої ЛДФ $g_i(X)$; $w_{io} \cdot x_{io}$ - вільний елемент i -ої ЛДФ $g_i(X)$; $C = \{C_1, \dots, C_k\}$ - множина класів; m - кількість класів, w - матриця вагових коефіцієнтів w_{ij} , $w_{io} x_o$ - вільний елемент.

Формувач ЛДФ у структурі класифікатора реалізує функцію (4) в процесі векторно-матричного множення, а максимізатор типу "1 з N" - функцію (5), тобто визначає k -й клас з позначенням виходу y_k за максимальною величиною k -ої ЛДФ $g_k(X)$ серед сформованих m ЛДФ.

Найбільш перспективним з точки зору вдосконалення структурного та функціонального базису класифікатора (рис.3) є максимізатор. Якщо розглядати нейромережний варіант такої структури класифікатора, то функцію формувача ЛДФ може виконувати одношаровий персептрон, а функцію максимізатора - деякі мережі типу MAXNET [4,6], серед яких або нейромережа з від'ємними латеральними зв'язками у нейронів конкурентного шару, або нейромережа зі структурою Feed-Forward MAXNET.

Разом з тим, як для нейромережного, так і для класичного варіантів структури класифікатора одним із способів реалізації функції максимізатора можна задіяти асоціативну операцію сортування одновимірний (векторний) масиву чисел, оскільки в результаті можна визначити максимальний за значенням елемент числового масиву [20].

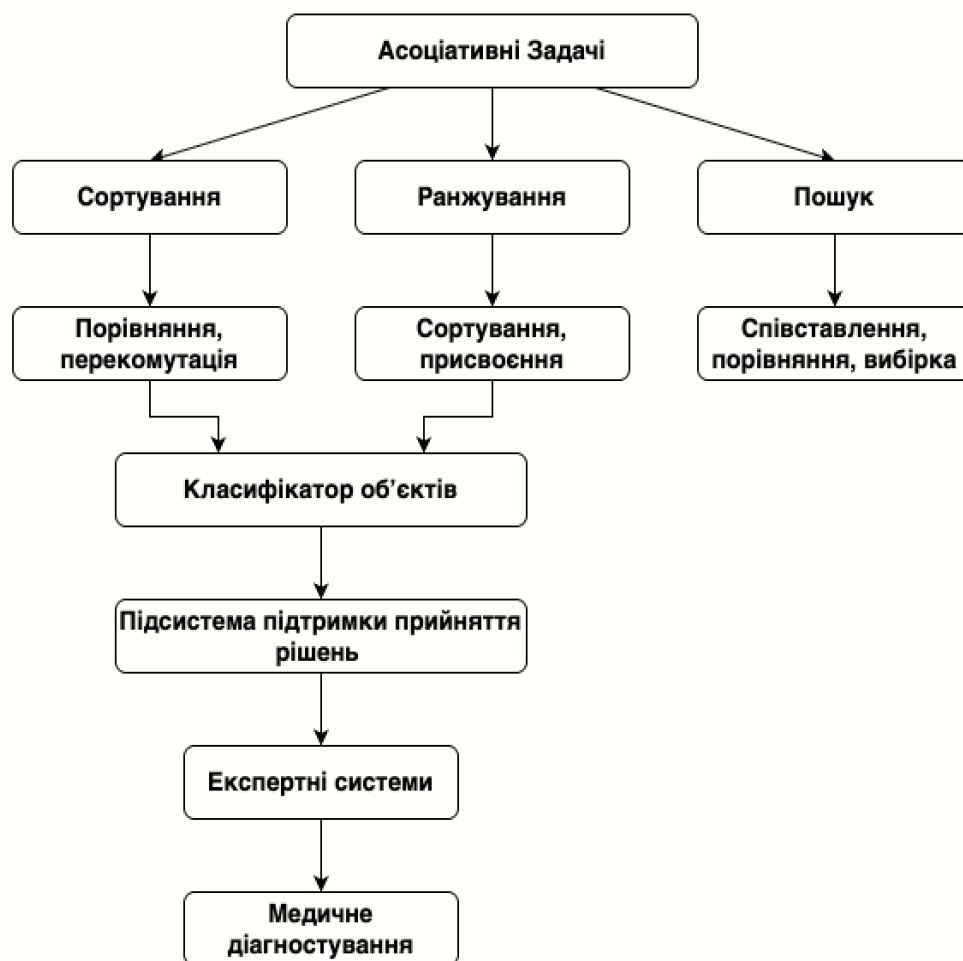


Рисунок 2 – Асоціативні аспекти оброблення даних для медичного діагностування

В результаті базова структура класифікатора об'єктів має вигляд як на рис.3



Рисунок 3 – Базова структура класифікатора об'єктів

За апаратними та часовими витратами в цьому плані інтерес представляє альтернативний метод сортування з використанням швидкісної операції декременту [20]. Це пов'язано з тим, що, по-перше,

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

операція декремента за цим методом виконується в кожному циклі оброблених паралельно для всіх елементів числового масиву до моменту обнулення одного з них. По-друге, цей момент обнулення в подальшому можна використати для формування рангів відповідних елементів із задіянням операції інкремента, починаючи з фіксації рангу “1” для найменшого за значенням елемента масиву [17,20].

По-третє, функції класифікатора в цьому випадку розширюються за рахунок можливості формування рангів для ЛДФ, а отже, і для результатів класифікації, що знаходить широке застосування в процесі прийняття рішень в експертних системах різного призначення. У четверте, застосування парних операцій декремента/інкремента дозволяє їх реалізацію на реверсивних лічильниках [33], що, у свою чергу, підвищує регулярність структури як сортувальника для максимізатора, так і ранжувальника, введеного з метою ранжування результатів класифікації до складу класифікатора [20].

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз найбільш розповсюджених застосувань асоціативних методів оброблення даних, а саме, для інтелектуальних систем керування у робототехніці та для класифікаторів у складі підсистем підтримки прийняття рішень, показав перспективність їх удосконалення та ефективного практичного задіяння.

Як приклад, новий альтернативний метод сортування, зокрема, на базі сумісного використання швидкісних операцій декремента/інкремента забезпечує не тільки прискорення асоціативної операції вибірки максимального числа типу “1 з N”, але й розширення функціональних можливостей засобів, що їх використовують, за рахунок реалізації одночасного ранжування результатів.

Крім того, апаратна реалізація одночасно операцій декремента/інкремента в єдиному обчислювальному процесі забезпечує збільшення регулярності структури відповідних комп’ютерних засобів для інтелектуальних систем різного призначення.

ВИСНОВКИ

1. Існує реальний зв’язок між методами асоціативного оброблення даних і впровадженням нейротехнологій у створення інтелектуальних систем різного призначення. Це стосується, наприклад, засобів у складі бортових систем мобільних роботів, а також підсистем підтримки прийняття рішень для експертних систем.
2. Порівняння математичного опису як процесу асоціативної вибірки даних у відповідній розподіленій пам’яті за змістом, так і процесу розпізнавання у нейромережах класичного типу свідчить про їх аналогічність, що пов’язано з наявністю властивості асоціативності у нейромережах.
3. Наявність асоціативних рівнів оброблення даних у засобах інтелектуальних систем підтверджує ефективність задіяння нейромережних технологій на таких прикладах, як керування динамічними системами у складних умовах, а також розпізнавання об’єктів з ранжуванням результатів класифікації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. R. Sedgewick, Algorithms in C++: Part 1-4. Fundamentals, Data Structures, Sorting, Searching. 3rd ed.. Addison-Wesley, Longman, 1999.
2. J. D. Knuth, The Art of Computer Programming, V.3. Sorting and Searching, 2nd ed. Addison - Wesley Professional, 1998. 800 p.
3. M.T. Jones, AI Application Programming. Charles River Media, 2003.
4. S. Osowski, Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Poland: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013. 490 s.
5. R. Callan, The Essence of Neural Networks. Prentice Hall Europe, NY, 1999. 232c.
6. S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines. Upper Saddle River, 2009.
7. T. Kohonen, Self-Organization and Associative Memory. Springer Berlin Heidelberg, 1989.
8. Е.М. Кукуль, Асоціативні нейроподібні структури. Київ, Україна: Наукова думка, 1990.
9. І.І. Цмоць, Інформаційні технології та спеціалізовані засоби обробки сигналів і зображень в реальному часі. Львів, Україна: Видавництво УАД, 2005. 228 с.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

10. В. Вуйцік, О.З. Готра, та В.В. Григор'єв, Експертні системи. Львів, Україна: Ліга-Прес, 2006. 209 с.
11. Р.Ф. Ситник, Системи прийняття рішень. Київ, Україна: КНЕУ, 2004. 614 с.
12. Г. М. Гнатієнко, та В.Є. Снитюк, Експертні технології прийняття рішень. Київ, Україна: ТОВ "Маклаут", 2008.
13. T. Martynuk, B. Krupikivskyi, L. Kupenshtein, and V. Lukichov, "Neural network models of heteroassociative memory for the classification tasks", *Radioelectronics and Computer Systems*, №1 (102), с. 104-111. 2022. doi:10.32620/reks.2022.2.09.
14. Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, Л. М. Куперштейн, та О. С. Безкрєвний, "Операційно-елементний базис для інтелектуальних систем", *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, №6, с. 197-201. 2019.
15. І.Г. Цмоць, В.М. Теслюк, Ю.В. Опотяк, Р.В. Парцей, та Р.В. Зінько, "Базова архітектура мобільної робототехнічної платформи з інтелектуальною системою управління рухом і захистом передачі даних", *Український журнал інформаційних технологій*, №2, Т.3, с. 74-80. 2021. <https://doi.org/10.23939/ujit2021.02.074>
16. О.Д. Азаров, Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко, Теоретичні та реалізаційні моделі комп'ютерних інтелектуальних систем. Монографія. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2024. 130с.
17. Т.Б. Мартинюк, Б.І. Круківський та О.А. М'якішев, "Особливості моделей нейроподібного класифікатора для розпізнавання об'єктів", *Вісник Вінницького національного політехнічного інституту*, №4(163), с. 53-63. 2022.
18. D. Smith, J. Hall and K. Miyke, "The CAM 2000 Chip Architecture". Rutgers University. [Електронний ресурс], Режим доступу. <https://www.rutgers.edu/pub/technical-reports>.
19. N.F. Kirichenko, A.M. Reznik, & S.P. Shchetenyuk, "Matrix pseudoinversion in the Problem of Design of Associative Memory", *Sybernetic and Systems Analysis*, №33, pp. 308-316. 2001.
20. Т.Б. Мартинюк, та Б.І. Круківський, "Модель паралельного сортувальника для асоціативного процесора", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №5, с. 49-55.2020.
21. А.С. Васюра, Т.Б.Мартинюк, та Л.М. Куперштейн, *Методи та засоби нейроподібної обробки даних для систем керування*. Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 2008. 175с.
22. P. Corke, *Robotic, Vision and Control*. Springer International Publishing. 2017.
23. Arents, & M. Greitans, "Smart industrial Robot Control Trends, Challenges and Opportunities within Manufacturing", *Applies Sciences*, vol.12, issue 2.p.937. 2022.
24. Y. Pategera, "Main strategy for autonomous robotic controller design", *Радіоелектроніка та інформатика*, вип. 4,с. 35-41. 2011.
25. В.Ф. Бордаченко, О.К. Колесницький, та С.А. Василецький, Таймерні нейронні елементи та структури. Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 2004. 126с.
26. Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко, Н.В. Фофанова, та О.М. Наконечний, "Адаптивний суматор для системи керування роботом", *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №2(10), с. 96-104. 2005.
27. V.I. Osinsky, "Information conception of image perceptron at solid-state lighting", *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, V.10, №3, p.30-43.2007.
28. О.В. Нестеренко, Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. Навч. посібник. Київ, Україна: Нац. акад. управління, 2016.
29. О.Г. Аврунін, Є.В. Бодяньський, М.В. Калашник, В.В. Семенець, та В.О. Філатов, Сучасні інтелектуальні технології медичної діагностики. Харків, Україна: ХНУРЕ, 2018.
30. Rangaraj M.Rangayyan, *Biomedical Signal Analysis*. John Wiley & Sons, 2015.
31. J. Brownlee, "Linear Discriminant Analysis for Machine Learning". Available at: <https://machinelearningmastery.com/linear-discriminant-analysis-for-learning>
32. T.B. Martynuk, L.M. Kupershtein, A.V. Medvid, A.V. Kozhemiako, and others, "Application of Discriminants Analysis Methods in Medical Diagnostics", *Optical Fibers and Their Applications, Proc. of SPIE* 8698, 86980, 2012.
33. С.О. Кравчук, та В.О. Шонін, *Основи комп'ютерної політехніки*. Навч. посібник Київ, Україна: ІВЦ "Видавництво Політехніка", 2002. 344с.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

REFERENCES

1. R. Sedgewick, Algorithms in C++: Parts 1-4. Fundamentals, Data Structures, Sorting, Searching. 3rd ed.. Addison-Wesley, Longman, 1999.
2. J.D. Knuth, The Art of Computer Programming, V.3. Sorting and Searching, 2nd ed. Addison - Wesley Professional, 1998. 800 p.
3. M.T. Jones, AI Application Programming. Charles River Media, 2003.
4. S. Osowski, Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Poland: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013. 490 p.
5. R. Callan, The Essence of Neural Networks. Prentice Hall Europe, NY, 1999. 232p.
6. S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines. Upper Saddle River, 2009.
7. T. Kohonen, Self-Organization and Associative Memory. Springer Berlin Heidelberg, 1989.
8. E.M. Kussul, Associative Neuro-Like Structures. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 1990.
9. I.I. Tsmots, Information Technologies and Specialized Means of Signal and Image Processing in Real Time. Lviv, Ukraine: UAD Publishing House, 2005. 228 p.
10. V. Vuytsik, O.Z. Gotra, and V.V. Grigoriev, Expert Systems. Lviv, Ukraine: Liga-Press, 2006. 209 p.
11. R.F. Sytnyk, Decision-Making Systems. Kyiv, Ukraine: KNEU, 2004. 614 p.
12. G.M. Gnatienco, and V.E. Snytyuk, Expert Decision-Making Technologies. Kyiv, Ukraine: Maklout LLC, 2008.
13. T. Martynuk, B. Krupikivskyi, L. Kupenshtein, and V. Lukichov, "Neural network models of heteroassociative memory for the classification tasks", Radioelectronics and Computer Systems, №1 (102), pp. 104-111. 2022. doi:10.32620/reks.2022.2.09.
14. T. B. Martynuk, A. V. Kozhem'yako, L. M. Kupershtein, and O. S. Bezkrevnyi, "Operational-elementary basis for intelligent systems", Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical Sciences, №6, pp. 197-201. 2019.
15. I.G. Tsmots, V.M. Teslyuk, Yu.V. Opotyak, R.V. Partsey, and R.V. Zinko, "Basic architecture of a mobile robotic platform with an intelligent motion control system and data transmission protection", Ukrainian Journal of Information Technologies, No. 2, Vol. 3, pp. 74-80. 2021. <https://doi.org/10.23939/ujit2021.02.074>
16. O.D. Azarov, T.B. Martyniuk, A.V. Kozhem'yako, Theoretical and implementation models of computer intelligent systems. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2024. 130p.
17. T.B. Martyniuk, B.I. Krukivskyi and O.A. Myakishev, "Features of models of a neural-like classifier for object recognition", Bulletin of the Vinnytsia National Polytechnic Institute, No. 4(163), p. 53-63. 2022.
18. D. Smith, J. Hall and K. Miyke, "The CAM 2000 Chip Architecture". Rutgers University. [Electronic resource], Access mode. <https://www.rutgers.edu/pub/technical-reports>.
19. N.F. Kirichenko, A.M. Reznik, & S.P. Shcheteniyuk, "Matrix pseudoinversion in the Problem of Design of Associative Memory", Cybernetic and Systems Analysis, №33, pp. 308-316. 2001.
20. T.B. Martyniuk, and B.I. Krukivskyi, "Model of a parallel sorter for an associative processor", Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, №5, pp. 49-55.2020.
21. A.S. Vasyura, T.B. Martyniuk, and L.M. Kupershtein, Methods and tools for neural-like data processing for control systems. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: UNIVERSUM - Vinnytsia, 2008. 175p.
22. P. Corke, Robotic, Vision and Control. Springer International Publishing, 2017.
23. Arents, & M. Greitans, "Smart industrial Robot Control Trends, Challenges and Opportunities within Manufacturing", Applies Sciences, vol.12, issue 2.p.937. 2022.
24. Y. Pategera, "Main strategy for autonomous robotic controller design", Radioelectronics and Informatics, vol. 4, pp. 35-41. 2011.
25. V.F. Bordachenko, O.K. Kolesnitsky, and S.A. Vasyletsky, Timer neural elements and structures. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: UNIVERSUM - Vinnytsia, 2004. 126p.
26. T.B. Martyniuk, A.V. Kozhem'yako, N.V. Fofanova, and O.M. Nakonechny, "Adaptive adder for a robot control system", Optoelectronic Information and Energy Technologies, No. 2(10), pp. 96-104. 2005.
27. V.I. Osinsky, "Information conception of image perceptron at solid-state lighting", Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, V.10, No. 3, p.30-43.2007.
28. O.V. Nesterenko, Intelligent decision support systems. Textbook. Kyiv, Ukrainka: National Academy of Management, 2016.
29. O.G. Avrunin, E.V. Bodyansky, M.V. Kalashnyk, V.V. Semenets, and V.O. Filatov, Modern intelligent technologies of medical diagnostics. Kharkiv, Ukraine: KhNURE, 2018.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

30. Rangaraj M. Rangayyan, Biomedical Signal Analysis. John Wiley & Sons, 2015.
31. J. Brownlee, "Linear Discriminant Analysis for Machine Learning". Available at: <https://machinelearningmastery.com/linear-discriminant-analysis-for-learning>
32. T.B. Martyniuk, L.M. Kupershtein, A.V. Medvid, A.V. Kozhemiako, and others, "Application of Discriminants Analysis Methods in Medical Diagnostics", Optical Fibers and Their Applications, Proc. of SPIE 8698, 86980, 2012.
33. S.O. Kravchuk, and V.O. Shonin, Fundamentals of Computer Polytechnics. Textbook Kyiv, Ukraine: IVC "Polytechnics Publishing House", 2002. 344p.

Надійшла до редакції 15.05.25 р.

МАРТИНЮК ТЕТЯНА БОРИСІВНА – доктор техн. наук, професор кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com**
КАТАШИНСЬКИЙ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: katashinskydmitry@gmail.com**

T.B. MARTYNIUK, D.O. KATASHYNSKYI

PECULIARITIES OF ASSOCIATIVE DATA PROCESSING IN INTELLIGENT SYSTEMS

Vinnitsia National Technical University