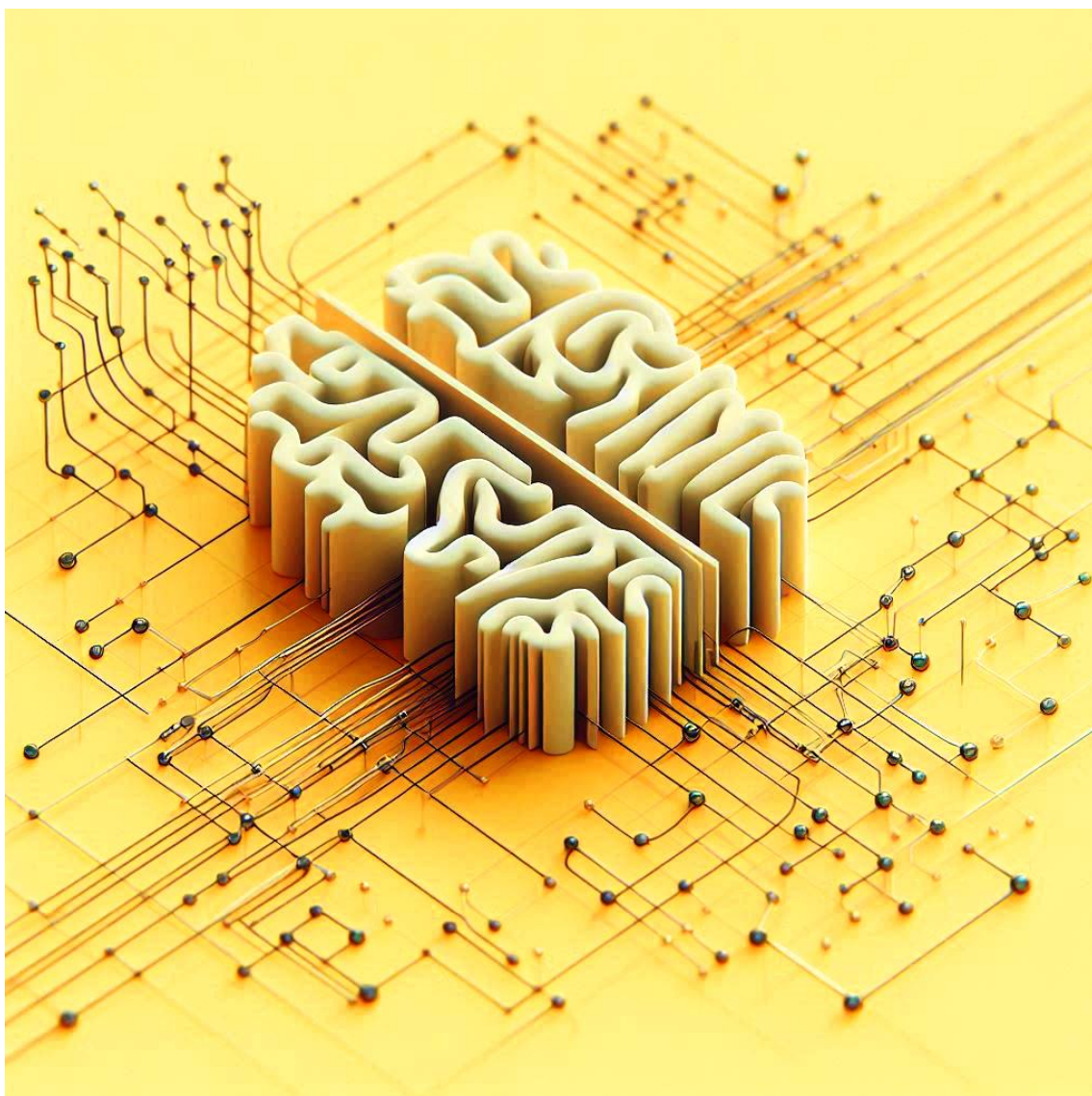


О. Д. АЗАРОВ, Т. Б. МАРТИНЮК, А. В. КОЖЕМ'ЯКО

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА РЕАЛІЗАЦІЙНІ
МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНИХ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. Д. Азаров, Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА РЕАЛІЗАЦІЙНІ МОДЕЛІ
КОМП'ЮТЕРНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ
СИСТЕМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2024

УДК 004.272+004.8

А 35

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 29.11.2022 р.)

Рецензенти:

В. М. Кичак, доктор технічних наук, професор

Л. І. Тимченко, доктор технічних наук, професор

Азаров, О. Д.

А 35 Теоретичні та реалізаційні моделі комп'ютерних інтелектуальних систем : монографія [Електронний ресурс] / О. Д. Азаров, Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко. – Вінниця: ВНТУ, 2024. – (PDF, 130 с.)

ISBN 978-617-8163-20-4

Монографію присвячено тенденціям розвитку сучасних комп'ютерних систем. Основну увагу приділено інтелектуалізації комп'ютерних систем, застосуванню нейромережних технологій. Розглянуто теоретичні та реалізаційні моделі комп'ютерних інтелектуальних систем. Досліджено операційний та структурний базиси мультиоброблення даних.

Для науковців, аспірантів, студентів та фахівців відповідного напрямку.

УДК 004.272+004.8

ISBN 978-617-8163-20-4

© О. Д. Азаров, Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, 2024

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ.....	9
1.1 Напрямки та базові положення нових підходів до створення сучасних комп'ютерних систем.....	9
1. 2 Концепція інтелектуалізації комп'ютерних систем	14
2 ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ.....	18
2.1 Інтелектуальна пам'ять.....	18
2.2 Альтернативний метод оброблення даних	20
2.3 Обґрунтування базових обчислювальних операцій для інтелектуальних систем.....	25
3 РЕАЛІЗАЦІЙНІ МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ.....	31
3.1 Особливості застосування нейротехнологій в інтелектуальних системах	31
3.2 Інтелектуальні системи керування в робототехніці	32
3.3 Інтелектуальні системи захисту інформації.....	36
4 ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ.....	45
4.1 Апаратне моделювання нервових процесів у біомедичних дослідженнях	45
4.2 Базові операційні вузли для обчислювальних засобів інтелектуальних систем.....	47
4.3 Обґрунтування базової моделі нейроподібного елемента.....	49

5 ОПЕРАЦІЙНИЙ ТА СТРУКТУРНИЙ БАЗИС	
МУЛЬТИБРОБЛЕННЯ ДАНИХ	59
5.1 Аналіз методів лінійного перетворення інформації як базису мультитоброблення даних	59
5.2 Формалізований опис алгоритмів мультитоброблення даних	65
5.3 Формалізовані методи синтезу регулярних структур	68
5.4 Ефективність методів та засобів оброблення масивів даних	73
5.5 Особливості оцінювання ефективності паралельно-конвеєрного процесу в обчислювальних засобах	77
6 АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ РЕГУЛЯРНИХ СТРУКТУР ДЛЯ	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ.....	80
6.1 Моделювання регулярних структур на ПЛІС	80
6.2 Реалізація нейрообчислювача на ПЛІС	84
6.3 Рекомендації щодо використання оптоелектронних ІС в інтелектуальних системах	87
ВИСНОВКИ	92
ЛІТЕРАТУРА.....	94
ДОДАТКИ.....	121
ДОДАТОК А Цифрові нейрочипи.....	122
ДОДАТОК Б Класифікація моделей нейронів	126
ДОДАТОК В Основні операції, що входять у сигнатуру САА-М....	128

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АОП	–	алгоритм одиночних присвоювань
АС	–	аналізатор спектра
БЕС	–	біоелектричний сигнал
БОЕ	–	базовий обчислювальний елемент
ВВЛ	–	вертикально випромінючий лазер
ГЗ	–	граф залежностей
ГСП	–	граф потоку сигналів
ДЗ	–	дискретизоване зображення
ДФ	–	дискримінанта функція
ЕОМ	–	електронна обчислювальна машина
ІК	–	інструментальний комплекс
ІС	–	інтегральна схема
КП	–	конвеєрний процесор
ЛЧ	–	логіко-часовий
НВІС	–	надвелика інтегральна схема
НМ	–	нейронна мережа
ОГП	–	оператор групового підсумовування
ОК	–	образний комп'ютер
ОП	–	око-процесор
ООС	–	образна операційна система
ПЗП	–	постійний запам'ятовувальний пристрій
ПЕ	–	процесорний елемент
ПІ	–	паралельно-ієрархічний
ПЛІС	–	програмована логічна інтегральна схема
РІА	–	регулярний ітераційний алгоритм
РІМ	–	регулярна ітераційна матриця
РОС	–	реконфігурована обчислювальна система
РС	–	регулярна схема
РФГ	–	решітчастий функціональний граф
САА	–	система алгоритмічних алгебр
СК	–	схема керування
СОВІ	–	система оброблення візуальної інформації

УКП – узагальнений контурний препарат
ФН – формальний нейрон
ЦОС – цифрове оброблення сигналів
ЦСП – цифровий сигнальний процесор
ШНМ– штучна нейрона мережа
ШПФ– швидке перетворення Фур'є

ВСТУП

На сьогоднішній день значні досягнення в області інформаційних технологій, які пов'язані, в першу чергу, з використанням нейротехнологій, теорії нечітких множин та їх симбіозу, нанотехнологій та інтегральної оптоелектроніки, а також розроблених засад штучного (машинного) інтелекту дозволили впритул підійти до підвищення рівня інтелектуалізації та збільшення продуктивності комп'ютерних систем, тобто до надання їм властивостей мислення і сприйняття, що характерні для людини [1, 2].

При цьому ефективне використання штучних нейромереж для розв'язання складних практичних задач обумовило їх статус як одного з базових архітектурних принципів побудови комп'ютерних систем нового покоління [3-5] з метою створення адаптивних еволюціонуючих систем, зорієнтованих на вирішення задач інтелектуального рівня. Повноцінними прикладами таких систем на сьогоднішній час можна вважати інтелектуальні системи, області застосування яких охоплюють всі сфери діяльності людини [1-6]: медицину, освіту, фінансову діяльність, наукові і космічні дослідження, виробництво, побут тощо. Серед важливих прикладних задач, що вирішуються інтелектуальними системами, варто відзначити ефективне керування дистанційними об'єктами, розпізнавання зорових та мовленнєвих образів, інтелектуалізацію систем ідентифікації, підвищення ефективності систем захисту інформації в комп'ютерних та телекомунікаційних мережах, медичне експрес-діагностування.

Таким чином, актуальним є створення комп'ютерних систем з нетрадиційною архітектурою, здатних обробляти, аналізувати та розпізнавати символічну інформацію, що властиве для систем штучного інтелекту, з продуктивністю не менше, ніж у сучасних комп'ютерних систем.

Отже, для побудови ефективних архітектур обчислювальних засобів для інтелектуальних систем необхідною умовою є використання таких базових принципів, як паралелізм оброблення, локальна зв'язаність обчислень, програмованість та регулярність структури, які відповідають задачі адекватного відображення

просторово-часової алгоритмічної структури паралельних обчислювальних процесів на архітектуру паралельних обчислювачів. Такий підхід забезпечується поєднанням принципів конвеєризації, векторної та матричної програмно-апаратної та апаратної організації обчислень на базі новітніх розробок в області нанотехнологій та інтегральної оптоелектроніки.

У зв'язку з цим треба відзначити, що значний науковий вклад в розвиток методів та засобів з розпізнавання сигналів та зображень внесли такі вітчизняні вчені, як Є. П. Путятін, Б. П. Русин, Р. А. Воробель, С. Г. Антошук, М. І. Шлезінгер, І. Б. Сироджа. Серед вітчизняних вчених, що сприяли значному розвитку нейромережових технологій, необхідно в першу чергу відмітити В. М. Глушкова, М. М. Амосова, І. Г. Івахненка, В. В. Грицика, О. М. Різника, А. І. Шевченка, Р. О. Ткаченка, В. П. Кожем'яка, Є. В. Бодянського, О. Г. Руденка, Л. І. Тимченка.

В даній монографії подано аналіз тенденцій розвитку сучасних комп'ютерних систем з акцентом на їх інтелектуалізацію, розглянуто теоретичні та реалізаційні моделі комп'ютерних інтелектуальних систем. Особливу увагу приділено застосуванню нейромережових технологій в інтелектуальних системах. Крім того, розглянуто операційний та структурний базис мультиоброблення даних, а також аспекти реалізації регулярних структур для інтелектуальних систем.

Автори висловлюють щире подяку рецензентам проф. В. М. Кичаку та проф. Л. І. Тимченку, доброзичливе ставлення та поради яких сприяли покращенню змісту та структури монографії.

1 АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

1.1 Напрямки та базові положення нових підходів до створення сучасних комп'ютерних систем

Прогрес у розвитку і вдосконаленні сучасних комп'ютерів і комп'ютерних систем пов'язаний, в першу чергу, з необхідністю їх переорієнтації на розв'язання задач, що потребують оброблення в реальному часі значних об'ємів взаємопов'язаної неоднорідної інформації [6, 7], а по-друге, зумовлений успіхами в області нанотехнологій та їх широким застосуванням [8-11]. Забезпечення високого рівня паралелізму при обробленні великих об'ємів інформації, яка відрізняється за формою і способом подання (візуальна, аудіо-, телеінформація, біосигнали тощо), є необхідною умовою при розв'язанні таких важливих задач, як розпізнавання, ідентифікація, розуміння сенсу, побудова логічних ланцюжків, моделювання зовнішніх середовищ, створення гіпотез, розробка стратегій поведінки [5-7]. Отже, перспективним напрямком розвитку обчислювальної техніки на сьогоднішньому його етапі є створення комп'ютерних систем, які використовують принципи, аналогічні принципам оброблення інформації людиною, тобто принципи, що відповідають його взаємодії із зовнішнім середовищем [6, 8, 12-14].

Тому перспективним у найближчому майбутньому вважається вдосконалення та інтенсивне впровадження у практичних застосуваннях нейротехнологій [15-20], а також їх симбіоз з елементами нечітких множин у вигляді гібридних нейросистем [21, 22]. Такі штучні нейронні мережі (ШНМ) набули статус одного з базових архітектурних принципів побудови ЕОМ шостого покоління, тобто створення адаптивної еволюціонуючої ЕОМ [1-5]. З огляду сучасних публікацій до основних перспективних напрямків розвитку нейроінформаційних технологій можна віднести: оброблення, аналіз і розпізнавання сигналів і зображень, нейромережні експертні системи,

СУБД з використанням нейромережних алгоритмів, управління динамічними системами, фінансовою діяльністю тощо [1-5, 20-22].

Отже, головним об'єднуючим фактором усіх сучасних напрямків у розвитку комп'ютерних систем є їх інтелектуалізація, надання їм властивостей мислення і сприйняття людини [23-30]. З огляду на це головними особливостями ШНМ, які дозволяють у певній мірі імітувати властивості біологічних нейромереж, необхідно визначити: паралелізм оброблення інформації, здатність до навчання, асоціативність, здатність до автоматичної класифікації, надійність [31-34]. Разом з тим, необхідно відзначити, що жодна з існуючих моделей ШНМ, що призначені для розв'язання задач з області розпізнавання образів, не використовує механізмів біологічних нейромереж [23, 24].

У зв'язку з цим, актуальним є створення комп'ютерних систем з нетрадиційною архітектурою, що дозволить обробляти і розпізнавати символічну інформацію, а також виконувати інші асоціативно-логічні операції, що властиві системам штучного інтелекту, з ефективністю, що характерна для виконання обчислювальних операцій сучасними комп'ютерними системами [35, 36]. Звідси випливає, що комп'ютери нового покоління повинні будуватись на множині обчислювачів, що організовані у складну мережу, аналогом якої є нейромережі мозку людини [1-5]. При цьому можливим є дотримання аналогічних до нейромереж умов, а саме обчислювальні елементи не обов'язково повинні бути швидкісними, але мережа повинна мати змінну структуру, функціонування якої залежить від структури вхідної інформації [29, 35].

Отже, важливими напрямками сучасного розвитку комп'ютерних систем є інтелектуалізація, висока продуктивність та досягнення реального часу спрацювання при вирішенні сучасних прикладних задач з необхідністю оброблення значних об'ємів інформації.

Процес розвитку ЕОМ супроводжується вирішенням проблеми продуктивності у двох напрямках: вдосконаленням інтегральної технології та розпаралелюванням процесу оброблення інформації [36]. Разом з тим, існує протиріччя між зростаючим рівнем інтегральних технологій елементної бази і низьким рівнем інтеграції обчислювального процесу [36, 37].

Більше того, неможливо забезпечити високі темпи зростання обчислювальної потужності тільки за рахунок вдосконалення інтегральної технології з виходом на глибокосубмікронні напівпровідникові технології [35-37], оскільки продуктивність комп'ютерних систем і компонентів не знаходиться у прямо пропорційній залежності від кількості транзисторів на кристалі [36, 38]. Тут необхідні нові архітектурно-структурні та схемотехнічні рішення, а також нові обчислювальні методи, що забезпечуть ефективне використання кристалів з 10-100 млн. транзисторів з виходом на петафлопсну (10^{15} операцій з плаваючою комою в сек.) продуктивність комп'ютерних систем [35, 36].

З іншого боку, ефективність розпаралелювання обчислень визначається у багатьох випадках не кількістю паралельно функціонуючих процесорів, а методом ефективної організації обчислювального процесу, архітектурою пам'яті і параметрами комунікаційного середовища [36].

На даний час визначено декілька базових принципів побудови високопродуктивних обчислювачів. Це, по-перше, паралелізм і конвеєрність обчислень, по-друге, ієрархічна структура пам'яті, по-третє, ефективні комунікаційні мережі [39, 40]. При цьому необхідно реалізувати по можливості максимально принцип адекватності архітектури до характеру обчислювальних задач [36, 38, 39]. До таких архітектур відносять векторні, матричні, суперскалярні, керовані потоком даних, інтелектуальну пам'ять з прямим доступом тощо [36, 38], на базі яких будуються такі суперсистеми, як векторні, мультипроцесорні системи, системи з масовим паралелізмом, розподілені обчислювальні системи тощо [38, 39].

У публікації [36] визначено декілька напрямків зі створення нового підходу до організації обчислювального процесу:

- а) високий рівень розпаралелювання на всіх рівнях оброблення даних;
- б) конвеєрний принцип оброблення даних;
- в) організація внутрішньої мови високого рівня з апаратною підтримкою;

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз теоретичних та реалізаційних моделей побудови обчислювальних засобів для інтелектуальних систем показав, що актуальним напрямком є створення комп'ютерних систем спеціального призначення з нетрадиційною архітектурою, здатних обробляти, аналізувати та розпізнавати символічну інформацію з продуктивністю сучасних комп'ютерних систем. При цьому для побудови ефективних архітектур таких обчислювальних засобів необхідною умовою є розроблення нових паралельних методів оброблення одно- та двовимірних масивів даних, що забезпечують локальну зв'язаність та багатофункціональність обчислень, програмованість та регулярність структури з адекватним відображенням паралельних процесів на архітектуру паралельних обчислювачів.

Результати огляду методів оброблення та аналізу сигналів і зображень свідчать про ефективність спектральних методів на базі ортогональних перетворень з переходом в область трансформант. Оскільки на практиці у більшості випадків використовують сигнали прямокутної форми, то інтерес представляють дискретні перетворення, а саме, унітарні, які ефективно використовуються при ущільненні, кодуванні, фільтрації, архівації, передачі та розпізнаванні інформації.

Аналіз відомих методів синтезу регулярних структур, зокрема паралельно-конвеєрних архітектур, показав ефективність формалізованих методів відображення регулярних ітераційних алгоритмів на регулярні (систолічні) масиви. У цьому напрямі інтерес представляє метод С. Куна, який має формалізований і наочний апарат синтезу систолічних масивів, а також застосування базису систем алгоритмічних алгебр (САА) В.М. Глушкова для формалізованого представлення задач символічного мультиоброблення даних.

Відомо, що ефективність сучасної багатопроесорної техніки залежить від вдалого поєднання таких факторів, як розпаралелювання прикладних задач та максимальне використання апаратури, тобто коли архітектура паралельних обчислювачів адекватна класу задач, що реалізуються. Тому при виборі оптимального методу оцінювання ефективності алгоритмів розпаралелювання обчислювальних задач

особливе значення має врахування характерного для задачі паралелізму, а також запропонованої для її реалізації структури. Таким чином, у даному контексті найбільш прийнятними через коректність і наочність можна вважати коефіцієнт узгодженості φ_A та методику розрахунку ефективності для конвеєрних процесорів.

Аналіз результатів моделювання структур конвеєрних і матричних процесорів на ПЛІС показав доцільність їх реалізації як співпроцесорів і нейроприскорювачів у вигляді мікросхем ПЛІС, що при апаратній реалізації обчислювальних операцій значно скорочує час оброблення, а отже, забезпечує ефективне використання запропонованих структур для оброблення та аналізу сигналів і зображень та розпізнавання образів у реальному часі, де необхідний час відгуку повинен складати мілісекунди і менше.

З урахуванням зростаючих вимог до паралелізму оброблення даних, необхідності створення масових міжз'єднань і використання великих об'ємів пам'яті немає альтернативи перспективним розробкам оптоелектронних засобів, які поєднують переваги оптики з можливостями електроніки і пов'язані з подальшим розвитком відомих моделей, які зорієнтовані на створення око-процесорної системи з розвинутими функціональними та інтелектуальними властивостями

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Н. Б. Шаховська, Р. М. Камінський, та О. Б. Вовк, *Системи штучного інтелекту*. Львів, Україна: Видавництво Львівської політехніки, 2018.
- [2] S. S Haykin, *Neural networks and learning machines*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education. 2009.
- [3] О. Г. Руденко, та Є. В. Бодянський, *Штучні нейронні мережі. Навч. посібник*. Харків, Україна: ТОВ «Компанія СМІТ» 2006.
- [4] П. В. Тимошук, *Штучні нейронні мережі. Навч. посібник*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011.
- [5] S. Osowski, *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013.
- [6] О. В. Нестеренко, *Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. Навч. посіб.* Київ, Україна: Нац. акад. управління, 2016.
- [7] В. П. Кожем'яко, та А. В. Кожем'яко, «Концепції створення образного комп'ютера око-процесорного типу,» *Искусственный интеллект*, №3, с. 36-45. 2008.
- [8] В. П. Кожем'яко, Ю. Ф. Кутаєв, С. В. Свечніков, Л. І. Тимченко, та А. А. Яровий, *Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003.
- [9] V. I. Osinsky, «Information conception of image perceptron at solid-state lighting,» *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, V. 10, № 3, pp. 30-43. 2007.
- [10] В. И. Шмойлов, Б. П. Русын, и М. Н. Кузьо, «Пульсирующие информационные решётки с матричной коммутацией,» *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 1-2(5-6), с. 55-73, 2003.
- [11] В. І. Морозов, та І. В. Морозов, «Моделювання сигналів в нанопристроях з фрактальною структурою,» на *Другій міжнар. наук. конф. Теорія та методи обробки сигналів*, Київ, 2008, с. 92-93.
- [12] М. А. Попов, та В. В. Бескровный, «Нейротехническая модель системы для автоматической классификации объектов,»

Нейросетевые технологии и нейрокомпьютеры: сб. науч. тр. НАН Украины. Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, Київ, 1994, с. 71-78.

[13] P. Corke, *Robotics, Vision and Control*. Springer International Publishing, 2017.

[14] М. Попов, та В. Безкровний, «Організація функціонального просторового середовища для вирішення завдань розпізнавання об'єктів,» на *Другій Всеукр. міжнар. конф. Обробка сигналів і зображень та розпізнавання образів (УкрОБРАЗ'94)*, Київ, 1994, с. 109-113.

[15] А. С. Васюра, Т. Б. Мартинюк, та Л. М. Куперштейн, *Методи та засоби нейроподібної обробки даних для систем керування*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008.

[16] R. D. Wasserman, *Neural computing: theory and practice*. Van Nostrand Reinhold. New York, 1989.

[17] R. Hecht-Nielsen, *Neurocomputing*. Wokingham: Addison-Wesley, 1990.

[18] В. П. Кожемяко, Т. Б. Мартинюк, и Мохамед Салем Нассер, «Нейросети и ассоциативная обработка массива данных,» *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2(14), с. 72-79. 2007.

[19] G. Zheng, J. Terry, P. Belgrader, et al., “Massively parallel digital transcriptional profiling of single cells,” *Nature Communication*, 8, 14049. 2017.

[20] R. J. T. Morris, & B. Samadi, “Neural network control of communications systems”. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5, Issue 4, pp. 639–650. 1994.

[21] Л. С. Ямпольський, *Нейротехнології та нейросистеми*. Київ, Україна: Дорадо-Друк, 2015.

[22] D. V. Fogel, D. Liu, & J. M. Keller, *Fundamentals of Computational Intelligence*. Wiley, 2016.

[23] А. О. Гольцев, *Нейронные сети с ансамблевой организацией*. Київ, Україна : Наук. думка, 2005.

[24] В. П. Кожем'яко, “Погляд на природу штучного інтелекту,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 26-30, 1997.

[25] Z. L. Rabinovich, Thought mechanisms and intelligent computers. *Cybernetics and Systems Analysis*, №29, pp. 358–366. 1993.

- [26] Z. L. Rabinovich, "Machine intelligence paradigm and its development," *Cybernetics and Systems Analysis*, №31, pp. 297–305. 1995.
- [27] Z. L. Rabinovich, "Natural Thinking Mechanisms and Computer Intelligence," *Cybernetics and Systems Analysis*, №39, pp. 695–700. 2003.
- [28] Y. V. Kapitonova, V. I. Skurikhin, "Some trends in development and problems of artificial intelligence," *Cybernetics and Systems Analysis*, №35, pp. 40–46. 1999.
- [29] В. П. Кожем'яко, Л. І. Тимченко, та А. А. Яровий, *Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціальних моделей образного комп'ютера*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
- [30] В. П. Кожем'яко, та А. А. Яровий, "Наукова концепція образного відео-комп'ютера око-процесорного типу в контексті сучасної методології штучного інтелекту," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2, с. 84-89, 2001.
- [31] Е. М. Куссуль, *Асоціативні нейроподібні структури*. Київ, Україна: Наукова думка, 1990.
- [32] D. H. Hubel, *Eye, Brain, and Vision, 2nd edition*. W. H. Freeman, 1995.
- [33] Н. М. Амосова, *Нейрокомпьютеры и интеллектуальные работы*. Київ, Україна: Наук. думка, 1994.
- [34] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, та Л. М. Куперштейн, "Аналіз тенденцій розвитку сучасних комп'ютерних систем," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2(32), с. 5-13. 2016.
- [35] В. А. Ященко, "Компьютерные технологии в новом тысячелетии," *Математичні машини і системи*, № 2,3, с. 3-15. 2000.
- [36] А. В. Палагин, и Ю. С. Яковлев, *Системная интеграция средств компьютерной техники*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
- [37] В. А. Настасенко, та Е. В. Настасенко, "Основы концепции определения предельного быстродействия компьютерных систем искусственного интеллекта," *Штучний інтелект*, № 4, с. 25-30. 2008.
- [38] Ю. И. Митропольский, "Суперкомпьютеры и микропроцессоры. Приоритеты исследований и разработок," *Электроника: Наука. Технология. Бизнес*, № 2, с. 18-21. 2000.

- [39] V. V. Voevodin, *Mathematical Foundations of Parallel Computing*. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1992.
- [40] P. Tariov, T. Maqa, & E. Melnic, "Algorithmic Models for Supervectoring Calculation in Solving Base DSP Problems," *Advanced Computer Systems*, pp. 251–263. Springer US. 2002.
- [41] U. Lauther, P. Duzy, & P. Michel, *The Synthesis Approach to Digital System Design*. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [42] І. Г. Цмоць, *Інформаційні технології та спеціалізовані засоби обробки сигналів і зображень у реальному часі*. Львів, Україна: Видавництво УАД, 2005.
- [43] J. Sanders, E. Kandrot, *CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming*. Addison-Wesley Professional, 2010.
- [44] P. Andon, A. Doroshenko, & K. Zhereb, "Programming high-performance parallel computations: formal models and graphics processing units," *Cybernetics and Systems Analysis*, New York, vol. 47, Iss. 4, pp. 659-668. 2011.
- [45] В. А. Колбасин, «Использование технологии CUDA для ускорения обработки потока данных искусственными нейронными сетями,» на *I Міжнар. наук.-техн. конф., Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 97.
- [46] В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, та А. В. Кожем'яко, "Класифікаційна модель створення прототипу образного комп'ютера," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2(12), с. 129-141. 2006.
- [47] Ye. V. Bodyanskii, N. Ye. Kulishova, & O. G. Rudenko, "A Generalized Algorithm of Training a Formal Neuron," *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 38, Issue 5, pp. 790–796. 2002.
- [48] V. Gavrilov, V. V. Gubarev, Jo KangHyun, & H. H. Lee, "Hybrid neural-based control system for mobile robot," in *Proceedings The 8th International Symposium on Science and Technology*, KORUS 2004. IEEE, 2004, pp. 3-13.
- [49] G. O'hare, & N. Jennings, *Foundations of distributed artificial intelligence*. John Wiley & Sons, 1996.
- [50] В. В. Поліновський, та А. М. Короленко, «Використання нейроподібних зростаючих мереж для моделювання "нервової діяльності" в інтелектуальних системах,» на *Междунар. науч.-техн.*

конф., *Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы (ИИ-2011)*, Донецк, 2011, с. 306-310.

[51] А. М. Скаковська, та І. В. Маслова, «Інтелектуальна система швидкої ідентифікації людини за зображенням ока,» на *I Міжнар. наук.-техн. конф., Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 24.

[52] А. Ю. Шелестов, С. В. Скакун, та О. М. Кравченко, «Геоінформаційна інтелектуальна система моніторингу стану сільськогосподарських культур,» на *I Міжнар. наук.-техн. конф., Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 263.

[53] А. А. Суранова, та К. М. Любченко, «Система інтелектуального управління трафіком у комп'ютерних мережах» на *I Міжнар. наук.-техн. конф., Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 380.

[54] L. Rutkowski, *Computational Intelligence. Methods and Techniques*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

[55] M. Khalid, S. Omatu and R. Yusof, "Self learning process control systems by neural networks," in *Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control*, Tucson, AZ, USA, pp. 889-894.1992.

[56] J. Arents, & M. Greitans, "Smart Industrial Robot Control Trends, Challenges and Opportunities within Manufacturing," *Applied Sciences*, vol. 12, Issue 2, p. 937. 2022.

[57] О. Г. Аврунін, Є. В. Бодянський, М. В. Калашник, В. В. Семенець, та В. О. Філатов, *Сучасні інтелектуальні технології функціональної медичної діагностики*. Харків, Україна: ХНУРЕ, 2018.

[58] T. Kohonen, *Associative Memory*. Springer Berlin Heidelberg, 1977.

[59] T. Kohonen, *Self-Organization and Associative Memory*. Springer Berlin Heidelberg, 1989.

[60] C. Foster, *Content Addressable Parallel Processors*. N.Y.: John Wiley & Sons, 1976.

[61] K. J. Thurber, *Large Scale Computer Architecture Parallel and Associative Processors*. NJ: Hayden Book Company, 1976.

[62] В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, Г. Л. Лисенко, Л. М. Каньоса, та В. В. Ковалевський, «Оптоелектронний асоціативний

процесор,» *Патент України G06 F7/06, №33135МПК (1998), 15.02.2001.*

[63] J. S. Hall, S. Levy, D. E. Smith, & K. M. Miyake, *Content addressable memory project*. NASA-CR-190202, 1992.

[64] D. Smith, J. Hall, K. Miyake, *The CAM 2000 Chip Architecture*. Rutgers University [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.cs.rugers.edu/pub/technical-reports>.

[65] X. Glorot, Y. Bengio, "Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks," in *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, in Proceedings of Machine Learning Research, №9. pp. 249-256. 2010.

[66] N. F. Kirichenko, A. M. Reznik, & S. P. Shchetenyuk, "Matrix Pseudoinversion in the Problem of Design of Associative Memory," *Cybernetics and Systems Analysis*, №37, pp. 308–316. 2001.

[67] F. Dias, A. Antunes, & A. Mota, "Artificial neural networks: a review of commercial hardware," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 17, Issue 8, pp. 945–952. 2004.

[68] В. П. Кожемяко, *Оптоэлектронные логико-временные информационно-вычислительные среды*. Тбилиси, Грузия: Мецниереба, 1984.

[69] В. П. Кожемяко, Ю. А. Сторожук, и Ю. Ф. Кутаев, «Оптоэлектронный параллелизм в образной обработке информации с выделением признаков,» на 2-й Всесоюзн. науч.-техн. конф. по функциональной оптоэлектронике *Оптоэлектронные методы и средства обработки изображений*, Винница-Тбилиси, 1987, с. 6-29.

[70] Т. К. Вінцюк, "Образный комп'ютер: концепції, методологія, підходи," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 1, 2001. с. 125-138.

[71] Т. К. Вінцюк, «Генеративна модель образного комп'ютера,» на 6-й Всеукр. міжнар. конф. *Обробка сигналів і зображень та розпізнавання образів (УкрОБРАЗ'2002)*, Київ, 2002, с. 7-14.

[72] В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, О. І. Суприган, та Д. І. Клімкіна, *Квантові перетворювачі на оптоелектронних логіко-часових середовищах для око-процесорної обробки зображень*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007.

[73] В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, Д. І. Клімкіна, та Мутасім Абу-Шабан, "Аналізатор інформації для око-процесорної обробки сигналів та зображень," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №1(9), с. 64-70, 2005.

[74] В. П. Кожем'яко, Л. І. Тимченко, Ю. Ф. Кутаєв, та І. Д. Івасюк, *Вступ в алгоритмічну теорію ієрархії і паралелізму нейроподібних обчислювальних середовищ та її застосування до перетворення зображень. Ч. 2. Основи теорії пірамідально-сітьового перетворення зображень*. Київ, Україна: ІСДО, 1994.

[75] А. В. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, А. О. Кириаченко, і С. П. Любич, «Варіанти реалізації оптичних каналів обробки в оптоелектронних процесорах для розпізнавання зображень,» *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №1(27), с. 183–192. 2014.

[76] В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, О. І. Понура, Рами Р. Хамди, А. В. Кожем'яко, та О. В. Кожем'яко, «Спосіб розпізнавання зображень з око-процесорним виділенням визначників та пристрій для його здійснення,» *Патент України, G06G7/14, G06K9/00 №52616МПК*, 15.01.2003.

[77] V. Kozhemiako, T. Martyniuk, and O. Kozhemiako, "Vector-matrix conversions for parallel information processing in logic-time base,» in *Selected Papers from the International Conference on Optoelectronic Information Technologies, Proceeding of SPIE*, vol. 4425 (2001), pp. 70-75.

[78] Т. Б. Мартинюк, М. М Аль-Хіярі, та С. А. Василецький, "Функційна повнота логічно-часового принципу зображення інформації," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 58-63. 2003.

[79] Т. Б. Мартинюк, О. М. Тарасова, та М. М. Аль-Хіярі, "Особливості логіко-часового зображення числової інформації," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 72-76. 2000.

[80] В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко, Т. В. Головань, Н. Е. Фурдяк, и Т.Б. Мартынюк, «Способ параллельного сложения длительностей группы временных интервалов,» *МКИ⁵ G06G7/14, № 1119035*, 15.10.84.

[81] С. В. Свечников, В. П. Кожемяко, и Л. И. Тимченко, *Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа*. Київ, Україна: Наук. думка, 1987.

[82] В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко, Г. Л. Лысенко, и Ю. Ф. Кутаев, *Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники. Учеб. пособие.* Київ, Україна: УМК ВО, 1990.

[83] В. П. Кожемяко, О. Г. Натрошвили, Т. Б. Мартинюк, и Л. Ш. Имнайшвили, *Оптоэлектронная схемотехника. Учеб. пособие.* Київ, Україна: УМК ВО, 1988.

[84] W. K. Pratt, *Digital Image Processing.* Wiley, 2006.

[85] L. Tymchenko, J. Skorukova, J. Kutaev, S. Markov, T. Martyniuk, and J. Halchenko, "Method Spatial-Connected Segmentation of Images," на *Третій Всеукр. міжнар. конф., Обробка сигналів і зображень та розпізнавання образів (УкрОБРАЗ'96),* Київ, 1996, с. 224-225.

[86] Т. Б. Мартинюк, та А. В. Кожем'яко, *Системні структури для багатооперандної обробки векторних даних.* Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008.

[87] Т. Б. Мартинюк, С. В. Богомолов, С. М. Фацілін, та Є. С. Генеральницький, "Аналіз зображень в оптоелектронній системі з кореляційною матрицею," *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3(46), с. 39-46. 2019.

[88] D. E. Dudgeon, and R. M. Mersereau, *Multidimensional digital signal processing.* Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall. 1984.

[89] R. E. Blahut, *Fast algorithms for digital signal processing.* Addison-Wesley Pub. Co., 1985.

[90] James M. Ortega *Introduction to Parallel and Vector Solution of Linear Systems.* Springer Science & Business Media, 1988.

[91] Т. Б. Мартинюк, Н. О. Денисюк, та Т. Ю. Позднякова, "Аналіз операційного базису для нейромережових інтелектуальних систем," *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2(33), с. 83-87. 2015.

[92] James D. Broesch, *Digital Signal Processing.* Elsevier, 2009.

[93] В. Н. Крылов, С. Г. Антошук, и А. А. Бодалевский, «Ранговая обработка двумерных изображений в пространстве оценок и решений,» *Труды Одес. политехн. ун-та*, Вып. 2. Одесса, с. 105-108. 1998.

[94] О. М. Різник, «Потокова організація нейрообчислень в програмних нейрокомп'ютерах,» на *3-й українській конф. з*

автоматичного керування «Автоматика-96,» Севастополь, 1996, с. 205.

[95] О. М. Різник, «Нейрокомп'ютери,» *Світосгляд*, № 4, с. 8-13. 2010.

[96] Xiao X. and S. J. Ben Yoo, "Scalable and Compact 3D Tensorized Photonic Neural Networks," in *2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, San Francisco, CA, USA, 2021, pp. 1-3.

[97] K. Fu, Ed., *VLSI for Pattern Recognition and Image Processing*. Springer Berlin Heidelberg, 1984.

[98] S. Y. Kung, & H. J. Whitehouse, *VLSI and Modern Signal Processing*. Prentice-Hall, 1985.

[99] Г. Л. Трунов, и А. Г. Коваленко, "Параллельно-конвейерная реализация задачи умножения матрицы на поток векторов на реконфигурируемых вычислительных системах," *Искусственный интеллект*, № 3, с. 742-749. 2008.

[100] Jien-Chung Lo, *Modern digital designs with EDA, VHDL and FPGA*. Terasic Inc., 2015.

[101] Д. В. Гаврілов, та О. В. Осадчук, *Основи комп'ютерного проектування та моделювання РЕА, ч.1*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.

[102] Zhuo L. and V. K. Prasanna, "Scalable and modular algorithms for floatingpoint matrix multiplication on FPGAs," *18th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2004.

[103] Э. И. Зианбетов, В. П. Малахов, и В. С. Ситников «Исследование специализированных структур цифровой обработки сигналов в составе ПЛИС серии Virtex,» на *Девятой междунар. науч.-практ. конф. Современные информационные и электронные технологии*, Одесса, 2008, с. 133.

[104] В. Н. Малиновский, Ред., *Справочник по цифровой вычислительной технике*. Київ, Україна: Техника. 1980.

[105] Т. Б. Мартинюк, *Рекурсивні алгоритми багатооперандної обробки інформації*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000.

[106] В. П. Гамаюн, "О развитии многооперандных вычислительных структур," *Управляющие системы и машины*, № 4, с. 31-33. 1990.

[107] В. П. Гамаюн, "Организация макрооператорной обработки в многооперандных вычислительных структурах," *Управляющие системы и машины*, № 6, с. 17-25. 1995.

[108] В. П. Гамаюн, "Способ ускоренного преобразования многорядного кода в однорядный," *Управляющие системы и машины*, № 4/5, с. 10-14. 1995.

[109] М. Шлезингер, и В. Главач, *Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию*. Київ, Україна, Наук. думка, 2004.

[110] Dumas, T., Galpin, F., & Bordes, and P. Iterative, "Training of Neural Networks for Intra Prediction," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 30, pp. 697–711. 2021.

[111] Г. Ю. Щербакова, В. Н. Крылов, и О. В. Логвинов «Нейросетевая технология диагностики полупроводниковых приборов,» на *I Міжнар. наук.-техн. конф., Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 266-267.

[112] Larry R. Medsker, *Hybrid intelligent systems*. Springer Science & Business Media, 2012.

[113] A. Thayse, J.-L. Binot, *From natural language processing to logic for expert systems: a logic based approach to artificial intelligence*. Binot, 1991.

[114] Rangaraj M. Rangayyan, *Biomedical Signal Analysis*. John Wiley & Sons, 2015.

[115] В. Г. Абакумов, В. Н. Крылов, и С. Г. Антощук, "Автоматизированное распознавание при обработке биомедицинских изображений," *Электроника и связь*, № 15, с. 124-127. 2002.

[116] Т. Б. Мартинюк, Л. И. Тимченко, и Л. М. Куперштейн, "Аппаратная реализация модели формального нейрона," *Электронное моделирование*, т. 32, № 4, с. 35-47. 2010.

[117] Л. П. Рибак, "Дослідження можливості виникнення автоколивальних процесів в структурній схемі моделі нейрона з пороговою функцією активації та розробка конструкції моделі з метою створення конструкції медичного інтелектуального наноробота," *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 189-193. 2004.

[118] Т. Б. Мартинюк, А. Г. Буда, А. В. Кожем'яко, та Л. М. Куперштейн, "Особенности интеллектуализации в робототехнике та

системах захисту інформації,” *Вісник Хмельницького національного університету*, № 1, с. 154-157. 2020.

[119] Fernández-Caballero, & J. M. Ferrández, “Biologically inspired vision systems in robotics.” In *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 14, Issue 6, p. 172988141774594. SAGE Publications, 2017.

[120] К. К. Кадомский, и А. А. Каргин, «Концептуальная модель системы управления мобильным роботом,» на *Міжнар. наук.-практ. конф., Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, Вінниця, 2010, с. 337-338.

[121] Н. Brahmi, В. Ammar, & А. М. Alimi, “Intelligent path planning algorithm for autonomous robot based on recurrent neural networks,” in *International Conference on Advanced Logistics and Transport. 2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, IEEE, 2013.

[122] В. Э. Прукс, и А. Э. Прукс, «Система управления мобильного робота на основе технической нервной системы со зрением,» на *I Міжнар. наук.-техн. конф., Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 229.

[123] Э. Д. Аверьян, "Ассоциативная нейронная сеть СМАС. Ч. 1. Структура, объём памяти, обучение и базисные функции,” *Информационные технологии*, № 5, с. 6-14. 1997.

[124] Э. Д. Аверьян, "Ассоциативная нейронная сеть СМАС. Ч. 2. Процессы обучения, ускоренное обучение, влияние помех, устранение влияния помех в двухслойной сети,” *Информационные технологии*, № 6, с. 17-25. 1997.

[125] М. П. Комар, «Інформаційна модель процесу виявлення комп'ютерних атак на основі нейромережевих класифікаторів,» на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 179-180.

[126] С. Я. Гильгурт, «Методи побудови оптимальних схем розпізнавання для реконфігурованих засобів інформаційної безпеки,» *Безпека інформації*, №25 (2), с. 74-81, 2019.

[127] А. В. Скатков, и Д. Ю. Воронин, «Терминальное распределение ресурсов в критических информационных системах при использовании нейросетевых технологий,» на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 242-243.

[128] Д. П. Ночевнов, «Многозначная классификация пользователей Социального Web по интересам,» на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 353-354.

[129] А. К. Бернюков, и Л. Т. Сушкова, "Распознавание биоэлектрических сигналов,» *Зарубежная радиоэлектроника*, № 12, с. 47-51. 1996.

[130] В. Абакумов, С. Антощук, Ю. Муха, та М. Пашковський, «Використання методів сегментації у процедурах обробки біомедичних зображень» на *Дев'ятій Всеукр. міжнар. конф. Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів*, Київ, 2008, с. 217-220.

[131] *Biomedical Data Mining for Information Retrieval: Methodologies, Techniques, and Applications*. UK: Wiley, 2021.

[132] В. В. Скоробрещук, А. А. Тимченко, та С. В. Журба, «Системний аналіз технології моніторингу процесу лікування,» на *XI Міжнар. наук.-техн. конф. Системний аналіз та інформаційні технології*, Київ, 2009, с. 202.

[133] В. М. Лисогор, А. І. Власюк, та С. А. Яремко, "Побудова математичної моделі оцінки стану здоров'я людини для систем медичного телемоніторингу,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3, с. 78-84. 2005.

[134] С. Злепко, Л. Коваль, С. Тимчик, та В. Думенко, «Апаратно-програмний комплекс для оцінювання функціонального стану людини,» на *IV Міжнар. наук.-техн. конф. Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009)*, Вінниця, 2009, с. 41-42.

[135] А. А. Тимченко, С. О. Говорухін, А. А. Данилюк, та С. В. Журба, "Системний підхід до наукових досліджень інформаційних технологій та складних систем в галузі медицини,» *Штучний інтелект*, № 3, с. 113-120. 2008.

[136] Н. Сурова, та С. Костішин, «Нейромережі та експертні системи на їх основі в медичній діагностиці,» на *IV Міжнар. наук.-техн. конф. Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009)*, Вінниця, 2009, с. 55.

[137] В. І. Бойко, Л. П. Ларичева, В. О. Устименко, та О. П. Луценко, "Використання нейронних мереж для обробки сигналу в ехоенцефалографії,» *Електроника и связь*, № 3, с. 112-115. 2010.

[138] О. М. Мацуга, Ю. М. Архангельська, та Н. М. Єрещенко, *Інформаційні технології розпізнавання образів. Навчальний посібник.* Дніпропетровськ, Україна: РВВ ДНУ, 2016.

[139] Н. Р. Кондратенко, С. М. Куземко, та О. В. Чеборака, "Використання інтервальних функцій належності в задачах класифікації ендокринних захворювань," *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3, с. 85-90. 2005.

[140] Б. Капустій, Б. Русин, та В. Таянов, «Побудова та дослідження моделі навчання метричних класифікаторів на основі ймовірно-комбінаторного підходу,» на *Дев'ятій Всеукр. міжнар. конф. Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів (УкрОБРАЗ'2008)*, Київ, 2008, с. 19-22.

[141] В. И. Юнкеров, и С. Г. Григорьев, *Математико-статистическая обработка данных медицинских исследований.* СПб.: ВМедА, 2002.

[142] *Bionics: Artificial Life Parts* by Prerna Pandey, Delve Publishing, 2018.

[143] N. Ahmed, and K. R. & Rao, *Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing.* Springer Berlin Heidelberg, 1975.

[144] M. G. Kendall, *Multivariate analysis.* UK: Hafner Press, 1980.

[145] А. И. Галушкин, и Д. В. Кирсанов, "Цифровые нейрочипы (специализированные цифровые БИС для нейрокомпьютеров)," *Зарубежная радиоэлектроника*, № 1, с. 17-37. 1999.

[146] Т. В. Martyniuk, L. М. Kupershtein, А. V. Medvid, А. V. Kozhemiako, W. Wojcik, and О. Yuchshenko, "Applications of discriminant analysis methods in medical diagnostics," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8698, 86980G. 2013.

[147] А. В. Савельев, Н. А. Савельев, А. А. Колесников, А. Г. Жуков, «Устройство для моделирования нейрона,» *МКИ⁵ G 06 G 7/60. №1645973*, 30.04.91.

[148] А. А. Смеров, Ю. М. Романишин, та Ю. М. Сліпченко «Пристрій для моделювання нейрона,» *Патент України G 06 G 7/60. №25525МПК⁶*, 25.12.98.

[149] О. В. Іванівський, «Гармонічний перцептрон,» *Патент України G 06 G 7/60. №3276 МПК⁷*, 15.11.2004.

[150] А. В. Каляев, Ю. В. Чернухин, Ю. А. Брюхомицкий, и Г. А. Галуев, «Устройство для моделирования нейрона,» *МКИ⁴ G06G 7/60. №1479944*, 15.05.89.

[151] С. Н. Гринченко, С. Л. Загускин, «Устройство для моделирования адаптивного нейрона,» *МКИ⁴ G06G 7/60. №553635*, 05.04.77.

[152] E. Kussul, T. Baidyk, L. Kasatkina, & V. Lukovich, "Rosenblatt perceptrons for handwritten digit recognition", in *IJCNN'01 International Joint Conference on Neural Networks. Proceedings* (Cat. No. 01CH37222), vol. 2, IEEE, 2001, pp. 1516-1520.

[153] В. В. Лукович, «Проста згортоква нейронна мережа для розпізнавання рукописних цифр» на *Десятій Всеукр. міжнар. конф. Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів (УкрОБРАЗ'2010)*, Київ, 2010, с. 137-140.

[154] Jeffrey L. Blackmon, *Neural Network Classification of Environmental Samples*. USA: Storming Media, 1996.

[155] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, Л. М. Куперштейн, та О.С. Безкрєвний, "Операційно-елементний базис для інтелектуальних систем," *Вісник Хмельницького національного університету*, №6, с. 197-201. 2019.

[156] Г. Т. Олійник, І. В. Степанушко, та І. Б. Трегубенко, "Побудова класифікаторів в задачах біометричної ідентифікації та аутентифікації користувачів," *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 37-40. 2009.

[157] V. V. Hrytsyk, N. N. Aisenberg, R. A. Bun, et al., "The neural and neural-like networks: synthesis, realization, application and future," *Інформаційні технології і системи*, т. 1, № 1/2, с. 15-55. 1998.

[158] Ю. Бабій, та Л. Карпова, «Адаптивна фільтрація сигналів в задачах радіолокаційного виявлення та розпізнавання цілей,» на *V Міжнар. науч.-техн. конф. Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011)*, Вінниця, 2011, с.104-105.

[159] Т. Б. Мартинюк, С. А. Васюра, М. А. Очуров, та А. В. Шепотайло, "Реалізаційна модель адаптивного суматора для нейроподібних елементів," *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №3, с. 45-53. 2020.

[160] Є. В. Бодянський, Н. О. Тесленко, та А. О. Дейнеко «Еволюційна нейронна мережа з ядерними функціями активації й адаптивний алгоритм її навчання,» *Наукові праці*, Вип. 148, Т. 160, с. 53-58. 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://lib.kma.mk.ua/pdf/naukpraci/computer/2011/160-148-8.pdf>.

[161] Yin, C., Tian, S., & S. Mu, "A Fast Bit-Parallel Algorithm for Gapped String Kernels," *Neural Information Processing*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 634–641. 2006.

[162] В. В. Бреус, «Модель "быстрого нейрона" на основе разрядно-параллельных алгоритмов» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.ccsu.crimea.ua/eng/conf/ioi2000/list.html>.

[163] В. В. Кабачій, К. Д. Сторожук, та А. В. Шкарпета, "Використання інтелектуальних технологій для аналізу та прогнозування динаміки цінкових коливань,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №3, с. 102-107. 2005.

[164] В. І. Чорненький, В. М. Чешун, та С. В. Глушак, «Використання моделей нейронних мереж при тестовому контролі обчислювальних пристроїв,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: зб. наук. праць*. Хмельницький: ТУП, с. 167-171. 1999.

[165] В. М. Локазюк, В. М. Чешун, та В. І. Чорненький, «Засоби діагностування мікропроцесорних пристроїв на базі штучних нейронних мереж із змінними параметрами,» на *VII міжнар. конф. Контроль та управління в складних системах (КУСС-2003)*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003, с. 78-83.

[166] M. T. Jones, *Artificial Intelligence Application Programming (Second Edition)*. Dreamtech Press, 2006.

[167] P. Dayan, & L. F. Abbott, *Theoretical neuroscience: computational and mathematical modeling of neural systems*. MIT press, 2005.

[168] А. Г. Ивахненко, Ред., *Перцептрон – система распознавания образов*. Київ, Україна: Наук. думка, 1975.

[169] Загоруйко Л. В., та Л. І. Тимченко, "Семантичний підхід до створення просторових нейронних мереж,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №1, с. 23-29. 1999.

[170] З. Л. Рабинович, та В. А. Раманаускас, *Типовые операции в вычислительных машинах*. Київ, Україна: Техника, 1980.

[171] В. И. Зубчук, В. П. Сигорский, и А. Н. Шкуро, *Справочник по цифровой схемотехнике*. Київ, Україна: Техника, 1990.

[172] Т. Б. Мартинюк, "Порівняльний аналіз способів реалізації оператора групового підсумовування," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №3, с. 48-52. 1998.

[173] Т. Б. Мартинюк, В. В. Хом'юк, та О. В. Мельничук, "Дослідження особливостей багатооперандної обробки числової інформації," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, с. 66-70. 1999.

[174] Т. Б. Мартинюк, "Аналіз багатооперандного оброблення з використанням рекурсивного представлення інформації," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №6, с. 56-59. 2000.

[175] Л. И. Тимченко, Т. Б. Мартынюк, и Л. В. Загоруйко, "Подход к организации многоуровневой схемы систолических вычислений," *Электронное моделирование*, т. 20, № 5, с. 33-42. 1998.

[176] Т. Б. Мартынюк, «Модель порогового нейрона на основе параллельной обработки по разностным срезам,» *Кибернетика и системный анализ*, №4, с. 78-89. 2005.

[177] Т. Б. Мартинюк, та В. В. Хом'юк, *Методи та засоби паралельних перетворень векторних масивів даних*, Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.

[178] С. А. Василецький, та О. К. Колесницький, "Математичне та комп'ютерне моделювання оптоелектронного частотно-динамічного нейронного елемента," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №2, с. 96-101. 2001.

[179] Cornelius T. Leondes, Ed., *Neural Network-Systems Techniques and Applications. Algorithms and Architectures*. Academic Press, 1998.

[180] Cichocki, and R. Unbehauen, *Neural networks for optimization and signal processing*. N.Y.: Wiley, 1993.

[181] K. Diamantaras, and S.Y. Kung, *Principal component neural networks, theory and applications*. N.Y.: Wiley, 1996.

[182] F. Girosi, M. Jones, and T. Poggio, "Regularization theory and neural network architecture," *Neural Computation*, vol. 7. pp. 219-270. 1995.

[183] D. Hush, and B. Horne, "Progress in supervised neural networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, January, pp. 8-39. 1993.

- [184] S. Y. Kung, *Digital neural networks*. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- [185] E. Oja, "Principal Components, minor components and linear neural networks," *Neural networks*, vol. 5, pp. 927-935. 1992.
- [186] Я. О. Машницький, "Аналіз методів виділення інформативних ознак," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №6, с. 245-250. 2003.
- [187] A. Cohen, *Biomedical Signal Processing: Volume 2: Compression and Automatic recognition*. UK: CRC Press, 2019.
- [188] А. И. Рыбин, и О. Б. Шарпан, "Диагностика пульсограмм на базе ортогональных преобразований с действительным ядром," *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 136-141. 2004.
- [189] А. С. Васюра, А. Я. Кулик, та О. В. Кириченко, "Аналіз швидких алгоритмів обчислення дискретного перетворення Крестенсона-Леві," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2(10), с. 31-38. 2005.
- [190] І. В. Андрушко, І. Р. Пітух, та Я. М. Николайчук, "Теоретичні основи та інформаційні технології побудови логіко-статистичної інформаційної моделі (ЛСІМ-4) на основі контролю спектральних характеристик об'єктів управління," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2(12), с. 110-118. 2006.
- [191] Б. Г. Кадук, Д. Г. Мугенов, І. Д. Пономарьова, В. В. Середа, та Г. В. Церков, "Спектральний аналіз: швидкі методи," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 101-109, 2000.
- [192] A. Kharkevich, *Spectra and Analysis*. USA: Springer US, 1960.
- [193] K. P. Soman, K. I. Ramachandran, N. G. Resmi, *Insight Into Wavelets : from Theory to Practice*. PHI Learning, 2010.
- [194] M. T. Jong, *Methods of Discrete Signal and System Analysis*. UK: McGraw-Hill, 1982.
- [195] P. Blanchard, *Advances in Sequence Analysis: Theory, Method, Applications*. Springer International Publishing, 2014.
- [196] G. A. Korn, & T. M. Korn, *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. USA: Dover Publications, 2013.

[197] В. Г. Іванов, М. Г. Любарський, та Ю. В. Ломоносов, «Фур'є і вейвлет-компресія зображень по методу JPEG-технологій,» на 7-й Всеукр. міжнар. конф. *Обробка сигналів і зображень та розпізнавання образів (УкрОБРАЗ'2004)*, Київ, 2004, с. 255-258.

[198] V. G. Ivanov, M. G. Lubarskiy, & J. V. Lomonosov, "Cutting of Content Redundancy of Images on the Basis of Classification of Objects and Background," *Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 39, Issue 5, pp. 27–36. Begell House, 2007.

[199] Л. В. Вариченко, В. Г. Лабунец, и М. А. Раков, *Абстрактные алгебраические системы и цифровая обработка сигналов*. Київ, Україна: Наук. думка, 1986.

[200] Я. М. Николайчук, *Теорія джерел інформації*. Тернопіль, Україна: ТЗОВ "Терно-граф", 2010.

[201] В. А. Лужецький, и В. В. Маланчук, "Дискретне перетворення для потокового оброблення сигналів," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 71-76. 2002.

[202] А. Я. Кулик, "Аналіз впливу амплітудних спотворень сигналів каналом зв'язку в базисі функцій Уолша," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2(8), с. 183-185. 2004.

[203] О. А. Кожухівська, «Алгоритми стискання спектральної інформації,» на III Міжнар. наук.-практ. конф. *Динаміка наукових досліджень'2004*, Дніпропетровськ, 2004, с. 58-61.

[204] M. Hiromoto, H. Sugano, & R. Miyamoto, "Partially parallel architecture for adaboost-based detection with Haar-like features," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 19(1), pp. 41-52. 2008.

[205] Л. І. Тимченко, Ю. Ф. Кутаєв, С. В. Чепорнюк, та О. А. Герцій "Компактний опис моделей зображень для класифікації образів," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 72-83. 1998.

[206] Л. І. Тимченко, Я. Г. Скорюкова, С. М. Марков, та Я. О. Гальченко, "Сегментація багатоградаційних зображень на основі ознак просторової зв'язаності," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 39-44. 1998.

[207] В. М. Глушков, Г. Е. Цейтлин, и Е. Л. Ющенко, *Методы символьной мультиобработки*. Київ, Україна: Наук. думка, 1980.

- [208] Tseytlin, G. E., & Yushchenko, E. L. "Several aspects of theory of parametric models of languages and parallel syntactic analysis. Methods of algorithmic language implementation," *Cybernetics*, pp. 231-245. 2005.
- [209] В. М. Глушков, Г. Е. Цейтлин, и Е. Л. Ющенко, *Алгебра. Языки. Программирование*. Київ, Україна: Наук. думка, 1989.
- [210] G. E. Tseitlin, "Transformational reducibility and synthesis of algorithms and programs of symbolic processing," *Cybernetics and Systems Analysis*, №42(5), 750. 2006.
- [211] R. Cole, *Parallel Merge Sort*. USA: Courant Institute of Mathematical Sciences, New York University, 1987.
- [212] V. P. Kozhemiako, T. B. Martyniuk, & V. V. Khomyuk, "Distinctive features of structural programming of synchronous sorting algorithms," *Cybernetics and Systems Analysis*, №42(5), 714. 2006.
- [213] P. I. Andon, A. Y. Doroshenko, P. A. Ivanenko, & O. A. Yatsenko, "Glushkov's Algorithmic Algebras and Automated Parallel Computing Design," *Cybernetics and Systems Analysis*, №59(5), pp. 687-697. 2023.
- [214] G. E. Tseitlin, A. A. Amons, O. V. Golovin, et al. "Integrated tools for design and synthesis of classes of algorithms and programs," *Cybernetics and Systems Analysis*, №36, pp. 455–458. 2000.
- [215] G. E. Tseitlin, "Glushkov algebras and clone theory," *Cybernetics and Systems Analysis*, №39, pp. 509-516. 2003.
- [216] E. S. Borisov, "A semi-automatic system of decomposition of sequential programs for parallel computers with distributed memory," *Cybernetics and Systems Analysis*, №40, pp. 428-437. 2004.
- [217] Г. Е. Цейтлин, и Е. А. Иванов. "Специализированные информационные технологии для лиц с физическими ограничениями," *Управляющие системы и машины*, № 5, с. 62-69, 2008.
- [218] L. M. S. Ni, & A. K. Jain, "Design of a pattern cluster using two-level pipelined systolic array," *VLSI for Pattern Recognition and Image Processing*, Springer Berlin Heidelberg. 1984. pp. 65-83.
- [219] D. Butnariu, S. Reich, & Y. Censor, *Inherently Parallel Algorithms in Feasibility and Optimization and Their Applications*. Elsevier Science, 2001.
- [220] David J. Evans, *Parallel Processing Systems: An Advanced Course*. UK: Cambridge University Press, 1982.

- [221] Т. Мартынюк, Л. Куперштейн, А. Кожемяко, *Аспекты разностно-срезовой обработки данных в нейроструктурах*. LAP LAMBERT Academic Publishing, Mauritius, 2018.
- [222] S. Y. Kung, *VLSI Array Processors*. UK: Prentice Hall, 1988.
- [223] Г. А. Кухарев, А. Ю. Тропченко, и В. П. Шмерко, *Систолические процессоры для обработки сигналов*. Мн.: Беларусь, 1988.
- [224] Г. А. Кухарев, А. Ю. Шмерко, и В. П. Шмерко, *Алгоритмы и систолические процессоры для обработки многозначных данных*. Мн.: Наука і тэхніка, 1990.
- [225] S. Y. Kung, "On supercomputing with systolic/wavefront array processors," *Proceedings of the IEEE*, 72(7), pp. 867-884. 1984.
- [226] В. П. Аксенов, П. Я. Красинский, и Г. В. Спиридонов, «Систолические алгоритмы и процессоры,» *Зарубежная радиоэлектроника*, №7, с. 7-33. 1987.
- [227] В. В. Никонов, С. Г. Кравцов, и В. Н. Самошин, «Систолическая обработка информации: элементная база и алгоритмы,» *Зарубежная радиоэлектроника*, №7, с. 34-51. 1987.
- [228] D. I. Moldovan, "On the design of algorithms for VLSI systolic arrays," *Proceedings of the IEEE*, 71(1), pp. 113-120. 1983.
- [229] Г. И. Шпаковский, *Организация параллельных ЭВМ и суперскалярных процессоров. Учеб. пособие*. Мн.: Белгосуниверситет, 1996.
- [230] H. V. Jagadish, S. K. Rao, & T. Kailath, "Array architectures for iterative algorithms," *Proceedings of the IEEE*, 75(9), 1987. pp. 1304-1321.
- [231] S. K. Rao, & T. Kailath, "Regular iterative algorithms and their implementation on processor arrays," *Proceedings of the IEEE*, 76(3), pp. 259-269. 1988.
- [232] J. Kanevsky, & D. Korchev, "A Systematic Approach To The Design Of Processor Arrays," *Parallel Computing Technologies- Proceedings Of The International Conference*, World Scientific. p. 119. 1991.
- [233] C. J. Lin, "Systolic algorithm for the solution of dense linear equations," *International journal of computer mathematics*, №35(1-4), pp. 159-167. 1990.

[234] Ю. С. Каневский, и Д. В. Корчев, "Метод синтеза многомерной временной развертки вычислений в систолических процессорах," *Электронное моделирование*, том 12, №4, с. 43-49. 1990.

[235] Р. Выжиковски, и Ю. С. Каневский, "Формализованный синтез систолических процессоров на примере вычислителей для треугольного разложения симметричных матриц," *Кибернетика*, №3, с. 41-48. 1990.

[236] Ю. С. Каневский, *Систолические процессоры*. Київ, Україна: Техника, 1991.

[237] В. П. Тарасенко, Н. В. Черкасский, Ю. С. Каневский и др., *Арифметика, принципы организации, диагностика и формализованное проектирование вычислительных структур и устройств*. Київ, Україна: Вища шк., 1989.

[238] Ю. С. Каневский, та А. М. Сергиенко, «Локально связанные вычисления – состояние и перспективы». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.icfcst.kiev.ua//symposium/kanevsky.doc>

[239] А. Г. Корченко, В. М. Кинзерявый, С. А. Гнатюк, и А. Л. Панасюк, «Систолический криптопроцессор,» *Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, Вінниця: ВНТУ, 2010, с. 187-188.

[240] М. С. Яджак, «Особенности реализации штучных нейронных сетей одного типа на квазисистолических обчислювальних структурах,» на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2011, с. 134-135.

[241] И. В. Кузьмин, и В. А. Кедрус, *Основы теории информации и кодирования*. Київ, Україна: Вища шк., 1986.

[242] І. В. Кузьмін, М. М. Биков, С. М. Москвіна, та А. І. Кузьмін, *Методи оптимізації складних систем. Навч. посіб.* Вінниця, Україна: ВДТУ, 2003.

[243] С. Г. Антошук, *Теоретичні та реалізаційні основи створення адаптивно-критеріальних систем побудови інформаційних технологій обробки візуальної інформації в АСУ: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.13.06 "Автоматизовані системи управління і прогресивні інформаційні технології,»* Одеса, 2005.

- [244] Г. И. Шпаковский, *Архитектура параллельных ЭВМ*. Мн.: Университетское, 1989.
- [245] B. J. Shastri et al., "Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing," *Nature Photonics*, vol. 15, no. 2. Springer Science and Business Media LLC, pp. 102–114, 2021.
- [246] J. L. Hennessy, & D. A. Patterson, *Computer architecture: a quantitative approach*. Elsevier, 2011.
- [247] D. I. Moldovan, *Parallel processing from applications to systems*. Elsevier, 2014.
- [248] P. M. Kogge, *Parallel algorithms for the efficient solution of recurrence problems*. Computer Science Department, Stanford University, 1972.
- [249] M. Spiliotis, & B. G. Mertzios, "Real-time computation of two-dimensional moments on binary images using image block representation," *IEEE Transactions on Image Processing*, 7(11), pp.1609-1615. 1998.
- [250] М. А. Карцев, и В. А. Брик, *Вычислительные системы и синхронная арифметика*. М.: Радио и связь, 1981.
- [251] H. Kasahara, & S. Narita, "Practical multiprocessor scheduling algorithms for efficient parallel processing," *IEEE Transactions on computers*, 33(11), pp. 1023-1029. 1984.
- [252] V. G. Ivanov, "Parallel and sequential Haar structures for digital signal processing," *Electron. Modeling*, 27, №3, pp. 55–66. 2005.
- [253] В. Корнеев, "Будущее высокопроизводительных вычислительных систем," *Открытые системы*, №5, с. 10-17. 2003.
- [254] В. Д. Трухний, "Структурно-информационные оценки качества цифровых вычислительных машин," *Экономика и математические методы*, вып.1, с. 79-89. 1969.
- [255] Т. Б. Мартинюк, Н. І. Заболотна, та В. В. Шолота, "Оцінювання структурно-інформаційної складності паралельних алгоритмів додавання," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4, с. 21-26. 1996.
- [256] Т. Б. Мартинюк, та В. В. Хом'юк, "Оцінювання ефективності алгоритмів мультиобробки масивів даних," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №5, с. 76-82. 2005.
- [257] Т. Б. Мартинюк, Л. И. Тимченко, А. В. Кожемяко, и Л. М. Куперштейн, "Эффективность посрезовой обработки векторных

массивов данных,” *Математичні машини і системи*, №2, с. 60-67. 2017.

[258] И. М. Вишенчук, и Н. В. Черкасский, *Алгоритмические операционные устройства и суперЭВМ*. Київ, Україна: Техника, 1990.

[259] O. I. Aven, E. G. Coffman, & Y. A. Kogan, *Stochastic Analysis of Computer Storage*. Reidel, 1987.

[260] Hugh Ward, Ed., *High-Performance Computing: Algorithms and Applications*. Clarye International, 2022.

[261] К. Г. Самофалов, и Г. М. Луцкий, *Основы построения конвейерных ЭВМ*. Київ, Україна: Вища шк., 1981.

[262] Paschalis, P. Chatziantoniou, D. Theodoropoulos, A. Tsigkanos, & N. Kranitis, “High-Performance Hardware Accelerators for Next Generation On-Board Data Processing,” *IFIP/IEEE 30th International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC)*. IEEE, Oct. 03, 2022.

[263] А. С. Васюра, Т. Б. Мартынюк, та А. В. Кожемяко, «Исследование процесса конвейерной обработки массива чисел,» *Опτικο-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 1(3), с. 85-94. 2002.

[264] J. Misra and I. Saha, “Artificial neural networks in hardware: A survey of two decades of progress,” *Neurocomputing*, vol. 74, no. 1–3. Elsevier BV, pp. 239–255. 2010.

[265] А. В. Палагин, и В. Н. Опанасенко, *Реконфигурируемые вычислительные системы: Основы и приложения*. Київ, Україна: Просвіта, 2006.

[266] R. Tessier, & W. Burleson, “Reconfigurable Computing for Digital Signal Processing,” *The Journal of VLSI Signal Processing*, vol. 28, no. 1/2. Springer Science and Business Media LLC, pp. 7–27, 2001.

[267] Janik, Q. Tang, and M. Khalid, “An overview of Altera SDK for OpenCL: A user perspective,” *IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. IEEE, May 2015.

[268] Э. Комухаев, Современные тенденции развития ПЛИС и заказных БИС. *Электронные компоненты и системы*, № 4, с. 9-13. 2004.

[269] В. Шахнов, А. Власов, и А. Кузнецов, «Элементная база параллельных вычислений,» *Открытые системы*, № 5-6, 2001.

[270] T. J. Todman, G. A. Constantinides, S. J. E. Wilton, O. Mencer,

W. Luk, and P. Y. K. Cheung, "Reconfigurable computing: architectures and design methods," *IEE Proceedings - Computers and Digital Techniques*, vol. 152, no. 2. Institution of Engineering and Technology (IET), 2005. p. 193.

[271] В. Б. Стешенко, «Программируемые интегральные схемы: Обзор архитектур и особенности их применения,» *Основы схемотехники*, № 1-2, с. 22-24. 2000.

[272] И. А. Каляев, И. И. Левин, и Е. А. Семерников, «Архитектура семейства реконфигурируемых вычислительных систем на основе ПЛИС,» *Штучний інтелект*, № 3, с. 663-673. 2008

[273] Pong P. Chu *FPGA Prototyping by VHDL Examples: Xilinx MicroBlaze MCS SoC. 2nd Ed.* Wiley, 2017.

[274] А. В. Палагин, "Об ЭВМ с виртуальной архитектурой," *Управляющие системы и машины*, № 3, с. 33-43. 1999.

[275] А. В. Палагин, В. Н. Опанасенко, и В. Г. Сахарин, "Реконфигурируемые структуры на базе ПЛИС," *Управляющие системы и машины*, № 3, с. 32-39. 2000.

[276] С. С. Забара, Э. И. Комухаев, М. Э. Куссуль, и В. Г. Сахарин, "Проектирование логических схем нейрокомпьютера в элементном базисе ПЛИС XC 2000," *Управляющие системы и машины*, № 1, с. 9-15. 1993.

[277] Fredric M. Ham and Ivica Kostanic. *Principles of Neurocomputing for Science and Engineering.* McGraw-Hill Higher Education, 2000.

[278] Т. Б. Мартинюк, В. І. Андрущенко, та В. О. Богданов, «Організація аналізатора геометричних ознак зображень на базі ПЛІС,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 71-76. 2001.

[279] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, Н. В. Фофанова, та О. М. Наконечний, «Адаптивний суматор для систем керування роботом,» *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2 (10), с. 96-101. 2005.

[280] Т. Б. Мартинюк, М. М. Аль-Хияри, В. П. Майданюк, и Ш. М. Хилесь, «Ассоциативный процессор для сортировки массива данных,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1. с. 107-109. 2004.

[281] ALTERA. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.altera.com>.

[282] XILINX. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://www.xilinx.com>.

[283] АСТЕЛ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.actel.com>.

[284] N. Aranzabal et al., “Design of Digital Advanced Systems Based on Programmable System on Chip,” *Field - Programmable Gate Array*. InTech, May 31, 2017.

[285] Spartan-3A FPGA Family. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.rs-online.com/ae41/0900766b813ecd40.pdf>.

[286] Xilinx: Product Support & Documentation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.xilinx.com/support/#nav=sd-nav-link-156334&tab=tab-sd>.

[287] Isoaho, J. Pasanen, O. Vainio, and H. Tenhunen, “DSP system integration and prototyping with FPGAS,” *Journal Of Vlsi Signal Processing Systems For Signal, Image And Video Technology*, vol. 6, no. 2. Springer Science and Business Media LLC, pp. 155–172, Aug. 1993.

[288] S. Parab Jivan, S. Rajendra, and GadG.M. Naik, *Hands-on Experience with Altera FPGA Development Boards*. Springer (India) Pvt. Ltd, 2018.

[289] M. Węgrzyn and A. Karatkevich, “Experimental Comparison of Synthesis Tools Altera Quartus II and Synthagate,” *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 59, no. 4. Polish Academy of Sciences Chancellery, Jan. 01, 2013.

[290] А. В. Палагин «Опыт проектирования цифровых устройств на базе ПЛИС с использованием HDL-технологии,» *Управляющие системы и машины*, № 6, с. 11-20. 2004.

[291] А. В. Палагин, В. Н. Опанасенко, и А. Н. Лисовый, «Физическое моделирование цифровых устройств на ПЛИС с помощью моделирующей платы,» на *XIII Міжнар. конф. з автоматичного управління Автоматика-2006*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, с. 190-194, 2007.

[292] Richard S. Sandige. *Fundamentals of Digital and Computer Design with VHDL*. McGraw Hill Higher Education, 2011.

[293] В. В. Семенец, И. В. Хаханова, и В. И. Хаханов, *Проектирование цифровых систем с использованием языка VHDL*. Харків, Україна: ХНУРЕ, 2003.

[294] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, та Н. В. Фофанова «Особливості апаратного моделювання функцій нейрона,» *Вісник*

Вінницького політехнічного інституту, № 4, с. 46-53. 2010.

[295] R. Omondi and J. C. Rajapakse, Eds., *FPGA Implementations of Neural Networks*. Springer US, 2006.

[296] Г. М. Гнатієнко, та В. Є. Снитюк, *Експертні технології прийняття рішень: Монографія*. Київ, Україна: ТОВ «Маклауд», 2008.

[297] S. D. Zakharov, V. B. Fyodorov & V. V. E. Tsvetkov, "Optoelectronic integrated circuits utilising vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers," *Quantum Electronics*, №29(9), 745. 1999.

[298] В. П. Кожем'яко, Г. Д. Дорощенко, Т. Б. Мартинюк, та О. М. Гуцол, «Порівняльний аналіз оптоелектронних інтегральних схем на базі матриць смарт-пікселів,» *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2 (24), с. 36-40. 2012.

[299] Intelligent optical backplanes for parallel computing and communications. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.doe.carleton.ca/~gallan/pdf/optical_backplanes.pdf.

[300] Smart Pixels for Image Computing. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verd=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA389827>.

[301] N. A. Maleev & et al., "Matrices of 960-nm vertical-cavity surface-emitting lasers," *Semiconductors*, №45, pp. 818-821. 2011.

[302] S. M. Zakharov, "The Thermal Cross-Interference Effects in the Arrays of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *Semiconductors*, №35(4), 2001.

[303] N. A. Maleev et al., "Design and fabrication technology for arrays for vertical-cavity surface-emitting lasers," *Semiconductors*, №39, pp. 462-466. 2005.

[304] V. B. Fyodorov, "High-performance optoelectronic switching network with vertical-cavity surface-emitting laser arrays," *Quantum Electronics*, №33(3), pp. 259-264. 2003.

[305] V. B. Fedorov, "Principles of construction of a multiport associative memory from quantum-electronics components," *Quantum Electronics*, 25(11), 1120. 1995.

[306] Т. Б. Мартинюк, А. О. Бендера, Є. В. Дубінін, «Оптоелектронний навчений класифікатор,» *Патент України G06 K 9/00. №73074 МПК⁸*, 10.09.2012.

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

[308] M. A. Gigailenko, N. N. Kamenev, V. I. Nalivaiko, & P. E. Tverdokhlebov, "Waveguide 3D optical integrated circuits," in *3rd International Conference on Optical Information Processing*, vol. 3900, pp. 187-192. SPIE, 1999.

[309] Y. Dan, et al., "Optoelectronic integrated circuits for analog optical computing: Development and challenge," *Frontiers in Physics*, №10, 1064693. 2022.

[310] C. Denz, T. Dellwig, J. Lembcke, & T. Tschudi, "Parallel optical image addition and subtraction in a dynamic photorefractive memory by phase-code multiplexing," *Optics letters*, №21(4), pp. 278-280. 1996.

[311] T. B. Martyniuk, A. V. Kozhemiako, L. M. Kupershtein, V. V. Khomyuk, M. S. N. Mohamed, A. Smolarz, & A. Kozbakova, "Neural network approach to numeric array sorting," *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, vol. 11176, pp. 480-484. SPIE, 2019.

[312] Т. Б. Мартинюк, С. Є. Тужанський, та О. М. Шевчук, «Особливості передачі цифрових зрізів зображення між оптичними інтегральними схемами,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 58-62. 2003.

[313] Т. Б. Мартинюк, Г. Л. Лысенко, и В. А. Суприган, «Цифровой оптоэлектронный процессор на основе поразрядных срезов,» *Электронное моделирование*, т. 23, № 4, с. 42-51. 2001.

[314] Т. Б. Мартинюк, Г. Л. Лисенко, В. В. Ковалевський, та Ю. В. Васюра, «Багаторівневе накопичення двовимірних зображень в оптоелектронному цифровому процесорі,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 64-67. 2001.

[315] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, М. Г. Тарновський, та Д. О. Шаромов, «Реалізаційні моделі оптоелектронного корелятора,» *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2(39), с. 53-59. 2017.

ДОДАТКИ

Додаток А

Цифрові нейрочипи

Назва	Фірма-виробник (країна)	Призначення	Архітектурні особливості	Особливості НМ	Структурні характеристики	Переваги і недоліки
1	2	3	4	5	6	7
НВІС для кліткової моделі НМ	Центр напівпровідникової електроніки Арізонського університету (США)	Цифрова емуляція НМ із застосуванням у кліткових системах.	Системна мережа з 12 ПЕ. ПЕ емулює нейрон, який містить каналний адаптер, пам'ять, пристрій акумулятор, пристрій керування.	Модель НМ вагові вагові Хопфланда: коефіцієнти змінюються у межах -1...+1, порогові налаштовуються	Ваги розрядністю 4...8 біт, синхронізація зовнішніми тактовими і внутрішніми керуючими сигналами.	НВІС реалізує трьохшарові НМ з адаптивним налаштуванням вагових коефіцієнтів в усіх трьох шарах.
Спеціалізований цифровий нейрочип	Фірма Bell Laboratories (США)	Обчислення відстані Хеммінга між бінарними векторами (вхідним п'ятьма ознаковими) і Хеммінга, компаратор.	Цифровий конвеєр з 5 процесорів, які містять кільцевий регістр зсуву, пристрій порівняння, акумулятор відстані Хеммінга, компаратор.	Модель Хеммінга.	Вагові вектори – 128-бітні слова, 14-бітний тег або мітка вектора, тактова частота – 100 МГц, час видачі списку п'яти найкращих відстаней – 1,3 мс, технологія – 1,25 мкм.	При частоті синхронізації вище 50 МГц виникають труднощі з передачею інформації між плагами.

1	Цифровий нейрочип TIInMANN (Integer Markovian Artificial Neural Network)	2	Університет штату Північна Кароліна (США)	3	Реалізація навченої НМ із змінною розмірністю для обробки зображень.	4	Загальний керування і матриця процесорів, які містять ОЗП для вагових коефіцієнтів, комірку для топологічного вектора, компаратор, суматор, конвеєрний реєстр, додаткову логіку, спецканал для передачі сигналів статусу процесора.	5	Модель НМ Хоффілда. Для навчання застосовуються алгоритм Кохонена та конкуруючі алгоритми. Псевдо аналоговий спосіб обчислень.	6	Тактова частота – 10 МГц, довжина машинного слова – 12 біт, час обробки – 6,9 мс. Для реалізації у НВІС 1000 нейронів необхідно 1 млн. транзисторів.	7	Елементи І в якості базових елементів НМ, стохастичний метод навчання нейромережі Хоффілда.
Цифровий нейрочип	Дослідницька лабораторія фірми Hitachi (Японія)	Модельвання НМ різного типу з декількома алгоритмами навчання.	Шість нейронів з'єднані збуджуючими і гальмівними зв'язками через 84 синаптичні комірки і мають по 2 мультиплектора. Кожен нейрон містить дві дендритні схеми, 14 синаптичних комірок і тіло нейрона, яке складається з керуючої схеми, реверсивного лічильника, мультиплектора і вентиля. Синаптична комірка містить помножувач і реєстр вагового коефіцієнта	Використання повних зв'язків між нейронами для моделювання різного типу. Використання збуджуючих і гальмівних зв'язків між нейронами. Зміна стану нейрона у часі описується нелінійним диференціальним рівнянням першого порядку. Нейрони спрацьовують асинхронно	Реалізація на базі п'яти 1,2 мкм МК L 8000 вентилів у 240-вивідному корпусі типу PGA. Існує інтерфейс з керуючим комп'ютером для завантаження синаптичних комірок, потенціалів нейронів та керуючих сигналів. Ваговий коефіцієнт приймає 64 значення.	Частотно-імпульсна модуляція вхідного і вихідного сигналів (послідовність електричних імпульсів зі змінною скважністю). Можливість каскадування.							

1	2	3	4	5	6	7
Цифровий нейрочип	Фірма Махус Ltd (Велика Британія)	Для обробки поштових індексів, друкованих і рукописних текстів, аналізу рентгенівських знімків і супутникової інформації, для керування виробничими процесами.	Лінійна матриця процесорних комірок з конвеєрною обробкою даних. Нейрон процесорну комірку з локальною пам'яттю вагових коефіцієнтів, помножувач і суматор.	Зовнішня комірка реалізує сигмоїдальну функцію (на спеціалізованій НВІС або на трансп'ютері). Вихідний канал містить результати обчислень і тегові послідовності, які відсортовані у порядку зростання і по мірі їх появи.	Нейрочип містить 32 процесорні комірки, кожна з 1280-бітним локальним ОЗП з довірливим доступом. Обробка послідовна (побітова). 16-бітні послідовні порти, внутрішня частота нейрочипа – 6,25 МГц, 160 вагових коефіцієнтів. Швидкодія – 400 млн. зв'язків/с, обробка 160 8-бітних сигналів за 12,8 мс.	Відсутні у чипі спецзасоби для організації навчання. Гнучка структура з можливістю каскадування нейрочипів. Високий ступінь конвеєрності обробки.
Універсальний навчений цифровий нейрочип	Дослідницька лабораторія фірми Philips (Голандія)	Нейрочип використовується для гнучкої реалізації НМ різних типів (наприклад, НМ Хопфілда з повними зв'язками).	Ядром нейрочипа є синаптична матриця, що містить N^2 синаптичних комірок (для N вхідних і N вихідних нейронів). Матриця має вигляд ОЗП. Нейрочип містить дерево суматорів, АЛП, реєстри станів нейронів, реєстр навчання.	Навчання виконується керуючою системою. Функція активації – сигмоїдальна.	Сигмоїдальна функція реалізована поза кристалом табличним способом на трансп'ютері Т-414 (фірми Immos) з частотою 20 МГц. Використано 1,6 мкм КМОН технологію. Нейрочип містить 32 вхідних нейрона, 16 вихідних нейронів, 16-розрядні вагові	Паралельне завантаження значень вхідних сигналів і вагових коефіцієнтів. Використання спеціального апаратного забезпечення для алгоритму навчання (зі зворотним

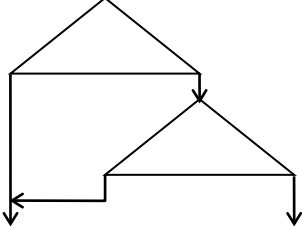
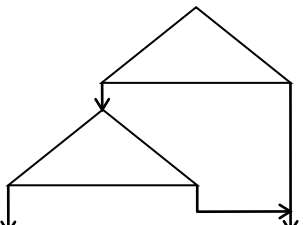
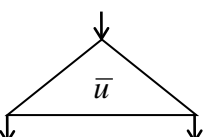
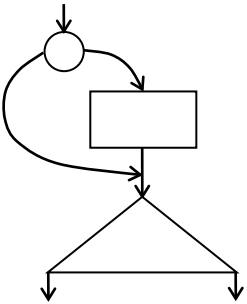
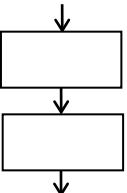
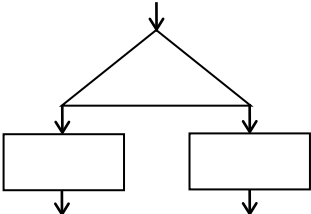
1	2	3	4	5	6	7
Цифровий нейрочип	НДІ багатопроцесорних обчислювальних систем Танганрогського радіотехнічного університету	Моделювання НМ, відтворення і намічних моделей нейрона. Нейрочип є базовим вузлом для побудови нейропроцесора.	Нейрон містить синаптичних входів, п схем операцій, багатовхідний суматор, схему вихідного сигналу, входів налаштування і входів розширення кількості синаптичних входів.	Відтворення формально-логічної та градуальної підсумовуючої математичної моделі нейрона.	коефіцієнти. Час спрацювання нейрона – 2 мс. Розрядність вхідного сигналу – 1...8біт.	розповсюдженям сигналів помилки).
					Кількість інформаційних входів – 2, кількість додаткових входів – 4, розрядність чисел – 8 біт, частота – 10 МГц, споживана потужність – 0,8 мВт, габаритні розміри – 18*18*2 мм.	Наявність спец. входів розширення дозволяє нарощувати кількість синаптичних входів. Реалізовано зразок дослідної партії цифрових ВІС НІ 1537 ХМ-1-034.

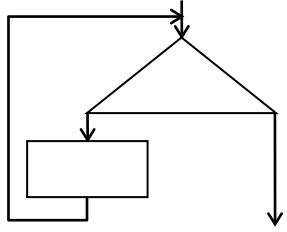
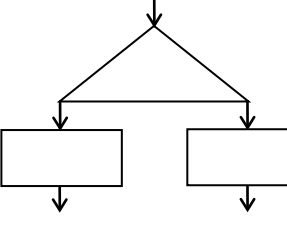
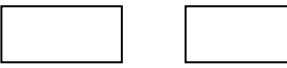
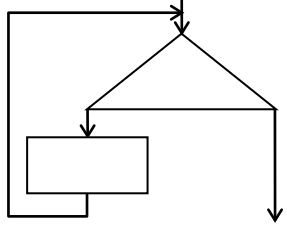
Додаток Б
Класифікація моделей нейронів

Назва	Базові формули		Правило навчання	Цільова функція	Алгоритм навчання
	Стан нейрона	Функція активації			
1	2	3	4	5	6
Перцептрон	$u_i = \sum_{j=1}^N w_{ij} \cdot x_j + w_{i0}$	<p>Ступінчаста функція</p> $f(u_i) = \begin{cases} 1 & \text{для } u_i > 0, \\ 0 & \text{для } u_i \leq 0. \end{cases}$	<p>Узагальнене правило Відроу-Хоффа:</p> $w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}$ $\Delta w_{ij} = x_j(d_i - y_i)$ $\Delta w_{i0} = d_i - y_i$	$E = \sum_{k=1}^p (y_i^{(k)} - d_i^{(k)})^2$ <p>де k – кількість навчальних вибірок.</p>	<p>Навчання з вчителем гетероасотивного типу. Мінімізація ЦФ за методом безградієнтної оптимізації.</p>
Нейрон типу "адалайн" (ADArptive LInear NEuron)	$u_i = \sum_{j=0}^N w_{ij} x_j$	<p>Функція активації типу sigmoid:</p> $f(u_i) = \begin{cases} 1 & \text{для } u_i > 0, \\ -1 & \text{для } u_i \leq 0. \end{cases}$	$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta \cdot e_i \cdot x_j$ $e_i = d_i - \sum_{j=0}^N w_{ij} \cdot x_j,$ <p>де η – коефіцієнт навчання, $0 < \eta < 1$, d_i – бажаний вихід.</p>	$E = \frac{1}{2} e_i^2 = \frac{1}{2} (d_i - \sum_{j=0}^N w_{ij} x_j)^2$	<p>Навчання з вчителем. Мінімізація ЦФ за методом найкорішого спуску.</p>

1	Нейрон типу WTA (Winner Takes All)	2	3	4	5	6
			<p>Використання механізму конкуренції (додатковий шар нейронів з латеральним гальмуванням – MAXNET)</p>	<p>Спрощене правило Гроссберта: $w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \eta(x_j - w_{ij}(t))$.</p>	–	<p>Навчання без вчителя з нормалізацією вхідних векторів: $x_j = \frac{x_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^N x_j^2}}$.</p>
<p>Модель нейрона Хебба</p>		–	<p>Будь-яка функція активації.</p>	<p>Правило Хебба: $w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) \times (1 - \gamma) + \Delta w_{ij}$, де γ – коефіцієнт забування, $\gamma < 0, 1$; без вчителя: $\Delta w_{ij} = \eta \cdot x_j \cdot y_i$, з вчителем: $\Delta w_{ij} = \eta \cdot x_j \cdot d_i$.</p>	–	<p>Навчання без вчителя, асоціативного типу.</p>

Додаток В
Основні операції, що входять у сигнатуру САА-М

Конструкції	Назва операції	Форма		
		Аналітична	Природно-лінгвістична	Графова
1	2	3	4	5
Логічні	Кон'юнкція	$u \wedge u'$ $u \cdot u'$	u і u'	
	Диз'юнкція	$u \vee u'$ $u + u'$	u або u'	
	Заперечення	\bar{u}	не u	
	Прогнозування (ліве множення умови на оператор)	$A \cdot [u]$	прогноз	
Операторні	Композиція	$a \times b$	a потім b	
	Альтернатива	$[u](a, b)$	якщо u , то a інакше b	

1	2	3	4	5
Опера- торні	Цикл	$[u]\{a\}$	доки не u цикл a	
	Фільтрація	$F(u)$	фільтр за умовою u	
	Асинхронна диз'юнкція операторів	$a // b$	a асинхронно b	
	Синхро- нізатор	$S(u)$	чекати u	

Електронне наукове видання

**Азаров Олексій Дмитрович
Мартинюк Тетяна Борисівна
Кожем'яко Андрій Вікторович**

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА РЕАЛІЗАЦІЙНІ МОДЕЛІ
КОМП'ЮТЕРНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ**

Монографія

Редактор *Т. Мартинюк*

Рукопис підготовлено *А. Кожем'яко*

Оригінал-макет виготовлено у *РВВ ВНТУ*

Підписано до видання 08.10.2024 р.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. P2024-156

Видавець та виготовлювач –
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
press.vntu.edu.ua
email: rvv.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.



Азаров Олексій Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки, Заслужений працівник освіти України. Тематика наукових інтересів: комп'ютерна інженерія, відмовостійкі високопродуктивні перетворювачі форми інформації на основі надлишкових позиційних систем числення, високолінійні швидкодіючі підсилювальні пристрої за двотактною симетричною структурою, аналогові пристрої. Є автором понад 600 наукових праць, серед яких близько 350 винаходів, у тому числі 11 закордонних патентів, зокрема, США, Великобританії, Канади, Німеччини і Франції, а також 17 навчальних посібників



Мартинюк Тетяна Борисівна – доктор технічних наук, професор кафедри обчислювальної техніки. Тематика наукових інтересів: методи та засоби аналізу зображень та розпізнавання образів, нейротехнології для комп'ютерних інтелектуальних систем. Є автором понад 360 наукових і науково-методичних праць, серед яких 7 монографій, 14 навчальних посібників та методичних вказівок, 32 авторських свідоцтва, 160 патентів України.



Кожем'яко Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки. Тематика наукових інтересів: паралельні обчислення, обробка відео та зображень, технології штучного інтелекту. Є автором понад 100 наукових і науково-методичних праць, серед яких 9 статей у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, 25 статей у фахових виданнях, навчального посібнику, 2 монографій та монографії у співавторстві, видану за кордоном.