

УДК 004.62:519.7

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7\(48\)-1458-1470](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7(48)-1458-1470)

Дейнеко Жанна Валентинівна кандидат технічних наук, доцент кафедри медіасистем та технологій, завідувач кафедри Медіасистем та технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-13-78, <https://orcid.org/0000-0003-0175-4181>

Литвиненко Сергій Володимирович аспірант кафедри Медіасистем та технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (097) 179-77-28, <https://orcid.org/0009-0003-2632-9082>

Харченко Роман Андрійович аспірант кафедри Медіасистем та технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-13-78, <https://orcid.org/0009-0003-8247-2983>

ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНОЇ НЕЙРО-ФАЗЗИ СИСТЕМИ З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ СТІЙКОСТІ ДО ШУМУ В ЗАДАЧАХ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

Анотація. Розпізнавання образів є одним із напрямків наукових досліджень, який використовується у багатьох сферах із застосуванням комп'ютерного зору. Це дозволяє встановити області потенційного інтересу та зосередитися на їх більш детальному вивченні.

Відтак упровадження різноманітних методів та підходів до розпізнавання образів є звичайною практикою, яка базується на розв'язанні конкретного завдання дослідження.

Проте шумові ефекти, завади та артефакти є тією загрозою, яка може спотворити реальне зображення та призвести до зниження ефективності алгоритмів розпізнавання.

Відтак постає питання у визначенні й застосуванні таких підходів, які мінімізують наслідки негативного впливу різноманітних шумів та завад. Виходячи з цього в роботі досліджено адаптивну нейро-фаззи систему з оптимізацією параметрів щодо застосування для розв'язку задач з розпізнавання образів. Таке дослідження розглядає різноманітні шуми (гаусівський, імпульсний, мультиплікативний), окремі методи їх усунення (медіанна фільтрація, вейвлет фільтрація, нечітка адаптивна фільтрація) та оптимізацію параметрів системи за допомогою алгоритму рою часток або генетичного алгоритму.

Результати дослідження показали, що запропонований підхід на основі адаптивної нейро-фаззі системи є ефективним і гнучким інструментом для розпізнавання образів. Для досягнення максимальної його продуктивності, доцільно застосовувати такі методи оптимізації, як генетичні алгоритми або алгоритм рою частинок. Це дозволяє підлаштовувати параметри запропонованого підходу під різні типи шуму.

Ключові слова: розпізнавання образів, нейро-фаззі системи, адаптивна оптимізація, нейронні мережі, шум, фільтрація.

Deineko Zhanna Valentinivna PhD, Associate Professor of the Department of Media Systems and Technologies, Head of the Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, tel.: (057) 702-13-78, <https://orcid.org/0000-0003-0175-4181>

Lytvynenko Serhii Volodimirovich graduate student of the Department of Media Systems and Technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, tel.: (097) 179-77-28, <https://orcid.org/0009-0003-2632-9082>

Kharchenko Roman Andriyovych graduate student of the Department of Media Systems and Technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, tel.: (057) 702-13-78, <https://orcid.org/0009-0003-8247-2983>

RESEARCH OF AN ADAPTIVE NEURO-FUZZY SYSTEM WITH PARAMETER OPTIMIZATION TO INCREASE ITS NOISE RESISTANCE IN PATTERN RECOGNITION PROBLEMS

Abstract. Pattern recognition is one of the areas of scientific research that is used in many areas using computer vision. This allows you to identify areas of potential interest and focus on their more detailed study. Therefore, the implementation of various methods and approaches to pattern recognition is a common practice, which is based on solving a specific research problem. However, noise effects, interference and artifacts are a threat that can distort the real image and lead to a decrease in the efficiency of recognition algorithms. Therefore, the question arises of defining and applying such approaches that minimize the consequences of the negative impact of various noises and interference. Based on this, the paper investigates an adaptive neuro-fuzzy system with optimization of parameters for use in solving pattern recognition problems. Such research considers various noises (Gaussian, impulse, multiplicative),

individual methods for their elimination (median filtering, wavelet filtering, fuzzy adaptive filtering) and optimization of system parameters using a particle swarm algorithm or a genetic algorithm.

The results of the study showed that the proposed approach based on the adaptive neuro-fuzzy system is an effective and flexible tool for pattern recognition. To achieve its maximum performance, it is advisable to use optimization methods such as genetic algorithms or particle swarm algorithm. This allows you to adjust the parameters of the proposed approach to different types of noise.

Keywords: pattern recognition, neuro-fuzzy systems, adaptive optimization, neural networks, noise, filtering.

Постановка проблеми. Розпізнавання образів є важливим напрямом у комп'ютерному зору, який має широкий спектр застосувань – медична діагностика [1, 2], автоматизація виробничих процесів [3], безпека та охорона [4], формування сховищ зображень та пошук необхідної інформації у мультимедійних базах даних [5] тощо.

Одна з основних проблем, з якими стикаються системи розпізнавання образів, це, зокрема, вплив шуму на точність розпізнавання необхідного контенту, його подальшої класифікації та відповідної структуризації для вирішення окремих завдань.

Шум може істотно спотворювати зображення і призводити до зниження ефективності застосування відповідних алгоритмів. У зв'язку з цим, розробка методів або підходів, здатних покращити стійкість до шуму, є важливою задачею для дослідників та практиків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують різні методи та підходи щодо розпізнавання образів, які ранжуються згідно умов їх застосування щодо поставлених завдань перед дослідниками.

Класичні методи розпізнавання образів, такі як, наприклад, метод опорних векторів (SVM), класифікатори на основі найближчого сусіда (k-NN), а також методи на основі векторних представлень (PCA), досягли значного успіху в задачах розпізнавання при відносно чистих даних (тобто даних без впливу шуму) [6].

Однак ці методи мають обмеження при роботі з великими та зашумленими зображеннями, оскільки вони часто не здатні адаптуватися до варіативних умов.

Сучасні підходи включають глибоке навчання (Deep Learning), зокрема глибокі нейронні мережі (CNN) та рекурентні нейронні мережі (RNN), які дозволяють досягати значно кращих результатів у розпізнаванні образів завдяки їх здатності автоматично витягувати складні ознаки з

вхідних даних [7]. Проте ці методи потребують великої кількості даних і обчислювальних потужностей.

Потужним інструментом, що поєднує переваги нейронних мереж та нечітких систем (FIS) для моделювання складних залежностей між вхідними та вихідними змінними з погляду на розв'язок різних завдань розпізнавання образів є адаптивні нейро-фаззі системи (ANFIS) [8, 9]. Зокрема ці системи дозволяють вирішувати проблеми розпізнавання, де присутній значний рівень невизначеності та шуму. Втім незважаючи на свою гнучкість, стандартні ANFIS можуть бути вразливими до шуму, що обумовлює необхідність оптимізації їх параметрів для покращення стійкості.

Отже, оптимізація параметрів ANFIS є важливим етапом у досягненні високої точності та стійкості до шуму в задачах розпізнавання образів. Тобто, стандартне навчання ANFIS може бути недостатньо ефективним в умовах шуму, тому застосовуються різні методи оптимізації для налаштування її параметрів [9, 10].

Мета статті – дослідження гібридної адаптивної нейро-фаззі системи (ANFIS) з оптимізацією її параметрів щодо визначення умов покращення стійкості до шуму в задачах розпізнавання образів.

Виклад основного матеріалу. Система ANFIS складається з нечітких правил, що описують зв'язок між вхідними та вихідними змінними, та використовує нейронну мережу для оптимізації цих правил на основі вхідних даних.

Вона визначається п'ятьма основними етапами: вхідні змінні, нечіткі правила, моделювання виведення, навчання нейронної мережі та адаптація параметрів. Під час навчання параметри системи коригуються таким чином, щоб мінімізувати помилку між передбаченими та фактичними значеннями, що робить ANFIS потужним інструментом для роботи з нечіткими, неповними та шумними даними, що відповідає обробці та розпізнаванню зображень де присутній шум. При цьому система ANFIS є відносно компактною і швидкою в порівнянні з глибокими нейронними мережами, що робить її привабливою для застосувань, де важлива швидкість обробки та адаптація до зміни умов.

Принципи навчання ANFIS включають дві основні стадії: навчання ваг на основі зворотного поширення помилки та коригування параметрів нечітких функцій за допомогою методу найменших квадратів [8]. Це дозволяє здійснювати адаптацію не тільки до входів, але й до невизначеності, що є важливим для розпізнавання образів в умовах шуму.

Оптимізація параметрів ANFIS є критичним етапом для досягнення високої точності при розпізнаванні образів.

Стандартне навчання ANFIS на основі зворотного поширення помилки та методу найменших квадратів може не забезпечити належної адаптації у складних умовах.

Отже, оскільки стандартне навчання може бути недостатньо ефективним, застосовуються методи оптимізації, які дозволяють покращити результати системи.

Одним з найбільш поширених методів є використання генетичних алгоритмів (GA), які дозволяють знайти оптимальні значення параметрів для нечітких правил і функцій активації [10]. Інші методи, наприклад, такі як алгоритми рою частинок (PSO), також показують хороші результати у процесі оптимізації параметрів для зменшення впливу шуму та підвищення точності розпізнавання [11].

Отже, оптимізація параметрів ANFIS є ключовим кроком для підвищення її ефективності в складних умовах, де присутній значний рівень шуму.

Втім у даному дослідженні пропонується використання гібридного підходу, що поєднує глобальну оптимізацію за допомогою генетичних алгоритмів та локальну оптимізацію за допомогою градієнтного спуску.

Генетичний алгоритм (GA) використовується для пошуку оптимальних параметрів ANFIS, зокрема, за допомогою функції пристосованості, як середнє квадратичне відхилення (MSE) між передбачуваними та фактичними значеннями зображення:

$$f = \frac{1}{1 + MSE}$$

Після глобальної оптимізації GA використовується градієнтний спуск для тонкого налаштування параметрів:

$$\theta^{(t+1)} = \theta^{(t)} - \eta \frac{\partial L}{\partial \theta},$$

де η – швидкість навчання, L – функція втрат.

Для оцінки ефективності запропонованого підходу проводиться серія експериментів із застосуванням методу ANFIS. Загальна схема експериментів полягає у наступному:

1. Генеруються тестові зображення у якості яких використовуються стандартний датасет – MNIST, що містить 70 000 зображень рукописних цифр розміром 28×28 пікселів у відтінках сірого.

Цей набір широко використовується для тестування моделей розпізнавання з урахуванням простих візуальних об'єктів.

До цих зображень додається шум різної інтенсивності. Для аналізу стійкості модифікованого методу ANFIS до шуму розглядаються три основні типи шуму, які найчастіше зустрічаються у реальних задачах розпізнавання образів [12]:

Гаусівський шум, який характеризується випадковими відхиленнями інтенсивності пікселів, що описуються нормальною розподіленою випадковою величиною:

$$n(x, y) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2),$$

де σ^2 – дисперсія шуму (у даному дослідженні $\sigma^2 = 0.05$).

Імпульсний шум (сіть і перець), який проявляється у вигляді випадкових білих або чорних точок на зображенні:

$$I_n(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{з ймовірністю } p/2, \\ 255, & \text{з ймовірністю } p/2, \\ I(x, y), & \text{з ймовірністю } 1 - p, \end{cases}$$

де p – ймовірність появи імпульсного шуму (у даному дослідженні $p = 0.1$).

Спекл-шум (мультиплікативний шум), який впливає на текстурні області зображення та є особливо проблемним у медичних і супутникових зображеннях:

$$I_n(x, y) = I(x, y) + I(x, y) \cdot n(x, y),$$

де $n(x, y) = N(0, \sigma^2)$.

Тобто мультиплікативний шум або інакше кажучи комбінований шум – це одночасний вплив гаусівського та імпульсного шумів з вказаними параметрами.

Щоб дослідити вплив шуму на якість розпізнавання окремих цифр, було обрано цифри "2" та "7" як репрезентативні приклади:

цифра "2" має плавні криві та менш різкі зміни градієнта, що може робити її чутливою до гаусівського шуму,

цифра "7" складається з більш контрастних ліній та різких змін, що робить її вразливою до імпульсного шуму типу "сіль і перець».

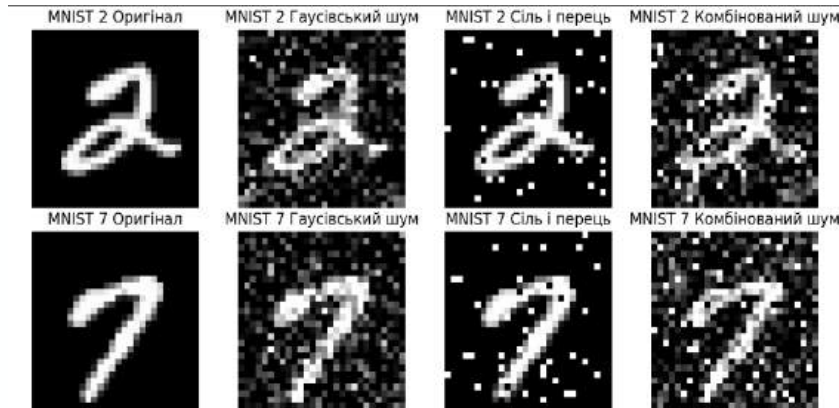


Рис. 1. Приклади цифр "2" та "7" до і після додавання шуму

У таблиці 1 наведено показник імовірності розпізнавання обраних зображень без шуму та в умовах впливу шумів на підставі стандартних алгоритмів системи MNIST.

Цифра	Без шуму	Гаусівський шум	Імпульсний шум	Комбінований шум
2	99.1%	92.8%	89.5%	85.7%
7	98.7%	95.2%	87.4%	82.3%

Таблиця 1. Вплив різних типів шуму на цифри "2" та "7" у MNIST

2. Відбувається навчання запропонованої моделі ANFIS із попередньою обробкою (фільтрацією шуму) та відповідною гібридною оптимізацією.

Для покращення стійкості ANFIS до шуму входні зображення проходять попередню обробку з використанням таких методів:

медіанна фільтрація – ефективна для усунення імпульсного шуму:

$$I'(x, y) = \text{median}(I(x + i, y + j)), (i, j) \in W,$$

де W – локальне вікно фільтрації,

вейвлет-фільтрація – застосовується для усунення гаусівського шуму шляхом обнулення певних коефіцієнтів розкладу за допомогою порогу,

нечітка адаптивна фільтрація ANFIS, яка використовується для динамічного коригування інтенсивності шуму шляхом побудови правил, що враховують просторові особливості зображення.

3. Проводиться апробація пропонованого підходу та його порівняння з іншими методами розпізнавання.

Для оцінки ефективності пропонованої гібридної адаптивної нейрофаззі системи (ANFIS) було проведено порівняння її результатів із іншими популярними методами машинного навчання (DNN, CNN, SVM). Результати надані для "2" в таблиці 2 та для "7" в таблиці 3 (з урахуванням попередньої фільтрації шуму та застосуванням гібридної оптимізації).

Таблиця 2

Імовірність розпізнавання цифри "2" при різних типах шуму

Модель	Без шуму (%)	Гаусівський шум (%)	Імпульсний шум (%)	Комбінований шум (%)
ANFIS	99.1	92.8	90.5	87.7
CNN	97.8	89.7	84.3	80.2
DNN	98.9	91.1	87.8	84.5
SVM	96.3	84.9	80.1	77.5

Таблиця 3

Імовірність розпізнавання цифри "7" при різних типах шуму

Модель	Без шуму (%)	Гаусівський шум (%)	Імпульсний шум (%)	Комбінований шум (%)
ANFIS	98.7	95.5	93.9	90.7
CNN	97.8	92.3	88.5	85.6
DNN	99.2	93.7	90.5	87.4
SVM	96.7	86.1	80.6	79.0

Також було розглянуто ефективність методів оптимізації параметрів ANFIS у задачах розпізнавання образів, але без попередньої фільтрації шуму. Було проведено порівняльний аналіз двох методів оптимізації: алгоритм рою частинок (PSO) [13] та генетичний алгоритм (GA) [14]. Результати надані для "2" в таблиці 4 та для "7" в таблиці 5.

Таблиця 4

Імовірність розпізнавання цифри "2" при різних методах оптимізації

Метод оптимізації	Без шуму (%)	Гаусівський шум (%)	Імпульсний шум (%)	Комбінований шум (%)
ANFIS (без оптимізації)	93.0	89.2	86.4	83.0
ANFIS (GA)	96.1	92.5	90.7	87.4
ANFIS (PSO)	95.7	91.8	90.0	86.8

Таблиця 5

Імовірність розпізнавання цифри "7" при різних методах оптимізації

Метод оптимізації	Без шуму (%)	Гаусівський шум (%)	Імпульсний шум (%)	Комбінований шум (%)
ANFIS (без оптимізації)	95.4	91.8	89.9	86.8
ANFIS (GA)	97.0	93.8	92.2	90.0
ANFIS (PSO)	96.4	93.3	91.6	89.4

Таким чином, поєднання попередньої обробки, генетичних алгоритмів та градієнтної оптимізації дозволяє значно покращити стійкість ANFIS до шуму в задачах розпізнавання образів.

Отримані результати експериментів також підтверджують, що гібридний підхід на основі адаптивної нейро-фаззи системи (ANFIS) має суттєві переваги у порівнянні з традиційними методами розпізнавання образів, особливо в умовах шуму.

Застосування методів оптимізації параметрів в ANFIS, таких як генетичний алгоритм (GA) та алгоритм рою частинок (PSO), також підвищує точність і стійкість системи до шуму. Порівняно з базовою моделлю ANFIS, оптимізовані параметри дозволяють зменшити вплив

шуму на процес навчання та покращити загальну імовірність розпізнавання.

Особливо значущим є вплив оптимізації параметрів на стійкість до шуму. Генетичний алгоритм дозволяє моделювати не тільки параметри функцій активації та нечітких правил, але й забезпечити оптимальні налаштування для адаптації до різних типів шуму. В результаті, ANFIS із застосуванням GA продемонструвала кращу стійкість до шуму, ніж стандартні методи машинного навчання, такі як CNN, особливо в задачах з імпульсним та гаусівським шумом.

Порівняння результатів ANFIS з іншими методами, такими як класичні згорткові нейронні мережі (CNN), методи опорних векторів (SVM) та методи на основі нечіткої логіки, показує, що ANFIS також демонструє високу стійкість до шуму, особливо у випадках імпульсного та гаусівського шуму.

Отже, результати експериментів підтверджують, що ANFIS є ефективним і гнучким інструментом для розпізнавання зображень у складних умовах, коли присутні шумові спотворення. Однак, щоб досягти максимальної продуктивності, необхідно застосовувати додаткові методи оптимізації, такі як генетичні алгоритми (GA) або алгоритм рою частинок (PSO), що дозволяють підлаштовувати параметри ANFIS під різні типи шуму.

Висновки. У роботі проведено дослідження ефективності застосування гібридної адаптивної нейро-фаззі системи (ANFIS) для розпізнавання образів в умовах шуму. Результати експериментів показали, що ANFIS, завдяки своїй здатності адаптуватися до невизначеності в даних через нечіткі правила, продемонструвала високі результати в порівнянні з традиційними методами машинного навчання, зокрема нейронними мережами, особливо в умовах впливу завад на якість зображень.

Для покращення стійкості ANFIS до шуму в реальних умовах рекомендується використовувати комбіновані методи попереднього оброблення зображень та адаптації до шуму в процесі навчання. Одним з підходів є використання мультимодальних фільтрів, які комбінують фільтрацію зображень з оптимізацією параметрів ANFIS для досягнення більшої стійкості до шуму різного типу. Це дозволяє зберігати важливі деталі в зображеннях при одночасному зменшенні впливу шумових спотворень.

Перспективними напрямками для подальших досліджень є адаптація ANFIS до нових типів шуму, зокрема шуму типу Релея або шуму з обмеженнями на розподіл. Для цього доцільно впроваджувати методи глибокого навчання для попереднього аналізу зображень і створення більш

точних моделей для оцінки шумових спотворень на різних етапах обробки. Слід також розглянути комбіновані методи оптимізації, що включають машинне навчання для визначення найбільш підходящих параметрів на кожному етапі навчання. Важливим напрямком дослідження є й інтеграція ANFIS з іншими системами, такими як глибокі нейронні мережі або методи обробки сигналів, для підвищення загальної ефективності при роботі з великими зображеннями в умовах дії різних шумів.

Література:

1. Babker A. M., Suliman R. S., Elshaikh R. H. Boboyorov S., Lyashenko V. Sequence of Simple Digital Technologies for Detection of Platelets in Medical Images // Biomedical and Pharmacology Journal. 2024, Vol. 17, № 1, P. 141-152. DOI: 10.13005/bpj/2842.
2. Babker A., Suliman R. S., Ghazwani A. A. M., AlHarbi W., Lyashenko V. Combined Use of Edge Selection Operators in Individual Color Channels for the Analysis of Cytological Images Presented in RGB Format // Biomedical and Pharmacology Journal. 2025, Vol. 18 (March Spl Edition), P. 121-138. DOI: 10.13005/bpj/3077.
3. Ghelani H. AI-Driven quality control in PCB manufacturing: enhancing production efficiency and precision // Valley International Journal Digital Library. 2024, Vol.12, № 10, P. 1549-1564. DOI: 10.18535/ijdrm/v12i10.ec06.
4. Mehraj H., Jayadevappa D., Haleem S. L. A., Parveen R., Madduri A., Ayyagari M. R., Dhabliya D. Protection motivation theory using multi-factor authentication for providing security over social networking sites // Pattern Recognition Letters. 2021, Vol. 152, P. 218-224. DOI: 10.1016/j.patrec.2021.10.002.
5. Rana M., Bhushan M. Machine learning and deep learning approach for medical image analysis: diagnosis to detection // Multimedia Tools and Applications. 2023, Vol. 82, № 17, P. 26731-26769. DOI: 10.1007/s11042-022-14305-w.
6. Guido R., Ferrisi S., Lofaro D., Conforti D. An overview on the advancements of support vector machine models in healthcare applications: a review // Information. 2024, Vol. 15, № 4, P. 235. DOI: 10.3390/info15040235.
7. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. 2015, Vol. 521, № 7553, P. 436-444. DOI: 10.1038/nature14539.
8. Vargas O. S., Aldaco S. E. D. L., Alquicira J. A., Vela-Valdés L. G., Núñez A. R. L. Adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) applied to inverters: a survey // IEEE Transactions on Power Electronics. 2023, Vol. 39, № 1, P. 869-884. DOI: 10.1109/TPEL.2023.3327014.
9. Senthilselvi A., Duela J. S., Prabavathi R., Sara D. Performance evaluation of adaptive neuro fuzzy system (ANFIS) over fuzzy inference system (FIS) with optimization algorithm in Яde-noising of images from salt and pepper noise // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2021, P. 1-6. DOI: 10.1007/s12652-021-03024-z.
10. Rashed B. M., Popescu N. Medical image-based diagnosis using a hybrid adaptive neuro-fuzzy inferences system (ANFIS) optimized by GA with a deep network model for features extraction // Mathematics. 2024, Vol. 12, № 5, P. 633. DOI: 10.3390/math12050633.
11. Daviran M., Maghsoudi A., Ghezlbash R. Optimized AI-MPM: Application of PSO for tuning the hyperparameters of SVM and RF algorithms // Computers & Geosciences. 2025, Vol. 195, P. 105785. DOI: 10.1016/j.cageo.2024.105785

12. Sun L., Lin J., Dong W., Li X., Wu J., Shi G. Learning real-world heterogeneous noise models with a benchmark dataset // Pattern Recognition. 2024, Vol. 156, P. 110823. DOI: 10.1016/j.patcog.2024.110823.

13. Pattnaik S., Sahu P. K. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System-Particle swarm optimization-based clustering approach and hybrid Moth-flame cuttlefish optimization algorithm for efficient routing in wireless sensor network // International Journal of Communication Systems. 2021, Vol. 34, № 9, P. e4783. DOI: 10.1002/dac.4783.

14. Katoch S., Chauhan S. S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future // Multimedia tools and applications. 2021, Vol. 80, № 5, P. 8091-8126. DOI: 10.1007/s11042-020-10139-6.

References:

1. Babker A. M., Suliman R. S., Elshaikh R. H. Boboyorov S., Lyashenko V. Sequence of Simple Digital Technologies for Detection of Platelets in Medical Images // Biomedical and Pharmacology Journal. 2024, Vol. 17, № 1, P. 141-152. DOI: 10.13005/bpj/2842.

2. Babker A., Suliman R. S., Ghazwani A. A. M., AlHarbi W., Lyashenko V. Combined Use of Edge Selection Operators in Individual Color Channels for the Analysis of Cytological Images Presented in RGB Format // Biomedical and Pharmacology Journal. 2025, Vol. 18 (March Spl Edition), P. 121-138. DOI: 10.13005/bpj/3077.

3. Ghelani H. AI-Driven quality control in PCB manufacturing: enhancing production efficiency and precision // Valley International Journal Digital Library. 2024, Vol.12, № 10, P. 1549-1564. DOI: 10.18535/ijdrm/v12i10.ec06.

4. Mehraj H., Jayadevappa D., Haleem S. L. A., Parveen R., Madduri A., Ayyagari M. R., Dhaliya D. Protection motivation theory using multi-factor authentication for providing security over social networking sites // Pattern Recognition Letters. 2021, Vol. 152, P. 218-224. DOI: 10.1016/j.patrec.2021.10.002.

5. Rana M., Bhushan M. Machine learning and deep learning approach for medical image analysis: diagnosis to detection // Multimedia Tools and Applications. 2023, Vol. 82, № 17, P. 26731-26769. DOI: 10.1007/s11042-022-14305-w.

6. Guido R., Ferrisi S., Lofaro D., Conforti D. An overview on the advancements of support vector machine models in healthcare applications: a review // Information. 2024, Vol. 15, № 4, P. 235. DOI: 10.3390/info15040235.

7. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. 2015, Vol. 521, № 7553, P. 436-444. DOI: 10.1038/nature14539.

8. Vargas O. S., Aldaco S. E. D. L., Alquicira J. A., Vela-Valdés L. G., Núñez A. R. L. Adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) applied to inverters: a survey // IEEE Transactions on Power Electronics. 2023, Vol. 39, № 1, P. 869-884. DOI: 10.1109/TPEL.2023.3327014.

9. Senthilselvi A., Duela J. S., Prabavathi R., Sara D. Performance evaluation of adaptive neuro fuzzy system (ANFIS) over fuzzy inference system (FIS) with optimization algorithm in de-noising of images from salt and pepper noise // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2021, P. 1-6. DOI: 10.1007/s12652-021-03024-z.

10. Rashed B. M., Popescu N. Medical image-based diagnosis using a hybrid adaptive neuro-fuzzy inferences system (ANFIS) optimized by GA with a deep network model for features extraction // Mathematics. 2024, Vol. 12, № 5, P. 633. DOI: 10.3390/math12050633.

11. Daviran M., Maghsoudi A., Ghezlbash R. Optimized AI-MPM: Application of PSO for tuning the hyperparameters of SVM and RF algorithms // Computers & Geosciences. 2025,

Vol. 195, P. 105785. DOI: 10.1016/j.cageo.2024.105785Get rights and content.

12. Sun L., Lin J., Dong W., Li X., Wu J., Shi G. Learning real-world heterogeneous noise models with a benchmark dataset // Pattern Recognition. 2024, Vol. 156, P. 110823. DOI: 10.1016/j.patcog.2024.110823.

13. Pattnaik S., Sahu P. K. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System-Particle swarm optimization-based clustering approach and hybrid Moth-flame cuttlefish optimization algorithm for efficient routing in wireless sensor network // International Journal of Communication Systems. 2021, Vol. 34, № 9, P. e4783. DOI: 10.1002/dac.4783.

14. Katoch S., Chauhan S. S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future // Multimedia tools and applications. 2021, Vol. 80, № 5, P. 8091-8126. DOI: 10.1007/s11042-020-10139-6.