

С. В. Тимчук, В. О. Тарасенко

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ**

*В умовах російсько-української війни виникають нові складнощі для ведення радіоелектронної розвідки. Радіочастотний спектр насичений різноманітними типами сигналів, а сучасні засоби зв'язку мають високий рівень захищеності. Більшість зразків озброєння автоматично розпізнають сигнали за рахунок вимірювання їх параметрів, однак через низьке відношення сигнал-шум цей процес може бути ускладненим. Крім того, майже усі сучасні засоби радіоелектронної розвідки відображають спектрограми, на яких можна чітко визначити сигнал. З урахуванням широкого застосування технологій розпізнавання зображень у різних галузях важливо вивчити наявний досвід, розглянути методи та способи цього процесу й дослідити можливість їх використання для розв'язання проблеми розпізнавання сигналів.*

*Сучасні алгоритми штучного інтелекту забезпечують аналіз великих обсягів даних із використанням методів машинного навчання. Особливу увагу приділено можливостям глибоких нейронних мереж, які демонструють високі результати у вирішенні складних завдань. Це відкриває нові перспективи для їх застосування у військовій сфері. Підходи, що ґрунтуються на аналізі даних із використанням спектрограм, дозволяють досягати високої точності розпізнавання навіть у складних умовах. Розробка інноваційних методів обробки сигналів є важливою складовою зміцнення обороноздатності держави.*

*У статті досліджено можливості штучного інтелекту з особливим акцентом на ролі комп'ютерного зору в цій сфері. Проведено класифікацію методів розпізнавання зображень за схемою, розробленою на основі відомих підходів. Крім того, проаналізовано основні етапи комп'ютерного зору, їх функціональні складові та зміст. Окрему увагу приділено методам розпізнавання образів, зокрема їх трьом основним типам, проаналізовано їх переваги та недоліки. У публікації наведено практичні приклади реалізації зазначених методів. Завершальним етапом дослідження став вибір методу для подальших експериментальних і теоретичних досліджень.*

**Ключові слова:** *радіоелектронна розвідка; радіочастотний спектр; сигнали; розпізнавання сигналів; методи розпізнавання зображень.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Швидкість та точність оброблення сигналів є критично важливими для забезпечення переваги в сучасних конфліктах. Застосування технологій комп'ютерного зору в розпізнаванні сигналів відкриває можливості для автоматизації процесів аналізу даних і підвищення ефективності роботи радіоелектронних засобів. Реалізовані в різноманітних засобах радіоелектронної розвідки (РЕР) підходи до розпізнавання сигналів ґрунтуються на вимірюванні їх параметрів та зіставленні з еталонними описами. Однак такий підхід не завжди дозволяє реалізувати процес розпізнавання в режимі часу, близькому до реального. Водночас значного розвитку

на сьогодні набули методи комп'ютерного зору, які дозволяють синхронно вирізняти різні об'єкти на зображеннях, тому актуальним є завдання реалізації цих методів для здійснення розпізнавання сигналів радіоелектронних засобів та систем зв'язку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тематика розпізнавання зображень на сьогодні є актуальною в різних сферах, зокрема у виробництві, наукових дослідженнях та військовій галузі. Вудс Р., Гонсалес Р. у книзі «Цифрова обробка зображень» [1] надають загальний аналіз алгоритмів та застосувань комп'ютерного зору, що є основою для багатьох сучасних методів розпізнавання зображень.

Форсайт Д. А., Понсе Дж. [2] описують сучасні підходи до розпізнавання зображень за допомогою комп'ютерних технологій, підкреслюючи важливість їх упровадження в практику.

Різні автори класифікують методи розпізнавання зображень залежно від поставлених завдань. Наприклад, у [3] наведено класифікацію методів для розпізнавання у відеопотоці. У статті [4] проаналізовано методи розпізнавання кольорових зображень та запропоновано схему їх загальної класифікації. Публікація [5] містить детальний аналіз нейронних мереж (НМ), а автор [6] виділяє чотири основні групи методів розпізнавання зображень.

Проте загальної класифікації методів, яка б відповідала вирішенню проблем, описаних у цій статті, немає. У [7] розглянуто подібну проблему, однак ведення РЕР має свою специфіку, тому слід зазначити, що питання використання методів розпізнавання зображень у РЕР досліджено недостатньо.

**Формулювання завдання дослідження.** Для вдосконалення процесу розпізнавання сигналів у системах РЕР необхідна така класифікація методів розпізнавання зображень, яка враховуватиме специфічні вимоги РЕР і забезпечуватиме високу точність та швидкість розпізнавання сигналів у складних умовах експлуатації. Це передбачає дослідження сучасних методів комп'ютерного зору та їх можливостей для розпізнавання сигналів у радіочастотному спектрі, а також розробку класифікації методів розпізнавання зображень на основі відомих підходів і технологій. Важливим етапом є аналіз основних стадій та функціональних компонентів методів комп'ютерного зору, зокрема їх переваг і недоліків. Практичні приклади застосування цих методів у контексті розпізнавання сигналів РЕР дозволять оцінити їхню ефективність і визначити оптимальні підходи. У підсумку метою статті є вибір найбільш ефективного методу для подальших теоретичних та експериментальних досліджень, що сприятиме підвищенню ефективності процесу розпізнавання сигналів у режимі реального часу.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження розпізнавання зображення доцільно почати з вивчення галузі штучного інтелекту (ШІ) та напрямків, які він охоплює, оскільки ці знання забезпечать фундаментальне розуміння основних принципів і технологій, що використовуються в системах розпізнавання зображень. ШІ – це властивість автоматичних систем брати на себе окремі функції інтелекту людини, наприклад, вибирати й ухвалювати оптимальні рішення на основі раніше одержаного досвіду й раціонального аналізу зовнішніх чинників [8]. ШІ як міждисциплінарна сфера включає в себе машинне навчання, обробку природнього мовлення, комп'ютерний зір,

робототехніку та експертні системи, що є критично важливими для розробки й упровадження ефективних методів оброблення та аналізу візуальної інформації. Дослідження цих сфер дозволяє краще зрозуміти алгоритми та моделі, які застосовуються в розпізнаванні образів, їх переваги та обмеження, а також вплив на практичні додатки в системах PER.

Комп'ютерний зір (або машинний зір) – це галузь ШІ, що займається розробкою теоретичних й алгоритмічних основ для автоматичного отримання, оброблення та аналізу зображень. Основна ідея – навчити машини «бачити» та інтерпретувати візуальну інформацію так само, як це робить людина. Комп'ютерний зір включає в себе декілька ключових етапів, кожен із яких є важливим для досягнення повного розуміння та інтерпретації зображень чи відео [9]. Розглянемо основні етапи комп'ютерного зору.

**Збір даних** – отримання зображень або відео завдяки використанню камер, сенсорів або інших пристроїв для збору візуальних даних.

**Попередня обробка зображень** – це їх корекція (усунення шумів, нормалізація освітлення, корекція перспективи), а також фільтрація (використання фільтрів для покращення якості зображень).

**Сегментація зображень** – їх поділ на сегменти (розбиття на кілька частин для полегшення аналізу).

**Аналіз та інтерпретація** передбачають класифікацію (визначення категорії, до якої належить зображення або об'єкт на ньому) та розпізнавання зображення (ідентифікація та локалізація об'єктів на ньому).

**Постоброблення та візуалізація** – це аналіз отриманих результатів; їх оцінювання, виявлення помилок та оптимізація моделей, а також візуалізація, яка полягає в наданні результатів у зручному для користувача вигляді, наприклад, накладання розпізнаних об'єктів на зображення.

Окрім того, слід розглянути розпізнавання образів у контексті комп'ютерного зору, оскільки цей підхід дозволяє вирішувати широкий спектр завдань, пов'язаних із автоматичною інтерпретацією візуальної інформації.

Розпізнавання образів є математичним фундаментом розпізнавання зображень, адже саме на основі теорії розпізнавання образів розробляються алгоритми та моделі, що забезпечують здатність комп'ютера відрізнити один об'єкт від іншого. Ця теорія базується на таких математичних принципах, як: статистика, лінійна алгебра, оптимізація, теорія ймовірностей, що дозволяють здійснювати класифікацію об'єктів на основі їх характеристик. Образом може бути цифрова фотографія (розпізнавання зображень), буква або цифра (розпізнавання символів), запис мовлення (розпізнавання мови) тощо.

Для реалізації основних принципів побудови автоматичних систем розпізнавання образів є три основні типи методів: евристичні, математичні та лінгвістичні (синтаксичні). Нерідко системи розпізнавання створюються на основі комбінації цих методів [10]. Розглянемо їх детальніше.

**Евристичні методи** розпізнавання образів – це група методів, які ґрунтуються на знаннях та досвіді людини, а не на формальних математичних моделях. Вони використовують набори правил, логічних висновків та інтуїтивних уявлень для класифікації образів.

**Математичні методи** розпізнавання образів базуються на формальних математичних моделях для подання (опису) та класифікації образів. Цей підхід використовує принципи математичної статистики, теорії прийняття рішень, ШІ та інших галузей математики для розроблення алгоритмів, які можуть автоматично класифікувати та інтерпретувати візуальну інформацію.

**Лінгвістичні методи** (також відомі як синтаксичні) використовують для розпізнавання образів шляхом опису їх структури та взаємозв'язків елементів, подібно до опису речень у мові. Основні принципи цих методів:

розподіл образу на складові (базові компоненти), які називають непохідними елементами;

граматика образів: створюється формальна граматика, яка описує правила комбінування та зв'язку непохідних елементів для формування допустимих образів;

аналіз та розпізнавання: за допомогою граматики й алгоритмів аналізу образ розпізнається та класифікується.

З урахуванням напрямків ШІ, а також основних етапів комп'ютерного зору та методів розпізнавання образів пропонуємо класифікацію розпізнавання зображення (рис. 1).

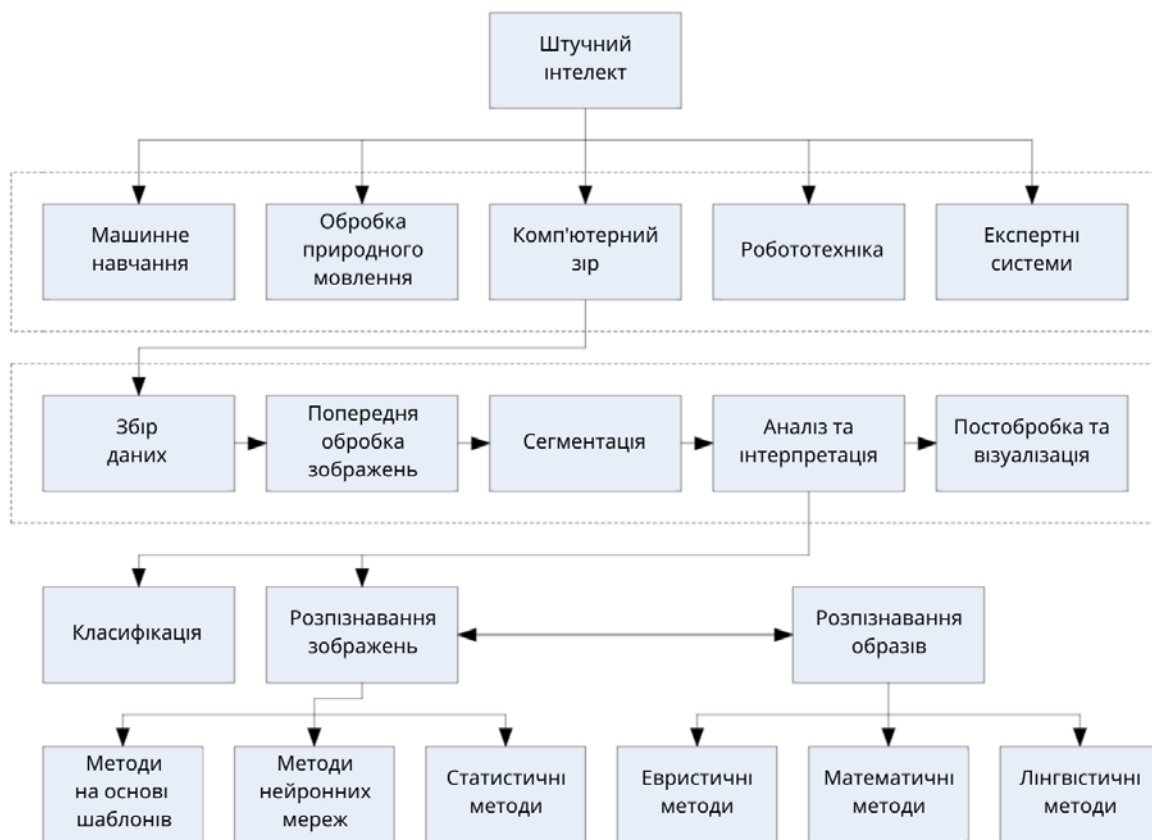


Рис. 1. Схема класифікації методів розпізнавання образів і зображень, а також їх зв'язок зі ШІ

Відповідно до наведеної схеми розглянемо найважливіший етап – розпізнавання зображення, яке ґрунтується на принципах розпізнавання образів, але використовує спеціалізовані методи й алгоритми, оптимізовані для роботи з візуальними даними.

Розпізнавання зображень – це розділ сучасного ШІ, який дозволяє комп'ютерам ідентифікувати візерунки чи об'єкти на цифрових зображеннях, а також людей, місця чи тексти [11].

На сьогодні відома велика кількість методів розпізнавання зображень, проте особливу увагу слід приділити трьом основним групам: методам на основі шаблонів, НМ та статистичним методам.

Методи розпізнавання зображень на **основі шаблонів** ґрунтуються на порівнянні вхідного зображення з набором прототипів (шаблонів, зразків). Для кращого зіставлення застосовується геометрична нормалізація, яка вирівнює та масштабує зображення. Потім розраховується відстань між вхідним зображенням та кожним прототипом. Відповідність визначається як прототип, для якого відстань є мінімальною. Перевагами цього методу є:

простота;

швидкість (пошук відповідностей у наборі шаблонів обчислювально ефективний);

стійкість до шуму (деякі методи стійкі до шуму та деформацій вхідного зображення).

Серед недоліків варто вказати на:

залежність від шаблонів (ефективність методу дуже залежить від якості та кількості шаблонів у наборі);

обмежена узагальнюваність (ці методи можуть мати обмежену здатність узагальнювати нові дані, які не включені до набору шаблонів);

складність роботи з великими обсягами даних (збільшення набору шаблонів може призвести до експоненціального зростання часу, необхідного для пошуку відповідностей).

Основний метод – це зіставлення шаблонів, або, як його ще називають, лінійна просторова фільтрація. Він використовує шаблонне зображення (маску фільтра), адаптоване до певної функції пошукових зображень для виявлення. Цю техніку можна легко застосувати на сірих зображеннях або тих, де додаткова змінна кольору або відсутня, або нерелевантна.

Методи взаємної кореляції порівнюють подібність пошукових і шаблонних зображень. Їх результати мають бути найвищими в тих місцях, де структура зображення відповідає структурі шаблону, тобто де великі значення зображень пошуку множаться на великі значення зображень шаблону.

Цей метод зазвичай реалізується шляхом вибору частини пошукового зображення для використання як шаблону.  $S(x, y)$  описують значення пікселя пошукового зображення, де  $(x, y)$  – це координати пікселя в пошуковому зображенні. Для простоти припустимо, що піксельні значення є скалярними, як у сірому зображенні. Так само нехай  $T(x_t, y_t)$  є значенням пікселя шаблону, де  $(x_t, y_t)$  описує координати пікселя в зображенні шаблону. Щоб застосувати фільтр, просто перемістимо центр (або початок) шаблонного зображення над кожною точкою пошукового зображення та обчислимо суму добутків, подібно до скалярного добутку, між значеннями пікселів у пошуковому запиті та шаблонних зображеннях у всій області, охопленій шаблоном. Більш формально, якщо  $(0, 0)$  є центром (або джерелом) зображення шаблону, то потім взаємну кореляцією  $T * S$  у кожній точці  $(x, y)$  у пошуковому зображенні можна обчислити як

$$(T * S)(x, y) = \sum_{(x_t, y_t) \in T} T(x_t, y_t) * S(x_t + x, y_t + y), \quad (1)$$

де  $(T * S)(x, y)$  – значення перехресної кореляції шаблону  $T$  і пошукового зображення  $S$  у точці  $(x, y)$  пошукового зображення;

$T(x_t, y_t)$  – значення пікселя шаблону в координатах  $(x_t, y_t)$ ;

$S(x_t + x, y_t + y)$  – значення пікселя пошукового зображення в координатах;

$(x_t + x, y_t + y)$  – точка, де шаблон зміщено на  $(x, y)$  відносно початкової точки пошукового зображення;

$(x_t, y_t) \in T$  – усі координати, що входять до області шаблону  $T$ .

Для зручності  $T$  позначає значення пікселів зображення шаблону, а також його домен та межі. Враховуються всі можливі позиції шаблону щодо пошукового зображення. Оскільки значення перехресної кореляції є найбільшими, коли значення пікселів пошуку та шаблону вирівнюються, то найкраща відповідна позиція  $(x_m, y_m)$  відповідає максимальному значенню  $T * S$ .

Інший спосіб вирішення проблеми розпізнавання зображень за допомогою зіставлення шаблонів – це порівняння інтенсивності пікселів за допомогою вимірювання суми абсолютних різниць (*SAD*). Нехай  $I_S(x_s, y_s)$  та  $I_T(x_t, y_t)$  позначають інтенсивність світла пікселів у пошукових і шаблонних зображеннях із координатами  $(x_s, y_s)$  та  $(x_t, y_t)$  відповідно. Потім переміщуємо центр (або початок) шаблону в точку  $(x, y)$  у пошуковому зображенні, як і раніше, сума абсолютних різниць між інтенсивністю пікселів шаблону та пошуку в цій точці дорівнює

$$(SAD)(x, y) = \sum_{(x_t, y_t) \in T} I_T(x_t, y_t) * I_S(x_t + x, y_t + y), \quad (2)$$

де  $(SAD)(x, y)$  – значення суми абсолютних різниць між шаблоном  $T$  і пошуковим зображенням  $S$  у точці  $(x, y)$ ;

$I_T(x_t, y_t)$  – інтенсивність (значення) пікселя в шаблоні з координатами  $(x_t, y_t)$ ;

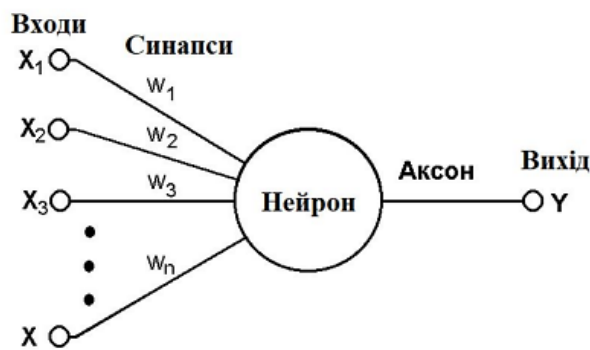
$I_S(x_t + x, y_t + y)$  – інтенсивність (значення) пікселя пошукового зображення в координатах  $(x_t, y_t)$ , де шаблон зміщено на  $(x, y)$  відносно початкової точки пошукового зображення;

$(x_t, y_t) \in T$  – усі координати, що входять до області шаблону  $T$ .

За допомогою цього показника найменша *SAD* дає найкращу позицію для шаблону, а не найбільша, як у випадку перехресної кореляції. Спосіб *SAD*, як правило, відносно простий для впровадження та розуміння, але він також має тенденцію до повільного виконання. Методи розпізнавання зображень на основі шаблонів пропонують простий та ефективний підхід до їх класифікації. Однак обмежена узагальнюваність та залежність від якості шаблонів роблять ці методи менш придатними для складних завдань розпізнавання зображень, де доступні великі обсяги даних [12].

**Метод НМ** використовує штучні НМ для навчання моделі розпізнавання на основі великого набору даних зображень та їх відповідних міток. НМ можуть вивчати складні закономірності даних і досягати високої точності розпізнавання.

Розпізнавання образів ШІ за допомогою НМ (рис. 2.) у наш час є найпоширенішим методом виявлення образів. НМ, що базуються на паралельних субодиницях, називаються нейронами, які імітують процес прийняття рішень людиною. Цей метод можна розглядати як масово паралельні обчислювальні системи, що складаються з величезної кількості простих процесорів із безліччю взаємозв'язків (нейронів). Найбільш популярною та успішною формою машинного навчання є глибоке навчання, яке застосовує глибокі згорткові НМ. Сьогодні розпізнавання образів НМ має перевагу над іншими методами, оскільки може неодноразово змінювати ваги на ітераційних образах.



*Рис. 2. Концепція НМ*

На основі нечітких алгоритмів застосовується концепція нечіткої логіки, яка використовує значення істинності від 0 до 1. У нечіткій моделі можуть діяти деякі правила для відповідності даного входу певним результатам. Ця модель дає хороші результати, оскільки підходить для невизначених областей [13].

Для розпізнавання складних об'єктів створюють системи на основі НМ. Вони можуть мати топологію, орієнтовану на розв'язання конкретної задачі з урахуванням властивостей об'єкта: просторово-часової орієнтації, масштабу, геометричних параметрів, зокрема координат, кутового положення, лінійного розміру, відстані тощо. У той же час істотним недоліком типових НМ є відсутність ефективних засобів для розв'язання задач розпізнавання динамічних образів. Основною проблемою інтерпретації динамічних візуальних сцен є висока розмірність простору ознак, наявність геометричних перетворень над об'єктом. Стискання простору ознак виконують методом витягу інтегральних й інваріантних до геометричних перетворень параметрів зображень. Метод геометричних та більш загальних алгебричних інваріантів відіграє значну роль у розв'язанні задач розпізнавання зображень. Так, наприклад, інваріанти, зокрема інваріантні моменти, були успішно використані для розпізнавання профілів літаків і танків, друкованих і рукописних букв, параметрів стикувального вузла космічного апарата, а також багатьох інших об'єктів. Математичне обґрунтування інваріантних особливостей напівтонових зображень базується на теорії алгебричних інваріантів.

Суть НМ полягає в тому, що мережа складається з елементів, які називаються формальними нейронами. Кожен нейрон приймає набір сигналів, що надходять на його входи від одної групи таких самих нейронів, обробляє сигнали з урахуванням попередніх сигналів й адаптації до них на основі процедур навчання та передає результати обробки іншій групі нейронів. Зв'язки між ними кодуються вагами, що відображають важливість їх інформації для визначення загального результату. Основний принцип налаштування НМ полягає в застосуванні процедур оптимізації та адаптації на основі певних критеріїв, здатності до перенавчання. Однією з переваг НМ є те, що всі елементи можуть функціонувати паралельно, тим самим істотно підвищуючи ефективність розв'язання задач, особливо в ході оброблення зображень у реальному часі. Системи розпізнавання об'єктів зображення, що ґрунтуються на НМ, використовують ієрархічну архітектуру. Спочатку вектор ознак обробляється грубою з високим рівнем похибок, але швидкою мережею, далі, якщо вектор не був класифікований як не об'єкт, то алгоритм розв'язання корегується більш точною і більш повільною мережею.

Переважає кількість прикладних нейронних систем передбачає використання багатосарових перцептронів (назва походить з англійського *perceptron* – сприйняття, оскільки перші зразки таких структур слугували для моделювання зору). Популярність перцептронів зумовлена широким колом доступних для них задач. Загалом вони вирішують задачу апроксимації багатовимірних функцій, іншими словами – побудову багатовимірного відображення  $F: x \rightarrow y$ , яке узагальнює заданий набір прикладів (еталонних пар даних)  $\{x^a, y^a\}$ .

Залежно від типу вихідних змінних (тип вхідних не має вирішального значення) апроксимація функції може набувати вигляду:

- класифікації (дискретний набір вихідних значень);
- регресії (неперервні вихідні дані).

Множина практичних задач розпізнавання зображень, фільтрації шумів, передбачення часових рядів та інших зводиться до цих базових задач. Причина популярності перцептронів у тому, що для свого кола задач вони є універсальними та ефективними (з погляду обчислювальної складності) пристроями.

Недоліком використання НМ є їх перенавантаження в разі надмірного збільшення кількості нейронів у мережі. Іншим недоліком є великий клас функцій, які неможливо розділити за допомогою одношарової мережі. Про ці функції говорять, що вони є лінійно нероздільними, і саме вони накладають вагомі обмеження на можливості одношарових мереж [14].

НМ є потужним інструментом для розпізнавання зображень, вони забезпечують високу точність і автоматизацію процесу виділення ознак. Хоча НМ вимагають значних обчислювальних ресурсів і великих обсягів даних для навчання, їх переваги значні, що робить їх незамінними в сучасних задачах комп'ютерного зору.

Перші **статистичні методи** ґрунтувалися на аналізі взаємного положення відтінків сірого кольору зображення та частоти їх появи, що характеризувалася двовимірною функцією щільності ймовірності. Для класифікації та розпізнавання тексту за допомогою



функції щільності ймовірності було визначено такі чотири характерні ознаки: кутовий момент; контрастність; кореляція; ентропія.

До статистичних методів належить кореляційний аналіз зображень. На основі кореляційного підходу найбільш успішним є метод матриць взаємозв'язку. Ці матриці характеризують частоту пар різних градацій сірого кольору, що присутні в зображенні, і визначаються шляхом кореляційного аналізу пікселів зображення, при цьому, якщо піксель відповідає вибраній градації, то він враховується як одиничне значення, якщо ні, то як нульове. У разі кольорових зображень цей підхід використовують для аналізу кожного з трьох базових кольорів. Як випливає з методу формування матриць взаємозв'язку, вони найкраще підходять для розв'язання задач класифікації текстур.

Разом із статистичним аналізом у просторовій області використовують аналогічний аналіз у спектральній області із застосуванням двовимірного дискретного перетворення Фур'є у базисі різних ортогональних функцій – дискретних експоненціальних функцій, косинусних, Уолша – Адамара, Хаара та інших. Для аналізу текстур користуються методом гістограм розподілу спектральних коефіцієнтів. Загальною характеристикою такого підходу є те, що гістограми спектральних коефіцієнтів, отримані в результаті інтегральних перетворень, більш стійкі та надійні, ніж гістограми розподілу окремих пікселів чи груп пікселів. Цей метод також не чутливий до наявного в зображенні шуму, але це є водночас і недоліком у разі його використання для розв'язання задачі розпізнавання незначних за розміром об'єктів на текстурованому фоні. Крім того, спектральні методи згладжують різкі межі між об'єктами зображення.

Статистичний аналіз пікселів та спектральних коефіцієнтів на основі гістограм в основному використовують для класифікації статичних текстур, а для дослідження динамічних текстур – методи на основі кореляційного аналізу.

Статистичні методи розпізнавання зображень є важливим інструментом у комп'ютерному зорі, що дозволяє ефективно класифікувати та ідентифікувати текстури й об'єкти. Їх застосування варіюється від таких простих завдань, як аналіз гістограм, до більш складних методів: кореляційний аналіз та спектральний підхід. Незважаючи на певні обмеження, статистичні методи залишаються фундаментальними та широко використовуваними в різних галузях.

Отже, запропонована на рис. 1 схема відображає взаємозв'язок між процесами розпізнавання зображень і образів, що підкреслює важливість кожного етапу в контексті ШІ та комп'ютерного зору. Вона також дозволяє чітко структурувати різні підходи та методи, які використовуються для розв'язання задач розпізнавання зображень, з акцентом на комплексному підході до аналізу та обробки візуальної інформації.

Багато проєктів розпізнавання зображень базуються на гібридних моделях для підвищення його продуктивності залежно від типу та наявності даних. Наприклад, методи глибокого навчання досягають значних результатів, але є досить затратними, тоді як простіші математичні методи зазвичай є більш ефективними. На нашу думку, використання гібридної моделі підвищить продуктивність усієї програми або системи виявлення.

**Висновки.** Здійснено комплексний аналіз методів розпізнавання зображень та їх класифікацію. Зокрема, розглянуто три основні групи методів розпізнавання: методи на основі шаблонів, статистичні методи та НМ. Усі вони мають свої унікальні переваги та недоліки, які визначають їхню ефективність у різних контекстах застосування.

Найперспективнішим методом, що виділяється на тлі інших, є метод НМ. Це обумовлено низкою причин, зокрема їхньою здатністю до глибокого навчання та адаптивності в умовах великих і складних наборів даних. НМ показують відмінні результати в задачах розпізнавання образів, зокрема розпізнавання сигналів на частотному спектрі. Вони здатні автоматично виділяти важливі ознаки із необроблених даних без необхідності в ручному їх визначенні. Це дозволяє НМ ефективно справлятися з такими складними задачами, як класифікація зображень, обробка сигналів у частотному спектрі. У випадках, коли розпізнавання здійснюється на основі аналізу частотних компонентів сигналу (наприклад, у задачах розпізнавання звуків, електромагнітних хвиль тощо), вони демонструють високу точність і надійність. НМ здатні навчатися відмінностей у спектральних характеристиках різних класів сигналів, що робить їх незамінним інструментом у таких задачах.

Отже, результати проведеного дослідження вказують на те, що НМ є найбільш перспективним підходом для розпізнавання зображень і сигналів, особливо в контексті аналізу частотних спектрів. Вони відкривають нові можливості для створення більш інтелектуальних й автономних систем, здатних вирішувати складні завдання безпеки. Подальший розвиток методів НМ у РЕР та їх адаптація до специфічних умов застосування сприятиме підвищенню ефективності й точності систем розпізнавання в реальності.

### **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Woods R. E., Gonzalez R. C. Digital Image Processing. Pearson, 2017. 1192 p.
2. Forsyth D. A., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. Pearson Education, Limited, 2015. 793 p.
3. Мозговенко А. А., Зінов'єва О. Г. Аналіз методів комп'ютерного зору в задачах ідентифікації осіб у відеопотоці // Таврійський науковий вісник. 2023. № 3. С. 56–62.
4. Яровий А., Власюк Р. Аналіз методики нейромережевого розпізнавання кольорових зображень у контексті її універсальності. Вінниця : ВНТУ, 2009. С. 255–262.
5. Могилевич Д., Хміль Р. Аналіз методів розпізнавання образів на основі нейронних мереж // Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. 2023. Т. 34 (73), Техн. науки. С. 46–52. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/09>
6. Самусько Б. М., Майданюк В. П. Класифікація методів для розпізнавання зображень. Вінниця : ВНТУ, 2021. С. 181–182.
7. Machine Vision and Deep Learning for Classification of Radio SETI Signals / G. R. Harp et al. 2019. P. 1–31.
8. Савченко А. С., Синельников О. О. Методи та системи штучного інтелекту. Київ : НАУ, 2017. 137 с.
9. Davies E. R. Computer Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Elsevier Science & Technology Books, 2017. 900 p.

10. Tou J., Gonzalez R. *Pattern Recognition Principles*. Addison-Wesley Publishing Company, 1974. 377 p.
11. Вовк С., Гнатушенко В., Бондаренко М. *Методи обробки зображень та комп'ютерний зір*. Дніпропетровськ : ЛІРА, 2016. 147 с.
12. Template matching // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Template\\_matching](https://en.wikipedia.org/wiki/Template_matching) (last accessed: 22.07.2024).
13. Використання комп'ютерного зору для розпізнавання образів // Матеріали 2-ї Міжнар. студ. наук. конф. 2021. Т. 1. С. 108–110.
14. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. *Методи обчислень*. Ч. 2 / Р. Кветний та ін. Вінниця : ВНТУ, 2013. 235 с.

## REFERENCES

1. Woods, R. E., & Gonzalez, R. C. (2017). *Digital Image Processing*. Pearson.
2. Forsyth, D. A., & Ponce, J. (2015). *Computer Vision: A Modern Approach*. Pearson Education, Limited.
3. Mozghovenko, A. A., & Zinov'ieva, O. H. (2023). Analiz metodiv komp'uternoho zoru v zadachakh identyfikatsii osib u videopototsi [Analysis of Computer Vision Methods in the Tasks of Face Identification in Video Streams]. *Tavriyskiy naukovyi visnyk [Tavriysky Scientific Bulletin]*, 3, 56–62 [in Ukrainian].
4. Yarovyi, A., & Vlasiuk, R. (2009). *Analiz metodyky neiromerezhevoho rozpoznavannia kolorovykh zobrazhen u konteksti yii universalnosti [Analysis of Neural Network Recognition Methodology for Color Images in the Context of its Universality]*. Vinnytsia [in Ukrainian].
5. Mohylevych, D., & Khmil, R. (2023). Analiz metodiv rozpoznavannia obraziv na osnovi neironnykh merezh [Analysis of Methods of Image Recognition Based on Neural Networks]. *Vcheni zapysky TNU im. V. I. Vernadskoho [Scientific Notes of TNU Named After V. I. Vernadsky]*, Vol. 34 (73), Tekhn. Nauky [Technical Sciences], 46–52. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/09> [in Ukrainian].
6. Samusko, B. M., & Maidaniuk, V. P. (2021). *Klasyfikatsiia metodiv dlia rozpoznavannia zobrazhen [Classification of Methods for Image Recognition]*. Vinnytsia [in Ukrainian].
7. Harp, G. R., et al. (2019). *Machine Vision and Deep Learning for Classification of Radio SETI Signals*.
8. Savchenko, A. S., & Synelnikov, O. O. (2017). *Metody ta systemy shtuchnoho intelektu [Methods and Systems of Artificial Intelligence]*. Kyiv [in Ukrainian].
9. Davies, E. R. (2017). *Computer Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*. Elsevier Science & Technology Books.
10. Tou J., & Gonzalez R. (1974). *Pattern Recognition Principles*. Addison-Wesley Publishing Company.
11. Vov, S., Hnatushenko, V., & Bondarenko, M. (2016). *Metody obrobky zobrazhen ta komp'uternyi zir [Image Processing Methods and Computer Vision]*. Dnipropetrovsk [in Ukrainian].
12. Template matching. (n.d.). *Wikipedia, the free encyclopedia*. Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Template\\_matching](https://en.wikipedia.org/wiki/Template_matching)

13. Vykorystannia komp'uternoho zoru dlia rozpiznavannia obraziv [Using Computer Vision for Pattern Recognition]. (2021). In *Materialy 2-i Mizhnar. stud. nauk. konf. [Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Student Scientific Conference]*, Vol. 1. (pp. 108–110) [in Ukrainian].

14. Kvietnyi, R., et al. (2013). Komp'iuterne modeliuвання system ta protsesiv. Metody obchyslen [Computer Modeling of Systems and Processes. Methods of Calculations]. Part 2. Vinnytsia [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 25.11.2021.

**S. V. Tymchuk, V. O. Tarasenko**

#### **ANALYSIS OF IMAGE RECOGNITION METHODS AND THEIR CLASSIFICATION**

*In the context of the Russian-Ukrainian war, new challenges arise for electronic intelligence. The radio frequency spectrum is saturated with various types of signals, and modern communications have a high level of security. An important stage of signal processing at electronic intelligence posts is their recognition. Most weapons automatically recognize signals by measuring their input parameters, however, due to the low signal-to-noise ratio, this process can be difficult. Nevertheless, almost all modern electronic intelligence equipment displays spectrograms on which the signal can be clearly recognized by human vision. Given the widespread use of image recognition technologies in various industries, it is important to consider the methods and techniques of this process and explore the possibility of using them to solve the problem of signal recognition.*

*The article discusses the concept of artificial intelligence with a special emphasis on the role of computer vision in this field. A classification of image recognition methods is carried out according to the scheme developed on the basis of approaches. In addition, the main stages of computer vision are analyzed, including their functional components and content. Particular attention is paid to the methods of pattern recognition, in particular to the three main types of these methods. The three main types of image recognition methods are distinguished, and their advantages and disadvantages are analyzed. The article also provides practical examples of the implementation of these methods. The final stage of the study was the selection of a method for further experimental and theoretical research.*

**Keywords:** *electronic intelligence; radio frequency spectrum; signals; signal recognition; image recognition method; classification.*