

Дутка Х. Б.

Національний університет «Львівська політехніка»

Бешилей М. І.

Національний університет «Львівська політехніка»

Бешилей Г. В.

Національний університет «Львівська політехніка»

РОЗРОБКА КРОСПЛАТФОРМЕННОГО ВЕБЗАСТОСУНКУ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ТА СОРТУВАННЯ ВІДХОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті розглядається процес розроблення кросплатформеного вебзастосунок для розпізнавання та сортування відходів із використанням технологій штучного інтелекту. Актуальність даної теми зумовлена глобальною екологічною кризою, зростанням обсягів побутових і промислових відходів, а також низьким рівнем поінформованості населення щодо правильного сортування сміття. Запропоноване рішення має на меті підвищення ефективності управління відходами через впровадження інтелектуальних цифрових інструментів.

Основною особливістю запропонованого підходу є інтеграція штучного інтелекту безпосередньо в клієнтську частину вебзастосунок за допомогою бібліотеки TensorFlow.js. Це дозволяє виконувати розпізнавання типів відходів у реальному часі без необхідності надсилання даних на сервер, що значно підвищує швидкість системи, забезпечує конфіденційність та зменшує обчислювальне навантаження. Навчання моделі проводилося за допомогою власного набору зображень через платформу Teachable Machine, що забезпечило адаптацію системи до цільового середовища використання. У межах вебзастосунок реалізовано функціональні можливості: аутентифікація користувачів, додавання і перегляд записів про відходи, категоризація, інтерактивна карта з пунктами збору сміття, а також модуль для розпізнавання об'єктів через камеру. Структура системи розроблена на основі стеку технологій React.js, Node.js, PostgreSQL, Prisma та інших сучасних рішень, що забезпечує масштабованість, зручність і стабільність у роботі.

У статті також окреслено потенційні сфери застосування запропонованого інструменту, зокрема в освітніх закладах, комунальних службах, промисловості та побуті. Зроблено акцент на швидкодії, простоті використання та доступності технології для широкого кола користувачів. Застосунок є кросплатформеним і легко інтегрується з іншими цифровими системами, що розширює можливості його використання в різних середовищах та підвищує гнучкість впровадження. Запропонований вебзастосунок може виступати як основа для подальшого розвитку інтелектуальних рішень у сфері екологічного управління та цифрової трансформації утилізації відходів.

Ключові слова: штучний інтелект, розпізнавання відходів, сортування сміття, вебзастосунок, TensorFlow.js, автоматизація, екологічні технології, клієнтська модель, інтерактивна карта, управління відходами.

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростання обсягів побутових і промислових відходів питання їхнього ефективного сортування набуває особливої актуальності. Щороку в Україні утворюються сотні мільйонів тонн сміття, значна частина якого потрапляє на полігони без попереднього сортування, що призводить до істотного забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосфери. Така ситуація ставить під загрозу не лише екологічну рівновагу, а й здоров'я населення, порушуючи основи екологічної безпеки держави. Попри наяв-

ність законодавчих вимог щодо обов'язкового сортування відходів, їх дотримання залишається низьким. Основними причинами цього є відсутність зручних та інтуїтивно зрозумілих інструментів для роздільного збору сміття, низький рівень екологічної культури та поінформованості громадян, недовіра до системи утилізації та переробки, а також недостатнє впровадження інноваційних цифрових технологій у сфері поводження з відходами.

Особливої уваги потребує питання залучення сучасних інформаційних технологій, зокрема веб-

платформ та штучного інтелекту, до автоматизації процесів і підвищення мотивації населення до правильного поводження з відходами. Існує нагальна потреба у створенні інтелектуальних рішень, здатних не лише розпізнавати типи відходів, а й інтерактивно навчати користувачів, сприяючи формуванню екологічно відповідальної поведінки. Таким чином, відсутність доступного цифрового інструменту з функціями інтелектуального розпізнавання та сортування відходів становить суттєву прогалину в системі екологічної безпеки, що зумовлює необхідність розроблення вебзастосунку на основі штучного інтелекту, здатного автоматизувати процес сортування сміття, підвищити екологічну обізнаність населення та сприяти ефективному управлінню відходами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років інтенсивно зростає інтерес до використання технологій штучного інтелекту (ШІ) у сфері управління твердими побутовими відходами. Основним напрямом досліджень є автоматизація процесів сортування за допомогою глибокого навчання, зокрема технологій комп'ютерного зору. У роботі [2] автором запропоновано мобільний застосунок, що реалізовує систему класифікації побутових відходів за допомогою моделі глибокого навчання. Застосунок здатен класифікувати об'єкти в шість основних категорій з точністю понад 90 %, що робить його ефективним засобом підтримки екологічно свідомої поведінки користувачів. Важливою особливістю є зручний мобільний інтерфейс та акцент на використання у побуті, однак рішення залишається орієнтованим на окрему платформу й вимагає встановлення.

Інше дослідження [3] присвячене розробці багатокласової моделі, здатної класифікувати 28 типів сміття. Автори використовують згорткові нейронні мережі та досягають загальної точності понад 83 %. Хоча рішення не орієнтоване на кінцевого користувача, воно має перспективи для інтеграції у промислові сортувальні системи та роботизовані комплекси. У роботі [4] використано модель YOLOv5 для точного розпізнавання та класифікації кількох типів відходів: пластик, скло, папір, метал, картон та органіка. Дослідження акцентує увагу на продуктивності моделі, що дозволяє розгортати її у реальному часі. Проте архітектура рішення вимагає високих обчислювальних потужностей, і його застосування залишається обмеженим до спеціалізованого обладнання. Серед готових користувацьких рішень, що вже представлені на ринку, варто відзначити

Oscar Pocket [5] – мобільний застосунок, який ідентифікує понад 100 тисяч продуктів та надає інструкції з їх утилізації. Його перевагою є глибока база даних і простота використання, проте він вимагає постійного інтернет-з'єднання та не забезпечує автономної роботи моделі. Інший приклад – Wasteless [6], який адаптує інструкції до локальних умов сортування, проте наразі перебуває на етапі розробки. Система Oscar Sort [7], встановлена у кампусі Університету Кентуккі, спрямована на просвітницьку функцію та автоматизацію викидання сміття. Має обмежену доступність через потребу в спеціальному обладнанні та технічній підтримці.

Постановка завдання. З огляду на аналіз, можна зробити висновок, що більшість існуючих рішень орієнтовані на мобільні платформи або промислове обладнання з високими вимогами до ресурсів. При цьому майже відсутні універсальні вебзастосунки, що поєднують високу швидкість, автономність, кросплатформність і простоту впровадження. Саме тому метою роботи розроблення клієнтського вебзастосунку з вбудованою моделлю штучного інтелекту, що працює безпосередньо в браузері, з метою забезпечення миттєвого розпізнавання та сортування відходів, підвищення доступності й конфіденційності користувацьких даних, а також популяризації екологічно свідомого поводження з відходами серед широкого кола населення без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення.

Виклад основного матеріалу. У рамках дослідження розроблено інтелектуальний вебзастосунок для розпізнавання та сортування відходів, що поєднує в собі технології штучного інтелекту, обробки зображень, аналітики користувацьких дій і просторової навігації. Основна ідея полягає у створенні універсального інструменту, доступного через вебінтерфейс, який дозволяє користувачу за допомогою камери пристрою автоматично визначати тип відходу та отримувати рекомендації щодо його утилізації. Розроблена система включає повний функціонал вебзастосунку: модулі аутентифікації, управління користувачами, ведення обліку відходів, відображення статистики, сортування за категоріями, а також інтерактивну карту з можливістю додавання пунктів збору. Усе це об'єднано сучасною клієнт-серверною архітектурою на основі стеку React.js – Node.js – PostgreSQL.

На рис. 1 представлено структуру інформаційних потоків між основними компонентами системи. Користувач працює через вебінтер-



Рис. 1. Схема інформаційної архітектури

фейс, побудований на React.js, який забезпечує доступ до функціональних модулів застосунку. Кожна дія користувача, що стосується взаємодії з даними (реєстрація, додавання відходів, перегляд статистики, робота з картою), призводить до формування HTTP-запитів, які надсилаються на сервер.

Серверна частина, реалізована з використанням Node.js та Express, приймає ці запити та обробляє їх відповідно до бізнес-логіки. Верифікація прав доступу, валідація даних і логіка роботи з обліковими записами користувачів реалізовані саме на цьому рівні. Дані зберігаються у реляційній базі даних PostgreSQL, доступ до якої здійснюється через ORM Prisma. Такий підхід дозволяє легко керувати сутностями та зменшує ризик помилок при взаємодії з БД. Інформаційна архітектура проєкту передбачає чітке розмежування ролей клієнта і сервера, централізоване зберігання даних і модульність функціоналу, що забезпечує зручність підтримки системи, можливість масштабування та інтеграцію додаткових функцій у майбутньому. Для кращого розуміння функціональних можливостей системи на рис. 2 наведено діаграму варіантів використання (use-case діаграму), яка відображає основні сценарії взаємодії користувача з вебзастосунком.

Також, передбачено на головній сторінці вебзастосунку (рис. 3) реєстрацію, авторизацію, роботу з особистими даними, управління категоріями відходів, використання AI-модуля для роз-

пізнавання, перегляд статистики та додавання пунктів збору на інтерактивну карту (рис. 4).

Розроблений вебзастосунок орієнтований на широке коло користувачів – як побутових, так і навчальних або комунальних структур. Його основною цінністю є доступність, простота у використанні та можливість масштабування. На відміну від існуючих мобільних або серверних рішень, запропонований застосунок забезпечує повноцінний локальний аналіз вхідних даних, не покладаючись на зовнішні API чи хмарні сервіси. Такий підхід забезпечує автономність роботи, високу швидкість та збереження конфіденційності зображень.

Універсальність вебзастосунку дозволяє інтегрувати її в різноманітні цифрові екосистеми. Зокрема, застосунок може бути використаний:

- в освітніх закладах – як інтерактивний навчальний інструмент з екологічної грамотності, де учні можуть у реальному часі досліджувати види відходів, навчатися сортуванню та працювати з картою пунктів прийому;
- у житлово-комунальних підприємствах – як частина цифрового сервісу для мешканців, що допомагає правильно сортувати сміття безпосередньо вдома, підвищуючи якість вторинної сировини;
- у закритих корпоративних або виробничих середовищах – для контролю сортування відходів персоналом (наприклад, в офісах, коворкінгах, цехах);

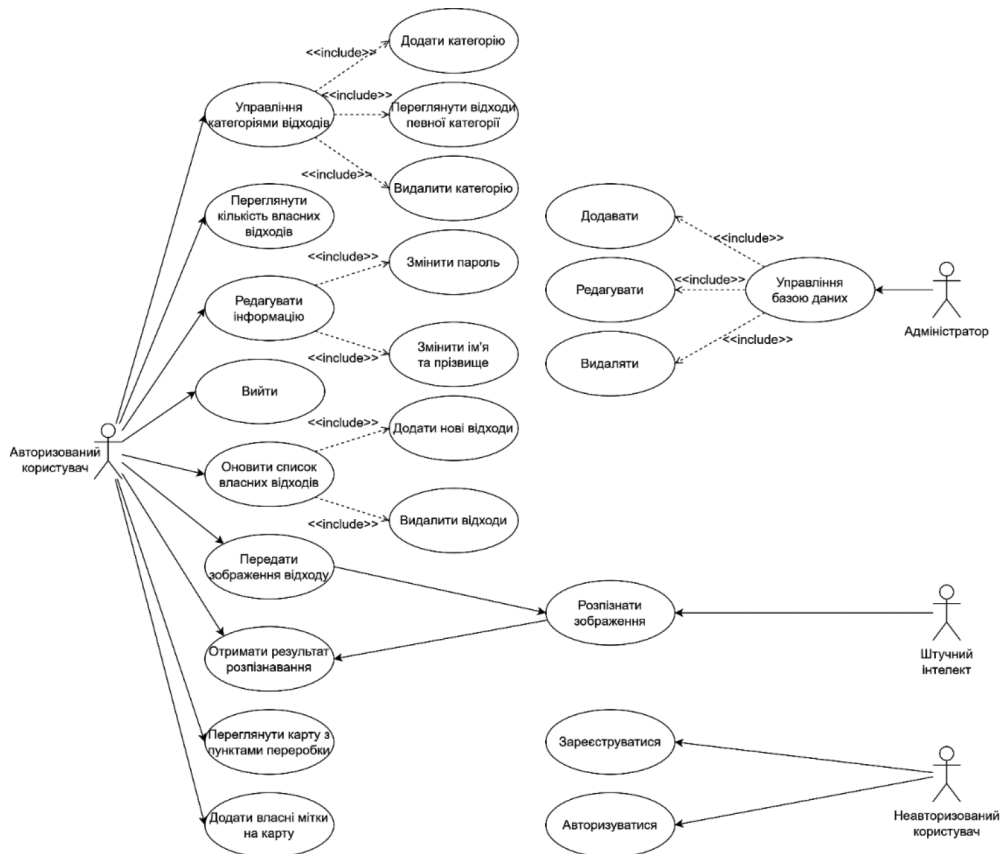


Рис. 2. Use-case діаграма взаємодії користувача із системою

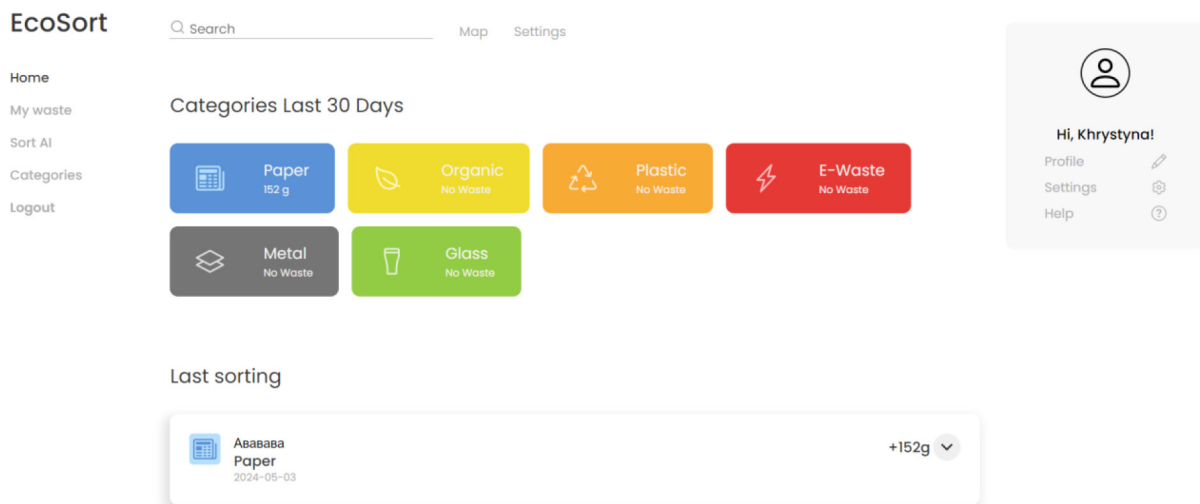


Рис. 3. Головна сторінка вебзастосунку

- як частина більшого порталу або мобільного додатку, пов'язаного з екологічними сервісами – через веб-інтеграцію (наприклад, додавання у вже існуючі сайти громад або міст);
- у проєктах громадського моніторингу – як інструмент збору даних про поведінку користувачів та мапування точок утилізації.

Гнучка архітектура та відсутність залежності від сторонніх сервісів дозволяють адаптувати систему під різні сценарії використання, розширювати її функціональність або локалізувати відповідно до потреб конкретного регіону чи організації. Ключовим компонентом, який забезпечує автономність і технологічну цінність сис-

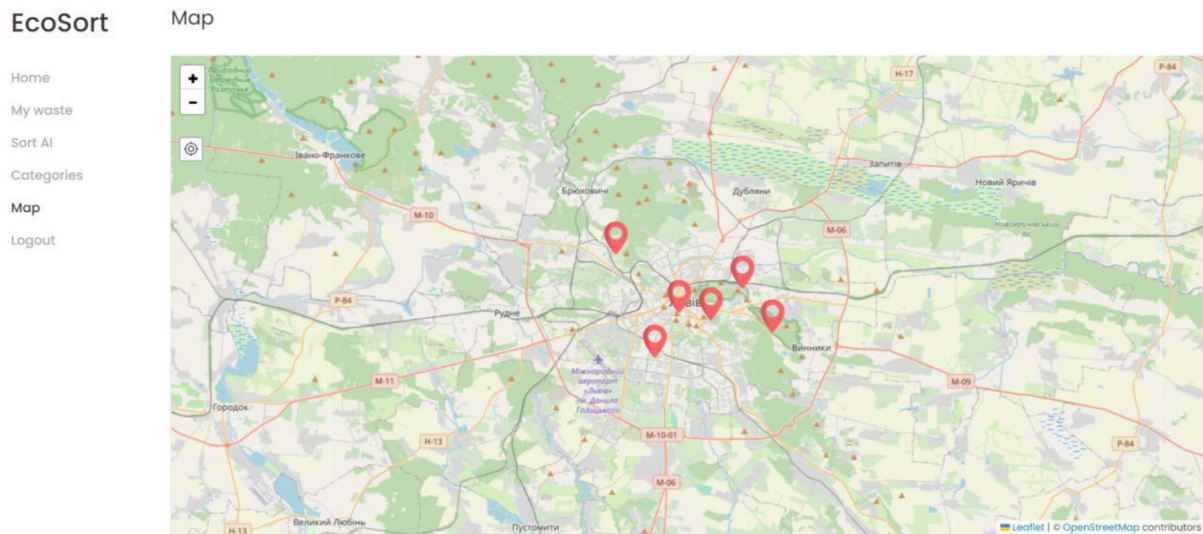


Рис. 4. Use-case діаграма взаємодії користувача із системою

теми, є вбудований модуль штучного інтелекту для розпізнавання відходів.

Модель III була попередньо навчена на власному датасеті, що складався зі знімків об'єктів шести категорій відходів: папір, пластик, скло, метал, органіка та електроніка. Фотографії зроблені в різних умовах освітлення та з різних ракурсів, щоб покращити загальну якість навчання та підвищити стійкість нейромережі до змін середовища. Для створення та навчання моделі обрано платформу Teachable Machine, яка забезпечує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, підтримку експорту у форматі TensorFlow.js та дає змогу швидко адаптувати систему кваліфікації під специфіку власного набору даних без глибоких знань у сфері машинного навчання. Це дозволило сфокусуватися на якості вхідного датасету та інтеграції моделі у клієнтську частину вебзастосунку. Для досягнення збалансованої точності та швидкодії було обрано такі параметри навчання: epochs – 500, batch size – 16, learning rate – 0.001. Велика кількість епох забезпечила глибше засвоєння ознак кожного класу навіть при обмеженому обсязі даних, а оптимальний розмір пакету сприяв стабільному оновленню ваг під час тренування. Значення швидкості навчання дозволило моделі мінімізувати помилки без втрати чутливості до візуальних відмінностей між класами.

Після розгортання модель демонструє стабільну роботу у реальному часі. Результати класифікації (рис. 5 та рис. 6) подаються у вигляді визначеної категорії відходу та ймовірного розподілу між класами. Висока швидкість та автономність підтверджують ефективність обраного

підходу для використання у вебсередовищі без додаткових інфраструктурних витрат.

Для проведення тестування розробленої моделі було сформовано окремий набір образів, які не входили до навчального датасету. Кожне зображення містило візуальне представлення одного об'єкта певної категорії відходів. Загалом тестовий набір охоплював усі шість класів: E-Waste, Glass, Metal, Organic, Paper та Plastic. Зображення були отримані в реальних умовах освітлення та з різних ракурсів, що дозволило оцінити стійкість моделі до зовнішніх змін. Процес тестування реалізовано у вигляді окремого модуля на клієнтській частині застосунку, який дає змогу завантажити тестові зображення, провести класифікацію за допомогою моделі та автоматично зафіксувати результати у вигляді:

- точності класифікації по кожному класу;
- часу передбачення для кожного зображення;
- матриці помилок, яка відображає реальні та передбачені класи.

Кожне зображення оброблялося індивідуально в режимі реального часу без попередньої обробки або кешування, що дозволило об'єктивно оцінити швидкість та точність моделі в умовах, наближених до практичного використання. Крім того, результати кожного експерименту виводились на екран у вигляді інтерактивних діаграм.

На першому етапі аналізу розраховано загальну точність класифікації по кожному з шести класів. Для цього фіксувалася кількість правильних передбачень моделі щодо кожної категорії відходів та загальна кількість зображень, що належали до цього типу. Результати виведено у вигляді

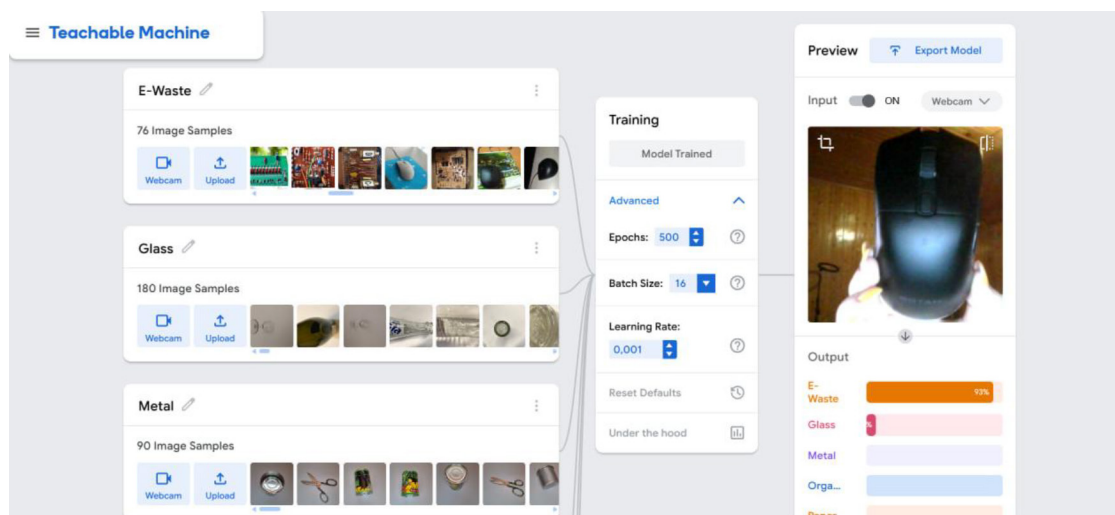


Рис. 5. Приклад розпізнавання: комп'ютерна мишка як категорія «електроніка»

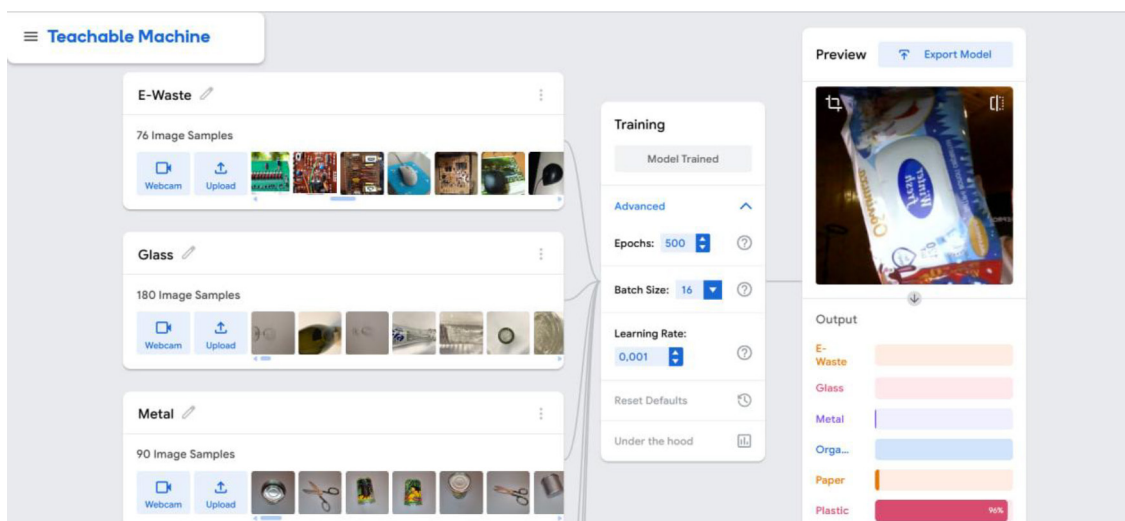


Рис. 6. Приклад розпізнавання: упаковка серветок як категорія «пластик»

стовпчикової діаграми (рис. 7), яка демонструє відсоткове співвідношення правильних класифікацій у межах кожного класу.

Як видно з графіку, найвищу точність досягнуто для категорій Plastic та Paper – понад 90 %, що свідчить про добре сформовані ознаки цих

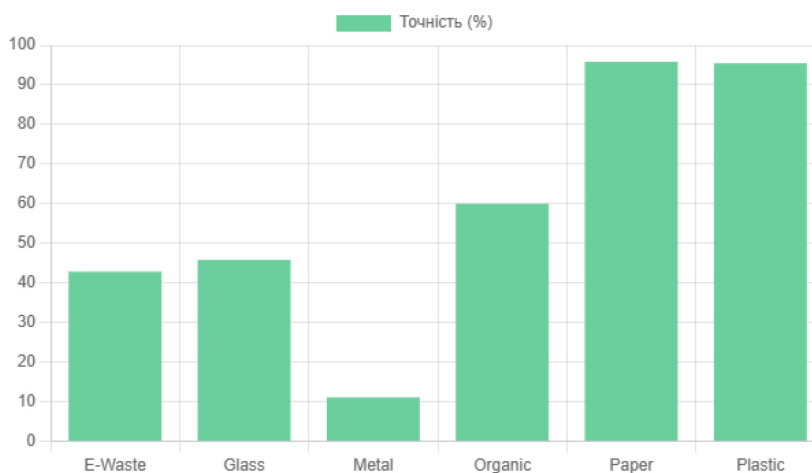


Рис. 7. Загальна точність класифікації по класах відходів

класів та достатній обсяг прикладів у тренувальному наборі. Категорії Organic, Glass та E-Waste показали задовільні результати з точністю понад 70 %. Натомість клас Metal продемонстрував найнижчий рівень точності – менше 30 %, що може бути пов’язано з візуальною схожістю його об’єктів з іншими категоріями або недостатнім представленням у навчальному датасеті.

Наступним критерієм оцінки була швидкодія моделі, тобто час, необхідний для обробки одного зображення та видачі результату класифікації. Цей показник є критично важливим для інтерактивних вебзастосунків, де очікується миттєвий відгук користувачеві. Для кожного зображення з тестового набору автоматично фіксувався час передбачення в мілісекундах, після чого результати було візуалізовано на рис. 8.

Як показано на графіку, більшість зображень оброблялися у межах 50–100 мс, що забезпечує плавну та швидку взаємодію з користувачем. Най-

вищий час було зафіксовано для першого образу, що пояснюється ініціалізацією моделі безпосередньо у браузері перед першим передбаченням. Подальші зображення обробляються значно швидше завдяки вже завантаженій неймережі та активованим ресурсам.

Завершальним етапом тестування стала побудова матриці помилок, що дозволяє проаналізувати, які саме класи найчастіше плутає модель між собою. На рис. 9 представлено діаграму, де по осі X відображено реальні класи відходів, а кожен стовпчик представляє набір передбачень зроблених для цієї категорії.

Згідно з діаграмою, модель найчастіше правильно класифікує зображення категорій Plastic та Paper. Водночас помітна кількість помилкових передбачень спостерігається у класі Metal, який іноді класифікується як Glass або E-Waste. Це може свідчити про наявність візуальних співпадінь між ними, або недостатню кількість варі-

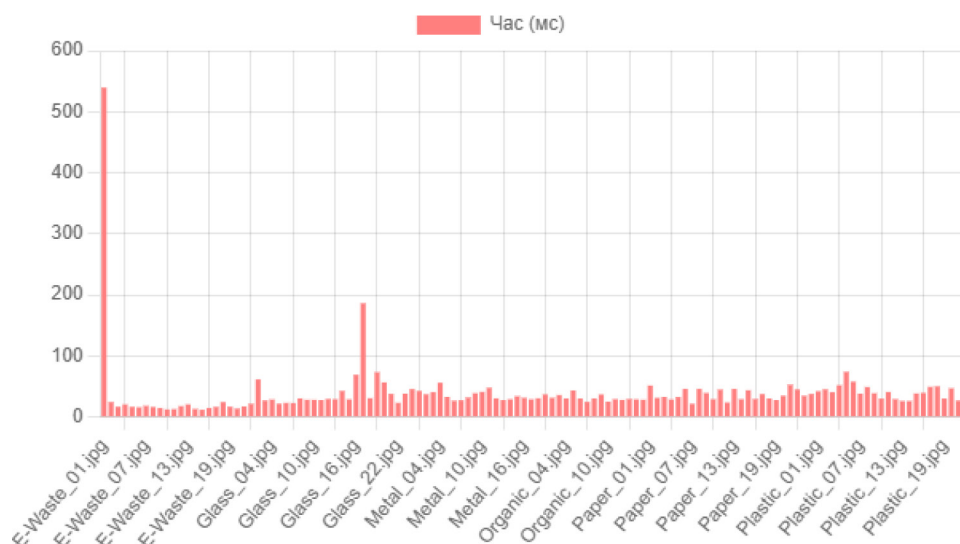


Рис. 8. Час розпізнавання зображень

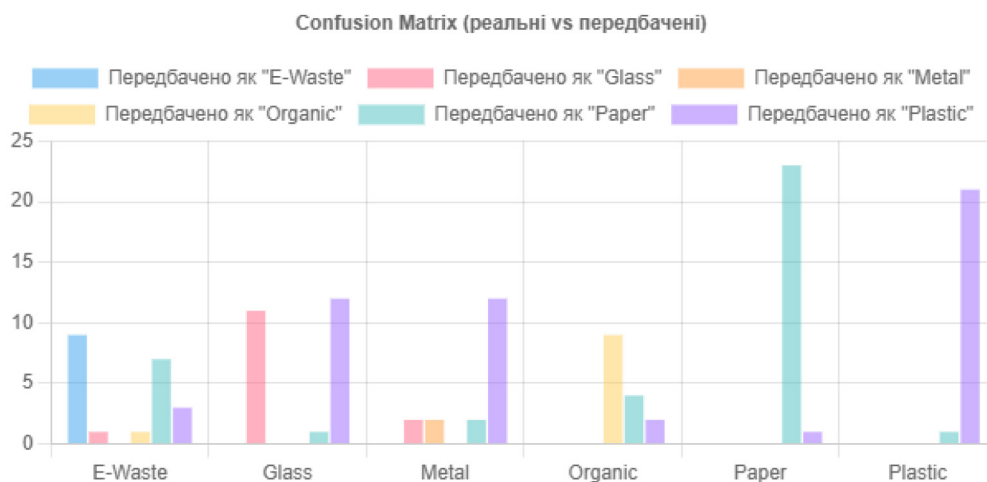


Рис. 9. Матриця помилок класифікації

ативних прикладів у навчальному наборі. Аналіз таких помилок є важливим етапом для подальшого вдосконалення нейромережі, зокрема, через доповнення датасету новими зображеннями або уточнення архітектури моделі.

Під час тестування в різноманітних умовах (освітлення, ракурси, задній фон) було виявлено, що на якість класифікації значною мірою впливає ступінь видимості об'єкта, контрастність зображення та наявність сторонніх предметів у кадрі. Об'єкти, зняті крупним планом з хорошим освітленням, класифікуються з високою точністю. У той же час, наявність тіней, часткове перекриття або низький контраст можуть спричинити зміщення у передбаченні класу. Однак, завдяки нормалізації зображень та попередній адаптації датасету до варіативних умов зйомки, модель демонструє стабільність навіть у неідеальних сценаріях.

Ключовим фактором практичної придатності є можливість роботи в реальному часі, без затримок у виведенні результатів класифікації. Модель забезпечує передбачення менш ніж за 100 мс після активації камери, що дозволяє користувачеві одразу отримувати зворотний зв'язок. Це відкриває можливості інтерактивної взаємодії у навчальних програмах, побутовому сортуванні або додавання у більші екологічні сервіси. Висока швидкодія, автономність і незалежність від сторонніх сервісів формують переваги запропонованого рішення як з технологічної, так і з користувачької точки зору.

Висновки. Реалізовано інтелектуальний веб-застосунок для розпізнавання та сортування побутових відходів, що функціонує повністю у середовищі браузера. Основною перевагою запропонованого рішення є використання клієнт-

ської моделі штучного інтелекту, що працює автономно та не потребує підключення до серверної інфраструктури або зовнішніх API. Такий підхід дозволяє забезпечити високу швидкодію, збереження конфіденційності зображень і незалежність від якості мережевого з'єднання.

Застосунок реалізовано на основі вебтехнологій React.js, Node.js, PostgreSQL та доповнено широким функціоналом: модулями аутентифікації, управління користувачами, аналітики, категоризації відходів та інтерактивної карти пунктів збору. Розроблена модель ШІ попередньо навчена на власному датасеті, що охоплює шість основних категорій відходів, із використанням платформи Teachable Machine. Проведене тестування продемонструвало здатність моделі до точного розпізнавання більшості класів зображень у режимі реального часу, із середнім значенням передбачення менше 100 мс.

Одержані результати підтверджують ефективність застосованих технічних рішень і придатність системи до практичного використання у побутовому та освітньому середовищі. Водночас аналіз помилок класифікації вказує на потенціал для подальшого вдосконалення – зокрема, розширення навчального набору та покращення розпізнавання для класів зі схожими візуальними ознаками. Використання ШІ забезпечує високу точність класифікації, а інтеграція з базами пунктів прийому відходів, системами навчання та екоінформування сприяє формуванню екологічної свідомості громадян. Отже, вебзастосунок виконує не лише функціональну роль, а й виступає засобом екопросвіти, підвищення громадської відповідальності та цифровізації сфери управління відходами, що є важливим елементом стратегії сталого розвитку.

Список літератури:

1. Не тренд, а необхідність: чому важливо сортувати відходи | Журнал ECOBUSINESS. Журнал ECOBUSINESS. Екологія підприємства | ecolog-ua.com. URL: <https://ecolog-ua.com/news/ne-trend-neobhidnist-chomu-vazhlyvo-sortuvaty-vidhody> (дата звернення: 22.03.2025).
2. Kunwar S. MWaste: An app that uses deep learning to manage household waste. *Clean Technologies and Recycling*. 2023. Vol. 3, no. 3. P. 119–133. URL: <https://doi.org/10.3934/ctr.2023008>
3. Enhancing waste sorting and recycling efficiency: robust deep learning-based approach for classification and detection / F.R.Sayem et al. *Neural Computing and Applications*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-024-10855-2>
4. Multi Object Detection and Classification in Solid Waste Management using Region Proposal Network and YOLO model. *Global NEST: the international Journal*. 2022. URL: <https://doi.org/10.30955/gnj.004501>
5. Oscar Pocket. *WasteGPT*. URL: <https://www.oscarpocket.com/> (дата звернення: 22.03.2025).
6. Wasteless. *Wasteless*. URL: <https://wastelesseu.com/> (дата звернення: 22.03.2025).
7. Say hello to Oscar Sort, UK Recycling's new AI-powered, waste-sorting system. *UKNow*. URL: <https://uknow.uky.edu/campus-news/say-hello-oscar-sort-uk-recycling-s-new-ai-powered-waste-sorting-system> (дата звернення: 22.03.2025).

Dutka H. B., Beshley M. I., Beshley H. V. DEVELOPMENT OF A CROSS-PLATFORM WEB APPLICATION FOR WASTE RECOGNITION AND SORTING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The article explores the development of a cross-platform web application for waste recognition and sorting using artificial intelligence technologies. The relevance of this topic is driven by the global environmental crisis, the increasing volume of household and industrial waste, and the low public awareness of proper waste sorting practices. The proposed solution aims to improve waste management efficiency through the implementation of intelligent digital tools.

A key feature of the proposed approach is the integration of artificial intelligence directly into the client side of the web application using the TensorFlow.js library. This enables real-time waste type recognition without the need to send data to a server, significantly improving system performance, ensuring user privacy, and reducing computational load. The model was trained using a custom image dataset via the Teachable Machine platform, allowing the system to be adapted to its target usage environment.

The web application includes features such as user authentication, waste record creation and viewing, categorization, an interactive map with waste collection points, and an object recognition module using the device's camera. The system architecture is built on a modern technology stack including React.js, Node.js, PostgreSQL, Prisma, and other contemporary tools, ensuring scalability, usability, and operational stability.

The article also outlines potential application areas of the proposed tool, including educational institutions, municipal services, industry, and household use. Emphasis is placed on the system's speed, ease of use, and accessibility for a wide range of users. The application is cross-platform and can be seamlessly integrated with other digital systems, expanding its applicability across various environments and enhancing deployment flexibility. The proposed web application can serve as a foundation for further development of intelligent solutions in the field of environmental management and digital transformation of waste disposal.

Key words: artificial intelligence, waste recognition, waste sorting, web application, TensorFlow.js, automation, environmental technologies, customer model, interactive map, waste management.