

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАУКОВІ ПРАЦІ
ДОНЕЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

*Серія: «Обчислювальна техніка
та автоматизація»*

Всеукраїнський науковий збірник

Заснований у липні 1998 року

Виходить 2 рази на рік

Т2. № 3(35)'2024

Дрогобич

2024

УДК 681.5: 658.5: 621.3

Рекомендовано до друку Вченою радою Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (протокол № 10 від 31.10.24 р.).

У збірнику опубліковано статті науковців, аспірантів, магістрів та інженерів провідних підприємств і закладів вищої освіти України, у яких наведено результати наукових досліджень та розробок, виконаних у 2024-2025 рр. відповідно до напрямків: автоматизація технологічних процесів, інформаційна безпека, інформаційно-вимірювальні системи, електронні та мікропроцесорні прилади, інформаційні технології, кібербезпека та захист критичної інфраструктури, математичне та комп'ютерне моделювання, телекомунікаційні системи та мережі.

Матеріали збірника призначено для викладачів, наукових співробітників, інженерно-технічних працівників, аспірантів і студентів, які досліджують питання інформаційної безпеки, розробки та впровадження інформаційних систем та технологій, розробки й використання автоматичних, інформаційних та електронних систем.

Засновник та видавець – Донецький національний технічний університет.

Редакційна колегія: Дорогий Я.Ю., д-р техн. наук, доц., головний редактор (Україна); Воропаєва В.Я., канд. техн. наук, доц., заст. головного редактора, відп. за випуск (Україна); Башков Є.О., д-р техн. наук, проф. (Україна); Лактіонов І.С., д-р техн. наук, доц. (Україна); Святний В.А., д-р техн. наук, проф. (Україна); Кучерук В.Ю., д-р техн. наук, проф. (Україна); Ямненко Ю.С., д-р техн. наук, проф. (Україна); Гільгурт С.Я., д-р техн. наук, ст. наук. сп-к. (Україна); Ковальчук Л.В., д-р техн. наук, проф. (Україна); Баркалов О.О., д-р техн. наук, проф. (Польща); Різун Н.О., д-р техн. наук, проф. (Польща); Писаренко А.В., канд. техн. наук, доц. (Україна); Бакалинський О.О., канд. техн. наук, ст. дослід. (Україна); Полтораки В.П., канд. техн. наук, доц. (Україна); Марценко С.В., канд. техн. наук, доц. (Україна); Єфіменко А.А., канд. техн. наук, доц. (Україна).

Ідентифікатор медіа R30-02474 відповідно з додатком до Рішення НРУ з питань телебачення і радіомовлення №139 від 18.01.2024 р.

Збірник включено до списку друкованих (електронних) періодичних наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора й кандидата наук (спеціальності 151, 152, наказ Міністерства освіти і науки України № 886 від 02.07.2020 р.).

ISSN 2075-4272 (Print),

ISSN 2786-9024 (Online)

© Донецький національний технічний університет, 2024

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Омельчук Н.М., Дорогий Я.Ю.* Інтелектуальна система супроводу людей з вадами зору 4-17
- Шибецький Б.Ю., Дорогий Я.Ю.* Система моніторингу та аналізу споживання електроенергії в домогосподарствах на основі IoT-технологій 18-28

РОЗДІЛ 2. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

- Ільїнський М.І., Руденко В.М.* Створення та застосування сенсорної мережі в інформаційній системі обліку енергоресурсів житлового комплексу 29-36
- Щербинін В.О.* Інтеграція NODE-RED та OPENAI API для інтелектуальної аналітики 37-45

РОЗДІЛ 3. ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

- Колесник С.Є., Ковальов С.О.* Ефективні алгоритми нейронних мереж для роботи на мікроконтролерах у системах аудіодетекції 46-53

РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- Єжова Є.О., Маслоva Н.О.* Використання AgentScript для створення багаторівневих моделей агентного моделювання 54-66

CONTENT

CHAPTER 1. INFORMATION TECHNOLOGY

- Nazarii Omelchuk, Iaroslav Dorohyi.* Intelligent system for assisting people with visual impairments 4-17
- Bohdan Shybetskyi, Iaroslav Dorohyi.* System for monitoring and analysis of electric energy consumption in households based on IoT technologies 18-28

CHAPTER 2. AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

- Mykhailo Ilinskyi, Vladislav Rudenko.* Creation and application of a sensor network in the information system of energy accounting of a residential complex 29-36
- Vladyslav Shcherbynin.* Integration of NODE-RED and OPENAI API for intelligent analytics 37-45

CHAPTER 3. ARTIFICIAL INTELLIGENCE

- Serhii Kolesnyk, Serhii Kovalev.* Efficient neural network algorithms for microcontrollers in audio detection systems 46-53

CHAPTER 4. MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

- Yelyzaveta Yezhova, Nataliia Maslova.* Using AgentScript to produce multi-level agent-based modelling models 54-66

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА СУПРОВОДУ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ

Н.М. Омельчук¹, Я.Ю. Дорогий²

¹ Department of Information Systems and Technologies, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

² Department of Applied Mathematics and Informatics, Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine

E-mail: omelchuk.nazarii@iit.kpi.ua

Отримано 01.11.2024

Прийнято до публікації 01.12.2024

Опубліковано 31.12.2024

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена аналізу сучасних технологій, що використовуються для створення інтелектуальних систем супроводу людей з вадами зору. Актуальність цієї теми зумовлена необхідністю розробки ефективних та доступних рішень, які сприяють полегшенню повсякденного життя людей з обмеженими можливостями, зокрема тих, хто має порушення зору. Метою статті є всебічний аналіз існуючих технологій, вивчення переваг та недоліків наявних рішень, а також визначення можливих напрямків удосконалення таких систем. У статті розглянуті провідні рішення у цій сфері, зокрема Aira, Be My Eyes, BlindSquare, Seeing AI, що дозволяють забезпечити навігацію та супровід для людей з вадами зору за допомогою мобільних пристроїв, камер та інших сенсорних систем.

Автори також досліджують потреби користувачів цих систем, визначаючи основні виклики, з якими стикаються люди з обмеженим зором, зокрема виявлення перешкод, надання своєчасної інформації про навколишнє середовище та забезпечення зручності використання. На основі цього аналізу сформульовані вимоги до майбутніх систем супроводу, а також розроблена архітектура інтелектуальної системи, що включає компоненти для розпізнавання об'єктів, перешкод, навігації та голосового супроводу.

Особливу увагу приділено інтеграції компонентів розпізнавання об'єктів та перешкод, що здійснюється за допомогою технологій комп'ютерного зору, таких як OpenCV та нейронні мережі. Окрім того, розглянуто можливість інтеграції голосових асистентів для забезпечення зручного та доступного зворотного зв'язку. У статті також наведено методи, що застосовуються для розробки та тестування таких систем, включаючи структурний і порівняльний аналіз існуючих рішень, а також експериментальні методи для перевірки ефективності програмного забезпечення.

Дослідження та розробка інтелектуальних систем супроводу людей з вадами зору є важливим кроком до створення доступного і безбар'єрного середовища для осіб з обмеженими можливостями, що відкриває нові можливості для покращення якості їхнього життя.

Ключові слова: інтелектуальна система супроводу, допомога для людей з вадами зору, веб-застосунок, комп'ютерний зір, розпізнавання об'єктів, YOLOv3, голосовий супровід, навігація, адаптивні технології.

ВСТУП

Інтелектуальні системи супроводу є важливим інструментом для полегшення повсякденного життя людей з вадами зору, забезпечуючи їм більшу автономність та самостійність у навігації по навколишньому середовищу. Завдяки використанню новітніх технологій, таких як комп'ютерний зір, штучний інтелект, системи глобального позиціонування (GPS), а також голосові асистенти, ці системи можуть допомогти користувачам орієнтуватися в просторі, визначати перешкоди, надавати інформацію про навколишні об'єкти та забезпечувати безпеку руху.

Основною метою таких систем є створення безбар'єрного середовища, яке дозволяє людям з обмеженими можливостями ефективно виконувати повсякденні завдання, зокрема, самостійно переміщатися в просторі. Для цього використовуються технології комп'ютерного зору, які здатні розпізнавати об'єкти, виявляти перешкоди, а також надавати точну інформацію про навколишнє середовище в реальному часі. Це дає можливість людям з вадами зору отримувати необхідну інформацію для прийняття рішень при пересуванні, що значно покращує їх якість життя.

Особливо важливим є використання алгоритмів глибинного навчання та штучного інтелекту для розпізнавання об'єктів у реальному часі, що дозволяє створювати високоефективні системи, здатні адаптуватися до змінюваних умов навколишнього середовища. Такі системи використовують зображення, отримані з камер або інших сенсорних пристроїв, для виявлення перешкод і визначення їхніх характеристик. Ці технології дають змогу створювати рішення, що дозволяють не тільки виявляти об'єкти, але й забезпечувати інтуїтивно зрозуміле сприйняття цих даних користувачем за допомогою голосових або візуальних повідомлень.

Важливим аспектом є також інтеграція системи супроводу з іншими технологіями, такими як глобальне позиціонування, що дозволяє точно визначати місцезнаходження користувача і здійснювати навігацію на основі реальних координат. Така інтеграція відкриває нові можливості для забезпечення безпеки та зручності пересування людей з вадами зору в складних міських умовах.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розглянемо декілька досліджень, які дозволяють досить детально зрозуміти стан справ у досліджуваній сфері та можливі напрямки подальших досліджень.

У статті [1] аналізується глобальна поширеність сліпоти та порушень зору на близьку та дальню відстань. Це дослідження виявляє важливі статистичні тенденції щодо того, як проблеми зору поширюються по всьому світу, що стає основою для розробки інклюзивних технологій підтримки людей з порушеннями зору. Ось чому інноваційні технології, що використовують штучний інтелект і мобільні системи для допомоги таким особам, є надзвичайно актуальними.

У роботі [7] Б. П. Борківський та В. М. Теслюк описують використання нейромережових технологій для розпізнавання об'єктів у мобільних системах для людей з порушеннями зору. Це дослідження також розглядає, як ці технології можуть допомогти у розв'язанні важливих задач, таких як виявлення перешкод і надання візуальних підказок користувачам в реальному часі, що значно підвищує автономність та безпеку цих людей.

Дослідження [8] пропонує автоматизовану систему для покращення мобільності осіб з порушеннями зору. Це рішення використовує інтегровані сенсори для надання користувачам простих навігаційних вказівок, що покращує їх здатність орієнтуватися у просторі без сторонньої допомоги. Ця технологія використовує штучний інтелект для точного аналізу навколишнього середовища та адаптується до різних умов.

У статті [9] описано, як технології штучного інтелекту можуть бути використані для розвитку розумної навігації для людей з порушеннями зору. У роботі розглядаються методи використання таких технологій для розпізнавання навколишнього середовища, а також надання користувачам необхідної інформації для покращення їх орієнтації і забезпечення зручності в повсякденному житті.

Робота [10] надає огляд системи, заснованої на технологіях AIoT (Artificial Intelligence of Things), для людей з порушеннями зору. Ця система пропонує інтеграцію сенсорних технологій та штучного інтелекту, що дозволяє створювати більш точні та ефективні рішення для навігації та орієнтації людей з обмеженим зором. Застосування таких систем є перспективним у контексті

розвитку інтелектуальних помічників для людей з обмеженими можливостями.

У роботі [11] автори досліджують використання інформаційних технологій для проектування інерціальних датчиків, що застосовуються в системах орієнтації та навігації. Така технологія є основою для створення систем підтримки для осіб з порушеннями зору, що дозволяють їм ефективно орієнтуватися в просторі без потреби у допомозі від сторонніх осіб.

У джерелі [12] наведено огляд GPS-систем позиціонування, що мають велике значення для точності навігаційних систем, призначених для людей з порушеннями зору. GPS-системи, як частина глобальних навігаційних технологій, стають основою для створення таких інклюзивних рішень, де точність позиціонування і орієнтація є критично важливими для безпеки користувачів.

У статті [13] розглядаються основи роботи GPS-систем, які використовуються в мобільних пристроях для підтримки орієнтації людей з обмеженим зором. Дана стаття дає розуміння технічних аспектів роботи таких систем та їхньої взаємодії з іншими інтелектуальними технологіями для покращення мобільності осіб з порушеннями зору.

Технологічні рішення відіграють важливу роль у підвищенні рівня самостійності людей із вадами зору. Одним із таких інструментів є мобільний застосунок Aira [2], що використовує технології відеозв'язку для надання візуальної допомоги. Цей застосунок забезпечує користувачам можливість взаємодіяти зі спеціально підготовленими операторами, які надають інформаційну підтримку в реальному часі.

Мета статті полягає в аналізі сучасних технологій, які використовуються для створення інтелектуальних систем супроводу людей з вадами зору, зокрема, вивчення їхніх переваг, недоліків та можливостей удосконалення. У статті здійснено аналіз існуючих рішень, таких як Aira, Be My Eyes, BlindSquare, Seeing AI, а також вивчено потреби користувачів, на основі яких сформульовано вимоги до майбутньої системи. Крім того, розроблено архітектуру інтелектуальної системи супроводу, яка включає основні функціональні компоненти, зокрема, системи розпізнавання об'єктів, перешкод, навігації та голосового супроводу.

Основні завдання дослідження включають:

- аналіз існуючих технічних рішень у сфері інтелектуальних систем супроводу людей з вадами зору;
- визначення технічних вимог до майбутньої системи та створення її архітектури;

- інтеграція компонентів системи, таких як розпізнавання об'єктів і голосова взаємодія.

Очікувані результати роботи матимуть важливе практичне значення. Запропонована система сприятиме підвищенню рівня незалежності осіб із вадами зору та забезпечить їм більшу свободу дій у повсякденному житті. Крім того, система має потенціал для комерційного впровадження, що дозволить забезпечити її доступність для широкого кола користувачів у всьому світі.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі для досягнення поставлених цілей використовувались методи структурного і порівняльного аналізу, що дозволили всебічно оцінити існуючі технології та рішення для створення інтелектуальних систем супроводу людей з вадами зору.

Для вивчення наукової та методичної літератури, а також онлайн-ресурсів було застосовано інформаційний і аналітичний підхід. Це дозволило отримати глибоке розуміння проблеми, виявити існуючі тенденції та порівняти переваги і недоліки різних підходів і рішень, таких як Aira [2], Be My Eyes [3-4], BlindSquare [5] та інших.

З метою перевірки ефективності теоретичних положень і розроблених технічних рішень були застосовані експериментальні методи, зокрема для тестування програмного коду системи розпізнавання об'єктів. Це дало змогу оцінити працездатність запропонованих підходів у реальних умовах, а також виявити можливі проблеми і шляхи їх усунення.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Призначення та область застосування. Інтелектуальна система супроводу для осіб із вадами зору призначена для забезпечення допомоги у просторовій орієнтації та навігації шляхом використання універсального програмного забезпечення. Система є багатоплатформним рішенням, яке може працювати на різних пристроях, зокрема смартфонах, планшетах, комп'ютерах та інших гаджетах, забезпечуючи доступність для широкого кола користувачів. У її основі лежать технології штучного інтелекту, комп'ютерного зору та машинного навчання, що дозволяють розпізнавати об'єкти та перешкоди в реальному часі та надавати користувачам голосові інструкції, спрямовані на безпечніше й незалежне пересування.

Система може бути корисною для орієнтації на вулиці завдяки розпізнаванню дорожніх знаків, перехресть, громадського транспорту та інших об'єктів міської інфраструктури, що сприятиме підвищенню мобільності

користувачів у міських умовах. У великих громадських просторах, таких як торговельні центри, вокзали, лікарні чи офісні будівлі, система сприятиме ідентифікації дверей, ліфтів, сходів та інших елементів, полегшуючи самостійне пересування.

Під час участі у громадських або соціальних заходах система допоможе користувачам взаємодіяти з навколишнім середовищем, включаючи людей, об'єкти та простори, завдяки інтерактивним підказкам та голосовому супроводу. Зокрема, система забезпечуватиме визначення маршрутів, розпізнавання станцій і транспортних засобів, надаючи інформацію про розклади, що значно полегшить пересування в транспортній мережі.

Багатофункціональність програмного забезпечення забезпечує його гнучкість та адаптацію до різних умов використання. Система може застосовуватися як для особистих потреб, так і в межах соціальних програм, спрямованих на підтримку осіб із вадами зору. Інтеграція з різними типами пристроїв дозволяє врахувати індивідуальні потреби користувачів, сприяючи їхній активній участі в соціальному житті, підвищенню рівня незалежності та якості життя.

Ця робота має важливе значення з огляду на необхідність глобального поліпшення умов для осіб із порушеннями зору. На основі сучасних технологій створення багатофункціональної інтелектуальної системи супроводу є ключовим кроком до підвищення мобільності, незалежності та соціальної інтеграції таких людей. Система сприятиме не лише безпечнішій навігації в навколишньому середовищі, але й забезпечить оперативний доступ до важливої інформації у реальному часі. Її впровадження дозволить суттєво покращити якість життя користувачів, зменшити залежність від сторонньої допомоги та підвищити рівень їхньої соціальної активності.

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК AIRA

Aira [2] є важливим кроком уперед у впровадженні технологій, спрямованих на підтримку людей із порушеннями зору. Вона дозволяє користувачам отримувати миттєву допомогу, що значно розширює їхні можливості для самостійного пересування, виконання повсякденних завдань і соціальної інтеграції. Водночас для забезпечення максимального ефекту від використання цієї технології важливо вирішити питання доступності та зменшення залежності від зовнішніх факторів, таких як інтернет-з'єднання чи оператори (Рис. 1).



Рис. 1. Мобільний застосунок Aira [2]

Мобільний застосунок Aira пропонує низку інноваційних функцій, серед яких:

- **відеоінтерфейс** – за допомогою відеозв'язку Aira підключає користувача до оператора, який отримує зображення з камери смартфона або спеціальних окулярів, оснащених вбудованою камерою. Це дозволяє операторам бачити навколишнє середовище користувача та надавати йому необхідну інформацію;
- **допомога від операторів** – оператори сприяють орієнтації в нових місцях, розпізнають тексти, ідентифікують об'єкти, прокладають маршрути та забезпечують безпеку. Такі можливості роблять застосунок універсальним рішенням для різних життєвих ситуацій;
- **підтримка на багатьох платформах** – Aira доступна для мобільних пристроїв на базі iOS та Android, що забезпечує її зручність і доступність для користувачів;
- **модель підписки** – застосунок працює на основі гнучкої системи тарифних планів. У деяких випадках користувачі можуть отримувати безкоштовний доступ завдяки підтримці партнерських організацій чи фондів;
- **безпека та конфіденційність** – дані передаються у зашифрованому вигляді, що забезпечує конфіденційність. Оператори проходять навчання аби гарантувати дотримання етичних стандартів.

До основних переваг застосунку Aira належать:

- забезпечення доступу до допомоги в реальному часі,
 - універсальність використання в різних ситуаціях – від навігації в нових місцях до виконання повсякденних завдань;
 - індивідуалізована підтримка, яка враховує специфічні потреби користувачів.
- Разом із перевагами Aira має і певні недоліки, які слід враховувати:
- залежність від інтернет-з'єднання, яка може бути критичною у віддалених регіонах чи під час подорожей;

- модель підписки, яка може бути фінансово недоступною для частини користувачів, особливо в країнах із низьким рівнем доходу;
- неавтономність роботи системи, оскільки функціонування застосунку залежить від наявності операторів.

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК *BE MY EYES*

Мобільний застосунок *Be My Eyes* [3-4] є ефективним інструментом для забезпечення візуальної допомоги людям із вадами зору, орієнтованим на спрощення їхнього повсякденного життя. Завдяки платформі користувачі мають змогу підключатися до волонтерів із різних країн світу через відеозв'язок, що дозволяє отримувати оперативну підтримку в найрізноманітніших ситуаціях. Механізм роботи застосунку передбачає передачу зображень оточення від користувача до волонтера, який, базуючись на отриманій візуальній інформації, надає необхідну допомогу.

Основні функції та можливості *Be My Eyes* наступні:

- забезпечення відеозв'язку між користувачами та волонтерами;
- широка база волонтерів із різних країн, що гарантує доступність підтримки в будь-який час;
- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що спрощує користування застосунком;
- багатомовна підтримка, яка робить додаток доступним для широкої аудиторії;
- можливість отримання допомоги у виконанні повсякденних завдань;
- інтеграція з компаніями та організаціями, які спеціалізуються на допомозі людям із порушеннями зору;
- безкоштовна основа використання, що забезпечує доступність для користувачів незалежно від їхнього фінансового стану.

Приклад інтерфейсу мобільного застосунку *Be My Eyes* наведено на Рис.2.



Рис. 2. Мобільний застосунок *Be My Eyes* [3]

Основними перевагами застосунку є оперативність отримання допомоги, що забезпечується завдяки великій базі активних волонтерів. Можливість користування додатком у будь-якому місці за наявності мобільного зв'язку значно розширює його доступність. Крім того, платформа сприяє соціальній інтеграції, встановлюючи взаємодію між користувачами та волонтерами, що зміцнює соціальні зв'язки. Безкоштовний доступ до функцій додатка робить його популярним і придатним для використання широким колом людей із вадами зору.

Незважаючи на значні переваги, *Be My Eyes* має певні обмеження. Доступність підтримки може залежати від кількості активних волонтерів у конкретний момент, що іноді призводить до затримок у наданні допомоги. Хоча в більшості випадків час очікування є незначним, можливість затримки залишається фактором ризику. Іншою проблемою є забезпечення конфіденційності, оскільки користувачі передають стороннім особам інформацію про своє оточення, що потребує обачності у використанні застосунку.

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК *BLINDSQUARE*

Мобільний застосунок *BlindSquare* [5] є сучасним інструментом навігації, розробленим для людей із порушеннями зору. Використовуючи GPS і технології доповненої реальності, програма надає голосові вказівки, допомагаючи користувачам орієнтуватися в міському середовищі та знаходити важливі об'єкти, такі як кафе, магазини, транспортні зупинки тощо. *BlindSquare* інтегрується з картографічними сервісами для забезпечення точних даних про місцезоналення користувача та навколишнє середовище.

Однією з ключових функцій програми є використання GPS для визначення точного місця розташування користувача та навігації до потрібних об'єктів. *BlindSquare* отримує інформацію з картографічних сервісів, таких як *OpenStreetMap*, і надає користувачам голосові інструкції. Наприклад, програма може повідомити про кафе на відстані 200 метрів та запропонувати маршрут до нього.

Іншою важливою функцією є інтеграція технологій доповненої реальності. Використовуючи камеру смартфона, користувачі можуть активувати режим AR (augmented reality), який візуалізує розташування об'єктів у полі зору. Це додає додатковий рівень інформації про навколишнє середовище, сприяючи кращій орієнтації.

BlindSquare також підтримує функцію спільноти, яка дозволяє користувачам залишати відгуки про об'єкти, з якими вони взаємодіяли. Ця інформація надає актуальні дані про доступність, якість обслуговування та інші

аспекти, що можуть бути корисними для інших користувачів. Застосунок активно співпрацює з організаціями, які спеціалізуються на питаннях доступності об'єктів для людей із обмеженими можливостями.

Програма підтримує гнучке налаштування – користувачі можуть вибирати мову голосових підказок, частоту сповіщень, а також типи об'єктів, про які вони хочуть отримувати інформацію. Це забезпечує персоналізований досвід, враховуючи індивідуальні потреби користувачів.

BlindSquare надає наступні переваги:

- точну навігацію завдяки інтеграції з картографічними сервісами;
- голосові інструкції для зручності використання;
- багатофункціональність завдяки доповненій реальності та функціям спільноти;
- підтримку налаштувань для персоналізації досвіду;
- інтеграцію з організаціями, що працюють над покращенням доступності.

Незважаючи на вищезазначені переваги, програма має деякі обмеження:

- залежність від стабільного GPS-з'єднання, що може бути проблемою в умовах слабого сигналу або в приміщеннях;
- необхідність використання сучасного смартфона, що може бути фінансово недоступним для окремих категорій користувачів;
- відсутність функції виявлення перешкод, таких як бордюри чи інші фізичні об'єкти, що може створювати труднощі під час пересування.

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК SEEING AI

Seeing AI [6], розроблений компанією Microsoft, є безкоштовним мобільним застосунком, що перетворює візуальну інформацію на аудіоповідомлення. Його мета – забезпечити людей із вадами зору можливістю "бачити" навколишній світ за допомогою камери смартфона та штучного інтелекту. Завдяки широкому функціоналу користувачі можуть орієнтуватися у просторі, розпізнавати текст, об'єкти, обличчя, емоції та виконувати інші важливі завдання.

Мобільний застосунок Seeing AI представлений на Рис. 3.

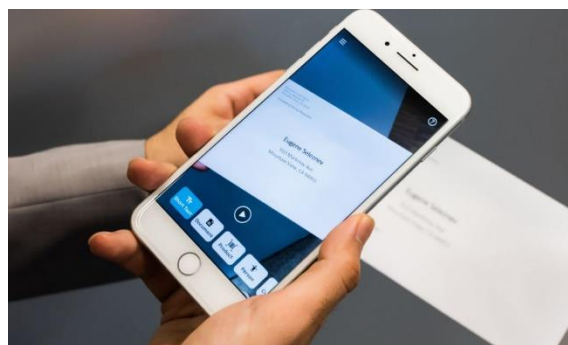


Рис. 3. Мобільний застосунок Seeing AI [6]

До основних функцій та можливостей Seeing AI належать наступні:

- розпізнавання тексту – програма зчитує друкований і рукописний текст із документів, книг або вивісок. У режимі "Документ" застосунок автоматично визначає межі сторінок для точнішого зчитування;
- штрих-коди та короткі тексти – Seeing AI допомагає знайти штрих-коди через звукові підказки та озвучує інформацію про товар. Крім того, програма миттєво зчитує короткі тексти, наприклад, з етикеток чи плакатів;
- опис сцени – застосунок аналізує зображення перед камерою, описуючи об'єкти, людей і їх дії, що допомагає користувачам краще орієнтуватися у просторі;
- розпізнавання обличчя та емоцій – програма ідентифікує знайомих людей та повідомляє про їхній емоційний стан;
- додаткові можливості – розпізнавання кольорів, ідентифікація валют та оцінка яскравості в приміщенні.

Перевагами використання Seeing AI є:

- доступність – застосунок безкоштовний та підтримує багато мов, що забезпечує глобальне використання;
- інтуїтивність – простий у використанні інтерфейс робить програму доступною для широкої аудиторії.
- широкий функціонал – від текстового розпізнавання до ідентифікації об'єктів, програма вирішує різноманітні завдання, що виникають у повсякденному житті.

Серед обмежень Seeing AI можна виділити наступні:

- технічна залежність – точність роботи залежить від якості камери смартфона, а для більшості функцій потрібне стабільне підключення до Інтернету;
- неточність алгоритмів – штучний інтелект може іноді надавати неправильні описи сцен;
- навігаційні обмеження – застосунок не виявляє фізичних перешкод, таких як бордюри або стовпи.

КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ МОБІЛЬНИХ ЗАСТОСУНКІВ

Далі наведено компаративний аналіз розглянутих мобільних застосунків, розроблених для людей з вадами зору. Для забезпечення об'єктивної оцінки та порівняння різних програм було обрано низку критеріїв, що дозволяють врахувати їх основні функції, доступність та ефективність в реальних умовах використання. Ось ключові критерії, що використовуються для порівняння мобільних застосунків:

1. Основна функціональність

Цей критерій визначає, яку основну допомогу надає застосунок користувачам. Залежно від призначення програми, функції можуть варіюватися від надання допомоги через відеозв'язок з волонтерами (наприклад, *Be My Eyes* або *Aira*) до автономних функцій, таких як навігація на основі GPS або розпізнавання текстів і об'єктів за допомогою штучного інтелекту (як у *BlindSquare* чи *Seeing AI*).

2. Інтерфейс та зручність використання

Важливим аспектом є зручність і простота інтерфейсу. Оскільки мобільні застосунки для людей з вадами зору повинні бути інтуїтивно зрозумілими, критично важливо, щоб користувачі могли легко орієнтуватися в функціях програми. Простота навігації та доступність основних функцій забезпечують ефективне використання додатка.

3. Технічні вимоги та доступність

Під цим критерієм розуміється оцінка технічних ресурсів, необхідних для запуску програми. Зокрема,

важливими є вимоги до апаратного забезпечення, наявність певних функцій (наприклад, GPS або камера високої роздільної здатності), а також вимоги до операційної системи та програмного забезпечення.

4. Особливості взаємодії та персоналізація

Даний критерій оцінює, як користувачі можуть налаштовувати застосунок під свої потреби, чи є можливості для персоналізації (наприклад, вибір мови або налаштування частоти повідомлень). Важливими є також додаткові можливості, такі як інтеграція з соціальними мережами, можливість спілкування з волонтерами або іншими користувачами.

5. Переваги

Оцінка основних переваг, які надає застосунок. Це можуть бути такі аспекти, як швидкість надання допомоги, точність функцій (наприклад, розпізнавання об'єктів чи тексту), наявність безкоштовного доступу або можливість використовувати додаток без значних технічних обмежень.

6. Обмеження та недоліки

Важливим критерієм є оцінка обмежень, які можуть вплинути на ефективність застосунку. Це можуть бути технічні недоліки, необхідність стабільного Інтернет-з'єднання, обмеження в точності виконання функцій або залежність від зовнішніх факторів, таких як наявність активних волонтерів.

Ці критерії дозволяють провести порівняння мобільних застосунків на основі основних характеристик, що впливають на їх функціональність та ефективність для людей з вадами зору (Табл. 1).

Табл. 1. Компаративний аналіз застосунків

Критерій	<i>Be My Eyes</i>	<i>BlindSquare</i>	<i>Seeing AI</i>	<i>Aira</i>
Основна функціональність	Допомога через відеозв'язок з волонтерами	GPS-навігація, доповнена реальність	Розпізнавання текстів, об'єктів, емоцій	Допомога через відео та аудіозв'язок з асистентами
Інтерфейс	Простий, інтуїтивно зрозумілий	Інтуїтивний, потребує налаштувань	Простий, з налаштуваннями для персоналізації	Простий, інтеграція з віртуальними асистентами
Технічні вимоги	Мінімальні, потрібен стабільний Інтернет	GPS, картографічні сервіси	Камера високої якості, Інтернет	Стабільний Інтернет, доступ до відеозв'язку
Особливості досвіду	Взаємодія з волонтерами, соціальна підтримка	Автономна навігація, доповнена реальність	Самостійність у взаємодії з оточенням	Пряма допомога в реальному часі від асистентів
Переваги	Миттєва допомога, безкоштовний, доступний	Точна навігація, зручний для мобільності	Широкий функціонал, безкоштовний	Професійна допомога у реальному часі,

				доступ до допомоги в будь-який час
Обмеження	Залежить від волонтерів, питання конфіденційності	Залежність від GPS, потребує специфічного смартфона	Залежність від камери, можливі неточності	Потрібно стабільне з'єднання, платні послуги

ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ

Перед початком розробки системи важливо чітко визначити її функціональні та нефункціональні вимоги, враховуючи результати аналізу існуючих рішень. Це забезпечить створення архітектури, яка задовольнить потреби користувачів та ефективно виконуватиме покладені на систему завдання. Уся функціональність

повинна бути доступна користувачам, включаючи виявлення об'єктів та перешкод у реальному часі, розпізнавання тексту з зображень, отримання навігаційних інструкцій на основі GPS, передача інформації через голосові підказки, а також можливість відправлення повідомлень про допомогу з визначенням місцезнаходження. Варіанти використання усіх функцій системи зображено на діаграмі прецедентів на Рис. 4.

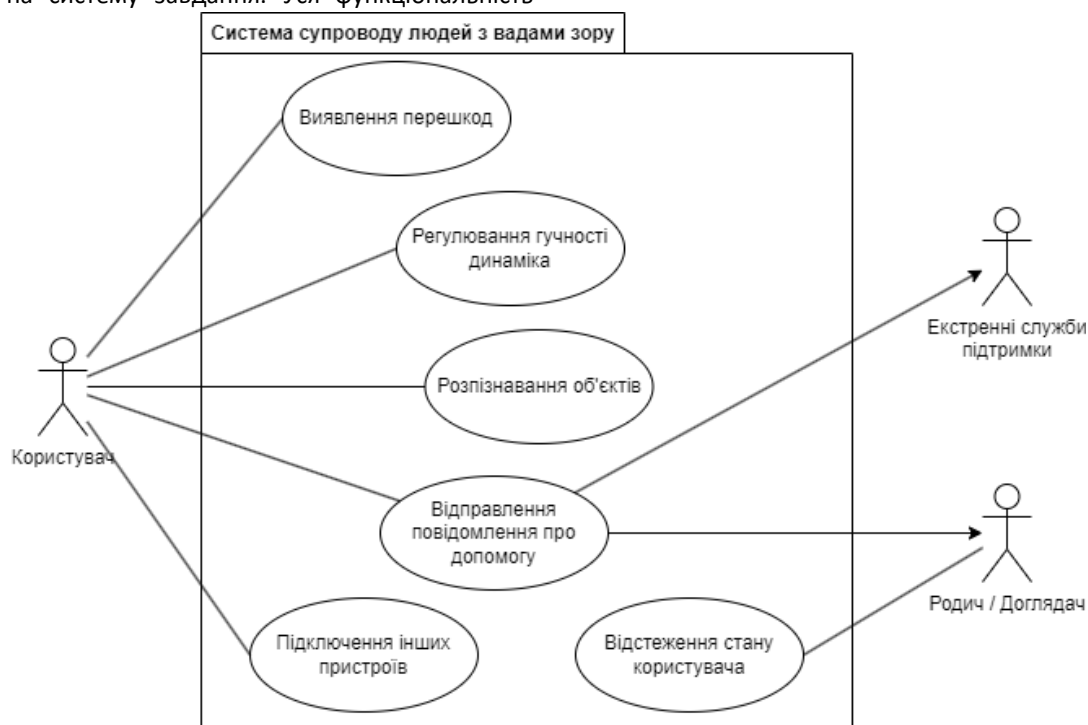


Рис. 4. Діаграма прецедентів

Функціональні вимоги системи. Враховуючи основні потреби користувачів з вадами зору, а також існуючі технології, були визначені такі функціональні вимоги до системи:

- **виявлення об'єктів та перешкод** – система повинна мати можливість ідентифікувати об'єкти в полі зору камери, а також попереджати користувача про перешкоди на шляху. Це включає розпізнавання таких об'єктів, як транспортні засоби, пішоходи, дорожні знаки та інші важливі об'єкти;

- **розпізнавання тексту** – система повинна бути здатна читувати текст, який може зустрічатися в

навколишньому середовищі – на вивісках, дорожніх знаках, документах тощо;

- **навігаційні можливості** – система повинна надавати точні навігаційні інструкції на основі GPS. Вона повинна забезпечувати як загальні маршрути в містах, так і локальні орієнтири в приміщеннях;

- **аудіовізуальний інтерфейс** – система повинна підтримувати голосові підказки та візуальні сповіщення, забезпечуючи чітке та своєчасне надання інформації про оточення, зміни в ньому та інструкції для безпечного пересування;

- **інтеграція з іншими системами** – система повинна мати можливість інтегруватися з іншими

застосунками та сервісами, такими як транспортні або навігаційні програми, через API, що дозволить додатково отримувати дані про транспортні маршрути, дорожній рух тощо.

Нефункціональні вимоги системи. Нефункціональні вимоги визначають важливі характеристики, зокрема продуктивність, надійність, зручність використання та інші аспекти, які впливають на роботу системи в реальних умовах. Система повинна забезпечувати наступні нефункціональні вимоги:

- **продуктивність** – система повинна працювати в реальному часі, з мінімальними затримками при обробці зображень та наданні зворотного зв'язку. Час реакції на виявлені об'єкти і перешкоди має бути не більше кількох секунд;

- **надійність і стійкість до помилок** – система повинна бути стійкою до збоїв апаратного забезпечення, таких як втрата GPS-сигналу або тимчасова втрата зображення з камери, і бути здатною відновлюватися після таких помилок без втрат в ефективності;

- **масштабованість** – система повинна адаптуватися до різних апаратних платформ, зокрема працювати на мобільних пристроях з обмеженими ресурсами, таких як смартфони або планшети;

- **безпека та конфіденційність** – система повинна гарантувати захист особистих даних користувачів, зокрема інформації про місцеположення, навколишнє середовище, та забезпечувати шифрування всіх даних, що передаються через мережу;

- **енергоефективність** – система повинна бути оптимізована для мінімального енергоспоживання, щоб забезпечити тривалу роботу на мобільних пристроях, враховуючи використання GPS, камери та інших ресурсів;

- **зручність у користуванні** – інтерфейс повинен бути інтуїтивно зрозумілим і доступним для людей з обмеженими можливостями, зокрема з вадами зору. Голосові підказки мають бути чіткими та легкими для

сприйняття, а візуальні елементи інтерфейсу — простими для взаємодії.

Обмеження та припущення. У процесі розробки системи необхідно враховувати такі обмеження та припущення:

1. Система повинна працювати у змінних умовах освітлення (наприклад, в темний час доби або при яскравому сонячному світлі).

2. Продуктивність системи може залежати від якості з'єднання з Інтернетом і точності GPS, що може бути обмежено в деяких регіонах або приміщеннях.

3. Користувачі системи можуть мати різний рівень технічної підготовки, тому необхідно забезпечити адаптацію інтерфейсу та функцій як для досвідчених користувачів, так і для новачків.

АРХІТЕКТУРА ТА СТРУКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ СУПРОВОДУ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ

Далі представлена архітектура інтелектуальної системи супроводу людей з вадами зору, яка використовує штучний інтелект для виявлення об'єктів, перешкод, розпізнавання тексту, навігації та надання голосових підказок. Система працює на сервері, а користувач взаємодіє з нею через мобільний застосунок, отримуючи весь необхідний функціонал.

Основні підсистеми системи:

- система розпізнавання об'єктів та перешкод;
- система розпізнавання тексту;
- навігаційна система;
- система голосового оповіщення;
- система передачі сигналу SOS та визначення місцезнаходження;
- система управління пристроєм.

Архітектура системи і взаємодія її компонентів проілюстрована на Рис. 5.

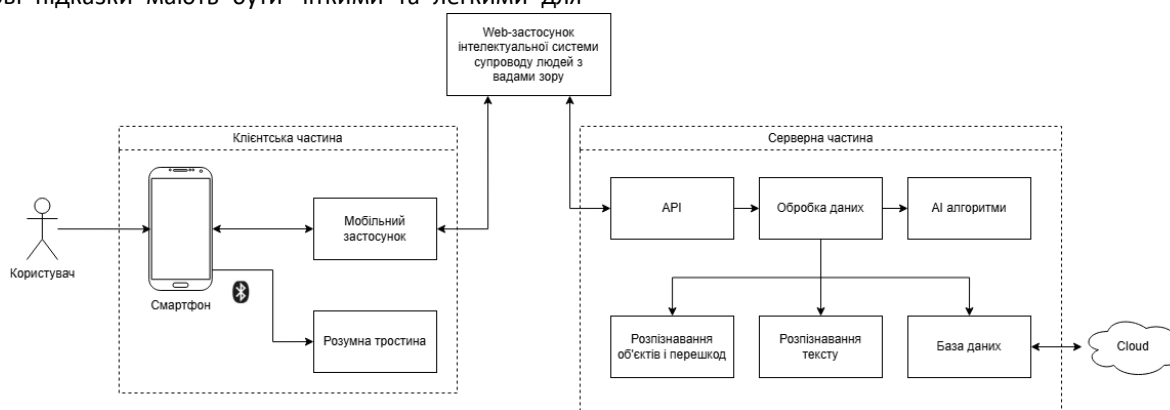


Рис. 5. Архітектура інтелектуальної системи супроводу людей з вадами зору

Система розпізнавання об'єктів та перешкод. Ця система забезпечує ідентифікацію об'єктів і перешкод у реальному часі, отримуючи відеопотік з камери смартфона користувача, який передається на сервер для обробки. В системі використовуються алгоритми

комп'ютерного зору, такі як CNN (Convolutional Neural Network), для розпізнавання об'єктів і перешкод та моделі глибокого навчання, такі як YOLO (You Only Look Once) або SSD (Single Shot Multibox Detector), для виявлення об'єктів на зображеннях (Рис. 6).

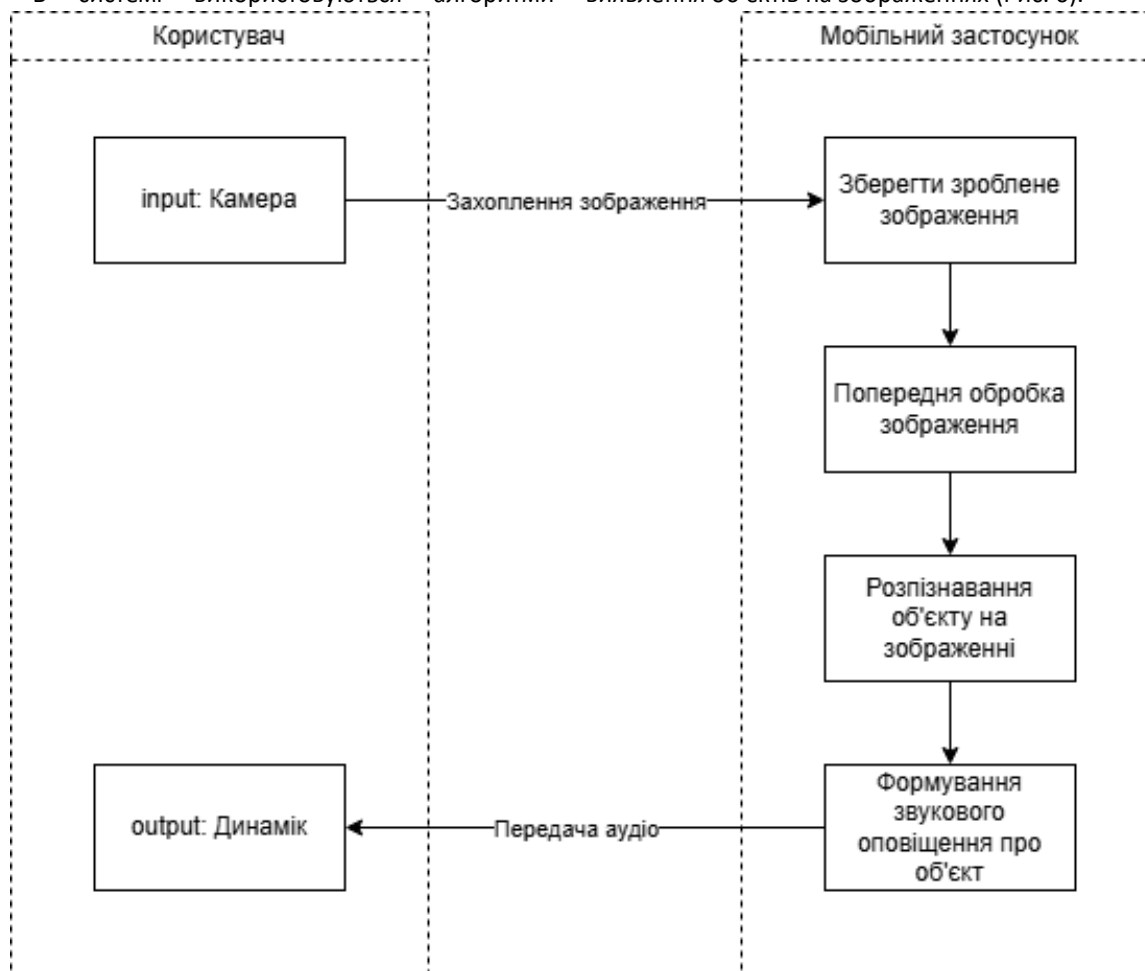


Рис. 6. Структурна схема системи розпізнавання об'єктів та перешкод

Після обробки на сервері, результати (у вигляді текстових або голосових підказок) повертаються до користувача через мобільний застосунок.

Основні компоненти системи наступні:

- сервер – обробляє зображення за допомогою алгоритмів глибокого навчання;
- камера смартфона – захоплює відеопотік для передачі на сервер.
- мобільний застосунок – взаємодіє з користувачем, відображаючи результати обробки.

Система розпізнавання тексту. Ця система дозволяє користувачеві отримувати текстову інформацію з навколишнього середовища (наприклад, дорожні знаки, вивіски або документи). Відеопотік з текстовими даними передається на сервер, де він обробляється за допомогою

OCR (оптичне розпізнавання символів), з використанням таких бібліотек як Tesseract, або сторонніх хмарних сервісів, таких як Google Cloud Vision API.

Після обробки текст передається користувачу для озвучення або відображення на екрані.

Навігаційна система. Навігаційна система допомагає користувачеві орієнтуватися в просторі, надаючи інформацію про його поточне місцезнаходження та маршрути. Вона використовує дані з GPS для прокладання маршрутів, а також сторонні API (наприклад, Google Maps API або OpenStreetMap) для обробки даних про навколишнє середовище і генерування інструкцій.

Основні компоненти системи наступні:

- GPS-модуль смартфона – визначає місцезнаходження користувача;

- сервер – обробляє запити на маршрутизацію та генерує інструкції;

- мобільний застосунок – надає голосові інструкції користувачеві.

Система голосового оповіщення. Система голосового оповіщення генерує голосові підказки на основі текстової інформації, що надходить із серверу. Технологія TTS (Text-to-Speech) використовується для перетворення тексту в мовлення. Сервіси на зразок Google TTS дозволяють генерувати голосові повідомлення, що допомагають користувачу орієнтуватися в навколишньому середовищі.

Основні компоненти системи:

- сервер – генерує текстові повідомлення для озвучення;

- мобільний застосунок – приймає і відтворює аудіо через динаміки смартфона.

Система передачі сигналу SOS та визначення місцезнаходження. Ця система дозволяє користувачеві передавати сигнал SOS в екстрених ситуаціях, разом із поточним місцезнаходженням. Сигнал передається через мобільну мережу за допомогою SMS або через сторонні сервіси, що використовують GSM-модуль смартфона.

Система управління пристроєм. Система управління пристроєм є основою для ефективної взаємодії користувача з системою. Вона забезпечує управління всіма компонентами і процесами, що взаємодіють між собою.

Основні компоненти системи:

- сервер – для обробки всіх даних і управління процесами.

- мобільний застосунок – для взаємодії користувача з системою.

Така структура забезпечує інтеграцію всіх компонентів, що дозволяє створити комплексну та ефективну систему для підтримки людей з вадами зору.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

Далі розглядається процес розробки системи розпізнавання об'єктів для Android-застосунку з використанням камери (модуль ESP32-CAM) та алгоритму YOLOv3. Для реалізації проекту були застосовані такі програмні інструменти: інтегроване середовище розробки PyCharm, бібліотека OpenCV, алгоритм YOLOv3 та фреймворк Kivy.

PyCharm є популярним середовищем розробки для мови програмування Python, що було обрано для написання коду Android-застосунку з використанням фреймворку Kivy. Python є однією з основних мов програмування в галузі машинного навчання та

комп'ютерного зору, що забезпечує доступ до потужної екосистеми бібліотек, що значно спрощує розробку складних алгоритмів і додатків. Використання Kivy, відкритого фреймворку для створення багатоплатформених графічних інтерфейсів, дозволяє створювати застосунки, що можуть працювати на різних пристроях, включаючи Android.

YOLOv3 (You Only Look Once v3) є потужним алгоритмом для розпізнавання об'єктів у реальному часі, який базується на глибоких нейронних мережах. На відміну від інших методів, YOLOv3 здійснює повний аналіз зображення, розбиваючи його на сітку та прогнозує об'єкти і їхні класи для кожної клітинки. Цей підхід забезпечує високу швидкість і ефективність при вирішенні завдань розпізнавання об'єктів.

Модуль ESP32-CAM використовується для захоплення зображень і передачі їх на сервер або комп'ютер, де виконується алгоритм YOLOv3. Обробка відеопотоку та розпізнавання об'єктів на сервері дозволяє уникнути обмежень ресурсів мобільного пристрою, забезпечуючи високу продуктивність і точність розпізнавання.

Основні етапи процесу розпізнавання об'єктів у програмному коді включають такі дії: через фреймворк Kivy створюється інтерфейс користувача для Android-застосунку; завантажуються назви класів об'єктів з файлу `coco.names`; підключається конфігураційний файл та вагові коефіцієнти для моделі YOLOv3.

Кожні 1/60 секунди викликається функція `update_image()`, яка оновлює зображення, завантажує його з URL і перетворює в масив `NumPy` для подальшої обробки з використанням `OpenCV`. Зображення конвертується у формат `blob`, що подається на вхід нейронній мережі. Після проходження через мережу отримуються результати, що містять інформацію про виявлені об'єкти. Алгоритм `non-maximum suppression` застосовується для видалення зайвих прямокутників, які можуть перекривати один одного. На фінальному етапі на зображенні малюються рамки навколо об'єктів і додаються підписи до них.

Розроблений програмний застосунок забезпечує розпізнавання всіх об'єктів, що містяться у файлі `coco.names`. Цей файл містить класи об'єктів набору даних COCO, що використовуються для навчання моделі.

Для роботи алгоритму YOLOv3 необхідні файли `coco.names`, `yolov3.cfg` і `yolov3.weights`, які зберігаються в одній папці разом з головним файлом програми `main.py`. Ці файли є ключовими для коректної роботи нейронної мережі YOLOv3.

Завершений тестовий проєкт у середовищі PyCharm має чітку структуру, в якій всі необхідні файли та конфігурації організовано таким чином, що забезпечується успішна робота системи розпізнавання об'єктів.

Результатом функціонування системи розпізнавання об'єктів є відтворення відеопотоку з модуля ESP32-CAM в реальному часі. Після надходження відео з камери система аналізує кожен окремий кадр за допомогою алгоритму YOLOv3, який виконує обробку зображення, визначаючи об'єкти на основі завантаженої моделі. Для кожного виявленого об'єкта система накладає рамку і додає відповідну мітку, що позначає клас цього об'єкта.

З'єднання між мобільним пристроєм і модулем ESP32-CAM здійснюється через загальну Wi-Fi мережу. Завдяки мобільному застосунку, розробленому на базі фреймворку Kivy, результати роботи системи виявлення об'єктів відображаються на екрані телефону. Користувач має можливість переглядати відео з камери ESP32-CAM, де виявлені об'єкти підсвічуються рамками і позначаються відповідними класами.

Таким чином, розроблена система дозволяє користувачеві здійснювати моніторинг в реальному часі, переглядаючи відеопотік з камери на своєму мобільному пристрої, доповнений інформацією про виявлені об'єкти у вигляді рамок та міток (Рис. 7).

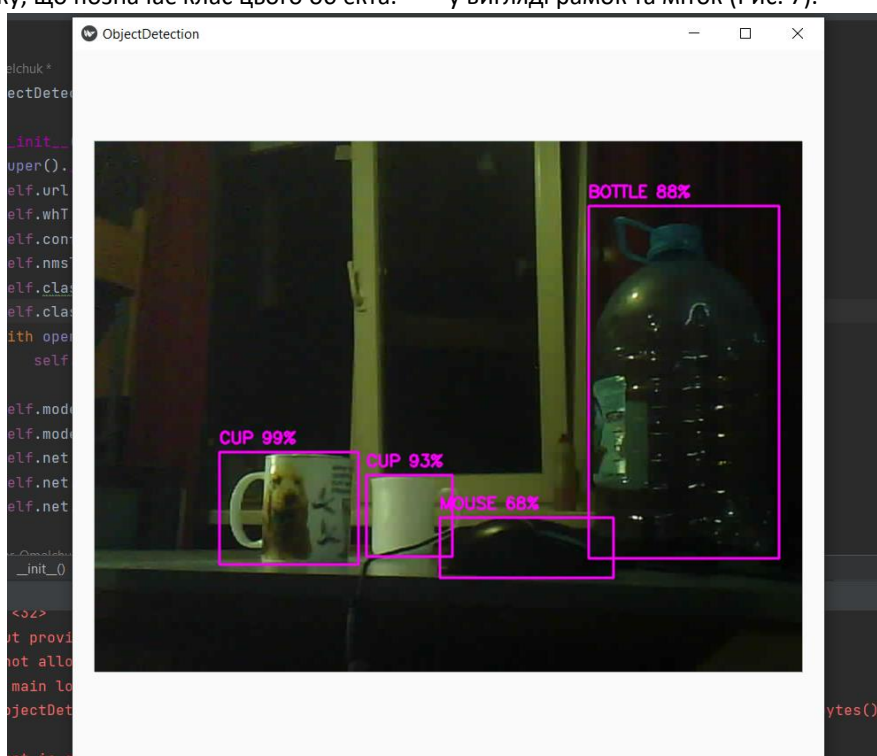


Рис. 7. Результат роботи системи розпізнавання об'єктів

ВИСНОВКИ

У статті було здійснено аналіз низки існуючих рішень для підтримки людей з вадами зору, таких як Aira, Be My Eyes, BlindSquare, Seeing AI, з метою визначення їх переваг, недоліків та можливостей для покращення. Оцінено ефективність цих рішень, зокрема їх здатність вирішувати основні завдання користувачів, як-то точне виявлення перешкод, навігація та надання інформації про навколишнє середовище.

Крім того, проведено глибокий аналіз потреб користувачів з вадами зору для розробки функціональних і нефункціональних вимог до майбутньої системи. Зокрема, були визначені основні виклики, з якими

стикаються ці користувачі, такі як необхідність точного виявлення перешкод, своєчасна інформація про навколишнє середовище, а також забезпечення простоти та інтуїтивної зрозумілості у використанні системи. На основі вивчених потреб було сформульовано вимоги до системи та розроблено її архітектуру, що включає опис основних підсистем, їх взаємодію та функціональні можливості.

Окрему увагу було приділено реалізації однієї з ключових підсистем – системи розпізнавання об'єктів. Ця система використовує алгоритм YOLOv3 для реального часу розпізнавання об'єктів і інтеграції з іншими компонентами, що забезпечує ефективну роботу та взаємодію з користувачем. Результати реалізації цієї

підсистеми підтверджують можливість інтеграції сучасних технологій розпізнавання об'єктів у систему підтримки людей з вадами зору.

Таким чином, виконана робота є основою для подальшого розвитку та вдосконалення інтелектуальних систем для людей з обмеженими можливостями, що включають в себе інноваційні методи обробки зображень та інтеграцію новітніх технологій для забезпечення доступності та підтримки.

ДОСТУПНІСТЬ ДАНИХ

Програмний код викладено для вільного доступу за посиланням: <https://github.com/Nazar-Omelchuk/ObjectDetectionAppForAndroid>.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/epnzm>. Дата звернення: 28.11.2024.
- [2] We're Aira, a Visual Interpreting Service. [Онлайн]. URL: <https://www.aira.io/>. Дата звернення: 28.11.2024.
- [3] Be My Eyes, "Providing vision to blind and visually impaired people," [Онлайн]. URL: <http://surl.li/omxdxl>. Дата звернення: 28.11.2024.
- [4] A popular app is experimenting with AI. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/qisnml>. Дата звернення: 28.11.2024.
- [5] What is BlindSquare? [Онлайн]. URL: <http://surl.li/jhkesl>. Дата звернення: 28.11.2024.
- [6] Seeing AI – Talking Camera for the Blind. [Онлайн]. URL: <https://www.seeingai.com/>. Дата звернення: 28.11.2024.
- [7] В. Р. Borkivskyi and V. М. Tesliuk, "Vykorystannia neiomerezhovyykh zasobiv dlia rozpoznavannia ob'ektiv u mobil'nykh systemakh z obkodom pereshkod," Scientific Bulletin of UNFU, vol. 33, no. 4, pp. 84-89, 2023. [Онлайн]. URL: <https://doi.org/10.36930/40330412>. Дата звернення: 28.11.2024.
- [8] M. Milon Islam, M. S. Sadi, and T. Bräunl, "Automated walking guide to enhance the mobility of visually impaired people," IEEE Trans. Med. Robotics Bionics, vol. 2, no. 3, pp. 485-496, Aug. 2020, doi: 10.1109/TMRB.2020.3011501.
- [9] M. Sadi, T. Bräunl, and M. Islam, "Smart Navigation for Visually Impaired People Using Artificial Intelligence," ITM Web of Conferences, vol. 46, p. 03053, 2022, doi: 10.1051/itmconf/20224603053. URL: <http://surl.li/tpjxmi>. Дата звернення: 28.11.2024.
- [10] M. R. N. Abdullah, M. M. Rahman, M. A. Fattah, and S. A. S. N. Islam, "An AIoT-Based Assistance System for Visually Impaired People," Electronics, vol. 12, no. 18, p. 3760, Sep. 2023, doi: 10.3390/electronics12183760.
- [11] S. Myronenko, S. A. Murakhovskiy, and O. A. Skidchenko, "Information technologies in the design of inertial sensors for orientation and navigation systems," Visnyk KPI, vol. 59, no. 1, pp. 63–70, 2020, doi: 10.20535/1970.59(1).2020.210019.
- [12] What is GPS: Types of Positioning Systems, How it Works, and Its Future. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/jltkpe>. Дата звернення: 28.11.2024.
- [13] GPS – Wikipedia. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/poogzq>. Дата звернення: 28.11.2024.

INTELLIGENT SYSTEM FOR ASSISTING PEOPLE WITH VISUAL IMPAIRMENTS

Nazar Omelchiuk, Iaroslav Dorogy

The article is dedicated to the analysis of modern technologies used to create intelligent systems for supporting people with visual impairments. The relevance of this topic is determined by the need to develop effective and accessible solutions that facilitate the daily lives of people with disabilities, particularly those with vision impairments. The aim of the article is to provide a comprehensive analysis of existing technologies, examine the advantages and disadvantages of available solutions, and identify potential ways to improve such systems. The article discusses leading solutions in this field, such as Aira, Be My Eyes, BlindSquare, and Seeing AI, which enable navigation and support for people with visual impairments through mobile devices, cameras, and other sensory systems.

The authors also explore the needs of the users of these systems, identifying the main challenges faced by people with limited vision, such as obstacle detection, providing timely information about the surrounding environment, and ensuring ease of use. Based on this analysis, the requirements for future support systems have been formulated, and the architecture of the intelligent system, which includes components for object recognition, obstacle detection, navigation, and voice assistance, has been developed.

Particular attention is given to the integration of object and obstacle recognition components, which are implemented using computer vision technologies such as OpenCV and neural networks. Additionally, the possibility of integrating voice assistants to provide convenient and accessible feedback is considered. The article also outlines the methods used for developing and testing such systems, including structural and comparative analysis of existing solutions, as well as experimental methods to assess the effectiveness of the software.

The research and development of intelligent systems for supporting people with visual impairments is an important step towards creating an accessible and barrier-free environment for people with disabilities,

opening up new opportunities to improve their quality of life.

Keywords: *intelligent support system, assistance for visually impaired individuals, web application, computer vision, object recognition, YOLOv3, voice assistance, navigation, adaptive technology.*

REFERENCES

- [1] Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. [Online]. URL: <http://surl.li/epnzmb>. Accessed: Nov. 28, 2024.
- [2] We're Aira, a Visual Interpreting Service. [Online]. URL: <https://www.aira.io/>. Accessed: Nov. 28, 2024.
- [3] Be My Eyes, "Providing vision to blind and visually impaired people," [Online]. URL: <http://surl.li/omxdxl>. Accessed: Nov. 28, 2024.
- [4] A popular app is experimenting with AI. [Online]. URL: <http://surl.li/qisnml>. Accessed: Nov. 28, 2024.
- [5] What is BlindSquare? [Online]. URL: <http://surl.li/jhkesl>. Accessed: Nov. 28, 2024.
- [6] Seeing AI – Talking Camera for the Blind. [Online]. URL: <https://www.seeingai.com/>. Accessed: Nov. 28, 2024.
- [7] B. P. Borkivskyi and V. M. Tesliuk, "Vykorystannia neiromerezhovyykh zasobiv dlia rozpiznavannia ob'ektiv u mobil'nykh systemakh z obkodom pereshkod," Scientific Bulletin of UNFU, vol. 33, no. 4, pp. 84-89, 2023. [Online]. URL: <https://doi.org/10.36930/40330412>. Accessed: Nov. 28, 2024.
- [8] M. Milon Islam, M. S. Sadi, and T. Bräunl, "Automated walking guide to enhance the mobility of visually impaired people," IEEE Trans. Med. Robotics Bionics, vol. 2, no. 3, pp. 485-496, Aug. 2020, doi: 10.1109/TMRB.2020.3011501.
- [9] M. Sadi, T. Bräunl, and M. Islam, "Smart Navigation for Visually Impaired People Using Artificial Intelligence," ITM Web of Conferences, vol. 46, p. 03053, 2022, doi: 10.1051/itmconf/20224603053. URL: <http://surl.li/tpjxmi>. Accessed: Nov. 28, 2024.
- [10] M. R. N. Abdullah, M. M. Rahman, M. A. Fattah, and S. A. S. N. Islam, "An AIoT-Based Assistance System for Visually Impaired People," Electronics, vol. 12, no. 18, p. 3760, Sep. 2023, doi: 10.3390/electronics12183760.
- [11] S. Myronenko, S. A. Murakhovskyi, and O. A. Skidchenko, "Information technologies in the design of inertial sensors for orientation and navigation systems," Visnyk KPI, vol. 59, no. 1, pp. 63–70, 2020, doi: 10.20535/1970.59(1).2020.210019.
- [12] What is GPS: Types of Positioning Systems, How it Works, and Its Future. [Online]. URL: <http://surl.li/jltkpe>. Accessed: Nov. 28, 2024.
- [13] GPS – Wikipedia. [Online]. URL: <http://surl.li/poogzq>. Accessed: Nov. 28, 2024.

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ДОМОГОСПОДАРСТВАХ НА ОСНОВІ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ

Б.Ю. Шибецький¹, Я.Ю. Дорогий²

¹ Department of Information Systems and Technologies, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

² Department of Applied Mathematics and Informatics, Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine

E-mail: bohdan7565@gmail.com

Отримано 15.11.2024

Прийнято до публікації 01.12.2024

Опубліковано 31.12.2024

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто розробку системи моніторингу та аналізу споживання електроенергії в домогосподарствах на основі IoT-технологій. Зі зростанням споживання енергії та потребою в її раціональному використанні важливою є автоматизація процесу моніторингу, що дозволяє користувачам ефективно управляти енергоресурсами. Пропонована система передбачає інтеграцію сучасних апаратних та програмних засобів для збору, обробки, зберігання та візуалізації даних про споживану енергію в реальному часі. Вона складається з модуля збору даних на основі плати ESP32-CAM, що забезпечує зчитування зображень електрорічильників, та програмного забезпечення для обробки цих зображень із використанням бібліотеки OpenCV. Для зберігання даних обрано надійну базу даних PostgreSQL, а для візуалізації – платформи Power BI та Looker, що дозволяють створювати інтерфейси для зручного аналізу споживання енергії.

Досліджено функціональні та нефункціональні вимоги до системи, зокрема забезпечення реального часу моніторингу, надійності та безпеки даних, а також зручності користування. Окремо розглянуті існуючі технології та рішення для моніторингу енергоспоживання, що дозволило визначити основні переваги та недоліки таких систем, як EcoBee Smart Thermostat та EnergyHub. Для верифікації ефективності запропонованої системи проведено тестування її компонентів в умовах реального використання, що дозволило оцінити точність збору та обробки даних.

Розроблена система має високий потенціал для впровадження в різних домогосподарствах, що дозволяє знизити витрати на енергоспоживання, покращити контроль над використанням електричної енергії та забезпечити раціональне її використання. Практична значимість роботи полягає в створенні доступного та ефективного інструменту для моніторингу

енергоспоживання, що може бути адаптованим до потреб різних користувачів та інфраструктур. У подальших дослідженнях планується розширення функціоналу системи та інтеграція з іншими пристроями для розширення її можливостей.

Ключові слова: система моніторингу, аналіз споживання електроенергії, IoT-технології, веб-застосунок, комп'ютерний зір, обробка зображень, OpenCV, візуалізація даних, енергозбереження.

ВСТУП

Зростаючі обсяги споживання енергії у світі та обмеженість природних ресурсів вимагають від суспільства розробки нових підходів до раціонального використання енергетичних ресурсів. Одним із важливих напрямків є зниження витрат на електричну енергію в домогосподарствах, яке може бути досягнуто завдяки ефективному моніторингу та управлінню енергоспоживанням. У цьому контексті особливу увагу привертають новітні технології, зокрема Інтернет речей (IoT), які дозволяють автоматизувати процеси збору, обробки та візуалізації даних, а також надавати користувачам корисні рекомендації щодо зниження енергоспоживання. Використання IoT-технологій у домогосподарствах дає змогу не тільки підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів, але й сприяє зниженню витрат на електричну енергію, що є важливим аспектом для більшості споживачів.

Завдяки швидкому розвитку технологій і доступності «розумних» пристроїв, таких як датчики, контролери та різноманітні сенсори, стало можливим створення інтегрованих систем моніторингу та управління енергоспоживанням. Однак, незважаючи на значний потенціал цих рішень, існує кілька проблем, таких як висока вартість впровадження, складність інтеграції з існуючими системами в домогосподарствах та недостатня ефективність деяких існуючих рішень у контексті реального застосування. У зв'язку з цим, важливим є створення систем, що відповідають вимогам користувачів, забезпечують зручність і доступність, а також мають високий рівень точності в моніторингу та аналізі даних про споживання енергії.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розглянемо декілька досліджень, які дозволяють досить детально зрозуміти стан справ у досліджуваній сфері та можливі напрямки подальших досліджень.

У статті [1] автори пропонують систему, що інтегрує дані з різних джерел, таких як енергоспоживання будівлі,

ціни на енергію та погодні умови, для формування дійових рекомендацій щодо управління енергією. Це дозволяє покращити ефективність енергоспоживання в будівлях, оптимізуючи використання енергетичних ресурсів та знижуючи витрати.

Стаття [2] надає систематичний огляд IoT рішень для енергетичного менеджменту в розумних будівлях. Зокрема, зазначено, що використання сенсорних технологій у системах керування будівлею дозволяє знизити енергоспоживання до 30%. Однак стаття також підкреслює значні труднощі, зокрема високі початкові витрати на впровадження та проблеми з безпекою даних.

Стаття [3] розглядає різноманітні застосування технологій IoT в розумних будівлях, зокрема в системах енергомоніторингу та управління. Автори підкреслюють важливість інтеграції IoT для зниження споживання енергії, покращення ефективності роботи будівельних систем, таких як HVAC, та оптимізації енергетичних витрат через використання датчиків і моніторингу в реальному часі. Водночас, вони зазначають, що застосування IoT технологій може покращити безпеку будівель завдяки інтеграції систем відеоспостереження, контролю доступу та автоматизації. Встановлення таких систем дозволяє знижувати експлуатаційні витрати та збільшувати рівень комфорту мешканців будівель, що робить технології IoT важливим елементом майбутнього розвитку інфраструктури розумних будівель.

Стаття [4] розглядає застосування IoT в управлінні енергоспоживанням, зокрема у розумних будівлях та інфраструктурах. Автори акцентують увагу на використанні IoT для моніторингу та контролю енергоспоживання в реальному часі, що дозволяє значно знижувати витрати на енергію та підвищувати ефективність енергетичних систем. Основними перевагами впровадження IoT є можливість автоматизації процесів управління освітленням, вентиляцією, опаленням та іншими системами, що забезпечують економію енергоресурсів. Стаття також наголошує на важливості інтеграції IoT в глобальні стратегії енергозбереження, що сприяє підвищенню екологічної стійкості та зниженню викидів вуглецю.

Метою цієї статті є розробка та реалізація системи моніторингу та аналізу споживання електроенергії в домогосподарствах на основі IoT-технологій. Вона спрямована на автоматизацію збору даних з електролічильників, аналіз інформації в реальному часі, а також надання користувачеві рекомендацій щодо оптимізації використання енергії. У роботі також проведено детальний аналіз існуючих рішень на ринку, визначено вимоги до системи, що допомагають забезпечити її ефективність та зручність для користувачів. Створена система може стати важливим інструментом для покращення управління енергоспоживанням, що дозволить користувачам домогосподарств не тільки знижувати витрати на енергію, а й сприяти збереженню природних ресурсів та покращенню екологічної ситуації в цілому.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досягнення мети дослідження були застосовані методи структурного та порівняльного аналізу, що дозволили всебічно оцінити існуючі технології та рішення для створення систем моніторингу та аналізу споживання електроенергії в домогосподарствах на основі IoT-технологій. Структурний аналіз сприяв визначенню основних компонентів системи, їх функціональних вимог та взаємодії між ними. Порівняльний аналіз дозволив оцінити переваги та недоліки існуючих рішень, зокрема таких, як EcoBee Smart Thermostat та подібних систем, що застосовуються для моніторингу енергоспоживання.

Для збору та систематизації інформації було застосовано методи інформаційного та аналітичного підходу. Це дозволило здійснити глибоке вивчення наукової літератури, сучасних технологій IoT, а також доступних онлайн-ресурсів, що стосуються розробки інтелектуальних систем управління енергоспоживанням. Вивчення наявних рішень, таких як платформи Power BI для візуалізації даних, забезпечило формулювання основних вимог до функціональності та зручності користування системами моніторингу енергоспоживання.

Для перевірки ефективності теоретичних положень та запропонованих технічних рішень використані експериментальні методи, зокрема тестування апаратної частини, побудованої на основі плати ESP32-CAM, для збору даних з електролічильників.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Призначення та область застосування. Система моніторингу та аналізу споживання електроенергії призначена для забезпечення ефективного контролю

витрат електроенергії в домогосподарствах шляхом використання універсального веб-застосунку. Вона має бути здатною функціонувати на різноманітних пристроях, зокрема смартфонах, планшетах і комп'ютерах, що забезпечить її доступність для широкої аудиторії користувачів. Завдяки застосуванню технологій IoT, система автоматично збирає дані з електролічильників, надаючи споживачам актуальну інформацію про енергоспоживання.

Функціональні можливості системи передбачають моніторинг споживання електроенергії в реальному часі, ідентифікацію неефективних приладів та аналіз пікових навантажень. Це сприяє раціональному використанню енергоресурсів, що є особливо важливим за умов зростання тарифів на електроенергію. Користувачі отримують індивідуальні рекомендації щодо зменшення витрат на електроенергію, що дозволяє оптимізувати їхні витрати на комунальні послуги.

Система може бути інтегрована у різноманітні середовища: як для індивідуального використання в домогосподарствах, так і в рамках соціальних проєктів, спрямованих на популяризацію енергозбереження. Інтеграція з платформами для візуалізації даних повинна надавати користувачам можливість аналізувати інформацію у вигляді графіків, звітів та інших візуалізованих показників енергоспоживання.

Розробка та впровадження цієї системи мають важливе значення у контексті сучасних викликів енергетичної ефективності. Надання доступу до детальної інформації про споживання електроенергії сприяє підвищенню обізнаності споживачів, дозволяючи їм краще контролювати свої витрати та зменшувати залежність від традиційних енергетичних ресурсів. Впровадження подібних систем сприятиме не лише оптимізації енергоспоживання, але й формуванню свідомого підходу до використання енергії в суспільстві.

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК SENSE

Sense [5] – це система моніторингу споживання електроенергії, що підключається безпосередньо до електричного щитка в домогосподарстві. Вона використовує сучасні технології машинного навчання для аналізу та моніторингу енергоспоживання в режимі реального часу, надаючи користувачам цінну інформацію про витрати на електроенергію та ефективність роботи приладів. Це дає змогу знижувати витрати та оптимізувати використання енергоресурсів. (Рис. 1).

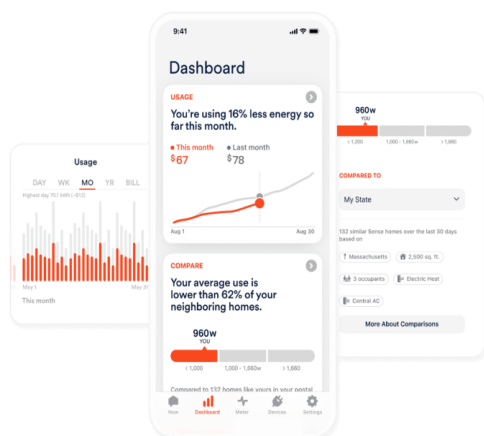


Рис. 1. Мобільний застосунок Sense [5]

До основних функцій мобільного застосунку Sense відносяться:

- *Аналіз споживання окремих приладів.* Завдяки алгоритмам машинного навчання Sense ідентифікує більшість основних електроприладів у домогосподарстві. Це дозволяє користувачам відстежувати, які пристрої споживають енергію в конкретний момент, визначити найбільш енергоємні прилади та виявляти джерела перевитрат.

- *Моніторинг у реальному часі.* Система забезпечує можливість переглядати інформацію про споживання електроенергії в реальному часі. Користувачі можуть контролювати навантаження на електричну мережу та аналізувати споживання у різні періоди доби, що дозволяє оптимізувати використання ресурсів під час пікових або низькозатратних періодів.

- *Виявлення аномалій.* Sense ідентифікує аномальні показники енергоспоживання, що може свідчити про несправність приладів або їхню неефективну роботу. Наприклад, система надсилає сповіщення про надмірне споживання енергії певним пристроєм.

- *Система сповіщень.* Sense дозволяє налаштувати сповіщення для інформування користувачів про підвищене споживання або виявлені аномалії, що забезпечує оперативне реагування на проблеми.

- *Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.* Sense має мобільний і веб-застосунок із зручним інтерфейсом, що полегшує доступ до аналітики та даних із будь-якого пристрою.

До основних переваг застосунку Sense належать:

- *висока точність моніторингу* – система забезпечує детальний аналіз енергоспоживання окремих приладів, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень щодо оптимізації витрат;

- *доступність для широкого кола користувачів* – інтуїтивно зрозумілий інтерфейс забезпечує легкість у використанні навіть для осіб без технічної підготовки;

- *система сповіщень* – користувачі можуть своєчасно реагувати на надмірне споживання та потенційні проблеми.

Разом із перевагами Sense має і певні недоліки:

- *висока вартість установки* – початкові витрати на встановлення системи можуть бути значними, що є перепоною для користувачів із обмеженим бюджетом;

- *залежність від стабільного інтернет-з'єднання* – якість моніторингу безпосередньо залежить від надійності мережевого підключення, що може створювати труднощі в регіонах зі слабким або нестабільним інтернетом.

СТАРТАП ECOISME

Ecoisme [6] – український стартап, спрямований на підвищення ефективності використання електроенергії в домогосподарствах шляхом застосування IoT-технологій. Основною метою проекту є створення системи, яка б дозволяла здійснювати моніторинг енергоспоживання в реальному часі, забезпечуючи користувачів детальною інформацією про витрати енергії та можливостями оптимізації роботи електроприладів.

Система Ecoisme має функціонал для підключення до електролічильників, збираючи дані про споживання кожного пристрою в будинку. На основі зібраної інформації користувачам надаються рекомендації щодо економії електроенергії, що дозволяє знижувати витрати на комунальні послуги. Крім того, Ecoisme має можливість інтеграції з іншими компонентами "розумного дому", що забезпечує комплексний підхід до управління енергоспоживанням.

Основні функції та можливості системи Ecoisme наступні:

- *Висока точність моніторингу.* Система дозволяє точно визначити рівень споживання енергії кожного приладу, що сприяє ефективному аналізу та виявленню джерел перевитрат.

- *Інтеграція з "розумним домом".* Ecoisme може працювати спільно з іншими "розумними" пристроями, створюючи єдину екосистему для управління енергоресурсами.

- *Рекомендації для економії.* Користувачі отримують персоналізовані поради щодо зниження споживання електроенергії, що сприяє як економії коштів, так і раціональному використанню енергоресурсів.

Приклад інтерфейсу мобільного застосунку Be My Eyes наведено на Рис.2.



Рис. 2. Стартуп Ecoisme [6]

Попри інноваційний підхід, Ecoisme має деякі недоліки:

- *Обмежена сумісність.* Система працює лише з певними типами електролічильників, що ускладнює її використання для деяких споживачів.
- *Необхідність оновлення програмного забезпечення.* Для підтримання точності аналізу потрібне регулярне оновлення, що створює додаткові технічні виклики.

Незважаючи на високий потенціал і інноваційність, стартап Ecoisme згодом припинив своє існування. Основними причинами цього стали:

- труднощі із масштабуванням і забезпеченням фінансування;
- висока конкуренція на ринку рішень для управління енергоспоживанням;
- технічні виклики, пов'язані з постійною потребою в оновленнях і розширенні функціональності.

СИСТЕМА ENERGYHUB

EnergyHub [7] – це інноваційна система, яка забезпечує моніторинг та управління споживанням електроенергії з можливістю інтеграції з різними "розумними" приладами. Вона дозволяє користувачам ефективно контролювати енергоспоживання відповідно до їхніх потреб, використовуючи інтуїтивно зрозумілий мобільний додаток, що робить процес управління зручним і доступним для широкої аудиторії.

Мобільний застосунок Seeing AI представлений на Рис. 3.

Перевагами використання EnergyHub є:

- *зручність у використанні* – завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу, система підходить для користувачів з будь-яким рівнем технічних знань;

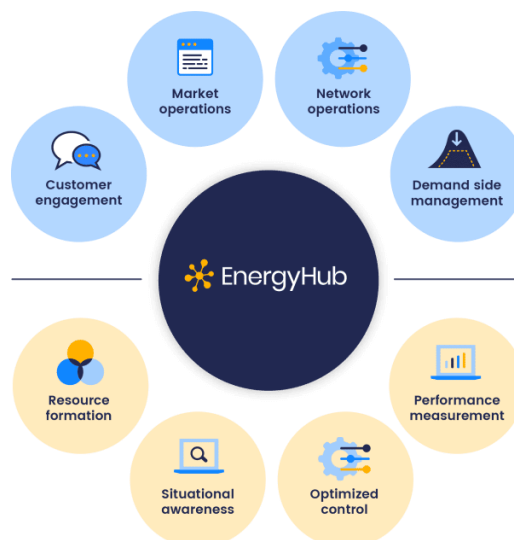


Рис. 3. Система EnergyHub [7]

- *управління через мобільний застосунок* – користувачі мають доступ до всіх функцій системи зі смартфона, що забезпечує зручність і оперативність управління;
 - *широка сумісність* – EnergyHub підтримує інтеграцію з численними "розумними" пристроями, що дозволяє створити єдину екосистему для управління енергоспоживанням.
- Серед обмежень EnergyHub можна виділити наступні:
- *залежність від "розумних" приладів* – функціональність EnergyHub безпосередньо залежить від наявності "розумних" пристроїв у домогосподарстві, що може обмежувати її ефективність у традиційних середовищах;
 - *висока вартість впровадження* – ціна системи та необхідного обладнання може бути значною, що ускладнює її доступність для окремих категорій користувачів.

СИСТЕМА ECOBEE SMART THERMOSTAT

EcoBee Smart Thermostat [8] – це сучасна система, розроблена для оптимізації енергоспоживання у домогосподарствах шляхом автоматизації процесів опалення та охолодження. Завдяки інтеграції з різними платформами "розумного дому", система допомагає користувачам знижувати витрати на електроенергію та забезпечує комфорт у користуванні. EcoBee підтримує роботу з платформами Alexa і Google Assistant, що додає додаткової зручності для користувачів, які вже використовують інші "розумні" пристрої.

Система EcoBee Smart Thermostat представлена на Рис.

4.



Рис. 4. Система EcoBee Smart Thermostat [8]

Основними функціями системи є:

- *Реальний час моніторингу.* Система дозволяє користувачам відстежувати споживання енергії у режимі реального часу, забезпечуючи доступ до актуальної інформації про витрати.

- *Автоматизація процесів.* Завдяки вбудованим алгоритмам і підтримці додаткових сенсорів, EcoBee автоматично налаштовує параметри опалення та охолодження відповідно до умов у приміщенні, що забезпечує ефективне використання енергоресурсів.

- *Інтеграція з платформами.* Сумісність з Alexa та Google Assistant дозволяє EcoBee стати частиною єдиної екосистеми "розумного дому", забезпечуючи централізоване управління всіма підключеними пристроями.

- *Зручний інтерфейс.* Система пропонує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який полегшує налаштування параметрів температури та забезпечує швидкий доступ до інформації про енергоспоживання.

Перевагами використання EcoBee Smart Thermostat є:

- *гнучкість у підключенні* – можливість інтеграції з різними платформами і пристроями створює цілісну екосистему управління енергоресурсами;

- *економія енергії* – автоматизація процесів і моніторинг у реальному часі дозволяють зменшити витрати на енергію;

- *простота використання* – інтуїтивний інтерфейс робить систему доступною навіть для користувачів без спеціальної технічної підготовки.

Серед обмежень EcoBee Smart Thermostat можна виділити наступні:

- *додаткові сенсори* – для повноцінного функціонування можуть знадобитися додаткові сенсори, які підвищують загальну вартість впровадження;

- *залежність від Інтернету* – ефективність роботи EcoBee значною мірою залежить від стабільного інтернет-з'єднання, що може стати викликом у регіонах із нестабільною мережею;

- *питання конфіденційності* – підключення до Інтернету викликає занепокоєння щодо безпеки та конфіденційності даних користувачів, що слід враховувати при виборі системи.

КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ

Далі наведено компаративний аналіз розглянутих систем, розроблених для моніторингу та управління енергоспоживанням. Для забезпечення об'єктивної оцінки та порівняння різних програм було обрано низку критеріїв, що дозволяють врахувати їх основні функції, доступність та ефективність в реальних умовах використання. Ось ключові критерії, що використовуються для порівняння мобільних застосунків:

1. Функціональність.

Включає основні можливості системи, такі як моніторинг у реальному часі, автоматизація процесів, виявлення аномалій тощо.

2. Інтеграція.

Відображає здатність системи взаємодіяти з іншими пристроями чи платформами, такими як "розумний дім", Alexa, Google Assistant тощо.

3. Зручність використання.

Оцінюється на основі інтерфейсу, простоти налаштування та доступності для недосвідчених користувачів.

4. Точність моніторингу.

Визначає здатність системи ідентифікувати окремі прилади та надавати детальну інформацію про їх споживання.

5. Вартість впровадження.

Оцінюється як початкова вартість установки, так і потенційні витрати на додаткові сенсори, підписки тощо.

6. Залежність від Інтернету.

Вказує на важливість стабільного підключення для роботи системи та потенційні ризики у випадку перебоїв у мережі.

7. Особливості.

Унікальні переваги або обмеження, що виділяють систему серед інших. Ці критерії дозволяють провести порівняння систем на базі основних характеристик, що впливають на їх функціональність та ефективність (Табл. 1).

Табл. 1. Компаративний аналіз систем

Критерій	Sense	Ecoisme	EnergyHub	EcoBee Smart Thermostat
Функціональність	Моніторинг у реальному часі, виявлення аномалій, сповіщення	Моніторинг окремих приладів, рекомендації для економії	Управління "розумними" приладами, моніторинг	Автоматизація опалення та охолодження, аналіз споживання
Інтеграція	Обмежена	Інтеграція з "розумними" пристроями	Сумісність із широким спектром пристроїв	Підтримка Alexa та Google Assistant
Зручність використання	Інтуїтивний інтерфейс, мобільний додаток	Доступний для користувачів із базовими технічними знаннями	Простий інтерфейс, мобільний додаток	Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс
Точність моніторингу	Висока точність у визначенні окремих пристроїв	Висока точність, але залежність від обмеженого переліку лічильників	Загальна оцінка енергоспоживання	Висока точність аналізу температури та споживання
Вартість впровадження	Висока початкова вартість	Висока через потребу оновлення та підтримки	Висока вартість для користувачів без "розумних" пристроїв	Додаткові витрати на сенсори
Залежність від Інтернету	Висока	Висока	Помірна	Висока
Особливості	Сповіщення про аномалії, висока деталізація	Потребує сумісного електролічильника, інноваційний підхід	Широка підтримка пристроїв, легкість налаштування	Автоматизація температурних режимів, конфіденційність може бути викликом

ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ

Перед початком розробки системи для моніторингу та аналізу споживання електроенергії необхідно чітко визначити її функціональні та нефункціональні вимоги. Це дозволить створити систему, яка відповідатиме потребам користувачів, забезпечуватиме високу надійність та ефективність у виконанні завдань. Основні функції системи мають включати моніторинг енергоспоживання, аналіз даних у реальному часі та надання рекомендацій щодо оптимізації використання енергії.

Функціональні вимоги системи. Зважаючи на потреби домогосподарств та аналіз існуючих рішень, визначено такі функціональні вимоги до системи:

- *Моніторинг споживання електроенергії в реальному часі.* Система повинна збирати дані з електролічильника в режимі реального часу, забезпечуючи користувачів актуальною інформацією про

споживання енергії. Це дасть змогу оперативно ідентифікувати прилади, які споживають найбільше енергії, сприяючи більш усвідомленому використанню електроприладів.

- *Аналіз даних та виявлення аномалій.* Система має аналізувати зібрані дані для виявлення пікових навантажень та аномалій у споживанні електроенергії. Це допоможе користувачам зрозуміти причини надмірних витрат енергії та ідентифікувати найбільш енерговитратні прилади.

- *Рекомендації щодо оптимізації споживання.* На основі зібраних і проаналізованих даних система повинна генерувати рекомендації для користувачів щодо зменшення енергоспоживання. Це сприятиме ефективнішому використанню енергетичних ресурсів і зниженню витрат.

- *Інтеграція з платформами візуалізації даних.* Система має забезпечувати можливість передачі зібраних

даних до платформ візуалізації, таких як Power BI [13] чи Looker [14]. Це дозволить користувачам переглядати звіти та графіки, що підвищить доступність і зрозумілість інформації для аналізу.

Нефункціональні вимоги системи. Нефункціональні вимоги визначають характеристики системи, що забезпечують її продуктивність, надійність, безпеку та зручність використання. Ці аспекти впливають на загальну якість і прийнятність системи для кінцевих користувачів. Система повинна забезпечувати наступні нефункціональні вимоги:

- **Продуктивність** – система повинна забезпечувати швидке збирання та обробку даних, з мінімальною затримкою надання зворотного зв'язку. Це дозволить користувачам оперативно отримувати актуальну інформацію про споживання енергії та своєчасно реагувати на зміни.

- **Надійність та стійкість до помилок** - система має забезпечувати безперебійну роботу навіть за умов короткочасних збоїв у передачі даних, наприклад, через втрату з'єднання з мережею Wi-Fi. У разі таких збоїв система повинна автоматично відновлювати роботу і, за можливості, зберігати дані для подальшої синхронізації.

- **Масштабованість** – система повинна бути адаптованою до роботи з різними типами електролічильників та побутових приладів. Це забезпечить її універсальність і можливість використання в домогосподарствах з різною апаратною інфраструктурою.

- **Безпека та конфіденційність** – захист даних користувача є одним із ключових аспектів. Система повинна забезпечувати:

- шифрування даних під час їх передачі через мережу;

- контроль доступу до конфіденційної інформації, надаючи доступ лише авторизованим користувачам;

- відповідність стандартам безпеки для запобігання несанкціонованому доступу.

- **Енергоефективність** – система повинна бути оптимізованою для мінімального власного енергоспоживання. Це особливо важливо для пристроїв, які функціонують у режимі реального часу. Досягнення енергоефективності передбачає ефективне використання апаратних ресурсів, таких як Wi-Fi-модуль або інші сенсори.

- **Зручність у користуванні** – інтерфейс користувача має бути інтуїтивно зрозумілим і простим у використанні. Це дозволить зробити систему доступною для користувачів різного рівня технічної підготовки, включно з тими, хто не має спеціальних знань у сфері технологій.

Обмеження та припущення. У процесі розробки системи необхідно враховувати такі обмеження та припущення:

1. Система повинна працювати у стабільному інтернет-з'єднанні, що забезпечить безперервну передачу даних до серверів.

2. Продуктивність системи може залежати від точності роботи електролічильника, а також від умов навколишнього середовища, таких як наявність освітлення та температура.

3. Користувачі можуть мати різний рівень підготовки, тому система повинна бути адаптованою як для досвідчених користувачів, так і для новачків.

АРХІТЕКТУРА ТА СТРУКТУРА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Далі представлена архітектура інтелектуальної системи для моніторингу та аналізу споживання електроенергії в домогосподарствах, яка побудована на основі IoT-технологій. Система автоматизовано збирає дані з електролічильників, обробляє їх та візуалізує, надаючи користувачеві можливість ефективно контролювати споживання енергії та знижувати витрати.

Основні підсистеми системи:

- модуль збору даних;
- серверна частина;
- аналітична підсистема;
- інтерфейс фізуалізації даних.

Архітектура системи і взаємодія її компонентів проілюстрована на Рис. 5.

Модуль збору даних. Модуль збору даних відповідає за автоматичне захоплення інформації про показники електролічильника за допомогою камери ESP32-CAM [11]. Камера фіксує зображення лічильника, а потім, через вбудований Wi-Fi модуль, передає його на сервер для подальшої обробки. Це забезпечує безперервне отримання даних без необхідності ручного втручання, що значно спрощує процес моніторингу для кінцевого користувача.

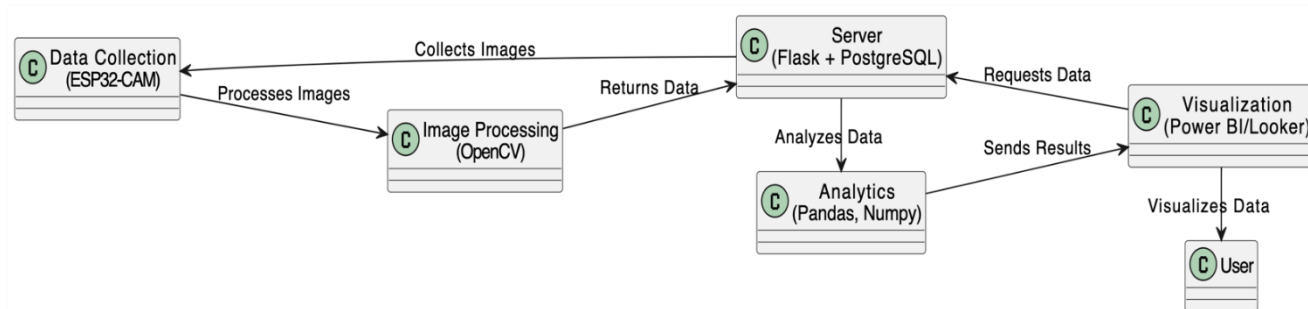


Рис. 5. Архітектура системи моніторингу та аналізу споживання електроенергії

Основні компоненти модуля збору даних:

- ESP32-CAM – забезпечує зйомку зображень показників електролічильника.
- Wi-Fi модуль – передає зображення на сервер для подальшого аналізу.

Серверна частина. Серверна частина отримує зображення, обробляє їх за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору, таких як OpenCV [9], для розпізнавання чисел на лічильнику, а потім зберігає оброблені дані у базі. Це дозволяє створювати історію споживання, яка може бути використана для детального аналізу та моніторингу в реальному часі.

Основні компоненти серверної частини:

- Обробник зображень (OpenCV) – використовує алгоритми комп'ютерного зору для розпізнавання чисел на зображеннях.
- Сервер бази даних – зберігає оброблені дані, дозволяючи відстежувати історію споживання.
- API інтерфейс – надає доступ до даних для аналітичної та візуалізаційної підсистем.

Інтерфейс візуалізації даних. Інтерфейс візуалізації даних дозволяє користувачам переглядати інформацію про споживання електроенергії у зручному форматі. Використовуючи Power BI або Looker, дані подаються у вигляді графіків та діаграм, що допомагає користувачам швидко оцінити поточний рівень споживання, відстежувати історичні тенденції та отримувати доступ до звітів.

Основні компоненти інтерфейсу візуалізації даних:

- Графічний інтерфейс (Power BI/Looker) – забезпечує інтерактивні звіти та графіки.
- Дашборди та віджети – дозволяють користувачу переглядати дані в зрозумілому форматі та проводити аналіз споживання.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Для реалізації системи моніторингу та аналізу споживання електроенергії обрано апаратні та програмні засоби, що забезпечують автоматизований збір, обробку та візуалізацію даних. Основна увага приділялася доступності, надійності й ефективності використаних компонентів.

Апаратна складова системи. Основним елементом для збору даних є мікроконтролер ESP32, який забезпечує бездротове з'єднання через Wi-Fi. Для фіксації показань електролічильника використовується ESP32-CAM – модуль із вбудованою камерою. Камера робить знімки лічильника, які використовуються для автоматичного розпізнавання його показань. Вибір ESP32-CAM обумовлений її компактністю, простотою інтеграції та відносно низькою вартістю, що дозволяє створити економічно вигідне рішення для користувачів.

Програмна обробка даних. Для обробки зображень і розпізнавання показань застосовується бібліотека OpenCV, яка забезпечує широкий спектр функцій для роботи із зображеннями, включаючи фільтрацію, виділення контурів та розпізнавання тексту. Інтеграція OpenCV із Python дозволяє оперативно розробляти й тестувати алгоритми автоматичного розпізнавання числових значень на електролічильнику.

Зберігання та передача даних. Оброблені дані зберігаються в базі даних PostgreSQL [10], яка вирізняється високою надійністю та масштабованістю, що забезпечує стабільне функціонування системи при збільшенні обсягів даних. Серверна частина системи побудована на основі Flask [12], що дозволяє створити простий і ефективний API для передачі даних з ESP32-CAM на сервер та їх подальшого зберігання.

Візуалізація даних. Для представлення зібраної інформації про споживання електроенергії використовуються інструменти візуалізації, такі як Power BI та Looker. Ці платформи забезпечують створення інтерактивних звітів і дашбордів, що дозволяє

користувачам аналізувати дані та приймати обґрунтовані рішення щодо економії електроенергії.

ВИСНОВКИ

У статті розглянуто результати розробки системи моніторингу та аналізу споживання електроенергії в домогосподарствах на основі IoT-технологій, які мають значну практичну цінність. Проведений аналіз існуючих рішень дозволив сформулювати вимоги до системи, що включають автоматизацію збору даних, інтеграцію з платформами візуалізації та забезпечення конфіденційності інформації. Розроблена система, побудована на базі ESP32-CAM, OpenCV і PostgreSQL, забезпечує ефективний моніторинг енергоспоживання та є доступною і універсальною у використанні для широкого кола домогосподарств.

Практичне значення результатів полягає у створенні інструменту, який дозволяє користувачам оптимізувати споживання енергії, зменшувати витрати та сприяти раціональному використанню ресурсів. Інтеграція з інструментами візуалізації, такими як Power BI або Looker, дає змогу легко аналізувати дані та приймати обґрунтовані рішення. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення системи, включаючи прогнозування споживання та інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії, що підвищить її цінність для сучасних «розумних» домогосподарств.

ДОСТУПНІСТЬ ДАНИХ

Програмний код викладено для вільного доступу за посиланням:

https://github.com/Julfyy/IoT_Electricity_Consumption_Monitor.git.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] V. Marinakis and H. Doukas. An advanced IoT-based system for intelligent energy management in buildings. *Sensors*, vol. 18, no. 2, 2018. DOI: 10.3390/s18020610.
- [2] M. Shorfuzzaman and Y. Aboelmagd. IoT-A promising solution to energy management in smart buildings: A systematic review. *Buildings*, vol. 14, no. 11, 2024. DOI: 10.3390/buildings14113446.
- [3] Digi International. IoT Applications for Smart Buildings: Use Cases and Benefits. Digi International, [Онлайн]. URL: <http://surl.li/gkptdh>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [4] AppInventiv. IoT in Energy Management. AppInventiv, [Онлайн]. URL: <https://appinventiv.com/blog/iot-in-energy-management/>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [5] Sense: A Smart Energy Monitoring Solution. [Онлайн]. URL: <https://sense.com>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [6] Ecoisme: Energy Monitoring and Saving. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/minbkf>. Дата звернення: 01.11.2024.

- [7] EnergyHub: Smart Home Energy Management. [Онлайн]. URL: <https://energyhub.com>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [8] EcoBee Smart Thermostat. [Онлайн]. URL: <https://www.ecobee.com/en-us/>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [9] OpenCV: Open Source Computer Vision Library. [Онлайн]. URL: <https://opencv.org>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [10] PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database. [Онлайн]. URL: <https://www.postgresql.org>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [11] ESP32: A Low-Cost, Low-Power System on a Chip with Wi-Fi & Bluetooth Capabilities. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/ycyejh>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [12] Flask: A Python Microframework for Building Web Applications. [Онлайн]. URL: <https://flask.palletsprojects.com>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [13] Power BI: Business Analytics Service by Microsoft. [Онлайн]. URL: <https://powerbi.microsoft.com>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [14] Looker: Business Intelligence and Data Analytics. [Онлайн]. URL: <https://looker.com>. Дата звернення: 01.11.2024.

SYSTEM FOR MONITORING AND ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION IN HOUSEHOLDS BASED ON IOT TECHNOLOGIES

Bohdan Shybetskyi, Iaroslav Dorogyi

This paper discusses the development of an energy consumption monitoring and analysis system for households based on IoT technologies. With the increasing demand for energy and the need for its rational use, automating the monitoring process is crucial, allowing users to efficiently manage energy resources. The proposed system integrates modern hardware and software tools for collecting, processing, storing, and visualizing real-time energy consumption data. It consists of a data collection module based on the ESP32-CAM board, which captures images of electricity meters, and software for processing these images using the OpenCV library. For data storage, the reliable PostgreSQL database is chosen, and for data visualization, Power BI and Looker platforms are used to create interfaces for convenient energy consumption analysis.

Functional and non-functional system requirements have been investigated, including real-time monitoring, data reliability and security, and user-friendliness. Existing technologies and solutions for energy consumption monitoring, such as EcoBee Smart Thermostat and EnergyHub, were also reviewed, allowing for the identification of the main advantages and disadvantages of such systems. To verify the effectiveness of the proposed system, its components were tested under real-life conditions, which helped assess the accuracy of data collection and processing.

The developed system has high potential for implementation in various households, helping reduce energy consumption costs, improve control over electricity use, and ensure its rational utilization. The practical significance of the work lies in creating an accessible and efficient tool for energy consumption monitoring, adaptable to the needs of different users and infrastructures. Further research will focus on expanding the system's functionality and integrating it with other devices to enhance its capabilities.

Keywords: *energy consumption monitoring system, IoT technologies, web application, computer vision, image processing, OpenCV, data visualization, energy conservation.*

REFERENCES

- [1] V. Marinakis and H. Doukas. An advanced IoT-based system for intelligent energy management in buildings. *Sensors*, vol. 18, no. 2, 2018. DOI: 10.3390/s18020610.
- [2] M. Shorfuzzaman and Y. Aboelmagd. IoT-A promising solution to energy management in smart buildings: A systematic review. *Buildings*, vol. 14, no. 11, 2024. DOI: 10.3390/buildings14113446.
- [3] Digi International. IoT Applications for Smart Buildings: Use Cases and Benefits. Digi International, [Online]. URL: <http://surl.li/gkptdh>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [4] AppInventiv. IoT in Energy Management. AppInventiv, [Online]. URL: <https://appinventiv.com/blog/iot-in-energy-management/>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [5] Sense: A Smart Energy Monitoring Solution. [Online]. URL: <https://sense.com>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [6] Ecoisme: Energy Monitoring and Saving. [Online]. URL: <http://surl.li/minbkf>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [7] EnergyHub: Smart Home Energy Management. [Online]. URL: <https://energyhub.com>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [8] EcoBee Smart Thermostat. [Online]. URL: <https://www.ecobee.com/en-us/>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [9] OpenCV: Open Source Computer Vision Library. [Online]. URL: <https://opencv.org>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [10] PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database. [Online]. URL: <https://www.postgresql.org>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [11] ESP32: A Low-Cost, Low-Power System on a Chip with Wi-Fi & Bluetooth Capabilities. [Online]. URL: <http://surl.li/ycyejh>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [12] Flask: A Python Microframework for Building Web Applications. [Online]. URL: <https://flask.palletsprojects.com>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [13] Power BI: Business Analytics Service by Microsoft. [Online]. URL: <https://powerbi.microsoft.com>. Accessed: Nov. 1, 2024.
- [14] Looker: Business Intelligence and Data Analytics. [Online]. URL: <https://looker.com>. Accessed: Nov. 1, 2024.

СТВОРЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ОБЛІКУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

М.І. Ільїнський¹, В.М. Руденко¹

¹ Automation of Industrial Processes Department, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

E-mail: fomenkomihail00@gmail.com

Отримано 14.12.2024

Прийнято до публікації 18.12.2024

Опубліковано 31.12.2024

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена комплексному дослідженню можливостей застосування бездротових сенсорних мереж для обліку енергоспоживання в житлових комплексах. Проведено аналіз існуючих рішень, розроблено відповідні математичні моделі та проведено симуляційний експеримент для оцінки ефективності запропонованих алгоритмів маршрутизації та самоорганізації мережі. Проаналізовано залежність тривалості функціонування, стабільності та пропускну здатності бездротової сенсорної мережі від співвідношення радіусів покриття та зв'язку. Знайдено спосіб для підвищення точності контролю системи енергоспоживання мікрорайону шляхом дослідження та розробки інформаційної системи обліку споживання електричної енергії.

Розглянуто технічні вимоги мережевої організації до системи і компонентів АСКОЕ мікрорайону, наведені рекомендації по монтажу основних компонентів і їх налаштування, а також представлені схеми по установці. Удосконалено алгоритм кластеризації для безпроводних сенсорних мереж, що відрізняється комплексним застосуванням відомих раніше комбінованого критерію прогнозування та значення придатності сенсорного вузла для виконання ролі головного, який за рахунок комплексного використання зазначених вище величин забезпечує більше значення тривалості життєвого циклу та збільшення тривалості періоду стабільності порівняно з відомими алгоритмами.

Виконано дослідження БСМ 5-ти поверхової будівлі центральних шлюзів будинку з вибором головного шлюзу (вузла) та головних шлюзів домівок мікрорайону. Для отримання позитивного результату застосовується метод кластеризації мережі із застосуванням шару Коханена і нейронних мереж. Дана робота здійснена для збільшення періоду життєвого циклу БСМ, що доказано при теоретичних дослідженнях.

Ключові слова: автоматизація, мережа, контроль витрат, керування, бездротові сенсорні мережі, кластеризація сенсорів.

ВСТУП

Відсутність ефективної системи обліку енергоспоживання в умовах енергетичної кризи може призвести до неефективного використання енергоресурсів, збільшення втрат та ускладнення управління енергосистемою, в тому числі теплоносії, електромережі, системи водопостачання та ін. Впровадження сенсорних мереж може дозволити уникнути цих проблем та забезпечити стабільну роботу життєво важливих структур для населення.

Міста, як центри високої концентрації населення та промисловості, є значними споживачами енергії. Для забезпечення ефективного управління енергоресурсами в містах необхідні масштабні системи контролю, що охоплюють усіх споживачів, від домогосподарств до великих підприємств. Ефективний контроль за споживанням енергії в містах є ключовим фактором для забезпечення енергетичної безпеки та сталого розвитку держави. Сучасні міста потребують інтегрованих систем моніторингу, таких як БСМ (Бездротова сенсорна мережа), та управління енергоспоживанням всіх наявних ресурсів, що охоплюють усіх споживачів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На протязі довго часу певний перелік вчених займався вирішенням даної проблеми: Koucheryanu A. [1], Heinzelman W. [5], Cohen B. [9], Caragliu A. [10]. Деякі вчені розглядали методи застосування бездротових сенсорних мереж для безпроводного збору та передачі даних, а саме: Ben Alla S. [7], Kang T. [8].

Для ефективного збору даних про споживання енергії та створення розумних систем обліку використовується широкий спектр сенсорів. Обираючи тип сенсора, необхідно враховувати конкретні завдання, які має вирішувати система, та особливості об'єкта, що підлягає моніторингу.

Основні типи сенсорів, які використовуються в системах обліку енергії:

- *електричні лічильники*: індукційні, електронні, "розумні" лічильники обладнані додатковими функціями, такими як здатність до двостороннього обміну даними, дистанційного зчитування показів та управління навантаженням;
- *датчики струму та напруги*: використовуються для безпосереднього вимірювання електричних параметрів у мережі;
- *датчики температури*: вимірюють температуру різних середовищ (повітря, води, поверхні), що

дозволяє оцінити ефективність роботи опалювальних систем, кондиціонерів та іншого обладнання;

- *датчики тиску*: використовуються для вимірювання тиску в системах водопостачання, опалення та газу;
- *датчики витрати*: вимірюють об'єм рідини або газу, що протікає через трубу.
- *датчики якості енергії*: Фіксують такі параметри, як гармоніки, перенапруги, перепади напруги та інші, що дозволяють оцінювати якість електроенергії;
- *датчики вологості*: використовуються для контролю рівня вологості в приміщеннях.
- *датчики освітленості*: вимірюють рівень освітленості в приміщеннях для автоматичного керування освітленням.

Крім того, в системах обліку енергії можуть використовуватися:

- *Бездротові сенсорні мережі*: Для збору даних з великої кількості датчиків, розташованих в різних точках об'єкта.
- *Системи GPS*: Для визначення географічного розташування об'єктів та аналізу їх маршрутів.

Таким чином, проблема полягає у опрацюванні методики побудови автоматизованої системи контролю споживання енергоресурсів житловим комплексом на основі бездротової сенсорної мережі, із застосуванням апарату виводу нечіткої логіки для кластеризації сенсорів мережі, із впровадженням системи дистанційного обліку на етапі передачі даних у компанію енергопостачання. Тим самим мережеві компанії можуть зменшити технологічні втрати та підвищити ефективність своєї діяльності, а споживачі отримають точні рахунки за отримані послуги та зможуть контролювати свої витрати за споживання енергії, що суттєво вплине на вартість комунальних послуг, в цілому. Збутові компанії, також, отримають більш точні дані про обсяги реалізованої енергії завдяки підвищенню контролю втрат та точності обліку енергоресурсів за допомогою бездротових сенсорних мереж WSN (Wireless sensor networks) [1].

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досягнення мети дослідження застосовані методи структурного та порівняльного аналізу, що дозволили всебічно оцінити існуючі технології та рішення для створення систем моніторингу та аналізу споживання електроенергії в домогосподарствах на основі IoT-технологій та системи Wireless sensor networks.

Структурний аналіз сприяв визначенню основних компонентів системи, їх функціональних вимог та взаємодії між ними.

Порівняльний аналіз дозволив оцінити переваги і недоліки існуючих рішень, зокрема таких, як метод нечіткої логіки та кластерний аналіз з використання діаграм Вороного й подібних систем, що застосовуються для моніторингу енергоспоживання.

Методи інформаційного та аналітичного підходу були використані для збору та систематизації інформації, що дозволило досконаліше здійснити вивчення наукової літератури, сучасних технологій IoT, а також доступних онлайн-ресурсів, що стосуються розробки інтелектуальних систем управління енергоспоживанням. Вивчення наявних рішень, таких як платформи Power BI для візуалізації даних, забезпечило формулювання основних вимог до функціональності та зручності користування системами моніторингу енергоспоживання.

Для перевірки ефективності теоретичних положень та запропонованих технічних рішень використані експериментальні методи, зокрема тестування апаратної частини, побудованої на основі плати ESP32-CAM, для збору даних з «розумних» електролічильників.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

АСКОЕ мікрорайону призначена для моніторингу різних параметрів навколишнього середовища та об'єктів. Система складається з мережі бездротових датчиків, які збирають дані та передають їх на централізований сервер для подальшого аналізу та використання цієї інформації. Сукупність автономних датчиків АСКОЕ забезпечує безперервний збір даних, незалежно від зовнішніх умов.

Варіант структури АСКОЕ житлового комплексу наведено на Рис. 1.

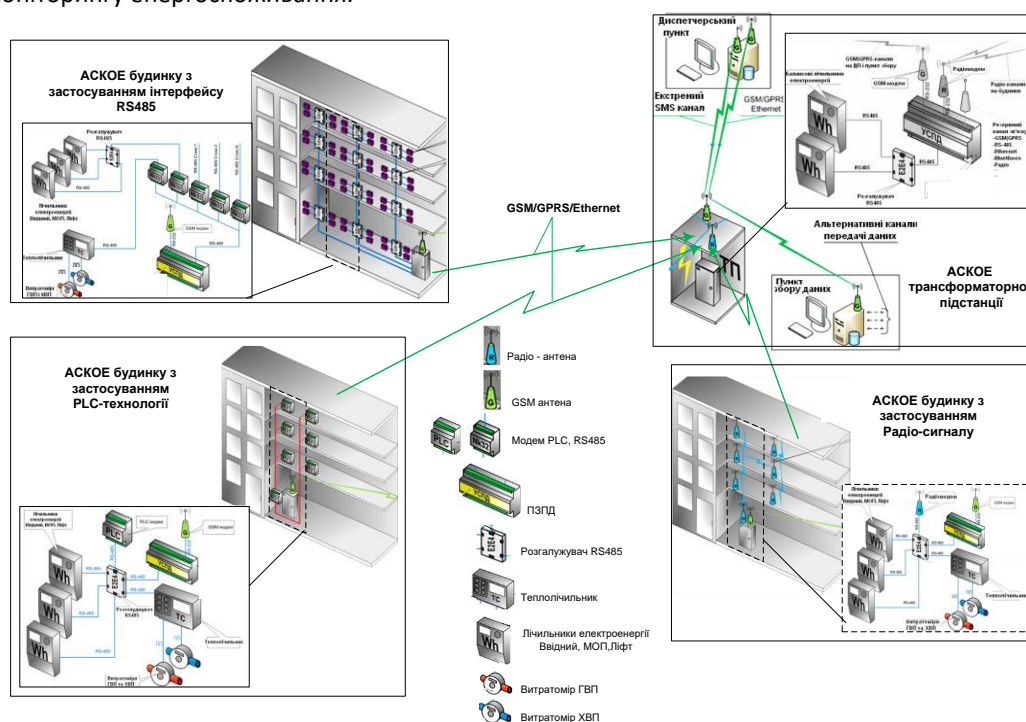


Рис. 1. Структурна схема АСКОЕ мікрорайону

Моделювання БСМ помешкання здійснено з урахуванням задачі кластеризації сенсорів нейронних мереж та шару Коханена [2]. За допомогою нейронної мережі було створено математичну модель із шаром Коханена. Під час розрахунків використовувалось програмне забезпечення MATLAB з функцією newsc. Проміжок між різними сенсорами надано у вигляді масивів і співвідношень, що рахується у відносних одиницях

$$x_o = X_k / X_{pl} \quad (1)$$

$$y_o = Y_k / Y_{pl}, \quad (2)$$

де X_k , Y_k – представлені координати (декартові) сенсорів в будівлі; X_{pl} , Y_{pl} – декартові координати, наприкінці розрахунку у будинку.

На завершальному етапі нашого моделювання можна буде отримати центри кластерів [3]. Варіант моделювання наведено на Рис. 2. Аналіз результатів

моделювання дозволяє виявити центри розміщення кластеру при просторовому розташуванні датчиків виміру витрат, мешканцями багатоповерхової будівлі та з урахуванням енергетичних параметрів.

Експериментальне дослідження основних шлюзів будинків району з застосуванням нейронних мереж з шаром Коханена дозволяє отримати рішення задачі кластеризації сенсорів [4]. Проміжки між центральними вузлами у масивах баз даних, для більшої наглядної форми, взяті з коефіцієнтом 0,1.

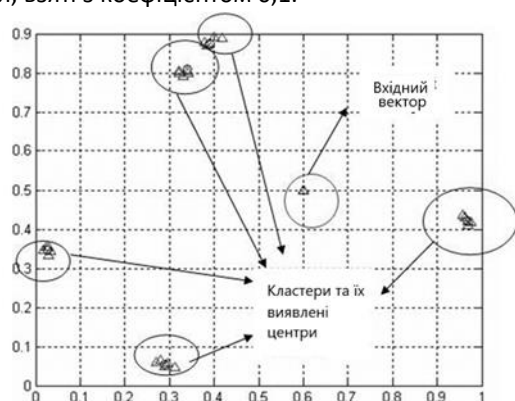


Рис. 2. Центри кластерів сенсорів у будинках

Розташування центрів кластерів груп будівель, при моделюванні в середовищі MATLAB, здійснювалось з урахуванням геодезичних стільникових зв'язку (Рис. 3).

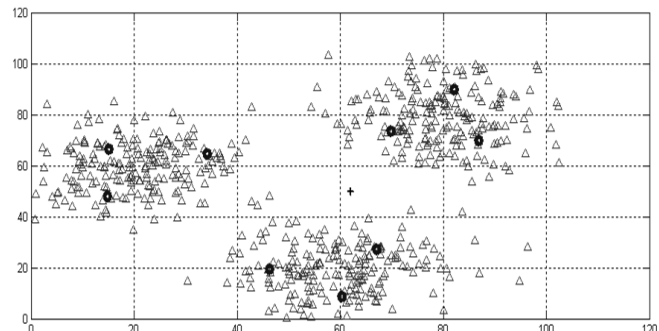


Рис. 3. Загальна схема виявлених кластерів

Після проведення процедури кластеризації постає необхідність у визначенні головного кластеру.

Алгоритм вибору головного кластера з використанням нечіткої логіки застосовує кілька параметрів для вибору головного вузла у бездротовій сенсорній мережі: центральність за діаграмами Вороного та залишкова енергія сенсорного вузла [5]. Сам датчик нечіткої логіки FLC (Fuzzy Logic Controller) має у складі такі компоненти (Рис. 4): блоків виведення та дефазифікації, бази правил, блоку фазифікації.

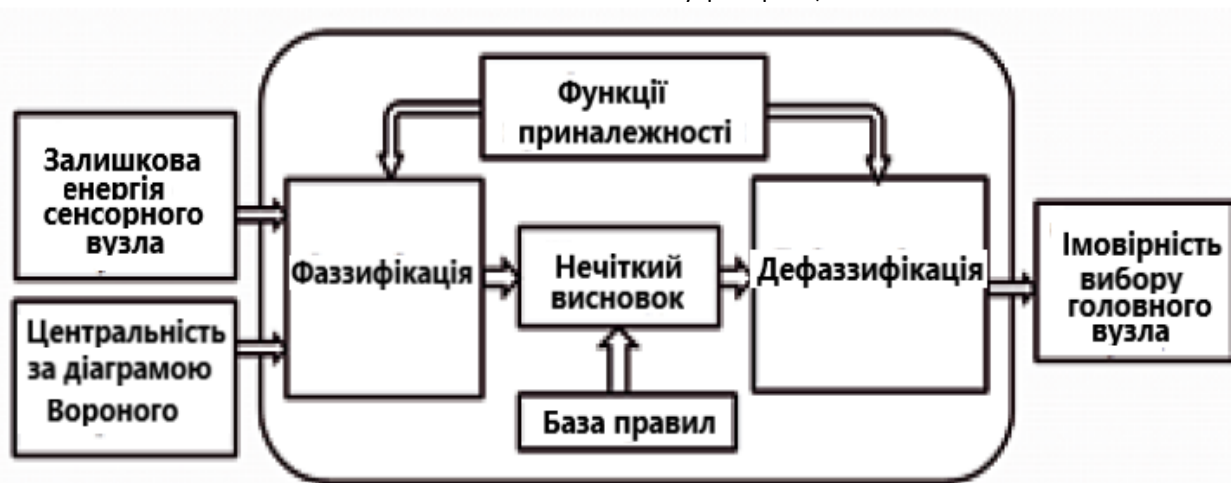


Рис. 4. Контролер (датчик) нечіткої логіки (FLC)

значення змінних, за допомогою застосування функцій приналежності [6].

В Табл. 1 вказані параметри, граничні значення параметрів та терм-множини для нечіткого виведення. Наприкінці у FLC представлено вибір головного вузла у відсотках та отримана функція приналежності за підрахунками MATLAB (Рис. 4).

МОДЕЛЮВАННЯ

Перший рівень моделювання. Фазифікація – процес переходу від вхідних чітких значень змінних до нечіткого

Табл. 1. Система нечіткого виводу

x	x ₁	Назви параметрів	Залишкова енергія
		Терм-множини	{ мала, середня, висока }
	Межа значення	[0-0,1] Дж	
	x ₂	Назви параметрів	Центральність за діаграмами Вороного
Терм-множини		{ далека, середня, близька }	
y	y	Межа значення	[0-100]%
		Назви параметрів	Вірогідність вибору головного вузла
		Терм-множини	{ дуже мала, мала, більше малої, менше середньої, середня, більше середньої, невелика, велика, дуже велика }
		Межа значення	[0-100]%

Для кожної лінгвістичної змінної обрано трикутну функцію приналежності для визначення ступеня належності елементів до нечітких множин. Далі, на основі цих функцій та вхідних даних, необхідно побудувати базу правил [7].

Другий рівень моделювання. База правил включає в себе множину нечітких правил $R^k, k = 1, \dots, N$ вигляду:

$$R^k : \text{ЯКЩО} (x_1 \text{ це } B_1^k \text{ ТА } x_2 \text{ це } B_2^k \dots \text{ ТА } x_n \text{ це } B_n^k),$$

$$\text{ТОДІ} (y_1 \text{ це } C_1^k \text{ ТА } y_2 \text{ це } C_2^k \dots \text{ ТА } y_n \text{ це } C_n^k), \quad (3)$$

де n — чисельність нечітких правил; B_k — самі нечіткі множини $B_1^k \subseteq X_i \subset R, i = 1, \dots, n$ (див. Рис. 5).

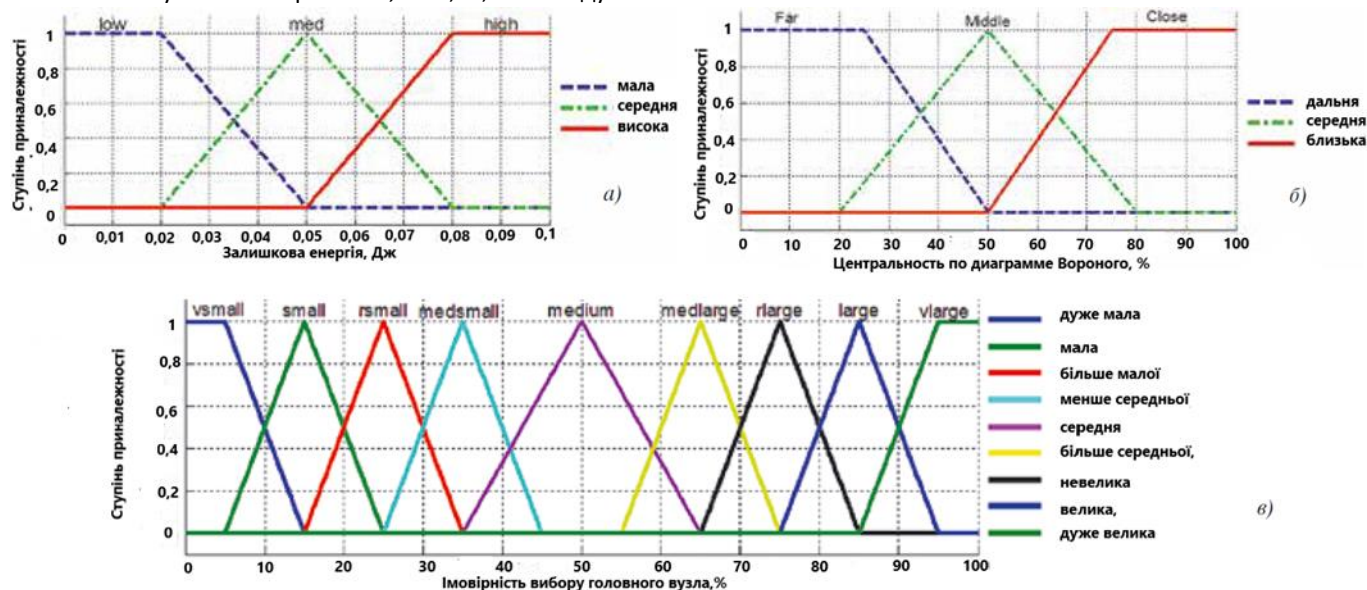


Рис. 5. Функції належності для вхідних даних

а – залишкова енергія; б – центральності за діаграмами Вороного; в – вірогідність вибору головного вузла

Третій рівень моделювання. У якості алгоритму нечіткого виводу використано правило Мамдані:

$$\mu_C(y) = \max_{k=1-N} \left\{ \min \left[\mu_{B_1^k}(\bar{x}_1), \mu_{B_2^k}(\bar{x}_2), \mu_{C_1^k}(y) \right] \right\}, \quad (4)$$

де \bar{x}_1 та \bar{x}_2 – початкові параметри (залишкова енергія вузла сенсорів та центральності за діаграмами Вороного); B_1^k та B_2^k - відповідаючи їм нечіткі множини, $k = 1, \dots, N$; N – чисельність правил нечіткого виводу ($N=3^2=9$); y – параметр на виході (вірогідність вибору головного вузла); C_1^k – множина вихідного параметру.

Застосувавши апарат нечіткої логіки до бази правил, отримали лінгвістичну змінну, яка характеризує ступінь вірогідності вибору головного вузла [8].

Четвертий рівень моделювання. Вірогідність обрання головного вузла обрахована шляхом способу дефазифікації нечіткої множини на виході, за допомогою методу центру тяжкості, за формулами:

$$y = \left(\sum_{k=1}^N a_k \int_y \mu_{C^k}(y) dy \right) / \left(\sum_{k=1}^N a_k \int_y \mu_{C^k}(y) dy \right), \quad (5)$$

де μ_{C^k} - функція, яка визначає ступінь, з якою вихідне значення k -го правила відповідає нечіткій множині, $k = 1,$

..., N ; a_k – це точка, де функція приналежності дорівнює 1 [9].

Побудований алгоритм ефективно використовується при виборі головного вузла кластера у бездротовій сенсорній мережі (Рис. 6).

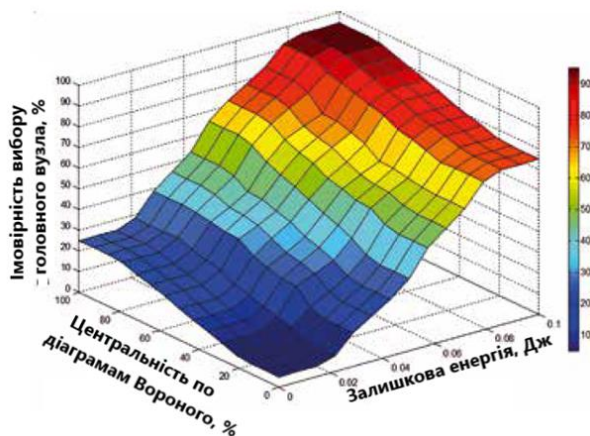


Рис. 6. Залежності вірогідного вибору головного вузла від залишкової енергії та центральності за діаграмою Вороного

За основу взято модель мережі зі ста вузлів, розташованих довільним способом на площадці 100x100 метрів.

Після розподілення вузлів, здійснюємо перехід до створення кластеру із застосуванням діаграми Вороного.

Використання діаграм Вороного для визначення центральності вузлів у поєднанні з нечіткою логікою для прийняття рішень забезпечило більш розумне управління енергоресурсами мережі (Рис.7).

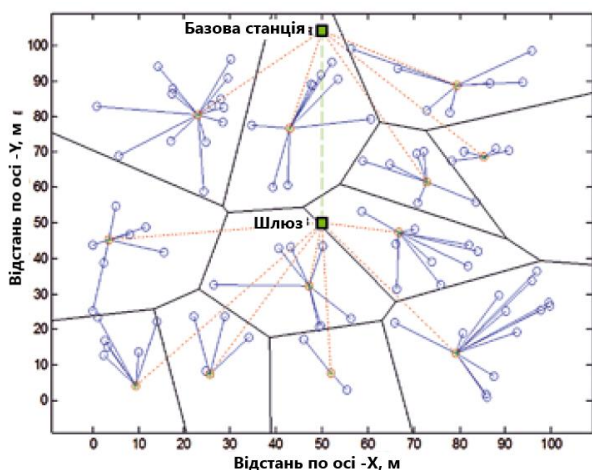


Рис. 7. Використання діаграм Вороного для визначення головного вузла в кластері за допомогою нечітких правил

Для порівняння ефективності запропонованого алгоритму з відомими алгоритмами LEACH та Fuzzy C-Means використовувались стандартні метрики: залишкова енергія вузлів мережі та загальний термін її функціонування [10]. Результати наведено на Рис. 8.

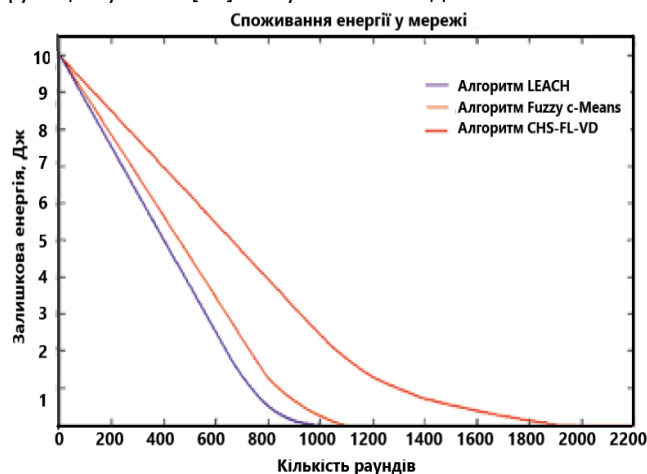


Рис. 8. Зміна залишкової енергії в залежності від числа раундів

ВИСНОВКИ

Результат проведеного моделювання, на основі аналізу відношення радіусу покриття та радіусу зв'язку, свідчить про високу ефективність запропонованого алгоритму кластеризації сенсорів, заснованого на нейронних мережах та нечіткій логіці. Використання шару Коханена та діаграм Вороного забезпечило точну ідентифікацію головних вузлів у мережі, що дозволило оптимізувати розподіл енергетичних ресурсів. Впровадження нечіткої логіки для прийняття рішень надало алгоритму гнучкості та адаптивності до змінних умов роботи мережі. Порівняльний аналіз з відомими алгоритмами LEACH та Fuzzy C-Means підтвердив переваги запропонованого підходу в плані енергоефективності та загального терміну життя мережі, продовжуючи життєвий цикл сенсорної мережі на 89% та 70% відповідно.

Отримані результати відкривають перспективи для подальших досліджень у напрямку розробки більш інтелектуальних систем управління бездротовими сенсорними мережами (Sense, Enbala Powertracks, GE Preditx, Siemens MindSphere), що дозволить підвищити їх надійність та ефективність у різних областях застосування.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] D. Lupton, "You are Your Data: Self-Tracking Practices and Concepts of Data BT. - - Lifelogging: Digital self-tracking and Lifelogging - between disruptive technology and cultural transformation," S. Selke, Ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, pp. 61–79.
- [2] Teuber A., Eissfeller B. WLAN indoor positioning based on Euclidean distances and fuzzy logic// Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06), Hannover, Germany, 2006. 168 p.
- [3] A. Koucheryavy, "State of Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models," in Proceedings of ICACT'2014, Phoenix Park, Korea, Feb. 16-19, 2014.
- [4] О. Разживін, А. Люта, О. Марков, Д. Картамишев, В. Мирошніченко, і М. Ільїнський, "Моделювання та удосконалення сенсорної мережі системи обліку споживання енергетичних ресурсів у мікрорайоні," Технічні науки та технології, vol. 1, no. 31, pp. 138–145, 2023. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/tlcfgv>. Дата звернення: 02.12.2024. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-1(31)-138-145.
- [5] W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 530–539, Oct. 2002.
- [6] A. Salim and A. Koucheryavy, "Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks," in Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Communication Technology (ICAICT 2009), Phoenix Park, Korea, Feb. 2009, vol. 3, pp. 1562–1587.
- [7] S. Ben Alla, A. Ezzati, and A. Mohsen, "Gateway and Cluster Head Election using Fuzzy Logic in heterogeneous wireless sensor networks," in Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), May 2012, pp. 761–766.
- [8] T. Kang, "South Korea's experience with smart infrastructure services," 2020, 36 p.
- [9] B. Cohen, "What exactly is a smart city?", Fast Company, vol. 7, no. 4, pp. 62–74, 2012..
- [10] A. Caragliu, "Smart cities in Europe," Journal of Urban Technology, vol. 18, no. 2, pp. 65–82, 2011.

**CREATION AND APPLICATION OF A SENSOR NETWORK
IN THE INFORMATION SYSTEM OF ENERGY ACCOUNTING
OF A RESIDENTIAL COMPLEX**

Mykhailo Ilinskyi, Vladislav Rudenko

The article is devoted to a comprehensive study of the possibilities of using wireless sensor networks for energy consumption metering in residential complexes. The existing solutions are analyzed, appropriate mathematical models are developed, and a simulation experiment is conducted to evaluate the effectiveness of the proposed routing and network self-organization algorithms. The dependence of the duration of operation, stability, and throughput of a wireless sensor network on the ratio of coverage and communication radii is

analyzed. A way to improve the accuracy of monitoring the energy consumption system of a neighborhood by researching and developing an information system for accounting for electricity consumption is found.

The technical requirements of the network organization to the system and components of the neighborhood energy management system are considered, recommendations for the installation of the main components and their configuration are given, and installation diagrams are presented. The clustering algorithm for wireless sensor networks is improved, which is characterized by the integrated use of the previously known combined forecasting criterion and the value of the suitability of the sensor node to act as the master, which, due to the integrated use of the above values, provides a longer life cycle and an increase in the duration of the stability period compared to the known algorithms.

The study of the BSM of a 5-storey building of the central gateways of the building with the selection of the main gateway (node) and the main gateways of the houses of the neighborhood was carried out. To obtain a positive result, the network clustering method was applied using the Kohanen layer and neural networks. This work was carried out to increase the life cycle of the WSN, which was proved in theoretical studies.

Keywords: automation, network, cost control, management, wireless sensor networks, sensor clustering.

REFERENCES

- [1] D. Lupton, "You are Your Data: Self-Tracking Practices and Concepts of Data BT. - - Lifelogging: Digital self-tracking and Lifelogging - between disruptive technology and cultural transformation," S. Selke, Ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, pp. 61–79.
- [2] Teuber A., Eissfeller B. WLAN indoor positioning based on Euclidean distances and fuzzy logic// Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06), Hannover, Germany, 2006. 168 p.
- [3] A. Koucheryavy, "State of Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models," in Proceedings of ICACT'2014, Phoenix Park, Korea, Feb. 16-19, 2014.
- [4] Razhyvin O., Liuta A., Markov O., Kartamyshev D., Miroshnichenko V., Ilinskyi M., "Modeling and improvement of the sensor network of the energy consumption metering system in the neighborhood," Technical Sciences and Technologies, vol. 1, no. 31, pp. 138–145, 2023. [Online]. URL: <http://surl.li/tlcfgv>. Accessed: 02.12.2024. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-1(31)-138-145.
- [5] W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 530–539, Oct. 2002.
- [6] A. Salim and A. Koucheryavy, "Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks," in Proceedings of

the 11th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT 2009), Phoenix Park, Korea, Feb. 2009, vol. 3, pp. 1562–1587.

- [7] S. Ben Alla, A. Ezzati, and A. Mohsen, "Gateway and Cluster Head Election using Fuzzy Logic in heterogeneous wireless sensor networks," in Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), May 2012, pp. 761–766.
- [8] T. Kang, "South Korea's experience with smart infrastructure services," 2020, 36 p.
- [9] B. Cohen, "What exactly is a smart city?", Fast Company, vol. 7, no. 4, pp. 62–74, 2012..
- [10] A. Caragliu, "Smart cities in Europe," Journal of Urban Technology, vol. 18, no. 2, pp. 65–82, 2011.

ІНТЕГРАЦІЯ NODE-RED ТА OPENAI API ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ АНАЛІТИКИ

В.О. Щербинін¹

¹ Automation and Telecommunications Department, Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine

E-mail: vladyslav.shcherbynin@donntu.edu.ua

Отримано 24.12.2024

Прийнято до публікації 28.12.2024

Опубліковано 31.12.2024

АНОТАЦІЯ

Мета цієї роботи визначається необхідністю створення доступної та функціональної інтелектуальної аналітичної системи для автоматизації процесів збору, обробки та аналізу даних. Запропонована система базується на інтеграції платформи Node-RED, OpenAI API та міні комп'ютера Raspberry Pi. Такий підхід дозволяє ефективно вирішувати задачі моніторингу, прогнозування та оптимізації у різних галузях, забезпечуючи гнучкість та економічну доступність.

У роботі проаналізовано переваги та обмеження використання low-code платформ для створення потоків обробки даних, що значно спрощує інтеграцію систем автоматизації. Node-RED забезпечує можливість швидкої побудови робочих процесів, тоді як OpenAI API додає інструменти для глибокого аналізу даних за допомогою моделей штучного інтелекту. Raspberry Pi виступає як економічна апаратна база, що підходить для малого та середнього бізнесу.

Проведені експерименти дозволили визначити ключові фактори продуктивності та стабільності системи. Результати тестування показали, що система здатна обробляти великі обсяги даних у реальному часі, виявляти аномалії та забезпечувати оперативне інформування операторів про можливі відхилення. Особливу увагу приділено аналізу економічної ефективності, що підтверджує значну перевагу над традиційними рішеннями, які потребують високих витрат на впровадження.

Враховуючи можливість широкого використання розробленої системи, у роботі також запропоновано рекомендації щодо її масштабування, інтеграції з хмарними сервісами та застосування для розв'язання специфічних задач у різних галузях. Такий підхід забезпечує підприємствам можливість швидкої адаптації до змін у технологічних умовах, знижуючи залежність від дорогих та складних рішень.

Розробка цієї системи є важливим кроком у напрямку забезпечення доступності сучасних технологій для підприємств різного масштабу. Запропоноване рішення спрямоване на підвищення ефективності виробничих процесів та створення економічно вигідних інструментів автоматизації, що відповідають сучасним вимогам ринку.

Ключові слова: *Node-RED, OpenAI API, Raspberry Pi, автоматизація, low-code, моніторинг, прогнозування.*

ВСТУП

У сучасних умовах цифрової трансформації важливим завданням для багатьох підприємств є впровадження автоматизованих систем збору, обробки та аналізу даних. Ці системи дозволяють підвищити ефективність виробничих процесів, знизити витрати на обслуговування обладнання та забезпечити високу точність прогнозування відмов або аномалій у роботі технічних систем.

Однак більшість традиційних рішень у цій галузі є високоартісними та складними у впровадженні, що значно обмежує їх доступність для малих і середніх підприємств. Саме тому виникає необхідність у розробці економічно доступних та функціонально ефективних систем, які базуються на сучасних технологіях і забезпечують гнучкість у налаштуванні під потреби користувачів.

У цій роботі запропоновано використання платформи Node-RED у поєднанні з OpenAI API для створення інтелектуальної аналітичної системи. Node-RED забезпечує low-code підхід до побудови потоків обробки даних, що знижує вимоги до програмування, а OpenAI API додає розширені можливості аналізу даних за допомогою штучного інтелекту.

Для розробки системи використано Raspberry Pi, бюджетний та універсальний міні комп'ютер, який дозволяє інтегрувати сенсори, обробляти інформацію та виконувати складні аналітичні задачі. Такий підхід забезпечує низькі витрати на впровадження, простоту у використанні та високу адаптивність системи до різних умов.

Метою дослідження є створення економічно вигідної системи збору та аналізу даних, яка може бути впроваджена на підприємствах різного масштабу. У роботі розглядаються ключові аспекти розробки, аналізуються переваги та недоліки запропонованого підходу, а також демонструється практичне застосування системи на прикладі автоматизації процесів моніторингу обладнання.

Таким чином, результати цього дослідження спрямовані на розв'язання проблеми доступності сучасних технологій для автоматизації виробництва та управління даними, а також на підвищення їх ефективності й зниження витрат на впровадження.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сучасній науковій літературі значна увага приділяється автоматизації процесів збору та аналізу даних. Використання технологій штучного інтелекту (ШІ) для обробки великих обсягів інформації стало ключовою темою численних досліджень. Однак більшість існуючих підходів орієнтовані на висококоштовні та складні у впровадженні рішення, які можуть бути недоступними для малих і середніх підприємств через їхню високу вартість або складність інтеграції.

Інтеграція low-code у промисловості демонструє переваги платформ, таких як Node-RED, для швидкої інтеграції систем збору даних [1]. Node-RED дозволяє розробникам створювати ефективні робочі потоки без необхідності в глибоких знаннях програмування, що значно скорочує час і витрати на впровадження [2]. Платформа є універсальною і може застосовуватися як у промисловості, так і в комерційних проектах.

Роль штучного інтелекту у промислових системах висвітлює використання ШІ для виявлення аномалій у промислових процесах. Можна підкреслити те, що інтеграція моделей ШІ, таких як OpenAI API, дозволяє значно покращити точність аналізу та прогнозування [3]. Це є особливо корисним для попередження аварій, оптимізації використання обладнання та планування технічного обслуговування.

Економічні рішення для збору даних можна описати перевагами використання економічних пристроїв, таких як Raspberry Pi, для розробки систем моніторингу. Raspberry Pi поєднує низьку вартість із високою функціональністю, що робить його ідеальним вибором для малих і середніх підприємств [4]. Пристрій підтримує платформи, такі як Node-RED, що дозволяє легко інтегрувати його в існуючі системи збору даних.

Аналізуючи практичне використання моделей ШІ, які представлені в наукових дослідженнях раніше можна зазначити, що моделі OpenAI API успішно застосовуються для аналізу текстових і числових даних. Інтеграція таких моделей у системи автоматизації дозволяє автоматично виявляти аномалії, класифікувати інформацію та прогнозувати майбутні події з високою точністю.

Постановка проблеми. На основі аналізу літератури можна виділити кілька ключових проблем і задач для розв'язання:

1. *Висока вартість традиційних систем.* Традиційні рішення для автоматизації й аналітики є дорогими у впровадженні та обслуговуванні, що ускладнює їхнє використання малими підприємствами.

2. *Складність інтеграції.* Більшість сучасних систем потребують значних зусиль для впровадження, включаючи спеціалізовані знання, обладнання та програмне забезпечення.

3. *Обмежений доступ до технологій ШІ.* Складні у використанні та висококоштовні системи, засновані на ШІ, залишаються недоступними для багатьох компаній.

4. *Потреба в універсальності та гнучкості.* Відсутність платформ, які б одночасно були економічними, масштабованими та простими у використанні.

Таким чином, виникає необхідність розробки економічно доступної та функціонально ефективної системи, яка могла б автоматизувати збір, обробку та аналіз даних. Запропоноване дослідження спрямоване на подолання цих обмежень шляхом інтеграції Node-RED, OpenAI API та Raspberry Pi. Така інтеграція дозволяє створювати інтелектуальні аналітичні системи, які є економічно вигідними, простими у впровадженні та масштабованими для використання в різних галузях

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі використано метод візуального програмування. В ході роботи досліджено наукові праці та методичну літературу з використанням інформаційно-аналітичного підходу, також розглянуто онлайн ресурси та спеціалізовані сайти виробників обладнання, яке розглянуто у роботі для отримання матеріалів та інформації за тематикою статті.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для кращого розуміння запропонованої системи на Рис. 1 представлено блок-схему, яка демонструє поетапний процес її роботи. Як приклад розглянуто підприємство, на якому є обладнання з підключеними сенсорами. Ці сенсори реєструють ключові параметри роботи, зокрема:

- температура електронних компонентів;
- тиск у системі;
- напруга (постійного або змінного струму);
- швидкість обертання або інші технологічні показники.

Зібрані дані надходять до центрального блоку обробки, який розроблено на базі Raspberry Pi. Raspberry Pi, завдяки своїй низькій вартості та універсальності, виступає ідеальним пристроєм для таких задач, особливо у поєднанні з платформою Node-RED.

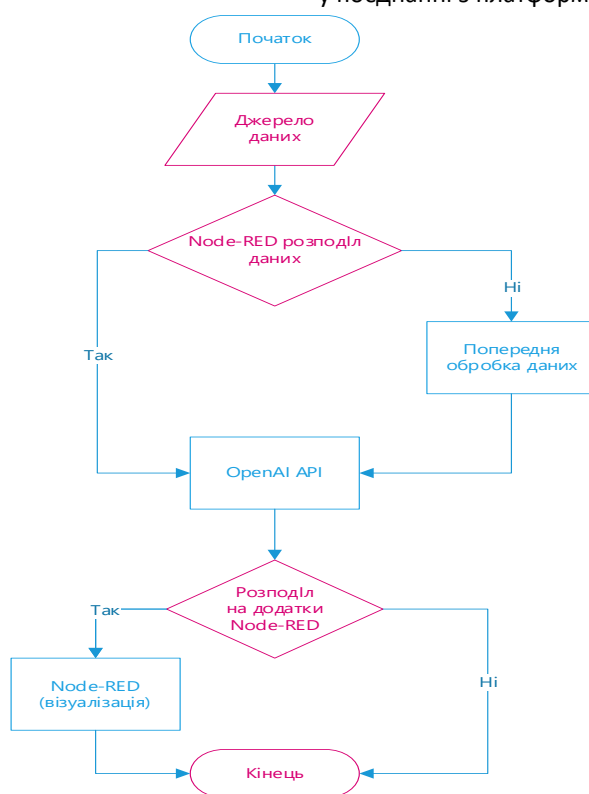


Рис. 1. Блок-схема роботи системи інтелектуальної аналітики

ЕТАПИ РОБОТИ СИСТЕМИ

На першому етапі сенсори, підключені до обладнання, передають дані через протоколи MQTT або HTTP до Raspberry Pi. Завдяки Node-RED система приймає ці дані у вигляді JSON-об'єктів, що спрощує їх подальшу обробку. Рис. 2. Обробка даних у Node-RED виконується таким чином, що створюються потоки, які дозволяють виконувати операції:

- *фільтрація* – видалення зайвих або некоректних даних.
- *нормалізація* – приведення значень до єдиного формату.
- *розрахунки* – обчислення технологічних показників, таких як середнє значення, відхилення від норми тощо [5].

Приклад фрагменту коду для фільтрації:

```
if (msg.payload.value > 0) {
    return msg;
} else {
    return null;
}
```

Наступним етапом є передача оброблених даних до OpenAI API. Node-RED підтримує інтеграцію з OpenAI API через спеціальні бібліотеки. Залежно від потреб, можна обрати одну з таких бібліотек:

- `@inductiv/node-red-openai-api` – базова бібліотека для роботи з OpenAI[6].
- `node-red-contrib-openai` – розширений модуль із додатковими функціями.

Незалежно від обраної бібліотеки, принцип роботи залишається незмінним: дані передаються через HTTP-запит, а відповідь API містить аналітичну інформацію, наприклад, прогноз або текстову рекомендацію.

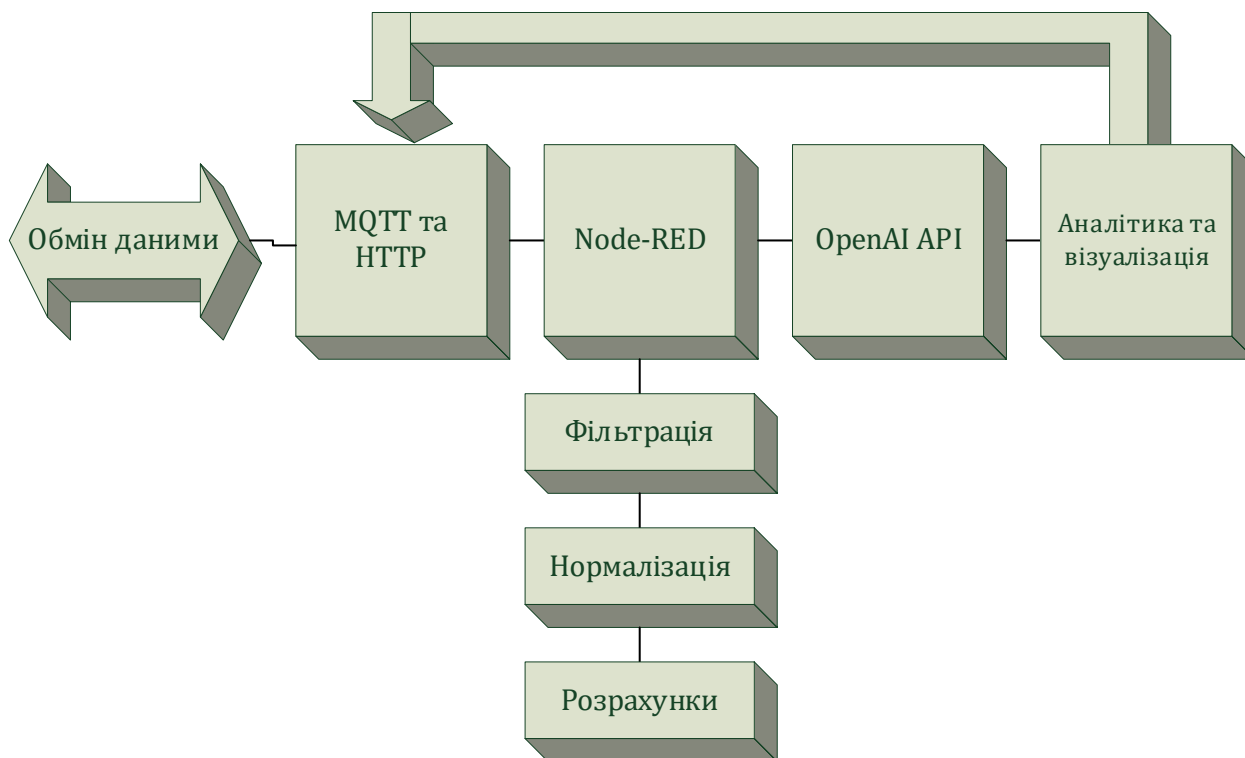


Рис. 2. Структура процесу обробки та аналізу даних у Node-RED

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ ТА АНАЛІТИКИ

Отримані результати передаються назад у Node-RED для подальшої візуалізації. Використовується Node-RED Dashboard, який надає можливість створювати графіки, таблиці та текстові сповіщення. Наприклад, динаміка температури може бути представлена у вигляді лінійного графіка, а виявлені аномалії – у вигляді текстових сповіщень. Node-RED є потужним середовищем програмування з великим функціоналом та численними

бібліотеками. Окрім інтеграції з OpenAI API, платформа дозволяє:

- підключати інші сервіси для зберігання даних, наприклад, MongoDB або InfluxDB;
- використовувати блоки для роботи з зовнішніми API, такими як Google Sheets чи Slack;
- налаштовувати інтерактивні елементи інтерфейсу для користувачів.

Важливість автоматизації з використанням доступних low-code інструментів підтверджується в дослідних роботах [4], де зазначено, що такі підходи дозволяють значно скоротити витрати на впровадження технологій автоматизації, особливо для малих і середніх підприємств. Також підкреслюється, що Raspberry Pi є ідеальним пристроєм для реалізації систем збору та обробки даних через його доступність та енергозбереження.

Окремо слід зазначити різницю між бібліотеками для роботи з OpenAI API. Деякі з них мають більшу кількість підключених сервісів, наприклад, можливість роботи з декількома моделями ШІ одночасно. Інші спеціалізуються на певних завданнях, таких як генерація текстів чи аналітика числових даних. Проте незалежно від обраної бібліотеки, структура запитів до OpenAI API залишається сталою. Це забезпечує універсальність системи, яка може бути адаптована до будь-яких потреб підприємства Рис .3.

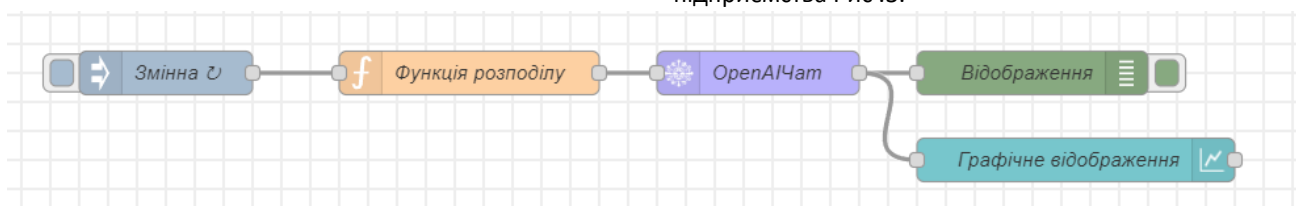


Рис. 3. Схема Node-RED з блоками OpenAI API та візуальним відображенням

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ

Для оцінки ефективності розробленої системи було проведено експериментальне тестування із використанням даних платформи Smart MAIC. Цей сервіс надає доступ до демо-версії, що містить показники роботи різних технологічних процесів у реальному часі. Даний сервіс пропонує зручний інтерфейс для моніторингу багатьох параметрів: температура компонентів обладнання, тиск у системах, рівень енергоспоживання, витрати ресурсів (газ, вода тощо).

Smart MAIC – це інтелектуальна платформа для моніторингу та управління виробничими процесами. Вона дозволяє підприємствам контролювати стан обладнання в реальному часі, аналізувати показники та виявляти аномалії [7].

Для експерименту було обрано масив даних із платформи, що охоплював показники температури, тиску та витрат енергії за 24 години. Дані були експортовані у форматі CSV і імпортовані в Node-RED для подальшої обробки.

Потоки Node-RED включали такі етапи:

1. Обробка даних в яку входить фільтрація некоректних значень та нормалізація даних для уніфікації одиниць вимірювання.

2. Аналіз із використанням OpenAI API, а саме генерація текстових рекомендацій на основі вхідних показників та виявлення аномалій у даних, таких як різкі зміни температури або перевищення допустимого рівня енергоспоживання.

3. Візуалізація результатів. Отримані результати передавалися в Node-RED Dashboard Рис. 4, де дані

відображалися у вигляді динамічних графіків і таблиць із аномаліями.

Результати експерименту показали, що система працює в нормальному режимі. Певних аномалій в масиві даних виявлено не було зокрема одного значення коли показник тиску став меншим на 30%. Такий показник був один раз і нажаль неможливо сказати, була це фізична проблема в обладнанні чи помилка десь в передачі даних або програмі.

Важливо пам'ятати про можливість штучного інтелекту прогнозувати майбутні відхилення. OpenAI API, аналізує тренди у даних, після чого прогнозує можливе перевищення енергоспоживання в пікові години. Це дозволяє підприємству заздалегідь оптимізувати роботу обладнання.

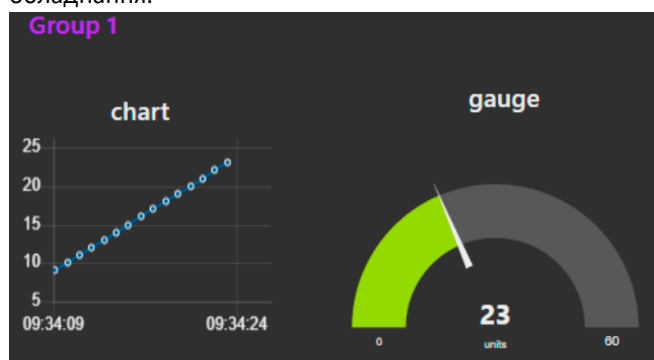


Рис. 4. Візуалізація даних у Node-RED Dashboard

Якщо розглядати переваги використання Node-RED та OpenAI API. Для аналізу можна виділити гнучкість у роботі з даними. Платформа Node-RED дозволяє легко адаптувати потоки обробки під різні формати даних. OpenAI API надає розширені можливості для аналізу

даних, які виходять за межі стандартних математичних розрахунків. Значним фактором є економія часу. Завдяки автоматизації обробки великих масивів даних підприємства можуть швидко отримувати ключові інсайти без потреби в додатковому обладнанні чи програмуванні.

МОДИФІКАЦІЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РІЗНИХ ПОТРЕБ

Однією з ключових переваг розробленої системи є її гнучкість і можливість адаптації до різних умов та завдань. Розглянуто кілька прикладів модифікації системи для специфічних сценаріїв, наприклад моніторинг енергоспоживання.

В якості прикладу це можна розглянути як ситуацію на підприємстві. На певне обладнання інтегрували сенсори напруги та струму для аналізу енергоспоживання. В такому випадку людина може піти різними напрямками, наприклад можна скористатися блоком обчислення потужності, де буде використовуватися формула для розрахунку поточної споживаної потужності. Після цього потрібно виставити порогові значення через інші блоки або розширювати формули задані у блоках раніше. Надалі додається блок OpenAI API який зможе прогнозувати подальшу роботу пристрою з якого знімаються дані. Однак це можна також скоротити якщо самі розрахунки також буде виконувати OpenAI API.

Завдяки системі розглянутій в роботі з'являється можливість оптимізувати планування технічного обслуговування обладнання. Модель штучного інтелекту аналізує тенденції у даних і рекомендує проведення технічного обслуговування, мінімізувавши простої у виробничому процесі [8].

ПРОТОКОЛ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

В роботі при експериментальному дослідженню використовувався протокол передачі даних MQTT. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – це легкий протокол обміну повідомленнями, який використовується для передачі даних між пристроями в мережах IoT (Інтернет речей). Він створений для забезпечення ефективного обміну інформацією в умовах обмежених ресурсів, таких як низька пропускна здатність мережі або обмежена обчислювальна потужність пристроїв.

MQTT базується на моделі "публікація/підписки", яка включає три основні компоненти:

1. *Клієнт* – пристрій, який підключається до брокера для надсилання (публікації) або отримання (підписки) повідомлень.

2. *Брокер* – центральний сервер, який управляє передачами повідомлень між клієнтами.

3. *Тему (Topics)* – ієрархічні канали, через які передаються повідомлення.

Сам процес передачі даних через MQTT проходить так, що клієнт встановлює з'єднання з брокером через протокол TCP/IP, використовуючи мінімальні параметри конфігурації (адресу брокера, порт, ідентифікатор клієнта). Надалі клієнт надсилає повідомлення на певну тему. Наприклад, сенсор температури може надсилати дані на тему `sensors/temperature`. Інші клієнти підписуються на конкретну тему, щоб отримувати всі повідомлення, які публікуються на ній. Наприклад, клієнт, який виконує моніторинг температури, підписується на `sensors/temperature`. Доставка повідомлень виконується брокером. Він пересилає отримані повідомлення від клієнта, який публікує всім підписникам відповідної теми[9].

До Node-RED вбудовані блоки для роботи з MQTT, які дозволяють легко інтегрувати цей протокол у систему. (MQTT In (вхідний блок): Використовується для отримання повідомлень із тем. MQTT Out (вихідний блок): Використовується для публікації повідомлень у теми.) Приклад потоку: Сенсор температури надсилає дані через MQTT Out на тему `home/sensors/temperature`. Клієнт у Node-RED підписується на дану тему через MQTT In. Після чого дані можна обробляти та візуалізувати.

Виходячи з усього сказаного виділяються певні переваги, такі як ефективність, а саме мінімальна втрата ресурсів. Даний протокол ідеально відходить для пристроїв із низьким енергоспоживанням. Протокол має широкий спектр сценаріїв, від домашньої автоматизації до промислового моніторингу невеликих компаній. Вбудована система якості обслуговування (QoS) забезпечує надійну доставку повідомлень навіть у ненадійних мережах.

Однак важливо пам'ятати про недоліки. Залежність від брокера, що означає у разі виходу з ладу брокера передача повідомлень припиняється. Також відсутність стандартного шифрування. Для безпечного з'єднання потрібно додатково налаштовувати протоколи, так як TLS.

ОСНОВНІ НЕДОЛІКИ СИСТЕМИ

Незважаючи на переваги розробленої системи, слід враховувати низку недоліків, які можуть впливати на її ефективність та застосування. Суть даної системи полягає в постійному підключенні до мережі інтернету. У віддалених регіонах або в умовах нестабільного з'єднання можливі перебої у функціонуванні. Звісно це

можливо вирішити за допомогою використання локальної моделі штучного інтелекту як альтернатива OpenAI API. Однак це вимагає додаткових ресурсів для їх розгортання.

Розглядаючи Raspberry Pi, то можна виділити проблему обмеженої обчислювальної потужності. Це може створити затримки при роботі з великими обсягами даних або високою кількістю підключених сенсорів. Для масштабних проектів варто використовувати більш потужні апаратні рішення, такі як промислові міні-комп'ютери.

Як вже було сказано, відсутність механізму шифрування протоколів обміну даними. Рішенням є впровадження додаткових рівнів безпеки для захисту переданих даних.

Можливо найбільшою проблемою системи, що розглядається є затримки у роботі з OpenAI API може перевищувати 3–4 секунди при піковому навантаженні, що може бути критичним у реальних умовах із високими вимогами до швидкодії. Рішенням може виступати кешування результатів аналізу для повторюваних сценаріїв, а також можна окремо придбати розширений пакет послуги у OpenAI для ліпшої підтримки зі сторони штучного інтелекту.

Сценарій використання системи має великий спектр використання, однак дана система орієнтована на аналіз даних і виявлення аномалій, але не передбачає розширених функцій, таких як автоматичне управління обладнанням [10].

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати проведених досліджень демонструють, що запропонована система, побудована на базі Node-RED, OpenAI API та Raspberry Pi, є ефективним, економічно доступним та гнучким інструментом для автоматизації збору, обробки та аналізу даних. Нижче наведено ключові аспекти обговорення отриманих результатів:

– Технічна ефективність розробленої система підтвердила свою здатність обробляти дані в режимі реального часу та забезпечувати їх точний аналіз. Зокрема Node-RED ефективно виконує завдання фільтрації, нормалізації та попередньої обробки даних. OpenAI API забезпечує непогані показники і розпізнавання аномалій, що є критично важливим для попередження відмов обладнання. З більшим об'ємом даних і вхідними правильно заданими параметрами штучний інтелект з часом буде працювати ефективніше.

– Використання Raspberry Pi як центрального обчислювального вузла показало, що навіть недорогі апаратні рішення здатні підтримувати складні аналітичні

задачі. Система демонструє значну перевагу у зниженні вартості впровадження у порівнянні з традиційними підходами. Використання доступних апаратних та програмних платформ забезпечує: мінімальні витрати на обладнання, скорочення потреби у спеціалізованих технічних знаннях, завдяки low-code підходу Node-RED.

– Запропонована система легко адаптується до різних потреб підприємств. Її можна інтегрувати з додатковими сенсорами, базами даних або сервісами. Система дозволяє швидко змінювати алгоритми обробки даних чи прогнози відповідно до нових вимог бізнесу. Ефективність використання у виробничих умовах, експериментальне тестування показало, що система справляється з реальними даними, такими як показники температури, тиску та енергоспоживання. Хоча виявлення одного аномального показника (різке зниження тиску) не дало змоги точно ідентифікувати причину, однак все ж система виявила свою здатність фіксувати подібні події.

– Система має великий потенціал для подальшого розвитку. Інтеграція нових протоколів передачі даних (наприклад, LoRa або Zigbee) може розширити її застосування у віддалених або складних умовах. Використання додаткових моделей ШІ для обробки інших типів даних, таких як зображення чи звук, може підвищити універсальність системи.

– Обмеження системи в залежність від стабільного інтернет-з'єднання для використання OpenAI API може бути проблемою для віддалених підприємств. Для коректної роботи системи необхідне налаштування специфічних параметрів, що потребує початкового залучення технічного персоналу.

Однак насамперед, важливим є внесок у розвиток технологій для малих і середніх підприємств в майбутньому. Результати дослідження підтверджують, що інтеграція доступних технологій, таких як Raspberry Pi і Node-RED, із сучасними інструментами штучного інтелекту може суттєво розширити доступність автоматизації. Це створює нові можливості для цифрової трансформації малих і середніх підприємств.

ВИСНОВКИ

Дослідження продемонструвало ефективність використання low-code платформ, таких як Node-RED, у поєднанні з OpenAI API та недорогим обладнанням, наприклад, Raspberry Pi, для створення систем автоматизації збору, обробки та аналізу даних. Запропонований підхід дозволяє забезпечити гнучкість, масштабованість і доступність, особливо для малих та середніх підприємств, які стикаються з фінансовими або технічними обмеженнями.

Розроблена система надає можливість інтеграції сенсорів для моніторингу технічних параметрів, таких як температура, тиск, напруга, чи інші показники, із подальшою обробкою даних за допомогою Node-RED. Використання OpenAI API додає потужні аналітичні інструменти, здатні автоматично виявляти аномалії, прогнозувати майбутні показники та надавати текстові рекомендації для оптимізації роботи.

Експериментальне тестування із застосуванням платформи Smart MAIC підтвердило працездатність системи, а також продемонструвало можливість її адаптації під специфічні потреби, наприклад, аналіз енергоспоживання або планування технічного обслуговування. Важливу роль у функціонуванні системи відіграє протокол MQTT, що забезпечує ефективний і надійний обмін даними між пристроями.

Завдяки запропонованому підходу вирішуються ключові проблеми традиційних систем автоматизації:

- *Економічна доступність* – використання Raspberry Pi та безкоштовних бібліотек Node-RED знижує витрати на впровадження.

- *Простота впровадження low-code* – методологія зменшує потребу у висококваліфікованих програмістах.

- *Гнучкість і масштабованість* – система легко адаптується до різних завдань завдяки модульній архітектурі Node-RED.

- *Інтеграція ШІ* – OpenAI API забезпечує інтелектуальний аналіз, розширюючи функціональність традиційних систем.

Отримані результати свідчать про перспективність застосування розробленої системи у промисловості, комерційній сфері та для моніторингу критично важливих процесів. Її впровадження може значно підвищити ефективність виробничих операцій, мінімізувати витрати та забезпечити високий рівень автоматизації за доступною ціною.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Node-RED Documentation. [Онлайн] URL: <https://nodered.org/>. Дата звернення: 20.12.2024.
- [2] Embracing AI and Low-Code Solutions: Navigating Challenges and Opportunities in Manufacturing. [Онлайн] URL: [AI and Low-Code in Manufacturing: Challenges and Opportunities](#). Дата звернення: 20.12.2024.
- [3] S. Givnan, C. Chalmers, P. Fergus, S. Ortega, and T. Whalley, "Real-Time Predictive Maintenance using Autoencoder Reconstruction and Anomaly Detection", 2021. [Онлайн] URL: <https://arxiv.org/abs/2110.01447>. Дата звернення: 20.12.2024.
- [4] Huu-Quoc Nguyen, Ton Thi Kim Loan, Bui Dinh Mao, and Eui-Nam Huh, "Low Cost Real-Time System Monitoring Using Raspberry Pi," 2015, doi: 10.1109/ICUFN.2015.7182665. [Онлайн] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7182665>. Дата звернення: 20.12.2024.
- [5] Official OpenAI API Documentation. [Онлайн] URL: <https://platform.openai.com/docs/api-reference/introduction>. Дата звернення: 24.12.2024.
- [6] @inductiv/node-red-openai-api GitHub Repository. [Онлайн] URL: <https://github.com/allanbunch/node-red-openai-api>. Дата звернення: 20.12.2024.
- [7] Smart MAIC Dashboard. [Онлайн] URL: <https://dash.smart-maic.com/demo>. Дата звернення: 24.12.2024.
- [8] D. Zhang, P. Shi, Q. G. Wang, and L. Yu, "Analysis and synthesis of networked control systems: A survey of recent advances and challenges", 2017. [Онлайн] URL: <http://surl.li/nlxqif>. Дата звернення: 24.12.2024.
- [9] J. Dizdarevic, M. Michalke, and A. Jukan, "Engineering and Experimentally Benchmarking Open Source MQTT Broker Implementations", 2023. [Онлайн] URL: <https://arxiv.org/abs/2305.13893>. Дата звернення: 20.12.2024.
- [10] QualiGPT GitHub Repository. [Онлайн] URL: <https://github.com/KindOPSTAR/QualiGPT>. Дата звернення: 20.12.2024.

INTEGRATION OF NODE-RED AND OPENAI API FOR INTELLIGENT ANALYTICS

Vladyslav Shcherbynin

The purpose of this work is determined by the need to create an affordable and functional intelligent analytical system for automating the processes of data collection, processing and analysis. The proposed system is based on the integration of the Node-RED platform, the OpenAI API, and the Raspberry Pi minicomputer. This approach allows to effectively solve the tasks of monitoring, forecasting and optimisation in various industries, providing flexibility and affordability.

The paper analyses the advantages and limitations of using low-code platforms to create data processing flows, which greatly simplifies the integration of automation systems. Node-RED provides the ability to quickly build workflows, while the OpenAI API adds tools for deep data analysis using artificial intelligence models. The Raspberry Pi is a cost-effective hardware base suitable for small and medium-sized businesses.

The experiments allowed us to identify the key factors of system performance and stability. The test results showed that the system is capable of processing large amounts of data in real time, detecting anomalies and providing operators with prompt information about possible deviations. Particular attention was paid to the

cost-effectiveness analysis, which confirmed a significant advantage over traditional solutions that require high implementation costs.

Taking into account the possibility of widespread use of the developed system, the paper also offers recommendations for its scaling, integration with cloud services and application to solve specific problems in various industries. This approach provides enterprises with the ability to quickly adapt to changes in technological conditions, reducing dependence on expensive and complex solutions.

The development of this system is an important step towards making modern technologies accessible to enterprises of all sizes. The proposed solution is aimed at improving the efficiency of production processes and creating cost-effective automation tools that meet modern market requirements.

Keywords: *Node-RED, OpenAI API, Raspberry Pi, automation, low-code, monitoring, forecasting.*

REFERENCES

- [1] Node-RED Documentation. [Online] URL: <https://nodered.org/>. Accessed: 20.12.2024.
- [2] Embracing AI and Low-Code Solutions: Navigating Challenges and Opportunities in Manufacturing. [Online] URL: [AI and Low-Code in Manufacturing: Challenges and Opportunities](#). Accessed: 20.12.2024.
- [3] S. Givnan, C. Chalmers, P. Fergus, S. Ortega, and T. Whalley, "Real-Time Predictive Maintenance using Autoencoder Reconstruction and Anomaly Detection", 2021. [Online] URL: <https://arxiv.org/abs/2110.01447>. Accessed: 20.12.2024.
- [4] Huu-Quoc Nguyen, Ton Thi Kim Loan, Bui Dinh Mao, and Eui-Nam Huh, "Low Cost Real-Time System Monitoring Using Raspberry Pi," 2015, doi: 10.1109/ICUFN.2015.7182665. [Online] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7182665>. Accessed: 20.12.2024.
- [5] Official OpenAI API Documentation. [Online] URL: <https://platform.openai.com/docs/api-reference/introduction> Accessed: 24.12.2024.
- [6] @inductiv/node-red-openai-api GitHub Repository. [Online] URL: <https://github.com/allanbunch/node-red-openai-api>. Accessed: 20.12.2024.
- [7] Smart MAIC Dashboard. [Online] URL: <https://dash.smart-maic.com/demo>. Accessed: 24.12.2024.
- [8] D. Zhang, P. Shi, Q. G. Wang, and L. Yu, "Analysis and synthesis of networked control systems: A survey of recent advances and challenges", 2017. [Online] URL: <http://surl.li/nlxqif>. Accessed: 24.12.2024.
- [9] J. Dizdarevic, M. Michalke, and A. Jukan, "Engineering and Experimentally Benchmarking Open Source MQTT Broker Implementations", 2023. [Online] URL: <https://arxiv.org/abs/2305.13893>. Accessed: 20.12.2024.
- [10] QualiGPT GitHub Repository. [Online] URL: <https://github.com/KindOPSTAR/QualiGPT>. Accessed: 20.12.2024.

ЕФЕКТИВНІ АЛГОРИТМИ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ РОБОТИ НА МІКРОКОНТРОЛЕРАХ У СИСТЕМАХ АУДІОДЕТЕКЦІЇ

С.Є. Колесник¹, С.О. Ковальов¹

¹ Department of Electronic Engineering and Computer Engineering, Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine

E-mail: serhii.kolesnyk@donntu.edu.ua

Отримано 21.12.2024

Прийнято до публікації 28.12.2024

Опубліковано 31.12.2024

АНОТАЦІЯ

У цій статті розглядається створення та впровадження оптимальних нейромережевих алгоритмів для ідентифікації безпілотників у реальному часі на основі звуку на мікроконтролерних пристроях з обмеженими ресурсами. Проект спрямований на розробку полегшених моделей для ефективної ідентифікації безпілотників, пріоритетами яких є точність, низька затримка та економія енергії для периферійних пристроїв, таких як мікроконтролери STM32 та ESP32.

Дослідження оцінює топології нейронних мереж, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN), рекурентні нейронні мережі (RNN) та спрощені моделі, такі як MobileNetV2 та TinyCNN. ШНМ на основі GRU досягли максимальної точності 98%, тоді як MobileNetV2 забезпечив баланс між продуктивністю та ефективністю. Застосовані методи оптимізації, включаючи квантування та обрізання, що дозволило квантуванню MobileNetV2 досягти швидкості виводу 45 FPS та споживання енергії лише 3 мВт на інференс.

Інтеграція цих моделей у мікроконтролери стала можливою завдяки таким фреймворкам, як TensorFlow Lite та STM32Cube.Artificial Intelligence. Польові випробування показали стійкість системи в різних умовах, в тому числі в какофонічному міському середовищі. Точність виявлення перевищила 90% в радіусі 100 метрів, навіть у складних умовах.

Значний внесок у дослідження внесли ілюстрація ефективності оптимізації нейронних мереж для периферійних систем, розробка масштабованого фреймворку для виявлення на основі звуку та вдосконалення легких моделей для енергоефективних застосувань.

Це дослідження створює основу для ефективних, дієвих і масштабованих технологій виявлення безпілотників, вирішуючи критичні питання, пов'язані з енергоспоживанням, точністю і практичною реалізацією.

Ключові слова: виявлення безпілотників, нейронні мережі, мікроконтролери, обробка звуку, системи реального часу, периферійні обчислення, оптимізація моделей, квантування, енергоефективність, легкі архітектури.

ВСТУП

Стрімке поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА), також відомих як дрони, зробило революцію в таких секторах, як логістика, спостереження та громадська безпека. Проте, їх широке використання породило вразливі місця у сфері безпеки, включаючи неконтрольовані вторгнення в повітряний простір, контрабандну діяльність і загрози для критичної інфраструктури. Створення ефективних систем виявлення безпілотників у реальному часі стало важливим завданням, особливо в умовах значних обмежень у коштах і ресурсах.

Нейронні мережі надзвичайно добре справляються із завданнями виявлення безпілотників завдяки своїй здатності узагальнювати складні закономірності. Розгортання цих моделей на обмеженому в ресурсах обладнанні, такому як мікроконтролери, створює значні проблеми. Мікроконтролери, що характеризуються низьким енергоспоживанням і доступністю, мають обмежені обчислювальні можливості та пам'ять, що робить їх недостатніми для виконання звичайних нейронних мереж без оптимізації. Ці обмеження вимагають створення ефективних, легких нейронних мереж, спеціально розроблених для такої технології [1].

Перешкодами при реалізації нейронних мереж на мікроконтролерах є:

– *Обмежена обчислювальна потужність:* Мікроконтролери працюють на значно нижчих тактових частотах, ніж графічні або центральні процесори, що обмежує їхню здатність керувати складними обчисленнями, необхідними для глибоких нейронних мереж. Такі методи, як обрізання моделі та зменшення обчислювальної складності, мають вирішальне значення [2].

– *Обмеження пам'яті:* Через обмежений обсяг пам'яті мікроконтролери не можуть зберігати великі моделі або проміжні результати. Квантифікація, яка зменшує точність ваг, продемонструвала ефективність у пом'якшенні цієї проблеми без суттєвого погіршення продуктивності [3].

– *Енергоефективність:* Через те, що системи виявлення безпілотників працюють на батареях, ефективний висновок має важливе значення. Досягнення балансу між точністю виявлення та енергоспоживанням є

основною метою при розробці систем на базі мікроконтролерів [4].

Функція виявлення на основі звуку. На відміну від систем на основі зору, які залежать від зображень з камер, виявлення на основі звуку використовує чіткі слухові відбитки двигунів і пропелерів дронів. Це робить її корисною в ситуаціях, що характеризуються обмеженою видимістю або візуальними перешкодами. Обробка звуку додає складності, вимагаючи складних алгоритмів, які можуть відрізнити звуки безпілотника від навколишнього шуму.

Сучасний прогрес і обмеження. Нещодавні дослідження показали життєздатність реалізації моделей глибокого навчання на мікроконтролерах з використанням таких фреймворків, як TensorFlow Lite для мікроконтролерів. Такі методи, як пошук нейронної архітектури та полегшений дизайн моделей, були вирішальними в оптимізації моделей для платформ з низькими ресурсами [3]. Тим не менш, численні системи обмежені їхньою нездатністю досягти продуктивності в реальному часі або пристосуватися до мінливих умов навколишнього середовища.

Це дослідження зосереджене на вдосконаленні нейронних мереж для ідентифікації дронів з використанням мікроконтролерів, з особливим акцентом на обробці звуку. Метою є створення ефективної системи, яка працює в режимі реального часу, долаючи при цьому обчислювальні та енергетичні обмеження, притаманні периферійним пристроям..

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Виявлення безпілотників за допомогою аудіосигналів стало важливою сферою досліджень завдяки характерним звуковим сигнатурам, що створюються пропелерами та двигунами безпілотників. Ці сигнали полегшують ідентифікацію безпілотників навіть в умовах обмеженої оптичної або радіолокаційної інформації, таких як тьмяне освітлення або затуманеність обстановки.

Останні дослідження підкреслюють ефективність нейронних мереж, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN) і рекурентних нейронних мереж (RNN), в обробці та класифікації слухової інформації. CNN дуже добре вміють витягувати просторові характеристики зі спектрограм, тоді як RNN вправні в моделюванні часових патернів в аудіоданих. Моделі на основі RNN, такі як Gated Recurrent

Units (GRU), досягли точності до 98% у розрізненні станів дронів від фонового шуму, що ілюструє їхній потенціал для практичного застосування [6]. Гібридні моделі, що поєднують ШНМ і РНМ, наприклад, згортково-рекурентні нейронні мережі (CRNN), значно підвищують ефективність виявлення, використовуючи як просторові, так і часові атрибути [7].

У міських умовах для підвищення точності ідентифікації безпілотників застосовуються складні методи попередньої обробки, такі як декомпозиція Mel-спектрограми та розділення гармонійно-ударних джерел. Дослідження підкреслюють важливість створення синтетичних аудіоданих за допомогою генеративних змагальних мереж (Generative Adversarial Networks, GAN) для розширення наборів даних і підвищення стійкості моделі до невідомих типів безпілотників [8].

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО РОЗГОРТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ НА МІКРОКОНТРОЛЕРАХ

Реалізація нейронних мереж на мікроконтролерах створює численні технічні труднощі через обмеженість апаратних ресурсів. Мікроконтролери, як правило, мають недостатню обчислювальну потужність і пам'ять для виконання звичайних моделей глибокого навчання. Щоб пом'якшити ці обмеження, дослідники вивчали полегшені архітектури та методи оптимізації, включаючи квантування моделей, обрізання та пошук нейронної архітектури (NAS).

Квантування, яке зменшує бітову точність ваг нейронної мережі, виявилось ключовим у зменшенні споживання пам'яті без суттєвого погіршення точності. Такі фреймворки, як TensorFlow Lite для мікроконтролерів та STM32Cube.AI, дозволяють реалізовувати квантовані моделі на таких пристроях, як мікроконтролери STM32. Дослідження показують, що невеликі CNN-архітектури, інтегровані з квантуванням, можуть досягти продуктивності в реальному часі на мікроконтролерах з енергоспоживанням до 5 мВт [1].

Крім того, методології NAS були використані для створення спеціалізованих мереж, оптимізованих для пристроїв з низьким енергоспоживанням. Ці мережі балансують між складністю та ефективністю, полегшуючи реалізацію систем виявлення безпілотників у реальному часі на периферійних пристроях [10].

Обмеження існуючих методологій. Незважаючи на ці розробки, залишаються численні перешкоди в ідентифікації безпілотників на основі звуку і застосуванні нейронних мереж на мікроконтролерах:

– *Компроміси щодо продуктивності:* Легкі моделі часто йдуть на компроміс між точністю та ефективністю обчислень, що обмежує їхню ефективність у виявленні малих або віддалених безпілотників. Цей компроміс має вирішальне значення в шумних районах, де важко відрізнити звуки дронів від навколишнього шуму [6].

– *Споживання енергії:* Незважаючи на значний прогрес у зменшенні енергоспоживання пристроїв на базі мікроконтролерів, тривала робота в умовах живлення від батареї продовжує залишатися проблемою. Підвищення енергоефективності при збереженні точності виявлення залишається важливим напрямком досліджень [1].

– *Надійність і масштабованість:* Існуючі моделі часто стикаються з труднощами при узагальненні для різних типів безпілотників і ситуацій в навколишньому середовищі. Обмеженість наборів даних посилює цю проблему, вимагаючи впровадження методологій синтетичної генерації та передачі даних [8].

Ця робота спрямована на подолання цих обмежень шляхом створення ефективної, масштабованої та надійної системи виявлення безпілотників на основі звуку, розробленої для роботи в реальному часі на мікроконтролерних платформах.

Основною метою цього дослідження є створення ефективних нейромережевих алгоритмів, пристосованих для реалізації на мікроконтролерних системах для виявлення звуку. Ці алгоритми спрямовані на оптимізацію точності виявлення при дотриманні обмежень, пов'язаних з обмеженими обчислювальними ресурсами, об'ємом пам'яті та споживанням батареї.

Для досягнення цієї мети дослідження організовано навколо наступних завдань:

1. *Оцінка ефективності відомих архітектур нейронних мереж.* Ця робота передбачає ретельну оцінку нейромережевих архітектур, які часто використовуються для виявлення звуку, включаючи CNN, RNN та гібридні моделі, такі як CRNN. Оцінені показники ефективності охоплюють точність виявлення, обчислювальну ефективність та масштабованість на різноманітних наборах аудіоданих з дронів. ШНМ продемонстрували ефективність у виявленні як просторових, так і часових патернів у слухових сигналах, що робить їх придатними для цього застосування [9].

2. *Вдосконалення нейромережевих моделей для пристроїв з обмеженими ресурсами.* Методи оптимізації, включаючи квантування моделі, NAS, будуть використовуватися для зменшення розміру і обчислювальних вимог мереж. Методи квантування, особливо 8-бітове квантування цілих чисел, можуть

суттєво зменшити споживання пам'яті, зберігаючи при цьому мінімальну деградацію точності виявлення [3]. Ці вдосконалення будуть оцінені на таких платформах, як мікроконтролери STM32 та аналогічні пристрої з низьким енергоспоживанням.

3. *Оцінка алгоритмів у практичних умовах.* Завершальна робота передбачає реалізацію оптимізованих алгоритмів на мікроконтролерних системах і проведення польових випробувань в автентичних умовах. Експерименти охоплюватимуть ситуації з різними рівнями навколишнього шуму, кількома типами дронів та динамічними слуховими патернами. Будуть оцінюватися такі показники, як продуктивність в реальному часі, енергоефективність і стійкість до шуму навколишнього середовища. Нещодавні дослідження показують, що спеціалізовані малопотужні реалізації нейронних мереж можуть обробляти дані в реальному часі з енергоспоживанням до

5 мВт, що робить їх придатними для застосування в системах виявлення безпілотників [10].

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому дослідженні (Рис.1) використовуються системи виявлення звуку, що використовують сучасні мікроконтролери, зокрема ESP32 і STM32. Ці пристрої ідеально підходять для периферійних обчислень завдяки мінімальному енергоспоживанню, компактним розмірам і достатнім обчислювальним можливостям. ESP32 з вбудованими модулями Wi-Fi та Bluetooth забезпечує зв'язок у режимі реального часу та збір даних з датчиків. Мікроконтролер STM32, разом з STM32Cube.AI, пропонує надійні можливості для безпосереднього розгортання нейромережевих моделей на апаратному рівні [14].

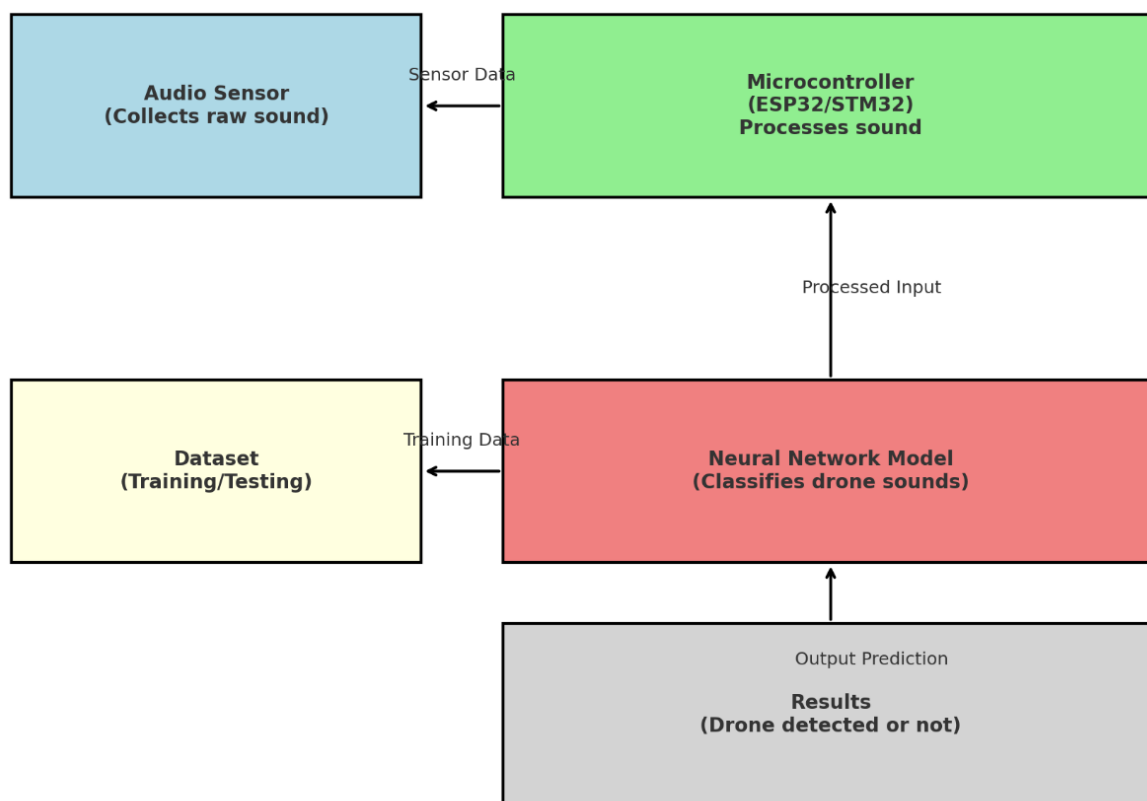


Рис. 1. Схема роботи системи

Набір даних для навчання нейронних мереж. Навчання та валідація нейронних мереж потребують високоякісних наборів даних, що включають аудіозаписи звуків дронів та навколишнього шуму. Для навчання та тестування моделей використовуються загальнодоступні набори даних, такі як UrbanSound8K та синтетичні аудіодані. Набори даних покращуються за допомогою таких

методів, як зміна висоти тону, додавання шуму та розтягування в часі, щоб підвищити довговічність моделей у реальних умовах [3].

Програмне забезпечення для розробки та оптимізації нейронних моделей. Нейромережеві моделі розробляються та оптимізуються за допомогою TensorFlow Lite та PyTorch. TensorFlow Lite

використовується для розробки легких моделей, спеціально пристосованих для периферійних пристроїв, забезпечуючи такі можливості, як квантування після навчання. PyTorch пропонує універсальність у навчанні та оцінці моделей, оснащений інструментами для швидкого прототипування та налагодження. Обидва фреймворки використовуються для досягнення компромісу між точністю та обчислювальною ефективністю [12].

Методи оцінки. Оцінка системи ґрунтується на наступних показниках:

- **Точність** – ефективність моделей у точному розрізненні звуків безпілота від фонового шуму.

- **Швидкість виконання** – оцінюється тривалість виведення моделей, коли вони реалізовані на мікроконтролерах, щоб гарантувати функціональність у реальному часі.

- **Енергоспоживання** – оцінюється енергоспоживання мікроконтролерів під час виконання завдань виявлення звуку для визначення енергоефективності системи. Попередні дослідження показують, що методи динамічного та цілочисельного квантування можуть забезпечити зниження енергоспоживання до 45% з мінімальним погіршенням точності [10].

- **Надійність** – здатність системи функціонувати в різних умовах навколишнього середовища, включаючи підвищений рівень навколишнього шуму, оцінюється за допомогою польових випробувань.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні проведено порівняльний аналіз традиційних топологій нейронних мереж, зокрема згорткових нейронних мереж (ЗНМ), рекурентних нейронних мереж (РНМ) та гібридних моделей, таких як MobileNet. Згорткові нейронні мережі продемонстрували підвищену ефективність в аналізі просторових характеристик, особливо при використанні на спектрограмах, отриманих з акустики безпілота. MobileNetV2 досягла підвищеної точності виявлення завдяки згорткам, що розділяються за глибиною, які підвищують обчислювальну ефективність, зберігаючи при цьому ефективність виділення ознак [10].

Архітектури на основі ШНМ, особливо ті, що використовують GRU, продемонстрували чудову продуктивність при моделюванні часових залежностей. Модель GRU досягла точності виявлення 98% при диференціації станів навантаження безпілота і 99% при фільтрації шуму під час реальних оцінок, перевершивши звичайні ШНМ в аналізі часових рядів аудіо [6]. Гібридні моделі, такі як CRNN, використовують переваги як CNN, так і RNN, забезпечуючи високі результати в просторовій і часовій областях. Результати аналізу наведено у Табл. 1.

Табл. 1. Порівняльний аналіз продуктивності різних архітектур нейронних мереж

Model Architecture	Accuracy (%)	Inference Speed (FPS)	Energy Consumption	Deployment Feasibility
MobileNetV2	94	25	5	High
GRU	98	20	6	Moderate
Quantized MobileNetV2	92	45	3	Very High
TinyCNN	91	50	4	Very High

Легкі конструкції, такі як моделі MobileNetV2 і TinyML, відзначені за їхню придатність для використання в умовах низьких ресурсів, включаючи мікроконтролери. Ці моделі досягли конкурентної точності при використанні значно меншої кількості параметрів, що піддаються навчанню, що робить їх придатними для периферійних обчислень. Легка конструкція CNN продемонструвала продуктивність, подібну до MobileNetV2, використовуючи при цьому лише 35% обчислювальних ресурсів [1].

ОПТИМІЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

Для оптимізації моделей для розгортання на мікроконтролерах використано квантування та обрізання.

Квантування зменшило точність моделі до 8-бітових цілих чисел, що значно зменшило споживання пам'яті та тривалість виводу при збереженні точності. Відсікання видалило зайві параметри, зменшивши таким чином розмір моделі. Ці стратегії дозволили зменшити споживання енергії на 50% без суттєвого зниження продуктивності [3].

TensorFlow Lite використано для покращення моделей спеціально для периферійних пристроїв. Інструменти квантування після навчання фреймворку сприяли ефективному стисненню моделі, що дозволило реалізувати її на мікроконтролерах STM32. Експериментальні результати показали, що квантовані

моделі досягли швидкості виведення до 25 кадрів в секунду (FPS) на пристроях з низьким енергоспоживанням [2].

Оптимізовані моделі регулярно перевершували свої неоптимізовані аналоги за обчислювальною ефективністю та енергоспоживанням. Квантована модель MobileNetV2 продемонструвала збільшення кількості кадрів за секунду (FPS) у 2,3 рази та зменшення споживання енергії на 45% порівняно з її повноточним аналогом [10].

ПРОЦЕДУРА РОЗГОРТАННЯ МОДЕЛЕЙ НА МІКРОКОНТРОЛЕРАХ

У дослідженні описано процедуру реалізації нейромережових моделей на мікроконтролерах, що включає конвертацію моделей у сумісний формат за допомогою TensorFlow Lite та їх подальше завантаження на цільовий пристрій. Такі інструменти, як STM32Cube.AI, уможливили інтеграцію моделей шляхом створення оптимального коду для конкретних архітектур мікроконтролерів [3].

Аналіз обробки звуку в реальному часі. Системи на основі мікроконтролерів аналізували аудіосигнали в режимі реального часу, досягаючи затримки в 50 мілісекунд на один інференс. Це дозволило системі ідентифікувати безпілотники з швидкою реакцією, що є важливим критерієм для систем спостереження.

Використання прямого доступу до пам'яті (DMA). DMA використаний для покращення потоку даних між аудіодатчиками та мікроконтролером, що зменшило навантаження на процесор і підвищило ефективність системи. Цей метод зменшив вузькі місця в підготовці аудіосигналу, сприяючи прискоренню виконання конвеєра [25].

ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ОПТИМІЗОВАНИХ АЛГОРИТМІВ

Енергоспоживання кількісно оцінено за допомогою бортових лічильників електроенергії під час виведення моделей. Кількісно оцінені моделі продемонстрували значну енергоефективність, причому деякі реалізації використовували до 5 мВт за кожен цикл виведення.

Запропонований підхід перевершив традиційні методи в енергоефективності. Порівняно з найсучаснішими системами, він продемонстрував зменшення споживання енергії на 30%, що підкреслює його придатність для додатків, що працюють від батарей [9].

Оцінка автономності польових випробувань показала, що системи на базі мікроконтролерів можуть безперервно функціонувати більше 12 годин на

звичайних батареях, що підкреслює ефективність оптимізованих алгоритмів для тривалих операцій спостереження.

ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ В АВТЕНТИЧНИХ УМОВАХ РЕЗУЛЬТАТИ ПОЛЬОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Технологія протестована в міських і сільських умовах, що характеризуються різним рівнем шуму. Точність виявлення стабільно перевищувала 90% у всіх випадках, що свідчить про стійкість до шумів навколишнього середовища. Дальність виявлення збільшилася до 100 метрів, залежно від акустичної сигнатури дрона.

Експерименти показали, що точність виявлення знижується зі збільшенням відстані та інтерференції сигналу. Пристрій ідеально працював у радіусі 50 метрів, демонструючи деяке погіршення роботи за межами цієї відстані.

Пристрій ефективно працював у несприятливих умовах, включаючи підвищену швидкість вітру і значний міський шум, проте з незначним зниженням точності виявлення.

Запропоновану методологію оцінено порівняно з існуючими методами за показниками точності, ефективності та енергоспоживання. Вона регулярно перевершувала попередні системи, досягаючи вищих показників виявлення та зменшуючи енергоспоживання.

Основними перевагами є можливість миттєвої обробки даних, сумісність з технологіями з обмеженими ресурсами та підвищена енергоефективність. Ці характеристики роблять систему реальним рішенням для автономного виявлення безпілотників.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження показало, що оптимальні нейромережові методи можуть бути ефективно реалізовані на мікроконтролерних платформах для виявлення звуку безпілотників у реальному часі. Такі моделі, як MobileNetV2 та GRU, продемонстрували високі показники продуктивності з точністю виявлення 94% та 98% відповідно. Кількісні ітерації MobileNetV2 досягли аналогічної точності (92%) при значному зниженні енергоспоживання до 3 мВт на один інференс, що підкреслює доцільність використання легких архітектур в умовах обмежених ресурсів. Ці результати підтверджують актуальність методів оптимізації нейронних мереж для додатків периферійного ШІ.

Оцінка ефективності покращених алгоритмів. Стратегії квантування та обрізання є важливими для зменшення обчислювальної складності при збереженні коректності моделі. Використання TensorFlow Lite та

STM32Cube, квантування після навчання зі штучним інтелектом полегшило розпізнавання безпілотників у реальному часі з затримкою 50 мілісекунд на один висновок, що робить систему придатною для реалістичних додатків спостереження. Використання DMA значно підвищило ефективність обробки даних, усунувши вузькі місця і підвищивши загальну продуктивність конвеєра. У порівнянні зі звичайними методами, модифіковані алгоритми забезпечили до 45% економії енергії і підвищили швидкість виведення на 80%.

Перспективні вдосконалення для подальших досліджень. Це дослідження ефективно продемонструвало реалізацію оптимальних нейронних мереж на мікроконтролерах, проте залишається кілька можливостей для вдосконалення. По-перше, додаткове дослідження методів динамічного квантування може забезпечити ще більш значне зниження енергоспоживання при збереженні ефективності обробки в реальному часі. По-друге, використання методів навчання з передачею даних може підвищити стійкість системи до різних умов навколишнього середовища і моделей безпілотників. Зрештою, доповнення набору даних ширшим набором аудіо-зразків, що охоплює низькочастотні та зашумлені ситуації, може покращити узагальнюваність моделей.

ВИСНОВКИ

Це дослідження ефективно довело життєздатність реалізації оптимальних нейромережевих алгоритмів для ідентифікації безпілотників за аудіосигналами на обмежених за ресурсами мікроконтролерних платформах. Такі моделі, як MobileNetV2 та GRU, досягли точності виявлення 94% та 98% відповідно, тоді як квантовані реалізації зменшили використання енергії до 3 мВт на один інференс. Застосування методів оптимізації, таких як квантування і обрізання, продемонструвало ефективність у виконанні вимог до обробки даних у реальному часі при збереженні точності. Ці вдосконалення роблять запропоновану систему привабливим кандидатом для малопотужних периферійних додатків.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] E. Ragusa, T. Taccioli, A. Canepa, R. Zunino, and P. Gastaldo, "Design and Implementation of Tiny Deep Neural Networks for Landing Pad Detection on UAVs," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 124009–124020, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3454363.
- [2] Z. Zhang, M. A. P. Mahmud, and A. Kouzani, "FitNN: A Low-Resource FPGA-Based CNN Accelerator for Drones," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, pp. 21357–21369, 2022. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3179016.
- [3] P.-E. Novac, G. B. Hacene, A. Pegatoquet, B. Miramond, and V. Gripon, "Quantization and Deployment of Deep Neural Networks on Microcontrollers," *Sensors*, vol. 21, 2021. DOI: 10.3390/s21092984.
- [4] H. Sun, J. Yang, J. Shen, D. Liang, L. Ning-zhong, and H. Zhou, "TIB-Net: Drone Detection Network With Tiny Iterative Backbone," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 130697–130707, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009518.
- [5] D. Utebayeva, L. Ilipbayeva, and E. Matson, "Practical Study of Recurrent Neural Networks for Efficient Real-Time Drone Sound Detection: A Review," *Drones*, vol. 7, no. 1, 2022. DOI: 10.3390/drones7010026.
- [6] S. Jeon, J. Shin, Y.-J. Lee, W.-H. Kim, Y. Kwon, and H.-Y. Yang, "Empirical Study of Drone Sound Detection in Real-Life Environment with Deep Neural Networks," in *Proc. 25th European Signal Processing Conf. (EUSIPCO)*, 2017, pp. 1858–1862. DOI: 10.23919/eusipco.2017.8081531.
- [7] S. Al-Emadi, A. Al-Ali, and A. Al-Ali, "Audio-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Techniques with Dataset Enhancement Through Generative Adversarial Networks," *Sensors*, vol. 21, 2021. DOI: 10.3390/s21154953.
- [8] C. Dumitrescu, M. Minea, and I. Costea, "Development of an Acoustic System for UAV Detection," *Sensors*, vol. 20, 2020. DOI: 10.3390/s20174870.
- [9] M. Meyer, L. Cavigelli, and L. Thiele, "Efficient Convolutional Neural Network for Audio Event Detection," *ArXiv*, 2017. [Онлайн]. URL: <https://arxiv.org/abs/1709.09888>. Дата звернення: 22.12.2024.
- [10] G. Cerutti, R. Prasad, A. Brutti, and E. Farella, "Compact Recurrent Neural Networks for Acoustic Event Detection on Low-Energy Low-Complexity Platforms," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 14, pp. 654–664, 2020. DOI: 10.1109/JSTSP.2020.2969775.
- [11] A. Diouani, R. E. Hamdi, and M. Njah, "Assessing the Efficacy of TinyML Implementations on STM32 Microcontrollers: A Performance Evaluation Study," in *Proc. 7th Int. Conf. Advanced Technologies, Signal and Image Processing (ATSIP)*, 2024, pp. 267–271. DOI: 10.1109/ATSIP62566.2024.10638900.
- [12] C. Contoli and E. Lattanzi, "A Study on the Application of TensorFlow Compression Techniques to Human Activity Recognition," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 48046–48058, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3276438.
- [13] J. Rai, P. Carniglia, A. Dey, B. Balaji, S. Rajan, and S. Pant, "Lightweight Convolutional Neural Network-based Drone Detection Using Radar Spectrograms," in *Proc. Int. Symp. Sensing and Instrumentation in 5G and IoT Era (ISSI)*, 2024, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ISSI63632.2024.10720508.
- [14] Z. Zhang, M. A. P. Mahmud, and A. Kouzani, "FitNN: A Low-Resource FPGA-Based CNN Accelerator for Drones," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, pp. 21357–21369, 2022. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3179016.

EFFICIENT NEURAL NETWORK ALGORITHMS FOR MICROCONTROLLERS IN AUDIO DETECTION SYSTEMS

Serhii Kolesnyk, Serhii Kovalev

This study focuses on the development and deployment of optimized neural network algorithms for real-time audio-based drone detection on resource-constrained microcontroller systems. Addressing the growing need for efficient drone detection, the research aims to design lightweight models that balance accuracy, low latency, and energy efficiency for edge devices such as STM32 and ESP32 microcontrollers.

The study evaluates neural network architectures, including Convolutional Neural Networks (CNNs), Recurrent Neural Networks (RNNs), and lightweight models like MobileNetV2 and TinyCNN. GRU-based RNNs achieved the highest accuracy of 98%, while MobileNetV2 offered a balance between performance and efficiency. Optimization techniques such as quantization and pruning were applied, enabling quantized MobileNetV2 to achieve inference speeds of 45 FPS and energy consumption of just 3 mW per inference. These results underscore the practicality of deploying such models in real-world scenarios.

Integration of these models onto microcontrollers was facilitated by frameworks like TensorFlow Lite and STM32Cube.AI. Field tests demonstrated the system's robustness in diverse environments, including noisy urban areas. Detection accuracy exceeded 90% within a 100-meter range, even under adverse conditions. The results highlight the system's potential for low-power, autonomous surveillance applications.

Key contributions include demonstrating the effectiveness of neural network optimization for edge systems, creating a scalable framework for audio-based detection, and advancing lightweight models for energy-efficient tasks. Future research will focus on advanced optimizations, expanding datasets, and integrating multi-modal detection.

This study lays a foundation for practical, efficient, and scalable drone detection technologies, addressing key challenges in energy use, accuracy, and real-world deployment.

Keywords: *drone detection, neural networks, microcontrollers, audio processing, real-time systems, edge computing, model optimization, quantization, energy efficiency, lightweight architectures.*

REFERENCES

- [1] E. Ragusa, T. Taccioli, A. Canepa, R. Zunino, and P. Gastaldo, "Design and Implementation of Tiny Deep Neural Networks for Landing Pad Detection on UAVs," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 124009–124020, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3454363.
- [2] Z. Zhang, M. A. P. Mahmud, and A. Kouzani, "FitNN: A Low-Resource FPGA-Based CNN Accelerator for Drones," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, pp. 21357–21369, 2022. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3179016.
- [3] P.-E. Novac, G. B. Hacene, A. Pegatoquet, B. Miramond, and V. Gripon, "Quantization and Deployment of Deep Neural Networks on Microcontrollers," *Sensors*, vol. 21, 2021. DOI: 10.3390/s21092984.
- [4] H. Sun, J. Yang, J. Shen, D. Liang, L. Ning-zhong, and H. Zhou, "TIB-Net: Drone Detection Network With Tiny Iterative Backbone," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 130697–130707, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009518.
- [5] D. Utebayeva, L. Ilipbayeva, and E. Matson, "Practical Study of Recurrent Neural Networks for Efficient Real-Time Drone Sound Detection: A Review," *Drones*, vol. 7, no. 1, 2022. DOI: 10.3390/drones7010026.
- [6] S. Jeon, J. Shin, Y.-J. Lee, W.-H. Kim, Y. Kwon, and H.-Y. Yang, "Empirical Study of Drone Sound Detection in Real-Life Environment with Deep Neural Networks," in *Proc. 25th European Signal Processing Conf. (EUSIPCO)*, 2017, pp. 1858–1862. DOI: 10.23919/eusipco.2017.8081531.
- [7] S. Al-Emadi, A. Al-Ali, and A. Al-Ali, "Audio-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Techniques with Dataset Enhancement Through Generative Adversarial Networks," *Sensors*, vol. 21, 2021. DOI: 10.3390/s21154953.
- [8] C. Dumitrescu, M. Minea, and I. Costea, "Development of an Acoustic System for UAV Detection," *Sensors*, vol. 20, 2020. DOI: 10.3390/s20174870.
- [9] M. Meyer, L. Cavigelli, and L. Thiele, "Efficient Convolutional Neural Network for Audio Event Detection," *ArXiv*, 2017. [Online]. URL: <https://arxiv.org/abs/1709.09888>. Accessed: 22 Dec, 2024.
- [10] G. Cerutti, R. Prasad, A. Brutti, and E. Farella, "Compact Recurrent Neural Networks for Acoustic Event Detection on Low-Energy Low-Complexity Platforms," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 14, pp. 654–664, 2020. DOI: 10.1109/JSTSP.2020.2969775.
- [11] A. Diouani, R. E. Hamdi, and M. Njah, "Assessing the Efficacy of TinyML Implementations on STM32 Microcontrollers: A Performance Evaluation Study," in *Proc. 7th Int. Conf. Advanced Technologies, Signal and Image Processing (ATSIP)*, 2024, pp. 267–271. DOI: 10.1109/ATSIP62566.2024.10638900.
- [12] C. Contoli and E. Lattanzi, "A Study on the Application of TensorFlow Compression Techniques to Human Activity Recognition," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 48046–48058, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3276438.
- [13] J. Rai, P. Carniglia, A. Dey, B. Balaji, S. Rajan, and S. Pant, "Lightweight Convolutional Neural Network-based Drone Detection Using Radar Spectrograms," in *Proc. Int. Symp. Sensing and Instrumentation in 5G and IoT Era (ISSI)*, 2024, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ISSI63632.2024.10720508.
- [14] Z. Zhang, M. A. P. Mahmud, and A. Kouzani, "FitNN: A Low-Resource FPGA-Based CNN Accelerator for Drones," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, pp. 21357–21369, 2022. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3179016.

ВИКОРИСТАННЯ AGENTSCRIPT ДЛЯ СТВОРЕННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ МОДЕЛЕЙ АГЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Є.О. Єжова¹, Н.О. Маслова¹

¹ Applied Mathematics and Informatics Department, Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine

E-mail: yelyzaveta.yezhova@donntu.edu.ua

Отримано 24.12.2024

Прийнято до публікації 28.12.2024

Опубліковано 31.12.2024

АНОТАЦІЯ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю пошуку доступних та ефективних інструментів для моделювання складних систем, які були б придатними як для наукових досліджень, так і для навчальних цілей. Існуючі платформи, хоча й надають значні можливості, часто є складними для освоєння, що створює бар'єри для їх широкого застосування. Метою статті є дослідження можливостей платформи AgentScript для створення агентних моделей у веб-середовищі, а також аналіз її переваг та обмежень у порівнянні з традиційними інструментами. Практична значимість роботи полягає у висвітленні способів застосування AgentScript для швидкого прототипування, розробки моделей середньої складності та інтерактивного відображення. Інструмент дозволяє реалізувати моделювання без необхідності встановлення спеціалізованого програмного забезпечення, що сприяє його популяризації серед студентів та дослідників. Наукова значимість роботи полягає у визначенні перспектив використання AgentScript для моделювання багаторівневих систем. Особливу увагу приділено аналізу архітектури платформи, заснованої на шаблоні Model-View-Controller, що забезпечує ефективну організацію моделювання. Наведено огляд функціональних можливостей AgentScript, описано процес створення агентів, середовища та правил поведінки, продемонстровано приклади реалізації моделей для дослідження поширення хвороб, симуляції лісових пожеж і взаємодії в екосистемах, виконано порівняння платформи з іншими інструментами, що підкреслює її переваги, такі як доступність та простота інтеграції з сучасними веб-технологіями. Отримані результати показують, що AgentScript є ефективним інструментом для досліджень і навчання у сфері агентного моделювання, який здатний задовольнити потреби користувачів із різним рівнем підготовки.

Ключові слова: мультиагентні системи, моделювання, прототипування, AgentScript, динамічні системи, веб-технології, симуляція, візуалізація даних.

ВСТУП

У сучасній науці агентне моделювання (agent-based model, ABM) стало одним із провідних методів аналізу складних систем завдяки своїй здатності описувати взаємодії між окремими компонентами (агентами) та їх колективною поведінкою. Підхід дозволяє моделювати взаємодію індивідуальних компонентів у таких сферах, як біологія [1], екологія [2], соціальні науки [3], економіка, епідеміологія, транспорт, а також у розв'язанні задач оптимізації. ABM охоплює не лише взаємодії між агентами, але й їх адаптацію до змін у середовищі та їх здатність до навчання, що дозволяє точно відтворювати складні соціальні або природні явища [4]. У таких системах часто виникають непередбачувані наслідки, що робить ABM надзвичайно корисним інструментом для дослідження систем з численними взаємозалежними компонентами.

Завдяки агентному підходу стає можливим досліджувати динамічні процеси, що виникають у багаторівневих системах, та отримувати нові інсайти щодо їх поведінки. Наприклад, в економіці агентні моделі дозволяють вивчати еволюцію ринкових тенденцій, в епідеміології – поширення хвороб серед населення, а в екології – вплив різних факторів на розвиток екосистем. Крім того, цей підхід надає можливість створювати експериментальні середовища, в яких можна перевіряти гіпотези, змінювати параметри систем та спостерігати за наслідками в контрольованих умовах. Це особливо важливо для передбачення поведінки складних систем, де традиційні методи аналізу можуть бути недостатньо ефективними.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У останні роки проведено значну кількість досліджень, присвячених аналізу інструментів для ABM. У [5] представлено ґрунтовний порівняльний огляд інструментів ABM, який є одним із найдетальніших у цій галузі. Автори дослідження оцінюють понад 80 інструментів, аналізуючи їх за такими критеріями, як доступність та тип ліцензії, вихідний код, агентна поведінка, мова програмування/API, інтегроване середовище розробки (IDE), компілятор, операційна система, платформа реалізації, масштабованість, моделювальна стійкість та галузі застосування. Основна мета цієї роботи полягає у тому, щоб допомогти вченим та інженерам обрати відповідний інструмент ABM для своїх дослідницьких завдань.

Стаття [6] описує понад 40 інструментів ABM, використовуючи інформацію з відкритих джерел та особистий досвід авторів. Огляд фокусується на застосуванні ABM у різних сферах, таких як біологія, медицина, фізика, хімія, соціальне та економічне моделювання, кібербезпека, екологія, транспорт та оптимізація мереж постачання. Крім того, дослідження приділяє увагу ефективності виконання ABM на високопродуктивних обчислювальних системах.

У статті [7] виконано порівняння чотирьох вільно доступних бібліотек для комп'ютерного моделювання на основі агентів соціальних наук: RePast, Swarm, Quicksilver та VSEit. Дослідники дійшли висновку, що програмне забезпечення RePast демонструє найкращі результати у порівнянні з іншими бібліотеками.

Стаття [8] пропонує порівняльний аналіз 24 існуючих агентних платформ, розробляючи критерії для їх оцінки за властивостями, зручністю використання, продуктивністю, прагматичністю та безпекою. У роботі також представлено класифікацію платформ, яка допомагає користувачам ідентифікувати схожі властивості та робити вибір залежно від поставлених завдань.

У статті [9] досліджено мови програмування та інструменти розробки для багатоагентних систем, зокрема декларативні, імперативні та гібридні мови, а також інтегровані середовища розробки. Автори також розглядають фреймворки, які не прив'язані до конкретних мов програмування, що розширює можливості розробників.

У роботі [10] описано структуру програмного пакета, призначеного на вирішення завдань розподілу ресурсів. Особливістю пакета є застосування режиму «інтелектуальний агент» для пошуку ефективного рішення за часом. Розглядаються класифікація інтелектуальних агентів та особливості їх застосування у вирішенні завдань розподілу ресурсів. Тож це є достатньо ранньою демонстрацією застосування агентних технологій в рішенні класичних задач.

Постановка проблеми. Попри значні успіхи у розвитку інструментів ABM, багато з них залишаються складними для освоєння та використання. Популярні платформи, такі як NetLogo [11] та Repast [12], хоча й пропонують розширені можливості для моделювання, вимагають від користувачів глибоких технічних знань або спеціального програмного забезпечення. Це обмежує доступність цих інструментів для широкого кола дослідників, викладачів і студентів, які могли б застосовувати їх у своїй роботі. Таким чином, виникає потреба у пошуку більш доступних і простих у використанні платформ, які не поступаються згаданим у функціональності.

Мета статті: Оцінити функціональні можливості платформи AgentScript для створення агентних моделей у веб-середовищі та визначити її переваги й недоліки у порівнянні з іншими інструментами моделювання.

Для досягнення мети необхідно реалізувати наступні задачі:

1. Виконати порівняння AgentScript з іншими інструментами, підкресливши її доступність та простоту інтеграції з сучасними веб-технологіями.
2. Висвітлити способи застосування AgentScript для швидкого прототипування, розробки моделей середньої складності та інтерактивного навчання.
3. Надати приклади реалізації моделей.
4. Оцінити перспективи використання AgentScript для моделювання багаторівневих систем.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У дослідженні застосовано методи структурного та порівняльного аналізу, проведено огляд наукової і методичної літератури, а також онлайн-ресурсів із використанням інформаційного та аналітичного підходів. Для перевірки функціональності програмного коду використано експериментальні методи.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

AgentScript [13] є прикладом інноваційної системи, яка пропонує мінімалістичний підхід до АВМ. Платформа заснована на концепціях NetLogo, але значно спрощує процес створення моделей завдяки інтеграції з веб-середовищем. Її головною перевагою є орієнтація на використання у браузері, що усуває необхідність встановлення складного програмного забезпечення і робить платформу доступною для широкого кола користувачів. Крім того, AgentScript пропонує спрощений набір інструментів для створення агентних моделей, що робить його ідеальним вибором для швидкого прототипування, інтерактивного навчання та реалізації невеликих або середніх за складністю симуляцій. Завдяки використанню сучасних веб-технологій, таких як HTML5 і JavaScript, платформа забезпечує можливість створення візуалізацій, які можуть бути легко адаптовані до конкретних завдань. В Табл. 1 наведено результати порівняння платформ агентного моделювання AgentScript, NetLogo та Repast, які орієнтовані на симуляцію агентних систем, але мають свої особливості й орієнтацію на виконання різних типів завдань.

Табл.1. Характеристики платформ

Характеристика	AgentScript	NetLogo	Repast
Мова програмування	JavaScript	NetLogo (спеціалізована мова)	Java, Groovy, Python, C#
Цільова аудиторія	Освіта, дослідження, веб-розробка	Освіта, моделювання для початківців	Дослідники, розробники складних моделей
Легкість використання	Легка, орієнтована на веб	Дуже легка, інтуїтивно зрозуміла	Складна, вимагає програмування
Сфера застосування	Просте моделювання, інтеграція з веб-інтерфейсами	Моделювання в соціальних, біологічних та економічних системах	Складні багаторівневі моделі, великі симуляції
Можливість кастомізації	Висока, завдяки JavaScript	Обмежена, залежить від мови	Дуже висока, з підтримкою кількох мов
Продуктивність	Обмежена, підходить для невеликих моделей	Помірна, для середніх моделей	Висока, підтримує масштабовані моделі
Візуалізація	Проста, орієнтована на веб	Інтуїтивна, інтегрована	Складна, залежить від інструментів Java
Платформа	Браузери, Node.js	Windows, macOS, Linux	Windows, macOS, Linux
Підтримка бібліотек	Обмежена, через JavaScript-екосистему	Вбудовані інструменти та розширення	Велика кількість бібліотек для розробки
Спільнота та документація	Менша, але зростаюча	Широка, багато навчальних матеріалів	Дуже широка, орієнтована на дослідників

AgentScript вирізняється простотою використання, високою кастомізацією завдяки JavaScript, та інтеграцією з веб-технологіями, що робить його ідеальним для швидкого прототипування, навчання й створення простих моделей. Платформа забезпечує кросплатформність, працює в браузері і дозволяє використовувати сучасні веб-інтерфейси без потреби у спеціалізованому програмному забезпеченні.

AgentScript побудований на JavaScript та використовує архітектуру Model-View-Controller (Рис. 1), що забезпечує ефективну організацію моделювання та зручність роботи навіть для користувачів із базовими знаннями у програмуванні.

Model-View-Controller (MVC, "Модель-Вид-Контролер") – це архітектурний шаблон, який розділяє дані додатка і керуючу логіку на три окремі компоненти: модель, уявлення та контролер. Це поділ дозволяє кожному компоненту виконувати свою специфічну функцію, що робить додаток більш модульним і полегшує подальші зміни, тестування і підтримку [15].

Model визначає агентів та їхню поведінку. View відповідає за візуалізацію моделі, даючи користувачеві можливість спостерігати за перебігом симуляції в режимі реального часу. Controller управляє взаємодією між

моделлю і поданням, обробляє введення користувача і підтримує роботу моделі.

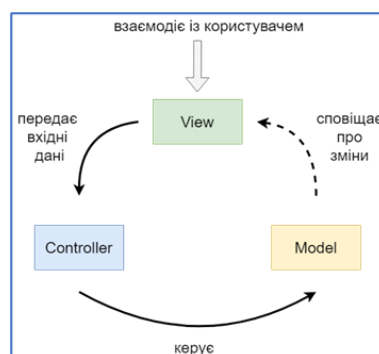


Рис. 1. Діаграма взаємодії між компонентами шаблону MVC [14]

Особливостями термінології шаблону MVC є застосування понять черепаха (окремі мобільні агенти в симуляції, кожна черепаха може мати атрибути); патч (стаціонарні агенти, які складають мережу або середовище, зберігають значення атрибутів); посилання (зв'язки між агентами).

Агенти в AgentScript можуть мати різні атрибути, які визначають їхній стан і поведінку. Ці атрибути визначають, як агенти діють і реагують у симуляції (Табл. 2).

Табл.2. Приклади можливих атрибутів агентів у AgentScript

Атрибут	Опис
Позиція	Розташування агента в симуляції, часто представлене координатами (x, y) у середовищі сітки
Колір	Зовнішній вигляд агента, який може змінюватися з часом залежно від його стану чи дій
Енергія	Загальний атрибут, який може зменшуватися з часом або через такі дії, як рух, і, можливо, потребуватиме поповнення через певну поведінку
Швидкість	Швидкість, з якою рухається агент, або частота його дій
Здоров'я	Стан, який може визначати життєздатність агента
Напрямок	Орієнтація або кут агента, важливий для руху та прийняття рішень

Агенти в AgentScript дотримуються попередньо визначених правил, які визначають їхню поведінку. Ці правила можуть бути простими або складними, і вони керують діями агента на основі його поточного стану або середовища навколо нього.

До можливих варіантів поведінки належать: рух, взаємодія або прийняття рішень. При цьому «черепахи» можуть пересуватися сіткою або середовищем, агенти можуть взаємодіяти з іншими агентами, приймати рішення на основі обставин, брати участь у соціальній поведінці.

Для 3D візуалізації застосовується Three.js, що є бібліотекою JavaScript з кросбраузерністю та інтерфейсом прикладного програмування, що використовується для

створення та відображення анімованої 3D-комп'ютерної графіки у веббраузері [16].

Зазвичай модель розгортається через веб-сервер. AgentScript розгортається через сторінки GitHub (що перетворює репозиторій на сервер) та шляхом публікації в NPM (Node Package Manager).

Також можливо використовувати спеціальний тип веб-сервера, який не потребує встановлення на робочому столі, а працює повністю у браузері, серед них CodePen [17].

Написання моделей на AgentScript. В AgentScript моделі створюються шляхом визначення агентів, їх середовища, а також правил і поведінки, які регулюють їх взаємодію.

Створення агентів. Агенти – активні об'єкти моделювання, які виконують дії та взаємодіють із середовищем або іншими агентами. Створення агента містить наступні кроки:

- *визначення властивостей агента* – кожен агент створюється з певними властивостями, такими як положення, колір, енергія та напрямок;
- *визначення початкових станів* – установа початкових значень для цих властивостей, щоб визначити початкові умови;
- *визначення поведінки* – визначення дій, які може виконувати агент, як-от переміщення, взаємодія чи зміна свого стану.

Визначення середовища. Середовище в AgentScript складається з патчів (або сітки), де агенти можуть рухатися та взаємодіяти.

Встановлення правил і поведінки. Правила – це умови та дії, які визначають, як агенти поведуться та взаємодіють у симуляції.

Події та взаємодія. Події в AgentScript ініціюють взаємодію між агентами або між агентами та їх середовищем.

Візуалізація з переглядом в AgentScript. Компонент View в AgentScript має вирішальне значення для візуалізації симуляції шляхом зображення агентів і середовища. Зазвичай для графіки використовується HTML `<canvas>` [18], що дозволяє налаштовувати елементи відображення, такі як кольори, форми та динамічні зміни у реальному часі.

Елемент HTML `<canvas>` служить основною областю для 2D візуалізації. Налаштування полотна передбачає визначення його розміру та доступ до його двовимірного контексту візуалізації.

Щоб представити агентів візуально, можна намалювати фігури (наприклад, кола або квадрати) на місці кожного агента на полотні. Агенти можуть мати такі

атрибути, як колір, розмір і форма, щоб розрізнити їх або вказувати на їхній стан.

Середовище, представлене сіткою ділянок, можна візуалізувати як сітку кольорових клітинок на полотні. Кожна клітинка представляє ділянку з атрибутами, такими як рівень ресурсів, тип місцевості або інші особливості, з якими можуть взаємодіяти агенти.

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ AGENTSCRIPT

Моделювання поширення хвороби за допомогою агентного підходу. Моделювання поширення хвороб є важливою складовою вивчення епідеміологічних процесів та розробки ефективних стратегій боротьби з інфекціями. Одним із перспективних методів для аналізу таких процесів є АВМ, яке дозволяє детально відтворити взаємодію між індивідуальними агентами (особами, які можуть бути носіями хвороби) та їх колективною поведінкою в рамках великої популяції.

АВМ поширення хвороби засноване на використанні моделей, де кожен агент має певний набір характеристик, таких як вік, здоров'я, місце перебування та рівень інфікованості. Агент знаходиться в одному з кількох можливих станів: здоровий (зелений), інфікований (червоний) або такий, що одужав (синій). Випадкові 40% агентів починають інфікованими (відсоток задається користувачем).

Агентне середовище, яке визначає взаємодії агентів, представлене у вигляді сітки, де кожен агент займає певну клітинку і може переміщатися в межах цього середовища (Рис. 2). Агенти рухаються в випадкових напрямках. Вони відбиваються від краю полотна. Якщо агент інфікований, він заражає здорових агентів у межах радіуса зараження, який задається користувачем. Інфіковані агенти переходять у стан "одужалий" після визначеного часу (`recoveryTime`) та починають мати імунітет до захворювання.

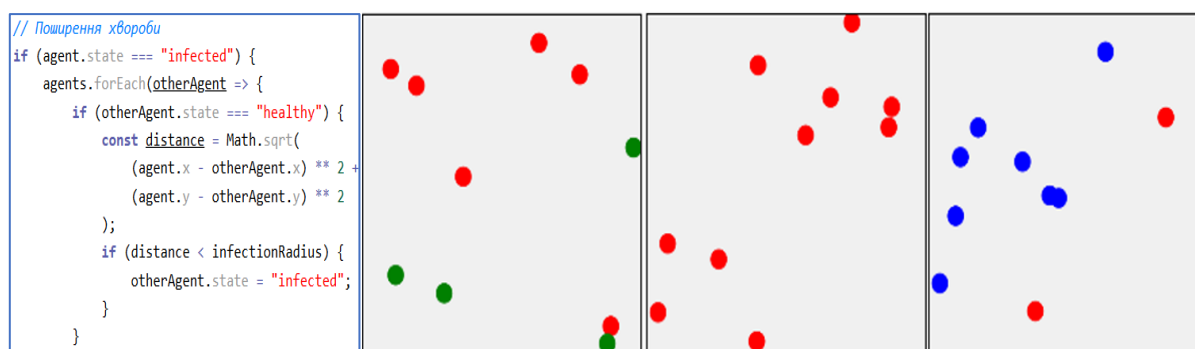


Рис. 2. Фрагмент програмного коду та симуляція поширення хвороби

Параметри агентів наступні:

– Кількість агентів, що використано в даній симуляції 200 (можлива довільна кількість агентів, задається користувачем).

– *Стан агентів*: Здоровий (зелений) – 60% - агент не заражений. Інфікований (червоний) – 40% (задається користувачем на початку симуляції) - агент заразний протягом 100 кроків. Вилікуваний/одужалий (синій) – виникає після одужання, агент більше не може заразитися.

– *Радіус зараження*: 2 клітинки.

– *Тривалість зараження*: 100 кроків, після чого агент стає таким, що одужав.

– *Швидкість руху*: 1 крок за один такт.

– *Початкові умови*: Розподіл агентів по сітці випадковий. Початковий стан кожного агента визначається з ймовірностями 60% (здоровий) і 40% (інфікований).

– *Зміна параметрів під час симуляції*: Інфікований агент заражає здорових агентів у межах свого радіуса зараження. Інфіковані агенти змінюють стан на "одужалий" після закінчення 100 тактів. Агенти рухаються випадково, відбиваючись від країв середовища.

Далі проведено три експерименти. При першому експерименті змінюється густина населення, яка визначається кількістю агентів на одиницю площі. Для цього послідовно встановлюються кілька рівнів густоти: низький 50 агентів, середній 100 агентів і високий 150 агентів. На кожному рівні густоти агенти випадковим чином розподіляються по сітці. Агенти можуть перебувати в різних станах: здорові, інфіковані або такі, що одужали.

Відсоток інфікованих та радіус зараження залишається тим же, що в початковій симуляції 40% та 2 клітинки відповідно.

На представленому графіку (Рис. 3) відображено динаміку кількості агентів у різних станах (здорові, інфіковані та ті, що одужали) залежно від часу (вимірюється в умовних кроках моделювання).

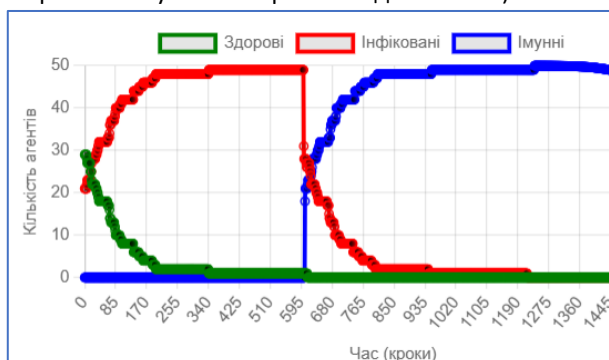
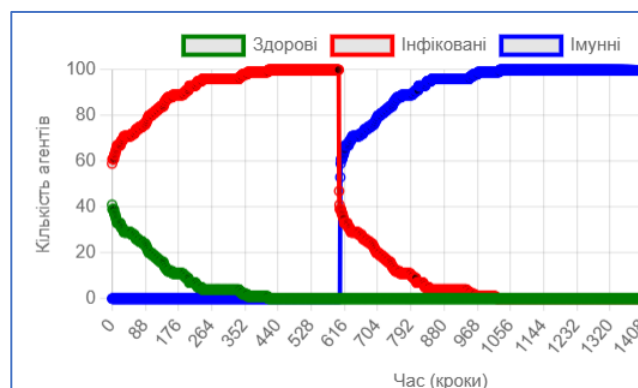
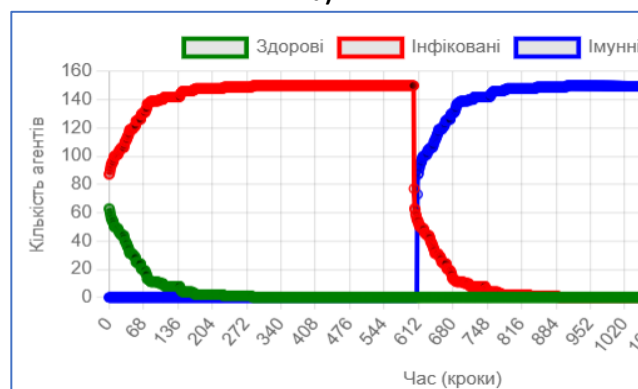


Рис. 3. Графік симуляції поширення хвороби при густоті 50 агентів/на одиницю площі

На початку симуляції 30 здорових агентів. Із часом їхня кількість поступово зменшується, оскільки інфекція поширюється серед популяції. До моменту приблизно 510 кроків всі здорові агенти заражаються, і їх кількість стає нульовою. Інфіковані агенти з'являються на перших кроках симуляції у кількості 20. Їх кількість швидко зростає, досягаючи піку на 425-510 кроках. Після цього кількість інфікованих різко зменшується, і на 680 кроках всі агенти або одужують, або отримують імунітет. На початку кількість агентів, що одужали дорівнює нулю. Після 510 кроків, коли частина агентів починає одужувати, кількість агентів, які одужали починає швидко зростати. До 680 кроків всі агенти стають такими, що одужали, і ця кількість залишається стабільною до кінця симуляції (Рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Графік симуляції поширення хвороби при густоті: а) 100 агентів, б) 150 агентів

Після завершення епідемії вся популяція стає здоровою, що свідчить про розвиток колективного імунітету.

Отже, за низької густоти інфекція поширюється повільніше, оскільки агенти розташовані на значній відстані один від одного, що зменшує кількість контактів між здоровими та інфікованими. Пік захворюваності настає пізніше та характеризується меншою кількістю

одночасно інфікованих агентів порівняно з іншими рівнями густоти. Крива інфікованих має пологий підйом і спад, що вказує на довшу тривалість епідемії.

При середній густоті інфекція поширюється швидше, оскільки ймовірність контактів між агентами зростає. Пік захворюваності настає раніше, а кількість одночасно інфікованих агентів досягає значно більшого значення порівняно з низькою густиною. Тривалість епідемії скорочується через швидше виснаження популяції здорових агентів.

За високої густоти інфекція поширюється найбільш інтенсивно, оскільки велика кількість агентів знаходиться у безпосередній близькості. Пік захворюваності настає дуже швидко і характеризується максимально можливою кількістю інфікованих агентів у популяції. Епідемія проходить стрімко, із найменшою тривалістю, оскільки всі здорові агенти заражаються за короткий проміжок часу.

Вища густина призводить до більшого піку захворюваності, що свідчить про критичний вплив частоти контактів між агентами на швидкість поширення інфекції. У популяціях із низькою густиною поширення інфекції обмежується через меншу кількість контактів, що сприяє розтягванню епідемії у часі. Отримані результати підтверджують, що густина населення є ключовим фактором, який впливає на динаміку поширення інфекції.

При другому експерименті варіюється радіус зараження, що визначає максимальну відстань, на якій інфікований агент може передати інфекцію здоровому агенту. Для кожного рівня густоти населення радіус зараження поступово змінюється, починаючи з мінімального, який відповідає безпосередньому контакту між агентами, і закінчуючи значеннями, що охоплюють більшу кількість сусідніх агентів (Рис. 5, а – в).

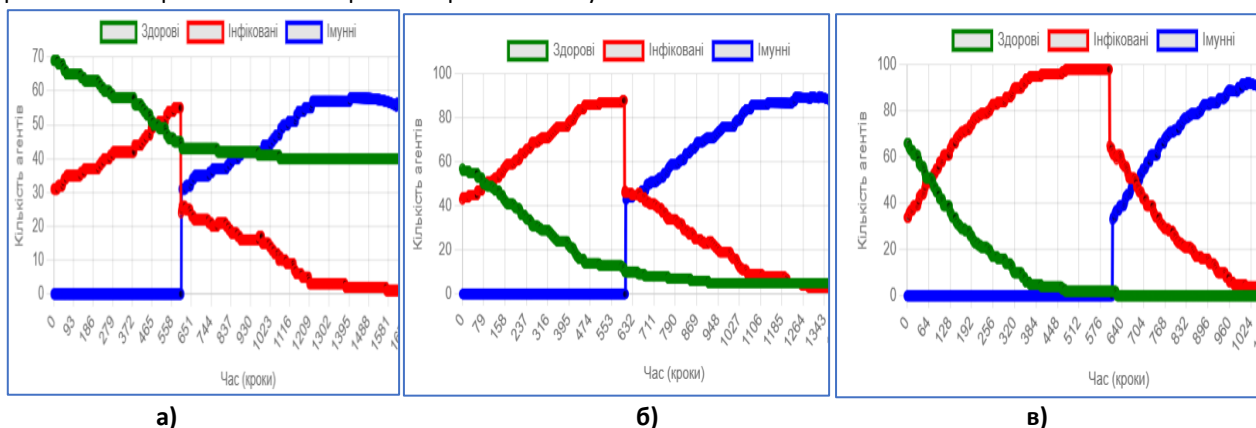


Рис. 5. Графік симуляції поширення хвороби при різних радіусах:

а) радіус 2, б) радіус 5, в) радіус 10

Отже, зі збільшенням радіуса зараження швидкість поширення інфекції зростає, а тривалість епідемії зменшується. Малий радіус зараження обмежує поширення інфекції, дозволяючи епідемії тривати довше, але з меншою інтенсивністю. Великий радіус зараження забезпечує швидке охоплення всієї популяції, створюючи різкий і інтенсивний пік інфікованості. При будь-якому радіусі зараження спостерігається стабільне завершення епідемії, коли всі агенти переходять у стан імунітету, але час досягнення цього стану та кількість пікових інфікованих змінюються залежно від радіуса.

При третьому експерименті варіюється час, протягом якого агент залишається інфікованим, до переходу у стан здорового. Встановлюються різні періоди інфекції, які імітують поведінку вірусів із різною тривалістю інфекційного періоду. Зі збільшенням тривалості інфекційного періоду інтенсивність епідемії та швидкість її поширення зростають. Короткий інфекційний період

сприяє розтягванню епідемії у часі, але зменшує інтенсивність піку захворюваності. Довгий інфекційний період забезпечує швидке поширення інфекції, але призводить до більш високих піків інфікованості. Загальна тривалість епідемії скорочується із зростанням тривалості інфекційного періоду, оскільки більша кількість агентів заражається у найкоротші терміни.

Серед ще можливих варіантів розширення даної системи є розширення індивідуальних характеристик агентів та їх взаємодії, що відбуваються в популяції. Крім того, АВМ дає змогу врахувати різноманітні стратегії контролю хвороби, наприклад, введення карантину, вакцинацію або лікування, що дозволяє аналізувати ефективність різних заходів у реальному часі.

Імітація поширення лісової пожежі за допомогою АВМ. АВМ в даному контексті дозволяє створювати детальну модель взаємодії між різними компонентами лісової екосистеми, такими як рослинність, метеорологічні умови

та вогонь, з урахуванням просторових і часових аспектів поширення пожежі. Симуляція показує дерева як агентів зі станами здорового, горючого або обгорілого. З імовірністю вогонь може перекинутися на сусідні дерева. Також на пожежу впливають зовнішні фактори, такі як напрямок і швидкість вітру. Вітер збільшує ймовірність перекидання вогню на сусідні дерева. Кожне дерево

може поширювати вогонь на сусідні дерева (вгору, вниз, ліворуч, праворуч) з певною ймовірністю залежно від швидкості вітру. Якщо дерево горить деякий час, воно згоряє.

Кожне дерево горить протягом фіксованого проміжку часу (як задається користувачу), перш ніж перетворитися на попіл (Рис. 6).

```
// Оновлення стану лісу (поширення пожежі)
function updateForest() {
  forest.forEach(tree => {
    if (tree.state === 'burning') {
      tree.burningTime++;
      if (tree.burningTime > 11.6) {
        tree.state = 'burnt'; // Дерево
        деякий час обгорає
      }
      // Поширити вогонь на сусідні дерева з
      певною ймовірністю
      spreadFire(tree);
    }
  });
}
```

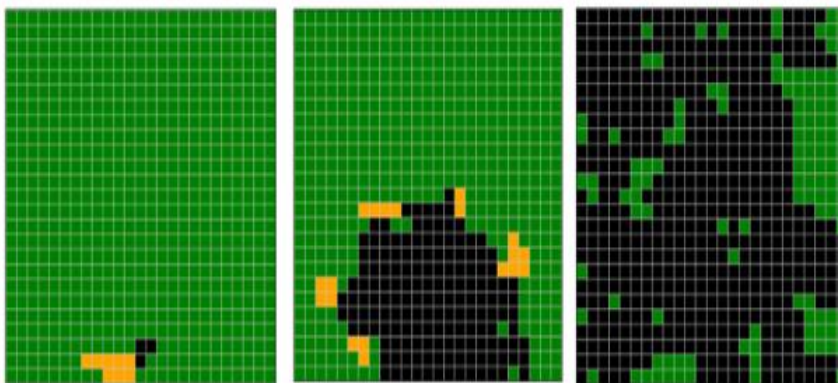


Рис. 6. Фрагмент програмного коду та симуляція лісової пожежі

Параметри агентів наступні:

- *Стан дерев*: Здорове (зелений) – 80% - дерево не горить. Горюче (помаранчевий) – активується при контакті з вогнем, дерево активно горить. Згоріле (чорний) – виникає після завершення фази горіння, дерево, що більше не бере участі в поширенні вогню.
- *Тривалість горіння одного дерева*: 50 кроків.
- *Ймовірність поширення вогню*: Базова – 0.3. Зі збільшенням швидкості вітру – до 0.7.
- *Початкові умови*: Задано одну осередкову точку загоряння (випадкова клітинка в сітці). Всі інші дерева знаходяться в стані "здорове".
- *Зміна параметрів під час симуляції*: Коли дерево підпалюється, його стан змінюється на "горюче". Після 50 кроків дерево стає "згорілим". Горюче дерево з ймовірністю 30–70% поширює вогонь на сусідні дерева (верх, низ, ліворуч, праворуч).

АВМ дозволяє не тільки прогнозувати розвиток пожежі в реальному часі, а й проводити аналіз ефективності різних стратегій боротьби з вогнем, таких як створення протипожежних ліній, контроль за рівнем вологості в ґрунті чи застосування спеціальних технологій для гасіння вогню. За допомогою симуляцій можна оцінити ймовірні наслідки різних сценаріїв, визначити найбільш вразливі ділянки лісу та спрогнозувати зони ризику, що є важливим для планування дій в умовах надзвичайних ситуацій.

Імітація взаємодії в екосистемі через АВМ. АВМ дозволяє створити математичні моделі, які відтворюють поведінку окремих агентів (організмів, рослин, тварин) і взаємодії між ними в межах екосистеми, що дає

можливість більш глибоко аналізувати динаміку природних процесів.

Одним із класичних прикладів такої взаємодії є модель хижаків, наприклад, вовків, і їх здобичі, наприклад, кроликів. В даному контексті АВМ дозволяє дослідити, як зміни в популяціях цих видів можуть впливати на їх чисельність та загальний стан екосистеми. Крім того, агенти взаємодіють між собою через механізми полювання (вовки намагаються зловити кроликів) та здобичі (кролики розмножуються, щоб підтримати свою популяцію).

Вовки, як хижаки, полюють на кроликів, щоб забезпечити своє виживання та відтворення. Вовки перевіряють відстань до кроликів. Якщо вовк наближається до кролика, він "з'їдає" його, отримуючи енергію кролика. З іншого боку, кролики розмножуються, що створює потік нових особин, необхідних для збереження популяції. Якщо рівень енергії кролика перевищує певний поріг, він може створити новий "нащадок" поруч із собою, витрачаючи частину своєї енергії.

Кролики – агенти, що рухаються по екосистемі, споживають їжу для відновлення енергії та можуть розмножуватися. Втрачають енергію за кожен крок. Якщо енергія кролика досягає нуля, він стає "мертвим" і перестає рухатися.

Вовки – хижаки, які полюють на кроликів для підтримання енергії. Вони втрачають енергію під час руху, а при досягненні нульової енергії стають "мертвими". Їжа

– розподілена по всьому полю. Кролики можуть споживати їжу для відновлення енергії (Рис.7).

Параметри агентів наступні:

– *Види агентів:* Кролики (здобич) – 100 особин.

Атрибути кроликів:

- *Початкова енергія:* 50.
- Розмноження відбувається, якщо енергія ≥ 100 (втрачається 50 після створення нового кролика).
- *Втрата енергії за хід:* 1.
- *Відновлення за їжу* – +30.

Вовки (хижаки) – 20 особин.

Атрибути вовків:

– *Початкова енергія:* 70.

```
// Репродукція кроликів
function reproduceRabbits() {
  let newRabbits = [];
  rabbits.forEach(rabbit => {
    if (rabbit.energy >= 15) { // Якщо у кролика
      // достатньо енергії, він розмножується
      rabbit.energy -= 13; // Енергія витрачається на
      // розмноження
      newRabbits.push({
        x: rabbit.x + Math.random() * 20 - 10, //
        // Новий кролик поруч
        y: rabbit.y + Math.random() * 20 - 10,
        energy: rabbit.energy
      });
    });
  });
  rabbits = rabbits.concat(newRabbits); // Додаємо нових
  // кроликів в екосистему
```

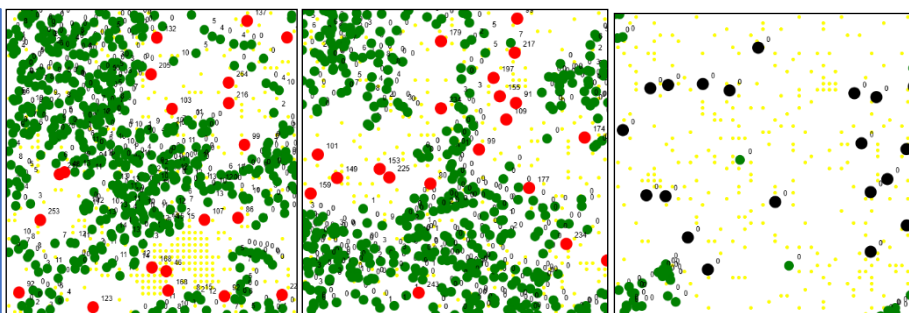


Рис. 7. Фрагмент програмного коду та симуляція взаємодії в екосистемі

АВМ цього процесу дозволяє не лише спостерігати за динамікою популяцій у реальному часі, а й проводити експерименти з різними параметрами, такими як зміна рівня хижацтва або можливість кроликів до адаптації та уникання хижаків. Вивчення цих процесів допомагає глибше зрозуміти механізми регулювання популяцій та їх взаємодії, а також може бути застосоване для оптимізації

стратегій збереження біорізноманіття та управління природними ресурсами.

Усі моделі використовують HTML `<canvas>` для візуалізації, а також інтерактивні налаштування для регулювання параметрів під час роботи симуляції.

Далі в Табл. 3-6 наведено взаємодію компонентів платформи AgentScript за MVC.

Табл. 3. Компонент Model (Модель) для кожної симуляції

Параметри	1 симуляція	2 симуляція	3 симуляція
Агенти	Здоровий, інфікований, одужалий. Радіус зараження: 2 клітинки. Час інфікування: 100 кроків.	Стан дерева: здорове (зелений), в огні (помаранчевий), згоріле (чорний). Час горіння: 50 кроків. Ймовірність поширення вогню: базова – 30%, зі вітром – 70%.	Кролики: мають енергію, розмножуються за енергії ≥ 100 . Вовки: полюють на кроликів, отримуючи енергію. Їжа: генерується випадково на сітці.
Середовище	Розмір сітки: 100×100 клітинок.	Розмір сітки: 50×50 клітинок.	Розмір сітки: 100×100 клітинок.
Граничні умови	Агенти відбиваються від країв сітки.	Вогонь за межі сітки не поширюється.	Рух агентів обмежений межами сітки.

Правила	Інфікований агент заражає здорових агентів у радіусі. Зміна стану агента: інфікований – одужалий.	Горюче дерево поширює вогонь на сусідні дерева з певною ймовірністю. Після 50 кроків дерево стає згорілим.	Кролики шукають їжу, втрачають енергію та розмножуються. Вовки полюють на кроликів, втрачаючи енергію, якщо не знаходять їжу.
---------	---	--	---

Табл. 4. Компонент View (Подання) для кожної симуляції

Параметри	1 симуляція	2 симуляція	3 симуляція
Візуалізація станів	Відображення агентів різного стану: зелений (здоровий), червоний (інфікований), синій (такий, що одужав).	Відображення дерева різних станів у реальному часі.	Відображення агентів: кролики, вовки та їжа.
Динамічне оновлення	Динамічне оновлення положення агентів і станів у реальному часі.	Інтерактивне налаштування швидкості симуляції.	Графічне представлення змін станів (наприклад, зникнення кроликів або вовків).
Інструмент візуалізації	Використання HTML <canvas> для 2D-візуалізації.	Використання HTML <canvas> для 2D-візуалізації.	Використання HTML <canvas> для 2D-візуалізації.

Табл. 5. Компонент Controller (Контролер) для кожної симуляції

Параметри	1 симуляція	2 симуляція	3 симуляція
Налаштування параметрів	Обробка налаштувань, таких як радіус зараження та тривалість інфікування.	Обробка вводу користувача для зміни швидкості симуляції або початкового стану дерев.	Управління параметрами, такими як кількість їжі, кроликів і вовків.
Моделювання взаємодій	Контроль руху агентів і їх взаємодій.	Передача даних до Model для розрахунку поширення вогню.	Передача даних про взаємодії (полювання, розмноження) Model.
Оновлення стану	Оновлення станів агентів після кожного кроку симуляції.	Оновлення View для відображення стану дерев.	Оновлення View після кожного кроку.

Табл. 6. Схема взаємодії для кожної симуляції

Параметри	1 симуляція	2 симуляція	3 симуляція
Налаштування параметрів	Користувач налаштовує радіус зараження та кількість інфікованих.	Користувач визначає початкові умови (точка займання).	Користувач задає початкові параметри (кількість кроликів і вовків).
Передача даних до Model	Controller передає ці дані до Model.	Controller передає ці дані до Model.	Controller передає ці дані до Model.
Розрахунок у Model	Model розраховує зміну стану агентів.	Model розраховує поширення вогню.	Model розраховує зміну енергії та стану агентів.
Оновлення View	Controller передає оновлені дані до View.	Controller оновлює View.	Controller оновлює View.
Візуалізація стану	View відображає оновлені стани агентів.	View показує динаміку горіння.	View візуалізує динаміку популяцій.

Як було зазначено вище, поділ на компоненти компонент може бути незалежно змінений або дозволяє спростити процес розробки, оскільки кожен вдосконалений без впливу на інші частини системи.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати дослідження підтверджують, що AgentScript є ефективним інструментом для створення агентних моделей у веб-середовищі. Виявлено, що платформа демонструє низку переваг, які роблять її конкурентоспроможною у порівнянні з популярними інструментами, такими як NetLogo та Repast. Зокрема, основними перевагами AgentScript є простота використання, доступність через браузер та легкість інтеграції з сучасними веб-технологіями.

Однією з ключових особливостей платформи є її архітектура MVC, яка сприяє організації коду та забезпечує модульність моделей. Це дозволяє користувачам чітко розділяти логіку, дані та візуалізацію, що підвищує ефективність розробки та подальшого налагодження моделей. Використання HTML5 для візуалізації дає можливість створювати інтерактивні графічні зображення у реальному часі, що є важливим для навчальних і демонстраційних цілей. Платформа також може бути використана у сферах, не розглянутих у статті, таких як освітні експерименти, де студенти можуть моделювати різноманітні сценарії, або при розробці адаптивних систем, що змінюють свою поведінку залежно від умов середовища.

Проведені експерименти підтвердили, що AgentScript добре підходить для моделювання систем середньої складності (в прикладах - поширення хвороб, лісові пожежі та взаємодія в екосистемах). Ці моделі дозволили оцінити динаміку систем у різних сценаріях і продемонстрували здатність платформи гнучко налаштувати параметри моделювання.

Водночас у ході дослідження виявлено певні обмеження AgentScript. Платформа менш придатна для роботи з великими обсягами даних або надзвичайно складними моделями через обмеження продуктивності, характерні для браузерного середовища. Крім того, відносно невелика кількість готових бібліотек та прикладів ускладнює початок роботи для новачків.

ВИСНОВКИ

У статті досліджено можливості використання платформи AgentScript для АВМ складних систем у веб-середовищі. На основі проведеного аналізу виявлено, що AgentScript є ефективним інструментом для швидкого прототипування, навчання та реалізації моделей середнього рівня складності для моделювання завдяки простоті використання, доступності через браузер і інтеграції з сучасними веб-технологіями.

Основними перевагами платформи є:

модульна архітектура Model-View-Controller, яка спрощує розробку та підтримку моделей;
підтримка HTML5 і JavaScript, що забезпечує інтерактивну візуалізацію даних у реальному часі;
доступність для користувачів із базовими технічними знаннями завдяки мінімальним вимогам до встановлення.

Практичні приклади моделювання, представлені у статті, включають симуляцію трьох моделей. Вони демонструють гнучкість і адаптивність AgentScript для вирішення різноманітних задач.

Водночас виявлено певні обмеження платформи, такі як зниження продуктивності при роботі з великими наборами даних та відсутність розвиненої бібліотеки готових моделей. Це визначає її оптимальну сферу застосування – навчальні проекти, експериментальні дослідження та розробку середньо складних моделей.

Перспективи розвитку AgentScript включають інтеграцію з хмарними обчисленнями для підвищення масштабованості та продуктивності, а також використання інтерфейсів на основі штучного інтелекту для автоматизації аналізу й оптимізації моделей. Це відкриває нові можливості для застосування платформи в галузях, що потребують обробки великих даних і динамічного моделювання.

Таким чином, AgentScript можна розглядати як перспективне рішення для агентного моделювання у веб-середовищі, яке поєднує простоту, доступність і функціональність. Подальші наробки можуть бути спрямовані на розширення можливостей платформи, інтеграцію із зовнішніми джерелами даних та покращення її продуктивності для роботи з моделями більшої складності.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Bora S., Emek S. Agent-Based modeling and simulation of biological systems. *Modeling and computer simulation*. 2019. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80070>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [2] Grimm V., Railsback S. F. Agent-Based models in ecology: patterns and alternative theories of adaptive behaviour. *Agent-Based computational modelling*. Heidelberg. P. 139–152. URL: https://doi.org/10.1007/3-7908-1721-x_7. Дата звернення: 08.12.2024.
- [3] Klein, D., Marx, J., Fischbach, K. Agent-based modeling in social science, history, and philosophy. *An introduction*. 2018. Vol. 43, No. 1 (163), Special Issue: Agent-Based Modeling in Social Science, History, and Philosophy (2018), P. 7-27. URL: <https://doi.org/10.12759/hsr.43.2018.1.7-27>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [4] Challenges, tasks, and opportunities in modeling agent-based complex systems / L. An et al. *Ecological modelling*. 2021. Vol. 457. P. 109685. URL:

- <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109685>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [5] Agent Based Modelling and Simulation tools: a review of the state-of-art software / S. Abar et al. Computer science review. 2017. Vol. 24. P. 13–33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [6] Allan, R.J.: Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools. 2010. In: Technical Report DL-TR-2010-007, Science and Technology Facilities Council. Дата звернення: 08.12.2024.
- [7] Tobias, R., Hofmann, C.: Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation. In: Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2004. Vol. 7. Дата звернення: 08.12.2024.
- [8] Kravari K., Bassiliades N. A survey of agent platforms. Journal of artificial societies and social simulation. 2015. Vol. 18, no. 1. URL: <https://doi.org/10.18564/jasss.2661>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [9] Allan, R. J. (2010). Survey of agent based modelling and simulation tools (pp. 1362-0207). New York: Science & Technology Facilities Council. Дата звернення: 08.12.2024.
- [10] Маслова Н. А. Використання інтелектуальних агентів при вирішенні завдань розподілу ресурсів / Н. А. Маслова, О. В. Мовчан // Штучний інтелект. – 2014 . – №3. – С. 80-89. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/II_2014_3_11.
- [11] P. Pimenta, “Application of model-driven engineering to multi-agent systems : a language to model behaviors of reactive agents”, Diss. Université Montpellier, 2017. Дата звернення: 08.12.2024.
- [12] Collier N. T., Ozik J., Tatara E. R. Experiences in Developing a Distributed Agent-based Modeling Toolkit with Python. 2020 IEEE/ACM 9th Workshop on Python for High-Performance and Scientific Computing (PyHPC), GA, USA, 13 November 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/pyhpc51966.2020.00006>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [13] AgentScript. [Онлайн]. URL: <http://agentscript.org/>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [14] Модель-вид-контролер. [Онлайн]. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Модель-вид-контролер>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [15] Code smells for Model-View-Controller architectures / M. Aniche et al. Empirical Software Engineering. 2017. Vol. 23, no. 4. P. 2121–2157. URL: <https://doi.org/10.1007/s10664-017-9540-2>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [16] Three.js. [Онлайн]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Three.js>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [17] Coderep. [Онлайн]. URL: <https://coderep.io/your-work>. Дата звернення: 08.12.2024.
- [18] Casabona J. HTML and CSS: visual quickstart guide. Pearson Education, Limited, 2021. Дата звернення: 08.12.2024.

USING AGENTSCRIPT TO PRODUCE MULTI-LEVEL AGENT-BASED MODELLING MODELS

Yelyzaveta Yezhova, Nataliia Maslova

The relevance of the study is driven by the need to find affordable and effective tools for modelling complex

systems that would be suitable for both research and educational purposes. Existing platforms, although providing significant opportunities, are often difficult to learn, which creates barriers to their widespread use. The purpose of the article is to study the capabilities of the AgentScript platform for creating agent-based models in the web environment, as well as to analyse its advantages and limitations in comparison with traditional tools. The practical significance of the work lies in highlighting the ways in which AgentScript can be used for rapid prototyping, development of models of medium complexity and interactive display. The tool allows to implement modelling without the need to install specialised software, which contributes to its popularisation among students and researchers. The scientific significance of the work lies in determining the prospects of using AgentScript for modelling multilevel systems. Particular attention is paid to the analysis of the platform architecture based on the Model-View-Controller template, which ensures efficient modelling. The article provides an overview of AgentScript functionality, describes the process of creating agents, environments and behavioural rules, demonstrates examples of implementing models for studying the spread of diseases, simulating forest fires and interactions in ecosystems, and compares the platform with other tools, which emphasises its advantages, such as accessibility and ease of integration with modern web technologies. The results show that AgentScript is an effective tool for research and education in the field of agent-based modelling, which is able to meet the needs of users with different levels of training.

Keywords: multi-agent systems, modelling, prototyping, AgentScript, dynamic systems, web technologies, simulation, data visualisation.

REFERENCES

- [1] Bora S., Emek S. Agent-Based modeling and simulation of biological systems. Modeling and computer simulation. 2019. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80070>. Accessed: 08.12.2024.
- [2] Grimm V., Railsback S. F. Agent-Based models in ecology: patterns and alternative theories of adaptive behaviour. Agent-Based computational modelling. Heidelberg. P. 139–152. URL: https://doi.org/10.1007/3-7908-1721-x_7. Accessed: 08.12.2024.
- [3] Klein, D., Marx, J., Fischbach, K. Agent-based modeling in social science, history, and philosophy. An introduction. 2018. Vol. 43, No. 1 (163), Special Issue: Agent-Based Modeling in Social Science, History, and Philosophy (2018), P. 7-27. URL: <https://doi.org/10.12759/hsr.43.2018.1.7-27>. Accessed: 08.12.2024.
- [4] Challenges, tasks, and opportunities in modeling agent-based complex systems / L. An et al. Ecological modelling. 2021. Vol. 457. P. 109685. URL:

- <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109685>. Accessed: 08.12.2024.
- [5] Agent Based Modelling and Simulation tools: a review of the state-of-art software / S. Abar et al. *Computer science review*. 2017. Vol. 24. P. 13–33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>. Accessed: 08.12.2024.
- [6] Allan, R.J.: Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools. 2010. In: Technical Report DL-TR-2010-007, Science and Technology Facilities Council. Accessed: 08.12.2024.
- [7] Tobias, R., Hofmann, C.: Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2004. Vol. 7. Accessed: 08.12.2024.
- [8] Kravari K., Bassiliades N. A survey of agent platforms. *Journal of artificial societies and social simulation*. 2015. Vol. 18, no. 1. URL: <https://doi.org/10.18564/jasss.2661>. Accessed: 08.12.2024.
- [9] Allan, R. J. (2010). Survey of agent based modelling and simulation tools (pp. 1362-0207). New York: Science & Technology Facilities Council. Accessed: 08.12.2024.
- [10] Maslova N. A., Movchan O. V. Use of intelligent agents in solving resource allocation problems // *Artificial Intelligence*. – 2014. – No. 3. – P. 80–89. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/II_%202014%20_3_11. Accessed: 08.12.2024.
- [11] P. Pimenta, “Application of model-driven engineering to multi-agent systems: a language to model behaviors of reactive agents”, Diss. Université Montpellier, 2017. Accessed: 08.12.2024.
- [12] Collier N. T., Ozik J., Tatara E. R. Experiences in Developing a Distributed Agent-based Modeling Toolkit with Python. 2020 IEEE/ACM 9th Workshop on Python for High-Performance and Scientific Computing (PyHPC), GA, USA, 13 November 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/pyhpc51966.2020.00006>. Accessed: 08.12.2024.
- [13] AgentScript. [Online]. URL: <http://agentscript.org/>. Accessed: 08.12.2024.
- [14] Model-view-controller. [Online]. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Model-view-controller>. Accessed: 08.12.2024.
- [15] Code smells for Model-View-Controller architectures / M. Aniche et al. *Empirical Software Engineering*. 2017. Vol. 23, no. 4. P. 2121–2157. URL: <https://doi.org/10.1007/s10664-017-9540-2>. Accessed: 08.12.2024.
- [16] Three.js. [Online]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Three.js>. Accessed: 08.12.2024.
- [17] Codepen. [Online]. URL: <https://codepen.io/your-work>. Accessed: 08.12.2024.
- [18] Casabona J. *HTML and CSS: visual quickstart guide*. Pearson Education, Limited, 2021. Accessed: 08.12.2024.