

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

на тему «Метод та кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору»

КвРКІП. 015162.18.02.03 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-2

  
Підпис

Дмитро РИБАНЧУК  
Ініціали, прізвище

Керівник канд. техн. наук, доцент  
Науковий ступінь, вчене звання

  
Підпис

Катерина БЕРЕЗЬКА  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри КІС,

PhD Ольга ПАВЛОВА

28 04 2025 р.



Хмельницький, 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 1 ” 09 2024 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Дмитру РИБАНЧУКУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод та кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Керівник проекту (роботи) Катерина БЕРЕЗЬКА к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 №8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Технологія комп'ютерного зору, аналіз відомих рішень та систем енергетичного моніторингу





Методи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Експериментальні дослідження застосування кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КІС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КІС		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2024р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

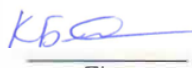
№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напряму дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	01.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих рішень та систем енергетичного моніторингу	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка методів енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – проектування кіберфізичної система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – експериментальні дослідження	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2025	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 20.05.2025	

Студент

  
Підпис

Дмитро РИБАНЧУК  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Катерина БЕРЕЗЬКА  
Ініціали, прізвище

## РЕФЕРАТ

Тема: Метод та кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Автор роботи: Рибанчук Д.М.

Керівник роботи: Березька К.М.

Пояснювальна записка: 71 с., 24 рис., 1 табл., 2 дод., 80 джерел.

МОНІТОРИНГ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ДАВАЧ, ESP32 CAM

Об'єктом дослідження є процес енергетичного моніторингу житлових будівель.

Предметом дослідження є кіберфізична система та метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору.

Метою роботи є автоматизація енергетичного моніторингу житлових будівель за допомогою кіберфізичної системи на основі комп'ютерного зору.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися математичні та аналітичні методи дослідження, теоретико-множинні моделі, методи штучного інтелекту та комп'ютерного зору для аналізу зображень та даних з сенсорів.

Наукова новизна отриманих результатів:

– удосконалено метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, який відрізняється від відомих аналізом відеопотоків з модулів ESP32-CAM, обробка яких здійснюється на Raspberry Pi в кожному окремому потоці, що дозволило здійснювати автоматичне визначення стану електроприладів без використання додаткових сенсорів споживання енергії.

– удосконалено кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, яка відрізняється від відомих інтеграцією функцій керування та моніторингу електроприладами, а також визначення енергетичних метрик, що дозволило підвищити ефективність енергетичного менеджменту.

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропонована кіберфізична система енергетичного моніторингу на основі комп'ютерного зору може бути реалізована як у вигляді самостійного рішення так і в складі інтегрованих систем Інтернету речей.

У першому розділі досліджено технологію комп'ютерного зору, здійснено аналіз відомих рішень та систем енергетичного моніторингу, виявлено їх переваги та недоліки. Виконано постановку задачі дослідження.

У другому розділі досліджено особливості обробки відеопотоків із модуля ESP32-CAM у контексті комп'ютерного зору для енергетичного моніторингу приміщень, запропоновано методи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору та визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору.

У третьому розділі сформульовано функції моніторингу та керування енергоспоживанням у кіберфізичній системі, запропоновано структуру кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, визначено потоки передачі інформації в середині кіберфізичної системи, запропоновано модель процесу функціонування кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору.

У четвертому розділі проведено експериментальне дослідження оцінки ефективності запропонованих рішень, розроблено прототип клієнтського додатку для кіберфізичної системи, що дозволяє відстежувати стан побутових пристроїв та метрик енергетичного моніторингу.

## ЗМІСТ

<b>СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....</b>	<b>4</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>1 ТЕХНОЛОГІЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ. АНАЛІЗ ВІДОМИХ РІШЕНЬ ТА СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ .....</b>	<b>8</b>
1.1 Технологія комп'ютерного зору в енергетичному секторі.....	8
1.2 Застосування технології комп'ютерного зору у концепції Інтернету речей .	11
1.3 Аналіз відомих рішень та систем енергетичного моніторингу.....	13
1.4 Постановка задачі дослідження.....	23
<b>2 МЕТОДИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ .....</b>	<b>25</b>
2.1 Особливості обробки відеопотоків із ESP32-CAM у контексті комп'ютерного зору для енергетичного моніторингу приміщень .....	25
2.2 Метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору.....	26
2.3 Метод визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору .....	37
2.4 Висновки .....	43
<b>3 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ .....</b>	<b>45</b>
3.1 Функції моніторингу та керування енергоспоживанням у кіберфізичній системі .....	45
3.2 Структура кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору.....	46
3.3 Модель процесу функціонування кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору.....	53
3.4 Висновки .....	56

<b>4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ .....</b>	<b>58</b>
4.1 Реалізація прототипу кіберфізичної системи енергетичного моніторингу ...	58
4.2 Створення та розгортання моделі комп'ютерного зору у Roboflow .....	61
4.3 Програмна реалізація веб інтерфейсу для кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору	70
4.4 Висновки .....	73
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>74</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>76</b>
<b>ДОДАТОК А Копія наукової публікації.....</b>	<b>84</b>
<b>ДОДАТОК Б Копія презентації до захисту кваліфікаційної роботи.....</b>	<b>87</b>

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ПЗ – програмне забезпечення

ЕМ – енергетичний моніторинг

КЗ – комп'ютерний зір

КФС – кіберфізична система

ПК – пристрій користувача

IoT – Internet of Things

SEMS – smart energy management system

## ВСТУП

Актуальність теми проєкування та дослідження кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору зростає в умовах глобальних викликів щодо енергетичної ефективності та сталого розвитку. Зважаючи на зростаючі витрати на енергоресурси та постійний розвиток технологій, важливість автоматизації енергетичних систем в житлових будівлях стає очевидною. Сучасні підходи, які включають використання Інтернету речей та кіберфізичних систем, дозволяють інтегрувати різноманітні технології для моніторингу та оптимізації споживання енергії. Особливо значущим є застосування комп'ютерного зору, який дає змогу більш точно та ефективно контролювати стан будівельних елементів, а також виявляти дефекти чи проблеми, що можуть спричиняти надмірні витрати енергії. Також важливо, що при використанні комп'ютерного зору не виникає необхідності в додаткових з'єднаннях чи проводах, оскільки система може працювати безпосередньо з існуючими камерами та сенсорами

Необхідність розробки такої системи зумовлена необхідністю інтеграції новітніх технологій у повсякденне життя для забезпечення енергетичної ефективності та зниження впливу на навколишнє середовище. Використання таких платформ як Raspberry Pi та ESP32 CAM дозволяє створити доступну та потужну інфраструктуру для моніторингу енергоспоживання в реальному часі. Моделі комп'ютерного зору, що обробляють зображення, також дозволяють автоматично аналізувати стан різних елементів будівлі, таких як вікна, двері, вентиляція, що має прямий вплив на енергоспоживання.

У даній роботі пропонується кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, яка орієнтована на автоматичний контроль стану електричних пристроїв та показів цифрового лічильника електроенергії. Використовуючи камери та сенсори, система здійснює моніторинг робочого стану електричних приладів, таких як освітлення, побутові прилади та інші енергоспоживачі, а також зчитує покази цифрового лічильника.

Завдяки застосуванню комп'ютерного зору, система може точно і безпечно визначати стан пристроїв без потреби в додаткових підключеннях чи складних з'єднаннях, забезпечуючи зручний та ефективний процес моніторингу енергоспоживання.

Метою роботи є автоматизація енергетичного моніторингу житлових будівель за допомогою кіберфізичної системи на основі комп'ютерного зору.

Об'єктом дослідження є процес енергетичного моніторингу житлових будівель.

Предметом дослідження є кіберфізична система та метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору.

Методи дослідження. У роботі було застосовано наступні теорії та засоби:

- математичні та аналітичні методи дослідження;
- теоретико-множинні моделі;
- методи штучного інтелекту та комп'ютерного зору для аналізу зображень та даних з сенсорів.

Наукова новизна роботи:

- удосконалено метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, який відрізняється від відомих аналізом відеопотоків з модулів ESP32-CAM, обробка яких здійснюється на Raspberry Pi в кожному окремому потоці, що дозволило здійснювати автоматичне визначення стану електроприладів без використання додаткових сенсорів споживання енергії.

- удосконалено кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, яка відрізняється від відомих інтеграцією функцій керування та моніторингу електроприладами, а також визначення енергетичних метрик, що дозволило підвищити ефективність енергетичного менеджменту.

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропонована кіберфізична система енергетичного моніторингу на основі комп'ютерного зору може бути реалізована як у вигляді самостійного рішення так і в складі інтегрованих систем Інтернету речей.

Рекомендації з використання результатів роботи. Результати цієї роботи можуть бути застосовані при розробці інтелектуальних систем, спрямованих на оптимізацію споживання енергоресурсів.

Публікації. За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію у Збірнику наукових праць за матеріалами Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (Тернопіль, 5 листопада, 2024. С. 75-76).

Структура та об'єм дипломної роботи. Дипломна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновку та додатків, її повний зміст 99 сторінок, основний зміст викладено на 75 сторінках, 2-х додатках на 18 сторінках, містить 24 рисунки, 1 таблицю, включає 80 найменувань вітчизняної та зарубіжної літератури.

# 1 ТЕХНОЛОГІЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ. АНАЛІЗ ВІДОМИХ РІШЕНЬ ТА СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

## 1.1 Технологія комп'ютерного зору в енергетичному секторі

Комп'ютерний зір, як передова галузь штучного інтелекту, охоплює методи, що дозволяють комп'ютерним системам розуміти візуальні дані. На початкових етапах комп'ютерний зір зводився до розпізнавання зображень, розбиваючи їх на одномірний масив пікселів і використовуючи межі та контури для створення 3D-моделей із 2D-даних. Однак з розвитком технологій комп'ютерний зір значно вдосконалився, включивши такі методи, як об'єктно-орієнтоване розпізнавання та згорткові нейронні мережі (CNN). Останні активно застосовуються, наприклад, у соціальних мережах для розпізнавання осіб на фотографіях, де алгоритми CNN навчаються розпізнавати характеристики обличчя користувача та обчислювати ймовірність того, що нове зображення відповідає певному користувачеві.

В енергетичному секторі технології комп'ютерного зору стали важливим інструментом для забезпечення ефективного моніторингу та діагностики устаткування, оптимізації процесів і підвищення рівня безпеки. Одним з основних напрямків є застосування комп'ютерного зору для моніторингу стану підстанційного обладнання, такого як трансформатори, автоматичні вимикачі, конденсатори, блискавкозахисні пристрої та комбіновані електричні пристрої (рис. 1.1). Завдяки автоматизованому ранньому виявленню несправностей і аномалій можна значно знизити витрати на експлуатацію і обслуговування обладнання та підвищити якість електропостачання. Порівняно з людським оглядом, комп'ютерний зір є високоточним, консистентним, об'єктивним і повністю автоматизованим.

Іншим важливим застосуванням є розпізнавання і цифрування аналогових контролів, таких як сигналізатори, положення стрілок на аналогових приладах, стан вимикачів і рівень рідини в трансформаторному маслі. Це дозволяє автоматизувати зняття показань з лічильників підстанцій без участі людини, що є

необхідним для прогнозуючого моніторингу та виявлення аномалій, а також попередження несправностей обладнання.



Рисунок 1.1 – Виявлення стану перемикачів для промислового електричного обладнання [14]

Використання комп'ютерного зору дозволяє також автоматично виявляти сторонні об'єкти, які можуть викликати відмови в електропостачанні, а також здійснювати загальний моніторинг стану підстанцій для постійного контролю за чистотою та якістю обслуговування.

В умовах небезпечних виробничих середовищ технології глибокого навчання використовуються для реального часу перевірки наявності засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), таких як каски, робочий одяг і жилети. Це автоматизує контроль за дотриманням норм безпеки, замінюючи традиційний контроль і забезпечуючи значні економії часу і коштів, а також поліпшення точності та швидкості виявлення порушень.



Рисунок 1.2 – Виявлення сторонніх об’єктів у лініях електропередачі [14]

Для ефективного моніторингу інфраструктури енергетичних підприємств, зокрема в підстанціях, використовуються системи комп’ютерного зору для автоматичного спостереження за станом вимикачів, що дозволяє запобігти аваріям і неполадкам в електропостачанні. Камери, що використовуються для спостереження, можуть бути переобладнані для цих цілей, що значно знижує витрати та спрощує установку і обслуговування в порівнянні з використанням окремих сенсорів для кожного вимикача.



Рисунок 1.3 – Виявлення ЗІЗ за допомогою технології комп’ютерного зору [14]

Комп'ютерний зір також застосовується для інспекції ліній електропередачі. Раніше такі інспекції здійснювались вручну або з використанням дронів, що було неефективно і затратно. Технології комп'ютерного зору дозволяють автоматизувати цей процес, зокрема для виявлення несправностей, таких як поломки утримувачів ізолятора. Це підвищує ефективність інспекцій, зменшує ризик відключень і пошкодження інфраструктури.

Зважаючи на виклики, з якими стикається енергетичний сектор через зміни клімату, варіативність попиту, диверсифікацію та децентралізацію виробництва енергії, застосування технологій штучного інтелекту, зокрема комп'ютерного зору, дозволяє знизити витрати і втрати, а також прискорити впровадження відновлювальних джерел енергії.

## 1.2 Застосування технології комп'ютерного зору у концепції Інтернету речей

У контексті сучасних технологічних трансформацій комп'ютерний зір відіграє критично важливу роль у реалізації концепції Інтернету речей (IoT). Ця технологія забезпечує унікальну можливість автоматизованого сприйняття та аналізу візуальної інформації, що принципово змінює підходи до моніторингу, діагностики та управління складними системами.

Застосування комп'ютерного зору в IoT охоплює широкий спектр галузей та напрямків. У промисловості він дозволяє здійснювати інтелектуальний контроль виробничих процесів, миттєво ідентифікуючи потенційні дефекти або відхилення від технологічних норм. На транспорті комп'ютерний зір забезпечує розпізнавання номерних знаків, контроль дорожнього руху та підтримку систем автономного водіння.

Особливого значення технологія набуває в системах безпеки та відеоспостереження. Інтелектуальні камери з функціями комп'ютерного зору здатні не просто реєструвати події, але й миттєво аналізувати їх, розпізнавати обличчя, визначати нестандартну поведінку та генерувати миттєві попередження.

У сільському господарстві комп'ютерний зір допомагає здійснювати моніторинг стану посівів, визначати рівень дозрівання культур, ідентифікувати хвороби рослин та оптимізувати процеси збирання врожаю. Медицина отримує потужний інструмент для діагностики захворювань через автоматизований аналіз медичних зображень та раннє виявлення патологій.

Важливим напрямком є також інтеграція комп'ютерного зору з розумними будинками та містами. Такі системи здатні контролювати енергоспоживання, забезпечувати безпеку, регулювати транспортні потоки та створювати максимально комфортне середовище для життєдіяльності людини.

Технічно реалізація комп'ютерного зору в IoT спирається на складні алгоритми машинного навчання, нейронні мережі та потужні графічні processors, що дозволяють опрацьовувати величезні обсяги відеоданих у режимі реального часу. Ключовими є також технології штучного інтелекту, які постійно вдосконалюють здатність систем до самонавчання та адаптації.

З точки зору архітектури ключовим елементом архітектури застосування комп'ютерного зору є інтеграція із одноплатними комп'ютерними системами, наприклад Raspberry Pi, та USB-камерами, які забезпечують механізм збирання та первинної обробки візуальної інформації. Система передбачає неперервне capturing зображень, їх попередню обробку та аналіз за допомогою попередньо навченої машинної моделі.

Ще одним компонентом є хмарні платформи. Хмарні обчислення відіграють критичну роль у накопиченні статистичних даних та зберіганні складних машинних моделей. Вони забезпечують потужності для глибокого аналізу та інтерпретації отриманих зображень, дозволяючи миттєво опрацьовувати великі масиви інформації.

Мобільний додаток виступає зручним інтерфейсом для кінцевого користувача, надаючи можливість віддаленого моніторингу, контролю та отримання аналітичних висновків. Це уможливорює інтерактивну взаємодію з системою та забезпечує негайний доступ до результатів комп'ютерного аналізу.

Принципово важливим є безперервний обмін даними між компонентами: зображення передаються з фізичних пристроїв до хмарної інфраструктури, де відбувається їх машинне навчання та statistical аналіз, після чого результати транслюються до мобільного додатку.

Така архітектура демонструє революційний потенціал комп'ютерного зору в ecosystems Інтернету речей, де технологічні рішення перетворюються на інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень.

Класична архітектура застосування технології комп'ютерного зору у концепції Інтернету речей наведено на рис. 1.4.

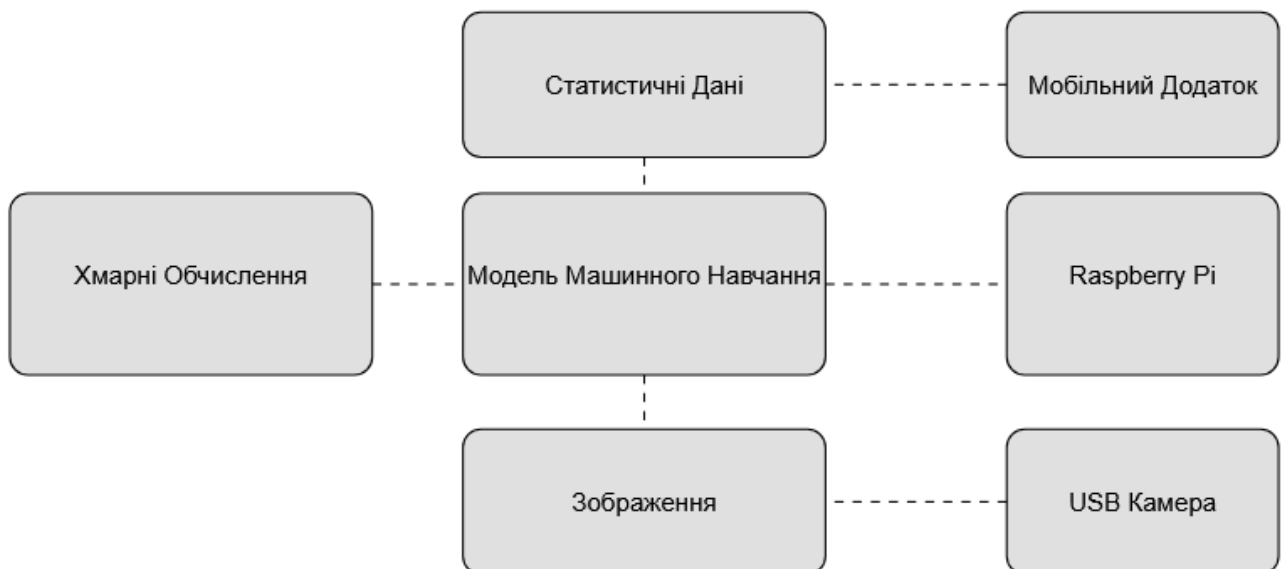


Рисунок 1.4 – Класична архітектура застосування технології комп'ютерного зору у концепції Інтернету речей

### 1.3 Аналіз відомих рішень та систем енергетичного моніторингу

Підхід, запропонований у роботі [15] зосереджений на інтеграції передових технологій, таких як цифровізація, машинне навчання та штучний інтелект, для покращення енергетичної ефективності в умовах відкритих кар'єрів. Метою представленого авторами дослідження є розробка інфраструктури для моніторингу та прогнозування пікових навантажень, що дозволяє знижувати енергоспоживання

та оптимізувати управління енергетичними потоками в умовах мінімальних інвестицій. У роботі підкреслюється важливість використання штучного інтелекту для покращення процесів прийняття рішень, особливо для менеджерів з енергетичного обслуговування, на основі стандартів ISO 50001. У рамках цього запропонованого підходу була запропонована система моніторингу та прогнозування пікових навантажень, яка забезпечує реальний час енергоспоживання та оцінку якості електричної мережі. Для цього встановлені датчики струму та напруги на обладнанні, такому як драглайни та конвеєри, які зібрані дані передають на енергометри, що через PLC взаємодіють із системою SCADA для зберігання та візуалізації даних. Це дозволяє отримувати дані в реальному часі та забезпечувати моніторинг енергоспоживання на різних етапах видобутку. Штучний інтелект у цій системі використовується для аналізу зібраних даних, включаючи діагностику дефектів та прогнозування енергетичних навантажень. Одним з ключових елементів є використання алгоритмів регресії, зокрема лісового квантильного регресора, для прогнозування попиту на енергію, який враховує різні історичні сценарії. Forest quantile regression – це статистичний метод, який поєднує техніки квантильного регресії та дерев рішень (наприклад, випадкових лісів). Квантильна регресія дозволяє моделювати не лише середнє значення залежної змінної (як у звичайній лінійній регресії), а й інші квантилі. Таким чином, представлена система не лише здійснює моніторинг енергоспоживання, але й прогнозує можливі пікові навантаження та допомагає оптимізувати енергетичне управління на основі даних.

У роботі [16] запропоновано підхід до моніторингу енергетичних навантажень у системах управління енергією, який використовує неінтрузивні методи для аналізу сигналів, що зчитуються з мережі. Це дозволяє зібрати необхідні дані без фізичного втручання в систему, що є важливим для економії часу та ресурсів при впровадженні таких рішень у реальні умови.

Одним з основних аспектів цього підходу є метод попередньої обробки сигналу струму. Струм є основним параметром, що змінюється в залежності від навантаження, тому він є важливим індикатором для розпізнавання та класифікації енергетичних навантажень. Оскільки пряме використання сигналів струму може

бути ускладнене через наявність шуму та інших перешкод, було запропоновано застосування перетворення вейвлету та дискретного перетворення Фур'є для попереднього аналізу та очищення сигналу (рис. 1.5).

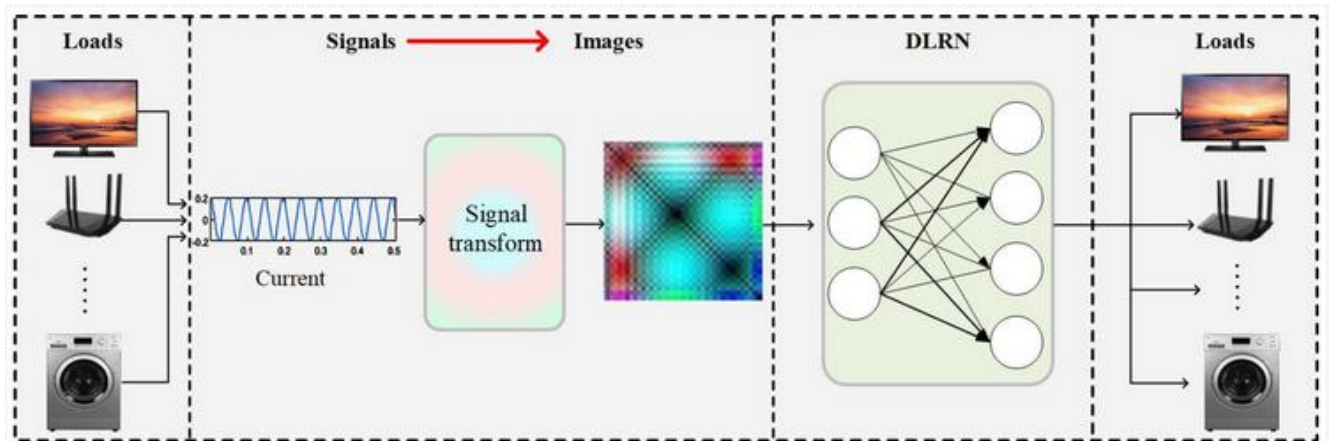


Рисунок 1.5 – Пропонована у [16] система моніторингу енергетичних навантажень у системах управління енергією, який використовує неінтрузивні методи

Першим кроком в обробці сигналу є розкладання струмового сигналу за допомогою вейвлет-перетворення на два основні компоненти: аппроксимаційний коефіцієнт і детальний коефіцієнт. Аппроксимаційний коефіцієнт відображає основну інформацію про струмовий сигнал, що містить глобальну характеристику навантаження, у той час як детальний коефіцієнт забезпечує інформацію про текстуру сигналу, що дозволяє виявити дрібні деталі та відмінності між різними типами навантажень. Ці коефіцієнти є основою для подальшого аналізу та класифікації навантажень. У доповнення до вейвлет-перетворення, для кращого розпізнавання різних типів навантажень автори запропонували використовувати гармонічний аналіз сигналу за допомогою дискретного перетворення Фур'є. Гармонічні компоненти сигналу можуть значно відрізнятися залежно від типу навантаження. Наприклад, резистивні навантаження генерують мінімальну кількість гармонік, тоді як електричні двигуни або пристрої з перемикачами можуть створювати багато гармонічних хвиль. Це дозволяє не тільки відрізнити типи навантажень, а й зменшити вплив шуму на точність розпізнавання.

Ключовим елементом методу є перетворення отриманих характеристик (аппроксимаційних коефіцієнтів, детальних коефіцієнтів і гармонічних вмістів) у зображення. Для цього застосовується метод глобальної автокореляції (GAF), який перетворює три отримані послідовності в чорно-білі зображення, а потім комбінує їх у три канали кольорового зображення (R, G, B). Це дозволило авторам підвищити наочність та виділити відмінності між різними типами навантажень, що важливо для точного розпізнавання за допомогою глибоких навчальних моделей, таких як DLRN (Deep Learning Recognition Network).

У роботі [17] було запропоновано систему моніторингу енергоспоживання, яка володіє низькою вартістю та забезпечує реальну візуалізацію даних з метою покращення доступності та зниження витрат на енергію. Запропонована система інтегрує кілька компонентів, включаючи низьковартісну апаратну плату, безпечний канал комунікації та налаштовувану панель керування в реальному часі. У представленій системі використовується спеціальний вбудований контролер, який отримує дані про споживання енергії з енергетичних лічильників і передає їх через Wi-Fi на сервер. Сервер працює безперервно в хмарі, отримуючи інформацію від пристроїв, та надає користувачам можливість віддалено моніторити параметри енергоспоживання своїх лічильників, а також накопичені рахунки за визначений період. Користувач може змінювати цей період для виставлення рахунків відповідно до своїх вимог у реальному часі. Система побудована на використанні відкритих інструментів та технологій, а також компонентів, що можна придбати в магазинах, для досягнення необхідних функцій. Всі дані з енергетичних лічильників збираються через протокол Modbus і передаються на сервер через модуль ESP8266, що відповідає за Wi-Fi з'єднання. Всі дані зберігаються в базі даних MySQL на сервері, що працює під управлінням операційної системи Ubuntu Linux. Для управління даними використовується створений API, що дозволяє легко передавати та обробляти запити між пристроями та сервером. Процес передачі даних від лічильника до сервера відбувається через GET-запит, що містить всі зібрані параметри енергоспоживання. Цей процес автоматично оновлює дані на панелі моніторингу в реальному часі. Тригери на сервері відповідають за активацію

попереджень, якщо параметри перевищують визначені користувачем пороги. Користувач може налаштувати ці пороги, що дозволяє адаптувати систему до різних потреб і типів споживання. Крім того, система дозволяє налаштовувати типи графіків для відображення даних і автоматично генерує звіти про енергоспоживання, які надсилаються користувачеві через електронну пошту.

У роботі [18] автори запропонували систему для інтелектуального управління громадським освітленням за допомогою комп'ютерного зору та штучного інтелекту, зокрема використовуючи фреймворк YOLO для виявлення об'єктів на зображеннях. Система працює з двома вхідними змінними, які передаються до нечіткої системи керування: кількість пішоходів на дорозі та рівень природного освітлення, що дозволяє регулювати потужність освітлення на основі цих даних. Вибір YOLO був обумовлений його ефективністю, особливо на пристроях з низькими обчислювальними можливостями, таких як Raspberry Pi, який використовувався у проекті.

Пропонована система ділить зону освітлення на три рівновіддалені зони по 30 м, де кожна зона коригує потужність освітлення залежно від кількості пішоходів у цій зоні. Для забезпечення мінімальних параметрів роботи освітлювальних приладів визначено, що мінімальна потужність, яка подається на кожен прилад, складає 30% від загальної потужності, що гарантує, що світильники залишаються увімкненими навіть при відсутності пішоходів.

Крім того, важливою частиною є питання конфіденційності: зображення, які аналізуються системою, не зберігаються. Після обробки вони одразу знищуються, що виключає можливість ідентифікації або відстеження осіб, оскільки немає доступу до баз даних індивідумів. Система також має бути під контролем державних установ, які повинні забезпечувати належну безпеку комп'ютерних мереж, щоб уникнути несанкціонованого доступу до інформації.

У роботі також запропоновано нечітку систему керування, яка використовує два вхідних параметри та один вихідний. Вхідні змінні – це кількість людей на вулиці та рівень природного освітлення, а вихідна змінна визначає потужність освітлення, яку має забезпечити кожен світильник. Для обробки зображень камера

здійснює попередню обробку зображень, а YOLO виконує ідентифікацію та підрахунок пішоходів. Крім того, індекс яскравості фіксується датчиком і передається в нечітку систему керування.

У роботі [19] запропоновано підхід до зменшення енергоспоживання будівель за допомогою комп'ютерного зору для виявлення присутності людей та використання електроприладів. Проведене дослідження передбачало розробку та впровадження глибокого навчання для автоматичного аналізу офісного простору з метою оптимізації енергетичного менеджменту (рис. 1.6).

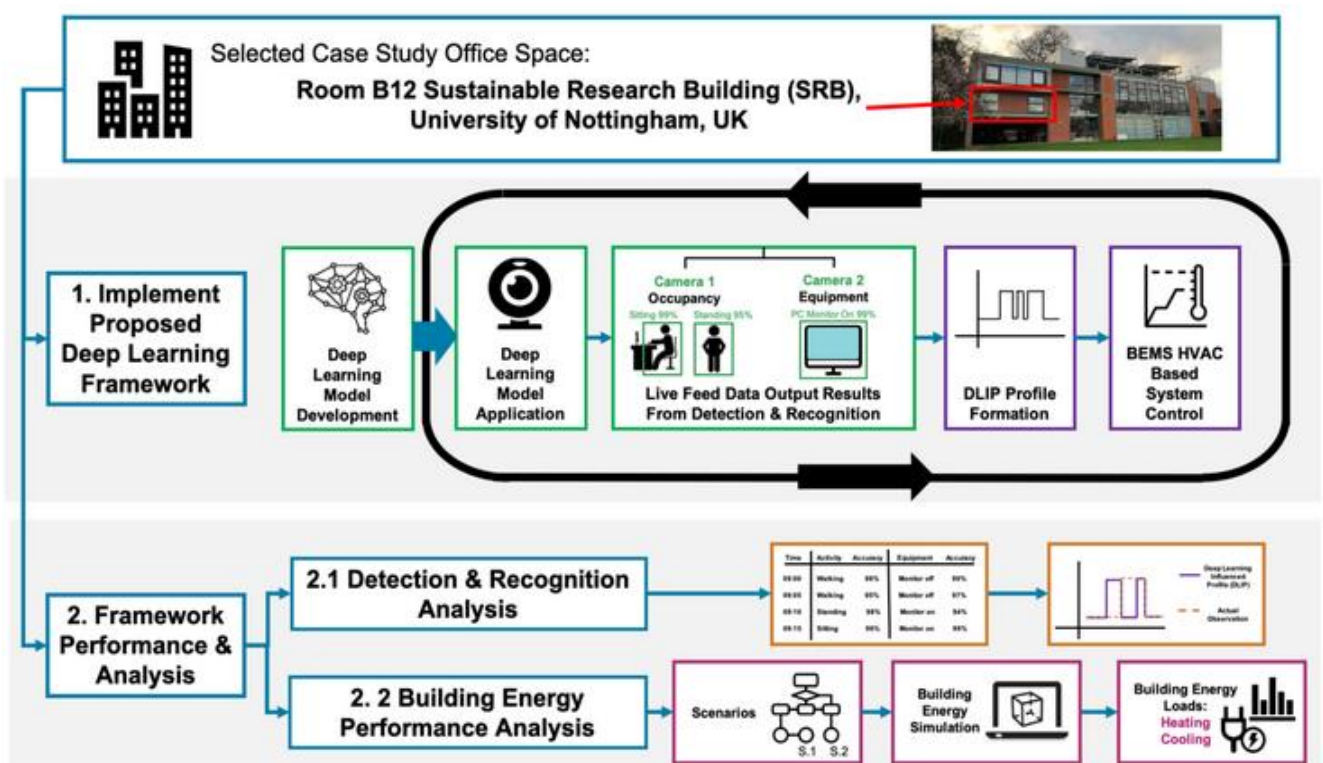


Рисунок 1.6 – Підхід для оптимізації енергоспоживання будівель за допомогою комп'ютерного зору [19]

Запропонована авторами методологія включала два основні етапи: 1) реалізацію глибокої нейронної мережі для розпізнавання людей та обладнання та 2) оцінку продуктивності моделі. На першому етапі було обрано та модифіковано відповідну модель глибокого навчання, після чого її було розгорнуто на AI-камері для тестування в офісному середовищі. Аналіз здійснювався окремо для двох підходів – детекції присутності людей та використання обладнання. Очікується, що

в майбутньому ці два методи будуть об'єднані в єдину систему для комплексного моніторингу. Вихідні дані системи використовуються для формування профілів теплового навантаження, що дозволяє автоматично коригувати роботу системи HVAC. Методика навчання нейромережі передбачає збирання зображень для формування наборів даних, які були розділені у співвідношенні 80% для навчання та 20% для тестування. Дані отримувалися з відкритих джерел, включаючи Google, а також шляхом збору зображень у реальних офісних приміщеннях. Розмітка об'єктів здійснювалася вручну за допомогою LabelImg, що дозволило створити XML-файли для тренування детектора. Для зменшення часу навчання застосовувався підхід transfer learning на основі TensorFlow Object Detection API. Після навчання модель була розгорнута на AI-камері для реального виявлення людей та обладнання.

Результатом іншого підходу представленого у [20] є адаптивна інтелектуальна система управління енергоспоживанням для Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEV). Для ефективного зниження витрат пального та шкідливих викидів авторами розроблено модель енергетичної системи, яка враховує параметри двигуна, трансмісії, кондиціонування повітря, а також зовнішні фактори, такі як ухил дороги, вітер і температурні умови. Запропонована система базується на нечіткій логіці та використовує три контролери, зокрема адаптивний нечіткий контролер двигуна. Для підвищення його ефективності застосовано нейромережевий нечіткий вивід із генетичним алгоритмом оптимізації. Навчання системи здійснюється на основі наборів даних для різних дорожніх умов за допомогою комбінованого алгоритму градієнтного спуску та методу найменших квадратів.

Результати експериментів проведені авторами показують, що розроблена система може адаптуватися в реальному часі та покращує ефективність управління енергією порівняно з існуючими методами.

У роботі [21] запропоновано нову архітектуру управління енергоспоживанням на основі повноцінної системи SCADA для освітньої будівлі з мікромережею (MG). Дослідження проводилося в лабораторії LAMBDA при

кафедри електро- та енергетичної інженерії Університету Сапієнца в Римі. LAMBDA MG включає фотоелектричний генератор (PV), систему зберігання енергії (BESS), розумний розподільний щит (SW) та різні навантаження, серед яких критичні, основні та керовані (освітлення, кондиціонування, розумні розетки).

Управління реалізовано через комунікаційну архітектуру, що базується на протоколах Modbus і Konnex. Це дозволяє інтегрувати пристрої та зменшити споживання енергії з основної мережі. Аналіз системи проводився у двох режимах: реальному часі (SCADA-система для моніторингу споживання та генерації) і в симуляційному середовищі (для дослідження поведінки мережі та режимів зарядки/розрядки BESS). Запропонована модель була протестована у різних сценаріях та оцінена з економічної точки зору.

в роботі [22] розглядається стратегія управління енергоспоживанням (EMS) для гібридної енергосистеми корабля, що використовує паливні елементи та акумулятори. Відповідно до регуляторних вимог ІМО щодо зниження викидів від суднових двигунів, застосування електричних кораблів є перспективним рішенням. Гібридна енергосистема судна складається з дизель-генератора, відновлюваних джерел енергії, системи накопичення енергії та, за можливості, водневих паливних елементів.

Запропонована в роботі стратегія управління забезпечує баланс між джерелами живлення та навантаженням, що гарантує стабільність і надійність системи. Управління потоком енергії здійснюється на основі адаптивної нейро-нечіткої системи виводу (ANFIS), яка враховує зміну навантаження та стан заряду акумуляторів (SoC). Реалізація системи виконана в середовищі Simulink на основі ANFIS. Основна мета дослідження – оцінити ефективність запропонованої системи в порівнянні з практичними результатами попередніх робіт. Автори стверджують, що отримані результати сприяють глибшому розумінню управління потоками енергії в гібридних суднових енергосистемах.

Інший підхід [23] передбачає розробку стратегії управління енергоспоживанням (EMS) для гібридної енергосистеми електричного корабля, що використовує паливні елементи та акумулятори. Регламенти Міжнародної морської

організації (ІМО) вимагають зменшення викидів від суднових двигунів, що стимулює використання електричних кораблів. Оптимальним рішенням є застосування відновлюваних джерел енергії в складі гібридної системи, що включає дизель-генератори, відновлювані джерела енергії, систему накопичення енергії та водневі паливні елементи.

EMS виконує управління та контроль балансу між різними джерелами енергії та навантаженням, забезпечуючи стабільність і надійність системи. Для оптимального розподілу потоків енергії використовується адаптивна нейро-нечітка система виводу (ANFIS), яка аналізує зміну навантаження та стан заряду акумуляторів (SoC). Реалізація системи виконана в середовищі Simulink з використанням ANFIS. У дослідженні розглядається застосування гібридного джерела живлення для роботи корабля в "тихому режимі" під час виявлення підводних човнів із низьким акустичним підписом. Основна мета – оцінити ефективність запропонованої системи порівняно з практичними результатами попередніх досліджень. Отримані висновки сприяють подальшому вдосконаленню стратегій управління потоками енергії в морських гібридних енергосистемах.

У роботі [24] представлено концепцію цифровізації енергетичного сектора в контексті розвитку Industry 4.0 та впровадження Energy 4.0. Розглянуто важливість розумного моніторингу та управління енергоспоживанням для різних сфер, таких як промисловість, розумні будівлі та університетські кампуси.

Запропоновано підхід до інтеграції стандарту ISO 50001 у систему управління енергоспоживанням, що забезпечує ефективне використання енергії. Особлива увага приділена застосуванню інтелектуальних лічильників, SCADA-систем для моніторингу та машинного навчання для прогнозування енергоспоживання. Проведено аналіз та порівняння існуючих моделей прогнозування, а також представлено архітектуру системи енергоменеджменту – від збору даних і комунікації до зберігання та аналізу інформації.

Запропонований підхід сприяє оптимізації енергоспоживання, підвищенню ефективності роботи електромереж та впровадженню розумних енергетичних систем у рамках концепцій Smart Grid і Industry 4.0.

У роботі [25] запропоновано підхід до ефективного управління енергоспоживанням у розумних будівлях на основі поєднання технологій Інтернету речей (IoT) та глибокого навчання. Основна мета дослідження – оптимізація роботи кондиціонерів шляхом використання алгоритму YOLOv3 для виявлення та підрахунку кількості людей у приміщенні.

Запропонована система дозволяє динамічно керувати кондиціонерами залежно від реальної присутності людей, що сприяє зниженню енергоспоживання. Дані про кількість осіб та статус кондиціонерів передаються на IoT-платформу через інтернет, що забезпечує віддалений контроль та моніторинг.

Результати симуляцій підтверджують високу точність виявлення осіб та ефективність прийняття рішень щодо управління енергоспоживанням. Застосування глибокого навчання дозволяє моделювати складні взаємозв'язки в даних, що робить систему перспективною для інтеграції у розумні будівлі та дистанційного керування різними пристроями.

У роботі [26] представлено розширену IoT-систему для інтелектуального управління енергоспоживанням у будівлях, що використовує семантичні технології для інтеграції даних з різних джерел. Основний підхід полягає в зборі, аналізі та обробці даних з різних модулів, включаючи дані про саму будівлю, виробництво енергії, ціни на електроенергію, погодні умови та поведінку користувачів.

Запропонована система включає модулі збору даних, які використовують децентралізовані сенсори для моніторингу реальних умов у будівлі. Вона також враховує рівень виробництва енергії з відновлюваних джерел, прогноз погоди, зміни тарифів на електроенергію та зворотний зв'язок від користувачів щодо комфорту та енергоспоживання.

Комунікаційна система побудована на семантичних веб-технологіях і працює за принципом публікації та підписки, що дозволяє інтегрувати дані з різних систем та форматів. Для цього використано семантичний сервіс Ztreamu, який обробляє та

контекстуалізує отримані дані, а також базу знань на основі трьохкоміркового сховища Virtuoso.

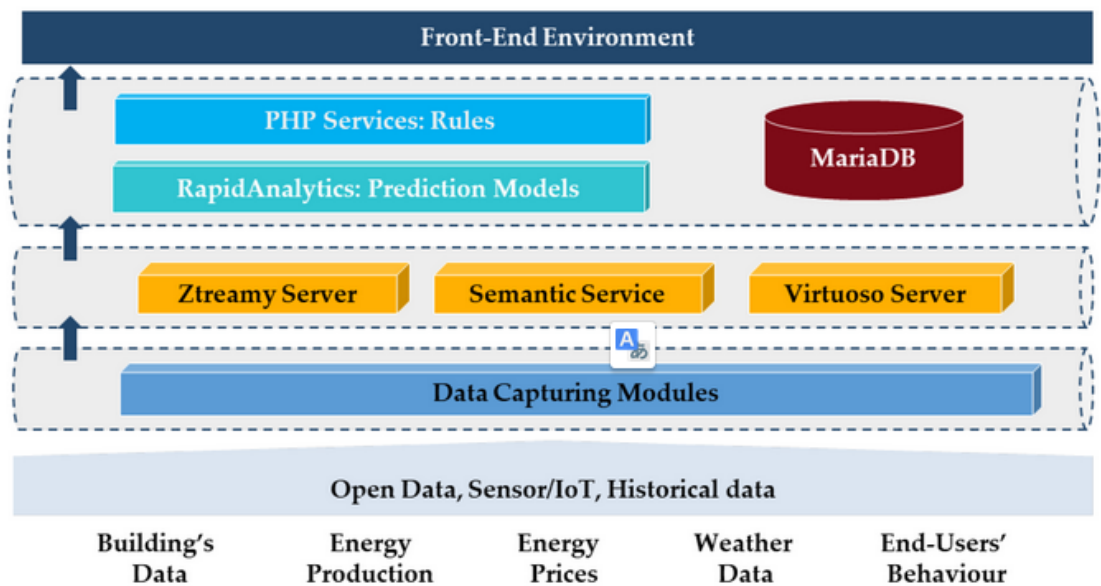


Рисунок 1.7 – IoT-система для інтелектуального управління енергоспоживанням у будівлях, що використовує семантичні технології для інтеграції даних з різних джерел [26]

На основі зібраних даних система формує правила для розумного управління енергоспоживанням, що дозволяє створювати щоденні та щотижневі плани енергоспоживання для користувачів. Це покращує інформованість та ефективність використання ресурсів. У рамках досліджуваної роботи авторами було реалізовано систему Інтернету речей, яка забезпечує інтерактивність та адаптивність управління енергією в будівлях. Проведене авторами пілотне тестування показало, що запропонований підхід покращує ефективність енергоспоживання та розширює можливості існуючих систем за рахунок інтеграції крос-доменних даних.

#### 1.4 Постановка задачі дослідження

Розвиток алгоритмів машинного навчання, штучного інтелекту та обробки зображень зробив можливим точне і ефективно застосування комп'ютерного зору для аналізу енергоспоживання.

Камери високої роздільної здатності та спеціалізовані інфрачервоні датчики можуть швидко й точно оцінювати теплові втрати, а також інші показники, які традиційні методи моніторингу не можуть виявити з такою точністю [24-37].

Комп'ютерний зір спрощує процес моніторингу, дозволяючи проводити постійний контроль без участі людини. Це знижує ризик людських помилок і дозволяє автоматизувати не лише збір даних, а й прийняття рішень, наприклад, щодо автоматичного регулювання систем опалення, кондиціонування чи освітлення. Тому з цією метою пропонується розробити метод та кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору. Для цього слід виконати ряд завдань:

- 1) дослідити технології реалізації комп'ютерного зору та їх застосування для задач енергетичного моніторингу;
- 2) проаналізувати відомі рішення та системи енергетичного моніторингу, зокрема ті, що засновані на використанні комп'ютерного зору;
- 3) розробити метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору;
- 4) розробити кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель та виконати її формалізації через модель процесу функціонування;
- 5) провести експериментальні дослідження для оцінки ефективності запропонованих рішень.

## **2 МЕТОДИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ**

2.1 Особливості обробки відеопотоків із ESP32-CAM у контексті комп'ютерного зору для енергетичного моніторингу приміщень

Використання мікроконтролерного модуля ESP32-CAM для обробки відеопотоків у системах енергетичного моніторингу приміщень відкриває нові можливості для автоматизації та оптимізації енерговитрат. Цей модуль, який поєднує мікроконтролер ESP32 та камеру, є енергоефективним рішенням для захоплення та аналізу візуальних даних у реальному часі. Основна перевага ESP32-CAM полягає в його здатності працювати в умовах обмежених ресурсів, що робить його ідеальним для впровадження в системи моніторингу, де критично важливими є низьке енергоспоживання та компактність.

Однією з ключових особливостей обробки відеопотоків із ESP32-CAM є обмежена обчислювальна потужність модуля [38-46]. На відміну від потужних серверних систем, ESP32-CAM має досить обмежені ресурси для виконання складних алгоритмів комп'ютерного зору. Тому для ефективної роботи необхідно оптимізувати алгоритми обробки зображень, зокрема шляхом використання методів попередньої обробки даних, таких як зменшення роздільності зображень, квантування кольорів або застосування бінаризації. Це дозволить зменшити обсяги даних, що підлягають аналізу, та прискорити їх обробку.

Важливим аспектом є передача відеопотоків у системах енергетичного моніторингу. Модуль ESP32-CAM підтримує передачу даних через Wi-Fi, що дозволяє інтегрувати його в мережі Інтернету речей. Однак через обмежену пропускну здатність бездротового зв'язку необхідно враховувати можливі втрати даних або затримки [49-54]. Для мінімізації цих проблем можна використовувати методи стиснення відео, такі як MJPEG або H.264, а також передавати лише ключові кадри або оброблені дані, наприклад, координати об'єктів або результати аналізу руху.

У контексті енергетичного моніторингу приміщень ESP32-CAM може бути використаний для виявлення руху, аналізу наявності людей у приміщенні та контролю освітлення чи опалення. Наприклад, за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору можна визначати, чи є у приміщенні люди, і автоматично регулювати роботу енергоспоживаючих пристроїв. Для цього можна застосовувати методи детектування руху на основі порівняння кадрів або використовувати нейронні мережі, попередньо навчені на виявлення об'єктів. Однак через обмежені ресурси ESP32-CAM нейронні мережі повинні бути оптимізовані для роботи на мікроконтролерах, наприклад, шляхом використання TensorFlow Lite для мікроконтролерів.

Ще однією особливістю є необхідність енергоефективної роботи ESP32-CAM у режимі реального часу. Для цього можна використовувати режими глибокого сну (deep sleep), коли камера активується лише за наявності руху або за розкладом. Це дозволяє значно знизити енергоспоживання системи, що є критично важливим для автономних пристроїв, які працюють від батарей.

Таким чином, обробка відеопотоків із ESP32-CAM у системах енергетичного моніторингу приміщень вимагає врахування обмежень модуля та застосування оптимізованих алгоритмів комп'ютерного зору. Врахувавши зазначені вище особливості можна створити ефективну систему, здатну аналізувати візуальні дані в реальному часі та автоматизувати управління енергоспоживанням у житлових приміщеннях.

## 2.2 Метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

В основі функціонування кіберфізичної системи моніторингу житлових будівель лежить метод енергетичного моніторингу, заснований на технологіях комп'ютерного зору. Цей підхід дозволяє здійснювати безконтактний контроль електроспоживання, використовуючи відеоаналіз (на основі відеопотоків) для ідентифікації активних пристроїв у приміщенні житлових будівель.

Замість традиційних методів, що базуються на вимірюванні електричних параметрів за допомогою датчиків або розумних лічильників, дана система використовує відеопотоки, отримані від модулів ESP32-CAM. Завдяки алгоритмам комп'ютерного зору система здатна розпізнавати включені електроприлади за їхніми характерними візуальними ознаками, такими як світіння дисплеїв, індикаторні лампи або зміни в освітленні.

Таке рішення забезпечує безперервний моніторинг енергоспоживання без необхідності встановлення додаткового обладнання на кожен пристрій. Крім того, система може інтегруватися з алгоритмами штучного інтелекту для автоматичного аналізу поведінкових патернів мешканців, що дозволяє не тільки контролювати, а й оптимізувати споживання електроенергії в розумному будинку.

Вхідними даними для пропонованого методу енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору є відеопотоки, що отримуються із клієнтських пристроїв на основі мікроконтролерів ESP32-CAM та база даних пристроїв із зазначенням їх номінального значення споживаної потужності.

Вихідними даними роботи даного методу є статуси пристроїв та метрики енергетичного моніторингу. Пропонований метод енергетичного моніторингу підтримує п'ять пристроїв та чотири приміщення. Зокрема пропонований метод функціонує у кіберфізичній системі, фізичний вимір представлений кухнею, вітальнею, спальнею та ванною кімнатою. У приміщенні кухні відстежуватиметься два пристрої – джерело освітлення та чайник. У решті приміщень здійснюватиметься моніторинг одного пристрою, у вітальні – телевізора, у спальні – вентилятора і у ванній кімнаті – пральної машини. Варто відзначити, даний метод може бути масштабований для більшої кількості приміщень та/або пристроїв.

Що стосується метрик енергетичного моніторингу, то в процесі роботи методу визначаються такі метрики як миттєва потужність для кожного пристрою, спожита енергія за певний період для кожного пристрою та сумарне поживання енергії за заданий період.

Узагальнена схема методу енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору для пропонованої кіберфізичної системи представлено на рис. 2.1.

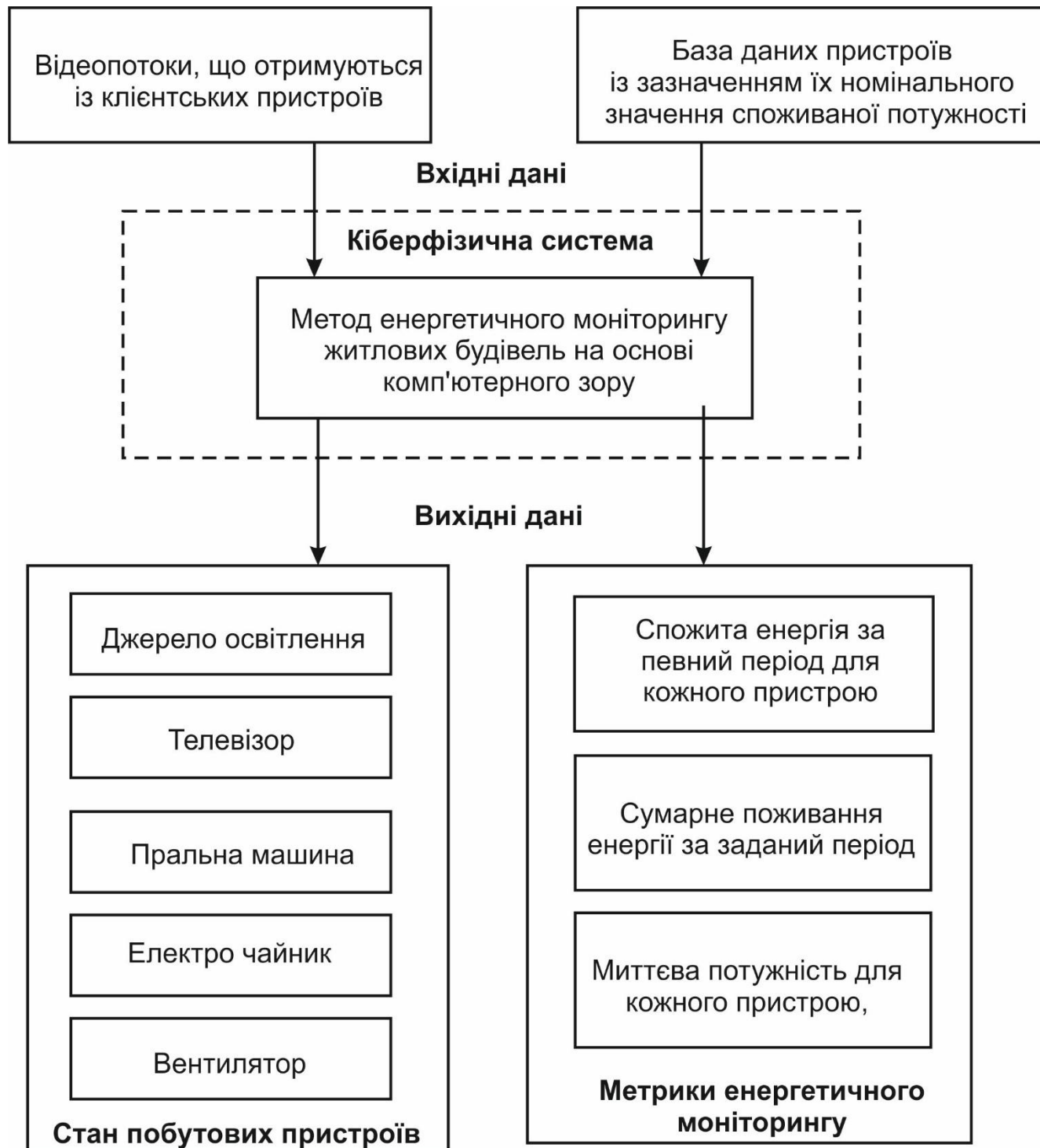


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема методу енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору для пропонованої кіберфізичної системи

Псевдокод методу енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору наведено на рис. 2.2.

**Вхідні дані:** Відеопотоки з ESP32-CAM пристроїв, номінальна потужність пристроїв

**Вихідні дані:** Статуси пристроїв та три ключові енергетичні метрики

1. Ініціалізувати MQTT клієнт та підключитися до брокера
  2. Завантажити попередньо навчену модель комп'ютерного зору
  3. Ініціалізувати базу даних потужностей пристроїв  $P_{nom}[i,j]$
  4. Ініціалізувати змінні для відстеження енергоспоживання:
    - $P[i,j] = 0$  для всіх  $i,j$  // миттєва потужність
    - $E[i,j] = 0$  для всіх  $i,j$  // спожита енергія за період
    - $E_{room}[i] = 0$  для всіх  $i$  // сумарне енергоспоживання приміщення
  5. Ініціалізувати часові мітки початку моніторингу  $t_{start}$
  6. Для кожного приміщення  $i$  в множині контрольованих приміщень:
    7. Запустити потік для обробки відеопотоку з приміщення  $i$
    8. В межах кожного потоку:
      9. Поки True:
        10. Отримати кадр  $I_i(t)$  з відеопотоку
        11. Отримати поточний час  $t_{current}$
        12. Застосувати модель комп'ютерного зору: результати =  $infer(I_i(t))$
        13. Для кожного виявленого об'єкта в результатах:
          14. Витягти координати, назву\_класу, рівень\_достовірності
          15. Визначити тип пристрою та стан з назви\_класу
          16. Оновити  $S[i,j](t)$  на основі стану
          17. Опублікувати стан у MQTT тему **home/{приміщення}/{пристрій}**
        - // Розрахунок миттєвої потужності
        18. Якщо  $S[i,j](t) == 1$ :
          19.  $P[i,j] = P_{nom}[i,j]$
        20. Інакше:
          21.  $P[i,j] = 0$
        22. Опублікувати  $P[i,j]$  у MQTT тему **energy/{приміщення}/{пристрій}/power**
      - // Розрахунок спожитої енергії
      23.  $\Delta t = (t_{current} - t_{prev}[i,j]) / 3600$  // перетворення в години
      24.  $E[i,j] += P[i,j] * \Delta t$
      25. Опублікувати  $E[i,j]$  у MQTT тему **energy/{приміщення}/{пристрій}/consumption**
      26.  $t_{prev}[i,j] = t_{current}$
    - // Розрахунок сумарного енергоспоживання по приміщенню
    27.  $E_{room}[i] = 0$
    28. Для кожного пристрою  $j$  у приміщенні  $i$ :
      29.  $E_{room}[i] += E[i,j]$
    30. Опублікувати  $E_{room}[i]$  у MQTT тему **energy/{приміщення}/total**
  31. Нанести обмежувальні рамки та підписи на кадр
  32. Відобразити кадр
  33. Якщо натиснута клавіша виходу: break
  34. Звільнити ресурси
35. Завершити всі потоки

Рисунок 2.2 – Псевдокод методу енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Подамо метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору у вигляді послідовності кроків: ініціалізація обладнання та

програмного забезпечення, збір даних з відеопотоків, застосування моделі комп'ютерного зору, визначення станів електричних приладів, передача статусів пристроїв через MQTT та розрахунок та публікація енергетичних метрик. Розглянемо детальніше кроки представленого методу.

Крок 1. Ініціалізація обладнання та програмного забезпечення. Даний крок методу передбачає виконання послідовності етапів, що включають у себе: встановлення ESP32-CAM модулів у приміщеннях житлової будівлі (кухня, вітальня, спальня, ванна кімната), налаштування ESP32-CAM для передачі відеопотоку, встановлення центрального сервера обробки з необхідним програмним забезпеченням, конфігурація MQTT брокера для забезпечення комунікації, ініціалізація HTTP клієнта для роботи з API моделі комп'ютерного зору, створення бази даних з номінальними значеннями потужності для кожного типу пристроїв.

Крок 2. Збір даних з відеопотоків. На цьому кроці відбувається збір даних з відеопотоків, що надходять від множини клієнтських пристроїв на основі мікроконтролера на основі мікроконтролера ESP32-CAM. Особливістю даного методу є те, що виконується паралельна обробка відеопотоків, що передбачає створення для кожного пристрою окремого потоку. Далі кожен потік підключається до відповідного відеопотоку та регулярно запитує нові кадри, із заданою частотою оновлення  $fr$ . Після цього, в рамках кожного потоку, отримані кадри проходять через буферизацію, що дозволяє тимчасово зберігати їх перед подальшою обробкою. Буферизація забезпечує узгодженість даних, мінімізує втрати кадрів у разі коливань швидкості передачі та дозволяє застосовувати алгоритми фільтрації або покращення якості зображень перед їхньою подальшою обробкою.

Крок 3. Застосування моделі комп'ютерного зору. На третьому кроці виконується застосування моделі комп'ютерного зору для аналізу отриманих відеокадрів. Кожен кадр, отриманий із відеопотоків клієнтів ESP32-CAM, передається до API моделі комп'ютерного зору для виконання розпізнавання об'єктів у реальному часі. Цей процес відбувається безперервно, забезпечуючи

швидке реагування на виявлені об'єкти та зміни в кадрі. Результат, який повертається, є словником, що містить інформацію про виявлені об'єкти. Зокрема у результаті міститься ключ `predictions`, який є списком словників. Кожен словник у цьому списку описує один виявлений об'єкт. Таким чином модель комп'ютерного зору після виконання розпізнавання зображення повертає такі поля для кожного словника:

- `X` – координата центру об'єкта по осі `X` (у пікселях);
- `Y` – координата центру об'єкта по осі `Y` (у пікселях);
- `Width` – ширина `bounding box` (прямокутника, що охоплює об'єкт);
- `Height` – висота `bounding box`;
- `Class` – назва класу об'єкта (наприклад, `"tv_on"`, `"light_off"` тощо).
- `Confidence` – рівень впевненості моделі у правильності розпізнавання (число від 0 до 1, де 1 – максимальна впевненість);
- `Class_id` – ідентифікатор класу (якщо модель використовує числові ідентифікатори);
- `Bounding_box` – координати кутів виділеного об'єкту.

На основі отриманих результатів розпізнавання виконується подальша обробка. Спочатку система аналізує координати обмежувальних рамок (`x0`, `y0`, `x1`, `y1`), що визначають точне положення об'єкта на зображенні. Далі встановлюється клас розпізнаного об'єкта (`class_name`), що дозволяє визначити, який саме конкретно об'єкт аналізується, тобто джерело освітлення, вентилятор, чайник, телевізор або пральна машина. Також оцінюється рівень достовірності розпізнавання (`confidence`)  $\sigma$ , що вказує на надійність отриманого результату. Якщо рівень достовірності нижчий за встановлений поріг, об'єкт ігнорується, щоб уникнути хибних спрацьовувань. Таким чином подальше опрацювання здійснюється відповідно до наступної функції індикатора  $f_c$ :

$$f_c(d) = \begin{cases} 1, & C_d \geq \sigma \\ 0, & C_d < \sigma \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $C_d$  – рівень достовірності розпізнавання (confidence) для об'єкта  $d$ ;  $\sigma$  – рівень достовірності розпізнавання.

Крок 4. Визначення станів електричних приладів. Даний крок є ключовим етапом у роботі методу енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, оскільки саме тут аналізуються результати розпізнавання для ідентифікації поточного стану пристроїв. Отримані об'єкти класифікуються за станом – увімкнено чи вимкнено – на основі їх розпізнаних класів.

$$S_{i,j,t} = f_{CV}(I_{i,t}, \theta) \quad (2.2)$$

де  $S_{i,j}$  – стан пристрою  $j$  у приміщенні  $i$  в момент часу  $t$  (1 – увімкнено, 0 – вимкнено),  $f_{CV}$  – функція комп'ютерного зору,  $I_i(t)$  – кадр з приміщення  $i$  в момент часу  $t$ ,  $\theta$  – параметри навченої нейронної мережі.

Наприклад, якщо модель виявила об'єкт із класом "light1\_on", це означає, що відповідне освітлення перебуває у стані увімкнення, а якщо "light1\_off" – у стані вимкнення. Також на даному кроці застосовується темпоральний фільтр, який аналізує зміну стану пристрою протягом певного проміжку часу. Наприклад, якщо протягом кількох послідовних кадрів система фіксує чергування станів "light1\_on" та "light1\_off", можна вважати це шумом або помилковим розпізнаванням. Таким чином застосування темпорального аналізу дозволяє підтверджувати зміну стану лише у разі, якщо новий стан зберігається протягом встановленого часу, що дозволяє уникнути зайвих спрацювань (шуму). Тобто якщо у  $i$ -му потоці визначено стан пристрою  $S_t$  у момент часу  $t$ , і при чому  $S_{t-1}, S_{t-2}, \dots, S_{t-n}$  визначають стани пристрою у попередні моменти часу, то система підтверджує змінну стану лише якщо:

$$\sum_{i=0}^n [(S_{t-i} = S_t) \geq T_{stable}] \quad (2.3)$$

де  $T_{stable}$  – мінімальна кількість послідовних кадрів, у яких стан залишається незмінним.

Після остаточного визначення стану об'єкта здійснюється ідентифікація класу пристрою  $D$  (джерело освітлення, вентилятор, чайник, телевізор або пральна машина):

$$D \in \{"light", "fan", "kettle", "tv", "washing\_machine"\} \quad (2.4)$$

Таким чином на даному кроці реалізується функція зіставлення:

$$f(C) = D \quad (2.5)$$

де  $D$  – тип пристрою, який належить одному з класів,  $C$  – розпізнаний клас об'єкта,

Наприклад  $f("light\_on") = "light"$  означатиме визначення класу  $light\_on$  для пристрою  $light$ .

Крок 5. Передача статусів пристроїв через MQTT. Наступним кроком є передача даних із попереднього кроку у відповідні канали обміну даними. Наприклад, статус світильника передається до MQTT теми, що відповідає за управління освітленням, а стан вентилятора – у відповідній MQTT темі для вентилятора:

$$MQTT\_publish("home/fan", \{"device": "fan", "state": 1, "timestamp": T\}) \quad (2.6)$$

де  $D = f("fan\_on") = "fan"$ ,  $S = 1$  (увімкнено) – стан пристрою,  $topic = "home/fan"$  – тема MQTT,  $payload = \{"device": "fan", "state": 1, "timestamp": T\}$  – корисне навантаження (повідомлення)

Завершальним етапом цього кроку є збереження інформації про стан пристроїв у локальній базі даних. Це дозволяє створювати детальну історію змін у роботі електроприладів, що відкриває можливість для довгострокового аналізу їхньої активності. Накопичені дані можуть бути використані для оцінки рівня

енергоспоживання, виявлення відхилень у роботі пристроїв або формування інтелектуальних сценаріїв автоматичного управління у межах розумного будинку. Хоча цей метод передбачає потенційну реалізацію подібних функцій, вони не є частиною поточного підходу.

Крок 6. Розрахунок та публікація енергетичних метрик. На цьому кроці визначається фактичне навантаження на електромережу та аналізується ефективність використання електроприладів. Загалом визначається три метрики: миттєва потужність для кожного пристрою, спожита енергія за певний період для кожного пристрою та сумарне поживання енергії за заданий період.

Першим етапом є визначення миттєвої потужності для кожного активного пристрою. Якщо пристрій перебуває у стані увімкнено, то його споживана потужність прирівнюється до номінального значення, що зберігається в локальній базі даних. У випадку, коли пристрій вимкнений, потужність дорівнює нулю:

$$P_i = \begin{cases} P_{nom,i}, & \text{if } S_{i,j} = 1 \\ 0, & \text{if } S_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

де  $P_{nom,i}$  – номінальна потужність пристрою  $i$ , що зберігається у локальній базі даних,  $S_{i,j}$  – стан пристрою  $i$  у приміщенні  $j$ , де  $S_{i,j} = 1$  означає “увімкнено”,  $S_{i,j} = 0$  означає “вимкнено”.

Після визначення значень для всіх активних пристроїв вони передаються в систему обміну повідомленнями MQTT, де кожен пристрій публікує свої дані у відповідну MQTT тему, структурованому за принципом:

$$energy/\{\text{приміщення}\}/\{\text{пристрій}\}/power \quad (2.8)$$

Це дозволяє будь-якому зацікавленому компоненту кіберфізичної системи отримувати актуальні дані про споживану потужність у режимі реального часу.

Наступний етап передбачає обчислення загального обсягу спожитої електроенергії кожним пристроєм за певний період. Для цього здійснюється накопичення часу, протягом якого пристрій перебував у стані "увімкнено":

$$eE_i = P_{nom,i} \cdot T \quad (2.9)$$

де  $P_{nom,i}$  – номінальна потужність пристрою, а  $T$  – сумарний час його роботи у цьому стані. Отримане значення енергоспоживання також передається через MQTT у відповідний MQTT тему:

$$energy/\{\text{приміщення}\}/\{\text{пристрій}\}/consumption \quad (2.10)$$

Останнім кроком є визначення загального рівня споживання енергії для кожного приміщення. Це здійснюється шляхом підсумовування енергоспоживання всіх пристроїв, що перебували у стані "увімкнено" у даному приміщенні:

$$eE_{total} = \sum_{j=1}^j E_{i,j} \quad (2.11)$$

Таким чином формується загальний показник, що відображає енергетичне навантаження конкретної зони у домогосподарстві. Після обчислення значення публікується у MQTT темі, відповідно до наступного шаблону:

$$eenergy/\{\text{приміщення}\}/total \quad (2.12)$$

Після цього, виконавши підписку на дану тему, у будь-якого клієнта буде доступ до значень обчислених енергетичних метрик. Схему функціонування методу система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору наведено на рис. 2.3.

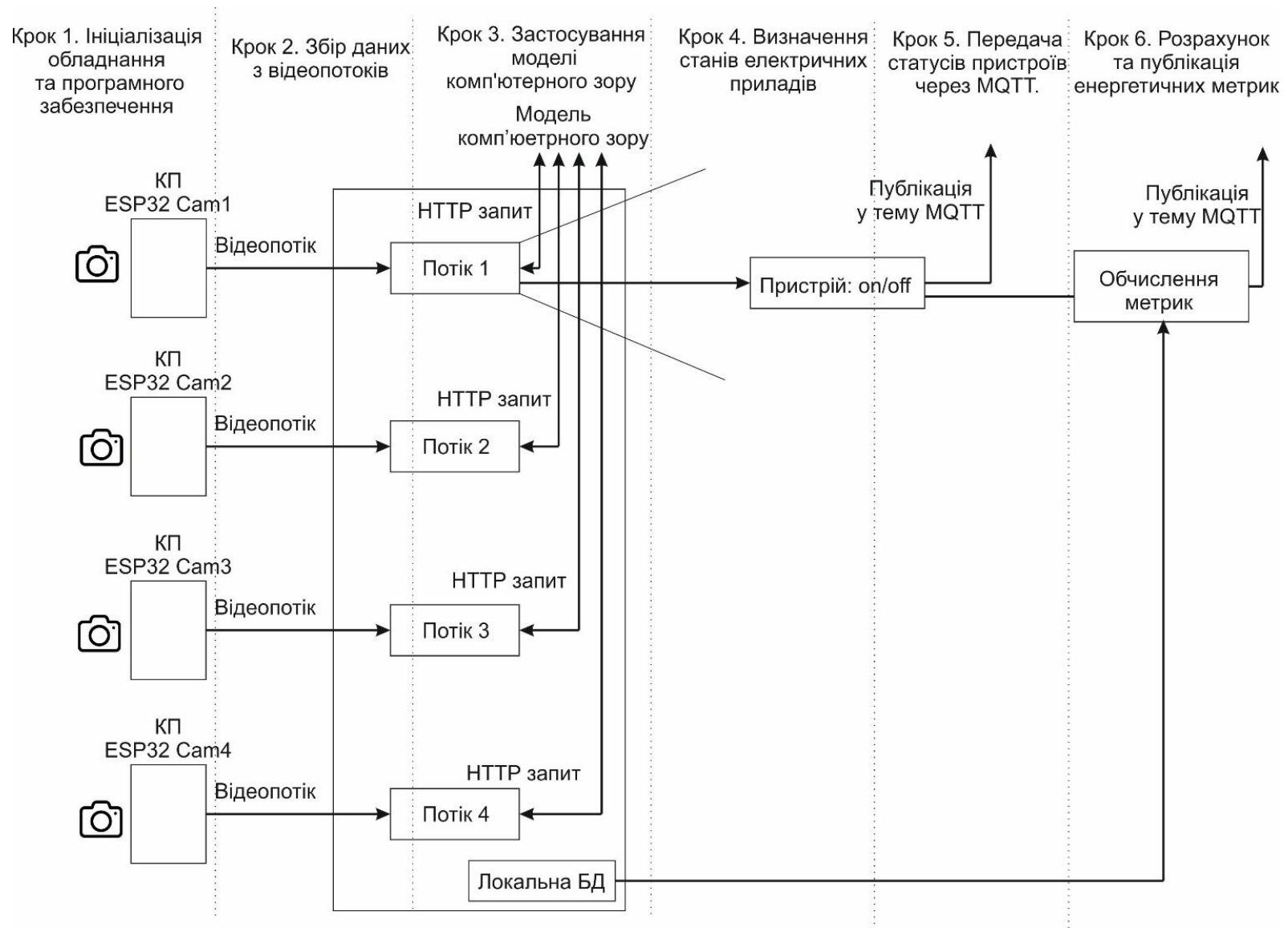


Рисунок 2.3 – Схема функціонування методу система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Таким чином запропонований методу енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору дозволяє здійснювати автоматичне визначення стану електроприладів без використання додаткових сенсорів споживання енергії. Замість традиційних методів, які передбачають вимірювання електричних параметрів через лічильники або датчики струму, запропонований методу кіберфізичної системи використовує відеопотоки, отримані за допомогою модулів ESP32-CAM. Камери фіксують навколишнє середовище, а алгоритми комп'ютерного зору аналізують отримані зображення для ідентифікації активних пристроїв. Наприклад, система може визначати, чи увімкнений телевізор, чи працює освітлення або побутова техніка, спираючись на характерні візуальні ознаки, такі як світіння екрана, індикаторні лампи чи зміни в освітленні приміщення. Це дозволяє оптимізувати витрати електроенергії, своєчасно виявляти надмірне споживання та підвищувати загальну ефективність енергетичного менеджменту.

### 2.3 Метод визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору

Метод визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору є важливим доповненням функціонування кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель. Якщо застосування методу енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору вже дозволяє відстежувати стан побутових пристроїв у реальному часі, визначаючи, які з них увімкнені чи вимкнені, то аналіз показників цифрового лічильника додає ще один рівень контролю, забезпечуючи вимірювання фактичного споживання електроенергії.

У той час як метод визначення стану пристроїв базується на аналізі відеопотоку приміщення та виявленні активних електроприладів, розпізнавання показників цифрового лічильника дозволяє отримати об'єктивні дані про загальне енергоспоживання. Це усуває похибки, що можуть виникати через відсутність

інформації про реальне навантаження кожного пристрою. Камера, встановлена біля цифрового лічильника, регулярно зчитує його показники, а модель комп'ютерного зору розпізнає цифри та передає їх у систему для подальшого аналізу.

Узагальнену схему методу визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору наведено на рис. 2.4.

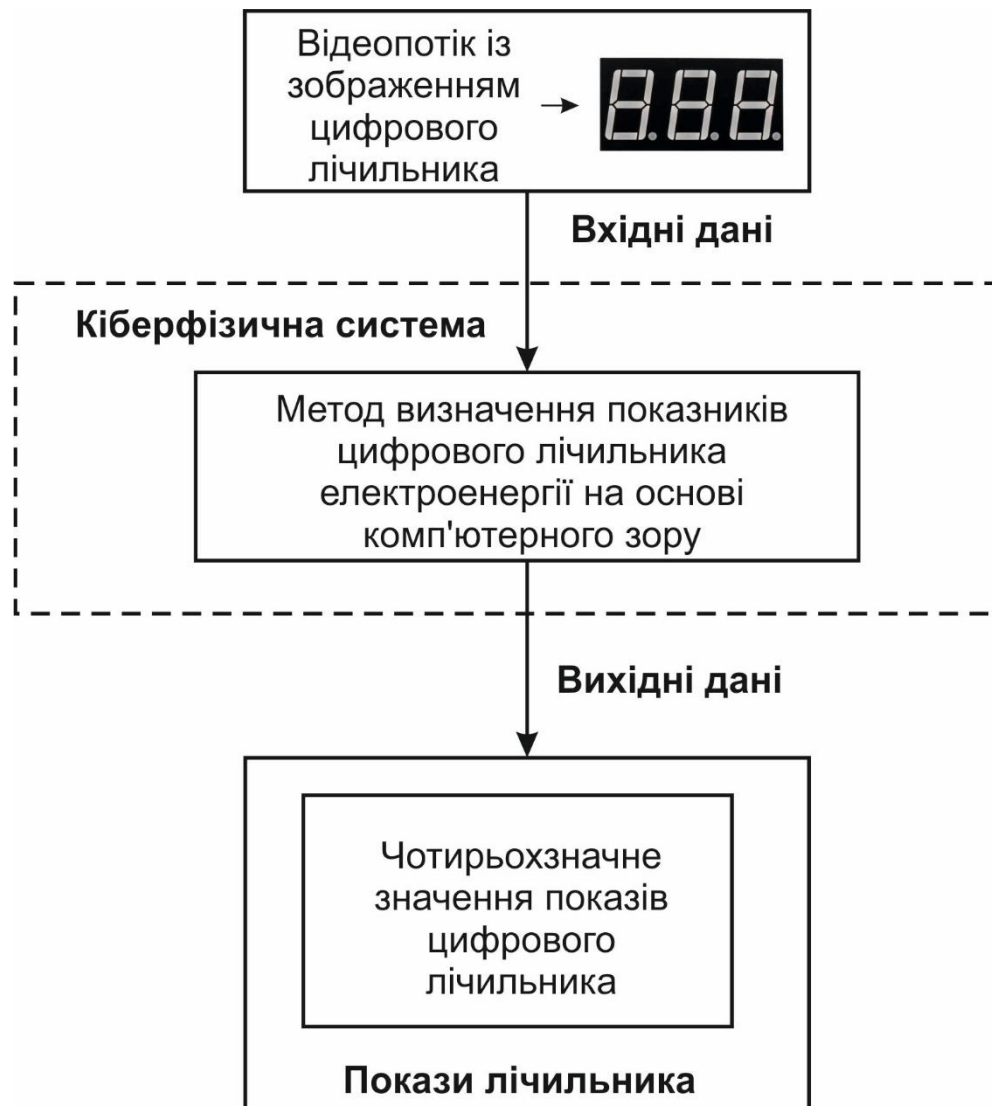


Рисунок 2.4 – Узагальнена схема методу визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору

Таким чином даний підхід забезпечує подвійний рівень моніторингу: поєднання інформації про увімкнені пристрої та фактичне споживання електроенергії дає змогу не лише визначати, які прилади працюють, а й оцінювати

їхню енергоефективність. Таким чином, кіберфізична система отримує можливість не тільки контролювати стан обладнання, а й аналізувати, наскільки ефективно використовується електроенергія в приміщенні, а також виявляти аномалії, наприклад, перевитрати чи приховані споживачі електроенергії або інші дії.

Метод визначення показників лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору включає кілька кроків, що дозволяє здійснити розпізнавання показів цифрового лічильника.

Процес починається з отримання зображення. Дане зображення отримується із мікроконтролера ESP32 CAM, яке надходить на одноплатну комп'ютерну систему Raspberry Pi. Отримане вихідне зображення може містити зайву інформацію та шум, що може вплинути на точність розпізнавання. Тому перед обробкою зображення проходить кілька етапів підготовки, спрямованих на підвищення якості та виділення необхідних даних.

Перший етап – обрізка зображення, яка дозволяє зосередитися виключно на сегменті дисплея, що містить цифрові показники. Далі зображення перетворюється в градації сірого, що дозволяє чітко відокремити цифри на передньому плані від фону. Інтенсивність пікселів у цьому випадку відображається відтінками сірого: світліші області позначають ділянки з більшою інтенсивністю світла, тоді як темніші відповідають менш освітленим ділянкам. Це спрощує подальше виділення семисегментних цифр.

Наступним кроком є порогова обробка, що полягає у переведенні зображення в бінарну форму. Якщо інтенсивність пікселя нижча за певне порогове значення  $\Delta$ , його колір стає чорним, а якщо вища – білим. Для цього використано інверсне бінарне порогове значення, завдяки чому цифри стають чорними на білому фоні. Як наслідок дана операція дозволяє повністю усунути шум та зробити зображення більш придатним для подальшого розпізнавання.

Для ідентифікації цифр у пропонованому методі визначенні показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору застосовується алгоритм K-Nearest Neighbors (KNN).

Після сегментації кожна цифра повинна бути представлена у вигляді вектору ознак, наприклад, у вигляді пікселів. Для цього, кожне зображення цифри перетворюється в одномірний вектор:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.13)$$

де  $n$  – кількість пікселів у зображенні.

Вибір алгоритму K-Nearest Neighbors (KNN) для ідентифікації цифр цифрового лічильника передбачає використання евклідової відстані для пошуку найближчих сусідів. Таким чином евклідова відстань між двома векторами  $x_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n})$  та  $x_j = (x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,n})$  буде обчислюватися за наступною формулою:

$$(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (2.14)$$

Після того як кожен цифру буде представлено у вигляді вектора ознак, модель KNN шукає KK-найближчих сусідів для кожного нового зображення цифри. Найбільш часто зустрічається етикетка серед сусідів визначатиме результат класифікації.

Оскільки семисегментні цифри мають стандартну форму (наприклад, цифра «0» завжди виглядає однаково), модель можна навчити на відносно невеликому наборі даних. Процес навчання починається із сегментації цифр із кількох отриманих зображень, після чого кожна цифра зберігається у відповідній теці для тренування моделі. Наприклад, усі зразки «0» з різних зображень збираються в окрему папку.

Після навчання модель тестується для оцінки точності. Якщо результати недостатньо точні, використовується більше навчальних зразків для покращення продуктивності. Коли модель повністю навчена, вона може застосовуватися для

обробки нових зображень у режимі реального часу. Під час отримання зображення з лічильника алгоритм автоматично сегментує цифри, порівнює їх із навченою базою даних і визначає, яке значення відповідає кожному символу. Таким чином, розпізнані значення лічильника перетворюються на текстовий формат і можуть зберігатися у файлі та передаватися у кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель.

Таким чином методу визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору можна подати наступними кроками.

Крок 1. Ініціалізація процесу зчитування показників.

Крок 2. Генерація спотворених зображень цифр. Отримання спотворених варіантів кожної цифри з вихідного зображення.

Крок 3. Налаштування параметрів обробки. Встановлення параметрів, таких як поріг (threshold), розмиття (blur), кількість ітерацій (iterations), коригування (adjustment), ерозія (erode).

Крок 4. Сегментація 7-сегментних цифр. Виявлення та обмеження цифр прямокутними рамками.

Крок 5. Збереження зображень. Збереження спотворених та сегментованих зображень для подальшого використання.

Крок 6. Навчання моделі. Тренування моделі на основі збережених спотворених зображень.

Крок 7. Обробка нового зображення. Подання нового зображення для отримання розпізнаного вихідного значення.

Крок 8. Збереження результатів. Запис отриманого значення показників лічильника у текстовому форматі з міткою часу.

Крок 9. Завершення процесу розпізнавання збереження результатів та надсилання результату у тему MQTT до хмарного брокера.

Блок-схеме роботи методу визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору наведено на рис. 2.5.

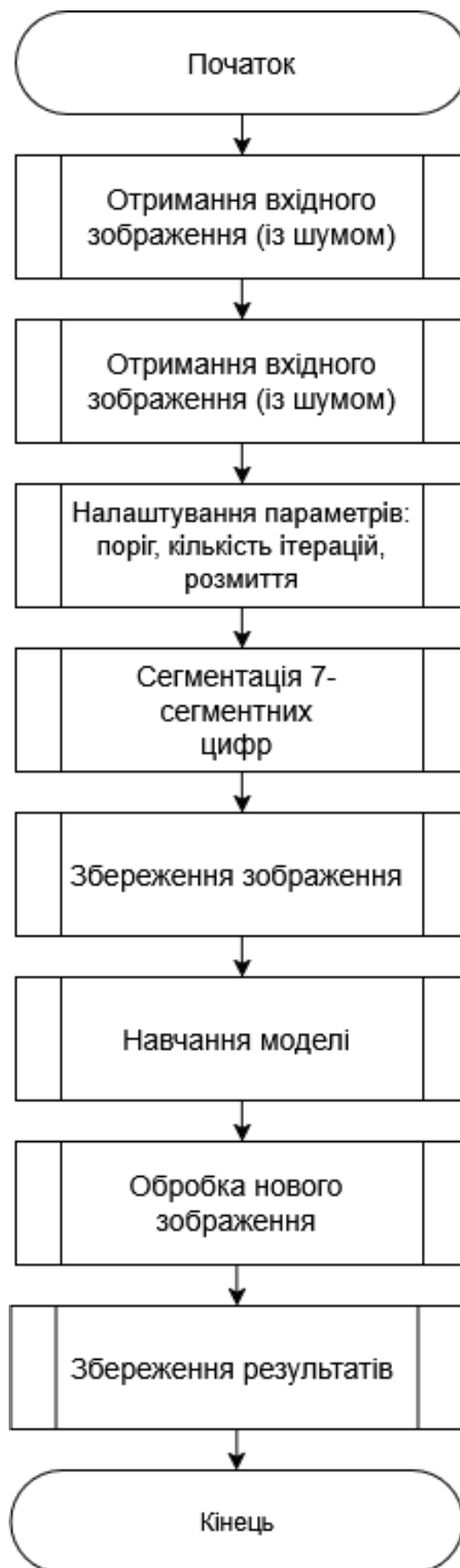


Рисунок 2.5 – Блок-схема роботи методу визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору

Варто відзначити, що кроки даного методу виконуватимуться на одноплатній КС Raspberry Pi, за допомогою бібліотеки OpenCV. Розпізнавання цифр цифрового лічильника виконуватиметься локально на Raspberry Pi за допомогою OpenCV, оскільки це дозволяє миттєву обробку даних без затримок, пов'язаних із передачею зображень у хмару. Це також зменшує навантаження на мережу, оскільки передаватимуться лише числові значення, а не повні зображення. Raspberry Pi має достатню продуктивність для локальної обробки зображень у реальному часі, що робить використання OpenCV ефективним. Крім того, локальне виконання підвищує рівень безпеки, оскільки зображення не покидають пристрій. Це є відмінністю у порівнянні із методом енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору де процес застосування моделі машинного навчання виконується на хмарній платформі.

Таким чином, запропонований метод дозволяє реалізувати одну із функцій кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, що полягає у зчитуванні показників цифрового лічильника. Завдяки автоматизованому зчитуванню та аналізу показників лічильника система може виявляти відхилення від нормального споживання, що є важливим елементом для вчасного реагування на аварійні ситуації або несанкціоноване використання електроенергії.

## 2.4 Висновки

Таким чином досліджено та встановлено основні функції кіберфізичної системи, що включають керування електроприладами в реальному часі та детальний моніторинг енергоспоживання на рівні окремих пристроїв і приміщень. Це дозволить користувачам не лише відстежувати поточний рівень енергоспоживання, а й приймати рішення щодо його оптимізації.

Запропоновано метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору дозволяє автоматично визначати стан електроприладів без використання додаткових сенсорів для вимірювання енергоспоживання.

Замість традиційних підходів, що базуються на аналізі електричних параметрів за допомогою лічильників або датчиків струму, запропонована кіберфізична система використовує відеопотоки, отримані від модулів ESP32-CAM. Камери реєструють навколишнє середовище, а алгоритми комп'ютерного зору аналізують зображення для ідентифікації активних пристроїв. Особливістю методу є те, що кожен відеопотік з окремого приміщення обробляється окремим потоком на комп'ютері типу Raspberry Pi. Це дозволяє забезпечити паралельну обробку даних, підвищуючи швидкість аналізу та зменшуючи навантаження на центральний обчислювальний вузол. Завдяки такому підходу система здатна ефективно масштабуватися та адаптуватися до різної кількості приміщень у житловому будинку. Також запропонований метод передбачає використання MQTT для обміну даними, та передачу енергетичних метрик, таких як миттєва потужність, спожита енергія та загальне навантаження на приміщення. Це забезпечує детальний контроль за використанням електроенергії, дозволяючи знижувати витрати та покращувати енергетичну ефективність.

Запропонований додатковий метод визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору підвищує точність обліку споживаної електроенергії, який заснований на аналізі зображень лічильника, сегментації 7-сегментних цифр та їх розпізнаванні за допомогою алгоритму K-Nearest Neighbors. Його інтеграція в систему забезпечує комплексний підхід до моніторингу, поєднуючи аналіз стану пристроїв із фактичними показниками лічильників.

Поєднання запропонованих методів забезпечує комплексний енергетичний моніторинг у кіберфізичній системі. Метод аналізу відеопотоків дозволяє визначати стан електроприладів у реальному часі без додаткових сенсорів, а метод розпізнавання показників цифрового лічильника забезпечує точний облік спожитої енергії. Ці два методи разом створюють систему автоматизованого енергетичного моніторингу житлових будівель, що інтегрується в кіберфізичну систему.

### **3 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ**

3.1 Функції моніторингу та керування енергоспоживанням у кіберфізичній системі

Кіберфізична система моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору виконує низку функцій, спрямованих на оптимізацію енергоспоживання та автоматизоване керування електроприладами. Основними функціями системи проєктованої кіберфізичної системи є:

Головною функцією проєктованої системи визначено як керування/моніторинг електроприладами через веб-додаток. Ця можливість надає користувачеві дистанційно вмикати та/або вимикати електроприлади. Зокрема у системі визначено керування/моніторинг для таких пристроїв: джерело освітлення, вентилятор, електрочайник, телевізор та пральна машина. Це забезпечує зручність управління енергоспоживанням у режимі реального часу та сприяє підвищенню енергоефективності.

Другою функцією є моніторинг енергоспоживання на рівні окремих пристроїв та приміщень. В основі системи лежить аналіз трьох ключових енергетичних метрик:

- миттєва потужність кожного пристрою, що дозволяє оцінити його поточне енергоспоживання в реальному часі;
- загальний обсяг електроенергії, спожитий конкретним пристроєм за певний період. Цей параметр допомагає визначити енергоефективність використання кожного приладу;
- сумарне споживання енергії в приміщенні, що дає змогу оцінити навантаження на електромережу та виявити найбільш енергоємні зони.

Останньою функцією є відстеження показників електрولیчильника. Крім моніторингу окремих пристроїв, система аналізує загальні показники електрولیчильника, що дозволяє оцінити загальне енергоспоживання всього

домогосподарства. Це надасть змогу користувачеві виявити тенденції витрат електроенергії та визначити потенційні шляхи оптимізації споживання.

### 3.2 Структура кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

З метою автоматизації енергетичного моніторингу житлових будівель запропоновано кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору.

Головними компонентами пропонованої кіберфізичної системи є одноплатна комп'ютерна система Raspberry Pi, яка виконує функцію центрального вузла обробки даних, та п'ять користувацьких пристроїв на базі ESP32 CAM із вбудованими камерами, розташованих у різних приміщеннях будинку. Структуру кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору приведено на рис. 3.1.

У пропонованій КФС хмарна інфраструктура представлена: хмарною платформою для обробки, анотації, тренування та розгортання моделі комп'ютерного зору, хмарним MQTT брокером та веб-сервером.

Для взаємодії із веб-сервером використовується користувацький веб-інтерфейс, який забезпечує зручний доступ до всіх функцій системи енергетичного моніторингу. Через цей інтерфейс користувачі можуть переглядати дані про енергоспоживання в реальному часі, аналізувати історичні показники використання електроенергії різними пристроями та керувати підключеними побутовими приладами. Розглянемо призначення та функціонування кожного компоненту пропонованої кіберфізичної системи детальніше.

Одноплатна комп'ютерна система Raspberry Pi функціонує як центральний обчислювальний вузол всієї архітектури. Вона отримує відеопотоки з усіх ESP32 CAM пристроїв, виконує первинну обробку зображень та застосовує попередньо навчені моделі комп'ютерного зору для розпізнавання статусу пристроїв та оцінки їхнього енергоспоживання.

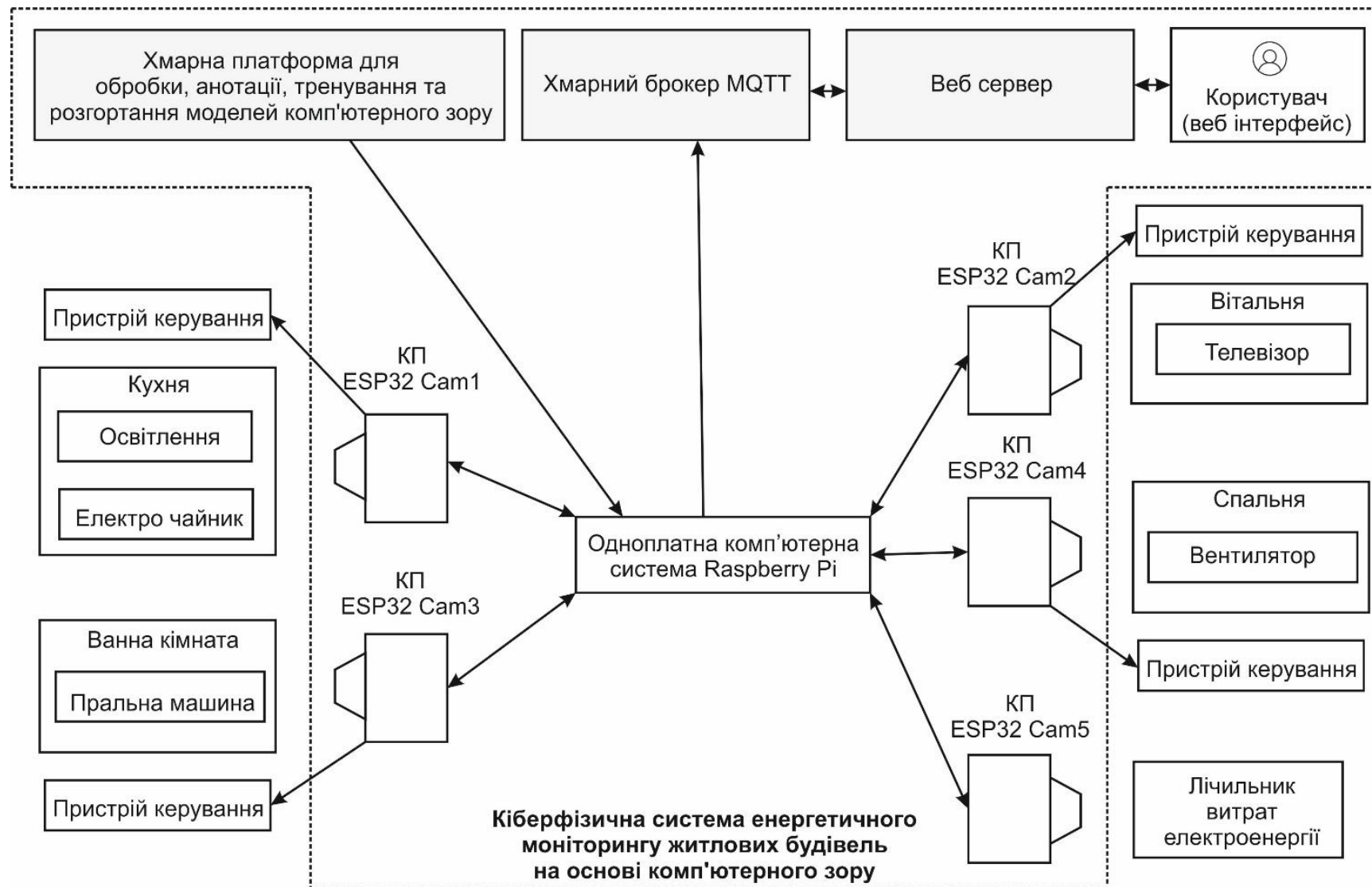


Рисунок 3.1 – Структура кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Raspberry Pi також виконує роль шлюзу для передачі оброблених даних до хмарної інфраструктури та реалізації команд керування, отриманих через веб-інтерфейс.

ESP32 CAM пристрої діють як розподілені сенсорні вузли системи. Кожен з п'яти пристроїв оснащений камерою та забезпечує візуальний моніторинг конкретної зони будинку. ESP32 CAM1 встановлено на кухні для контролю освітлення та електрочайника, він фіксує їхній робочий стан та передає відеопотік на Raspberry Pi. ESP32 CAM2 знаходиться у вітальні та моніторить телевізор. ESP32 CAM3 розміщений у ванній кімнаті для спостереження за пральною машиною. ESP32 CAM4 встановлено у спальні для контролю вентилятора. ESP32 CAM5 спрямований на лічильник витрат електроенергії для прямого зчитування показників енергоспоживання. Кожен з цих пристроїв також фізично з'єднаний з пристроями керування.

Пристрої керування є важливими виконавчими компонентами системи, які забезпечують можливість дистанційного контролю електроприладів. Вони представлені у вигляді реле та розумних розеток, що підключені до ESP32 CAM пристроїв (рис. 3.2). Ці пристрої керування встановлені у чотирьох приміщеннях будинку: на кухні для керування освітленням та електрочайником, у ванній кімнаті для управління пральною машиною, у вітальні для контролю телевізора та у спальні для керування вентилятором. Реле використовуються для комутації силових ліній електроприладів, а розумні розетки забезпечують можливість їх вмикання/вимикання. Зазначені пристрої керування отримують команди через ESP32 CAM модулі та можуть функціонувати як за заздалегідь встановленими сценаріями, так і у відповідь на команди користувача через веб-інтерфейс або на основі аналізу даних, отриманих системою комп'ютерного зору. У даній кіберфізичній системі функції пристроїв керування обмежені базовими операціями вмикання та вимикання електроприладів.

Хмарна платформа для обробки, анотації, тренування та розгортання моделей комп'ютерного зору надає обчислювальні ресурси для створення та вдосконалення алгоритмів розпізнавання. На цій платформі, що представляє собою сервіс

Roboflow, відбувається навчання нейронних мереж на основі зібраних та анотованих даних, оптимізація моделей, а також та їхнє тестування. Особливістю архітектури є те, що моделі не розгортаються безпосередньо на пристроях ESP32 CAM чи Raspberry Pi, а функціонують як хмарний сервіс.



Рисунок 3.2 – ESP32 CAM модуль

Кіберфізична система працює за принципом клієнт-серверної взаємодії: пристрої ESP32 CAM захоплюють відеопотік та передають кадри через одноплатну комп'ютерну систему Raspberry Pi до хмарної платформи Roboflow, яка здійснює обробку зображень за допомогою розгорнутих на ній моделей комп'ютерного зору. Результати аналізу повертаються назад до системи, де використовуються для прийняття рішень щодо керування пристроями. Такий підхід дозволяє використовувати потужні та ресурсоємні моделі машинного навчання без необхідності їх запуску на обмежених за обчислювальною потужністю пристроях, зокрема таких як модулі ESP32 CAM.

Діаграму взаємодії між основними компонентами кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору наведено на рис. 3.3.

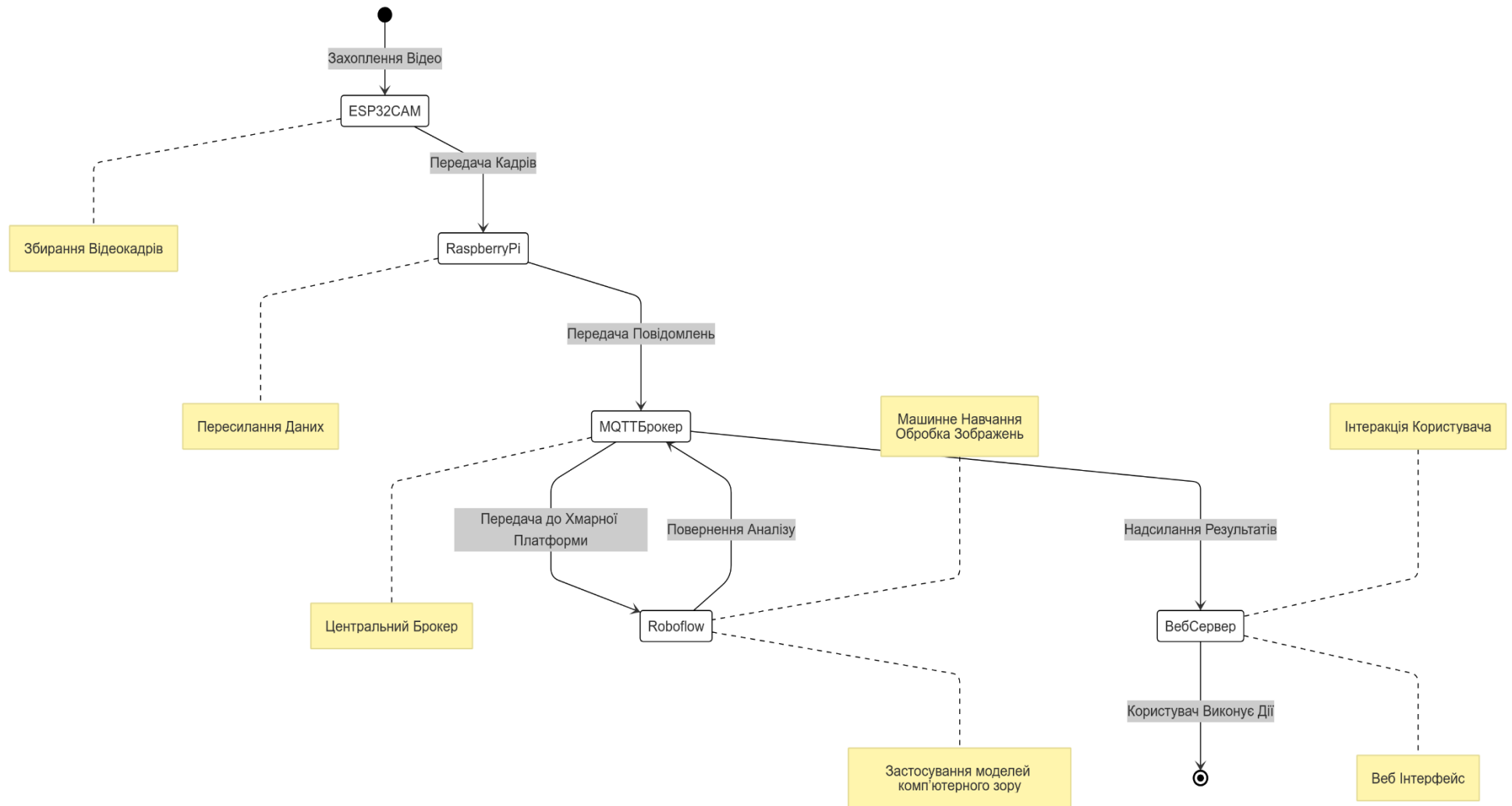


Рисунок 3.3 – Діаграма взаємодії між компонентами кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Хмарний MQTT брокер є ключовим компонентом комунікаційної інфраструктури системи, забезпечуючи обмін даними між пристроями та хмарною платформою. Для організації передачі інформації використовується ієрархічна система тем MQTT. Зокрема у пропонованій кіберфізичній системі визначено п'ять тем вигляду `home/{приміщення}/{пристрій}`. Через них здійснюється публікація/підписка на відповідний пристрій у конкретному приміщенні. Для моніторингу енергоспоживання використовуються три окремі теми:

- `energy/{приміщення}/{пристрій}/power` передає миттєву споживану потужність для кожного пристрою в реальному часі;
- `energy/{приміщення}/{пристрій}/consumption` містить дані про загальний обсяг електроенергії, спожитої пристроєм за певний період;
- `energy/{приміщення}/total` використовується для оцінки загального енергетичного навантаження в конкретному приміщенні.

Хмарний MQTT брокер відіграє ключову роль у забезпеченні інтеграції з веб-сервером, що є важливим елементом у пропонованій архітектурі кіберфізичної системи. Веб-сервер реалізує основну логіку взаємодії між користувачем та кіберфізичною системою, обробляючи всі запити, які надходять через веб-інтерфейс. Він аналізує ці запити, формує необхідні команди для кіберфізичної системи та передає їх для виконання. Окрім цього, сервер реалізує можливість збереження всіх історичні дані, що стосуються енергоспоживання, у базі даних, що дозволяє здійснювати подальший аналіз і моніторинг енергетичних показників. Важливою частиною роботи веб-сервера є також забезпечення належної безпеки системи. Для цього реалізовані механізми автентифікації та авторизації користувачів, що дає змогу контролювати доступ до чутливих даних та функцій системи, що значно підвищує рівень безпеки і запобігає несанкціонованому доступу.

Користувацький веб-інтерфейс представляє собою набір інтуїтивно зрозумілих екранів та елементів керування, що візуалізують дані моніторингу та надають інструменти для взаємодії з системою. Він містить приладову панель з індикаторами стану пристроїв та набором метрик енергетичного моніторингу.

Через цей інтерфейс користувач отримує інформацію про стан автоматизації енергетичного моніторингу житлових будівель за допомогою кіберфізичної системи на основі комп'ютерного зору.

Потоки передачі інформації в середині кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору для відстеження стану побутових пристроїв наведено на рис. 3.4.

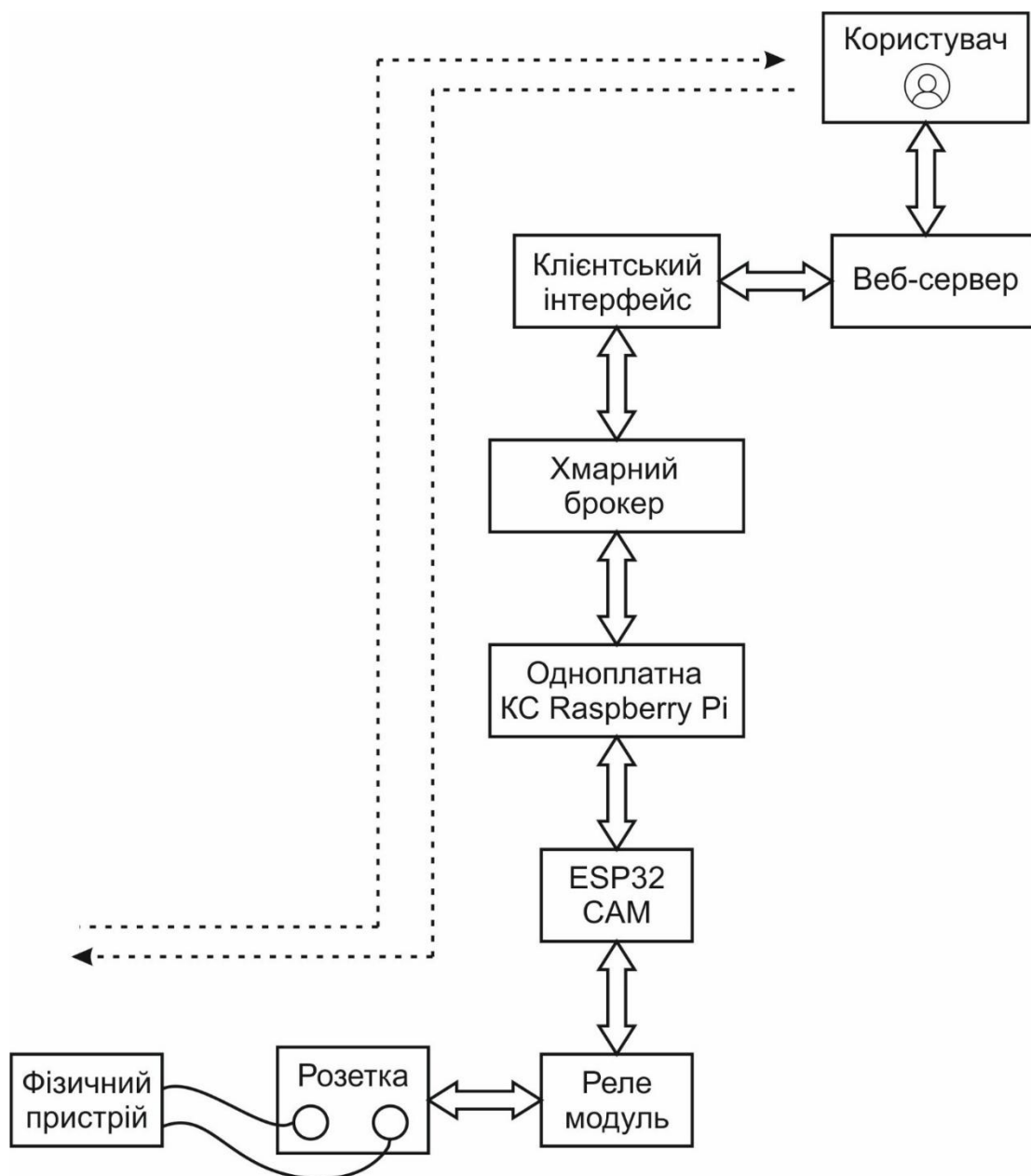


Рисунок 3.4 – Потоки передачі інформації в середині кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Варто відзначити, що подальшим вдосконаленням кіберфізичної системи є можливість генерації аналітичних звітів, які дозволяють детально аналізувати енергоспоживання в житловій будівлі. Крім того, система могла б надавати рекомендації для оптимізації енергоспоживання, допомагаючи користувачеві знижувати витрати на електроенергію та покращувати енергоефективність. Однак, в рамках поточної реалізації ці функції не були передбачені.

### 3.3 Модель процесу функціонування кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Модель процесу функціонування кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору ґрунтується на математичному описі взаємодії компонентів системи, що забезпечують збір, аналіз та управління енергоспоживанням у режимі реального часу.

Нехай множина приміщень представлена наступною множиною:

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\} \quad (3.1)$$

А також множина пристроїв у кожному приміщенні:

$$P_i = \{p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,n}\} \quad (3.2)$$

де  $i \in [1, m]$ .

Кожен пристрій може перебувати у кожен момент часу лише у двох визначених станах:

$$S_{i,j}(t) \in \{0,1\} \quad (3.3)$$

де стан 1 означає увімкнено, а 0 – вимкнено.

Також задано множину пристроїв ESP32 CAM:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\} \quad (3.4)$$

де кожен елемент  $e_i \in E$  відповідає одному приміщенню  $r_i \in R$ .

Тепер кожен пристрій ESP32 CAM приймає дані від пристроїв у відповідному приміщенні:  $p_{i,j} \in P_i$ , де  $i \in [1, m]$  та  $j \in [1, n]$ , що визначає, що  $e_i$  збирає інформацію з усіх пристроїв  $p_{i,j}$  у приміщенні  $r_i$ .

Кожний пристрій  $e_i$ , що встановлений у приміщенні  $r_i$  генерує відеопотік  $V_i$ , де  $V_i = \{I_i(t_1), I_i(t_2), \dots, I_i(t_n)\}$ , де  $I_i(t)$  – це зображення, що отримується в момент часу  $t$  з камери  $e_i$ . Цей відеопотік зберігається в форматі послідовності кадрів і передається через ESP32-CAM на Raspberry Pi для подальшої обробки.

Обробка зібраних відео-даних на однопалатній КС Raspberry Pi відбувається в окремих потоках для кожного приміщення  $r_i$ , що дозволяє паралельно обробляти відеопотоки з кількох приміщень. Тоді функція обробки відеопотоків від кожного мікроконтролера  $e_i \in E$  може бути подана:

$$f_{Infer}(V_i) = \begin{cases} I_i(t_1) \rightarrow Infer(I_i(t_1)) \\ I_i(t_2) \rightarrow Infer(I_i(t_2)) \\ \vdots \\ I_i(t_k) \rightarrow Infer(I_i(t_k)) \end{cases} \quad (3.5)$$

де  $Infer(I_i(t))$  — це інференція, яку модель комп'ютерного зору виконує на кожному кадрі  $I_i(t)$ , передбачаючи стан пристроїв  $p_{i,j}$  на основі аналізу отриманих зображень.

Результатом роботи моделі комп'ютерного зору  $f_{Infer}(V_i)$  є структура наступного виду:

$$R_i(t) = \{(x_k, y_k), w_k, h_k, class, p_k\} \quad (3.6)$$

де:  $(x_k, y_k)$  – координати верхнього лівого кута обмежувального прямокутника;

$w_k, h_k$  – ширина і висота прямокутника, що описує область, яка обмежує виділений об'єкт;

*class* – клас об'єкта, який був виявлений (наприклад, джерело освітлення, пральна машина, тощо);

$p_k$  – ймовірність правильності розпізнавання.

Таким чином модель комп'ютерного зору прогнозує ймовірність того, чи є на зображенні пристрій  $p_{i,j}$ , і чи увімкнений він (стан  $S_{i,j}(t) = 1$ ) або вимкнений (стан  $S_{i,j}(t) = 0$ ). Іншими словами, модель визначає, чи активований пристрій у відповідному приміщенні на основі зображення, отриманого з камери. Варто зазначити, що безпосередня робота моделі комп'ютерного зору відбувається на хмарній платформі, що дозволяє тим самим здійснювати масштабовану обробку великих обсягів даних, які надходять від численних ESP32-CAM пристроїв.

Після розпізнавання стану пристрою в хмарній платформі, результати передаються назад на Raspberry Pi через MQTT брокер для подальшого використання в кіберфізичній системі енергетичного моніторингу. Зазначимо, що стан кожного пристрою  $S_{i,j}(t)$  може бути переданий у відповідні MQTT теми:

$$M_{status}(i, j, t) = \{S_{i,j}(t)\} \quad (3.7)$$

Сформоване повідомлення для передачі у тему формується відповідно до наступного шаблону:

$$T_{status} = \text{home/} + \text{room} + \text{/} + \text{device} \quad (3.8)$$

де *room* – це назва приміщення, а *device* – тип пристрою.

Також для кожного пристрою розраховуються миттєва потужність  $P_{i,j}(t)$  та енергія  $E_{i,j}(t)$ , які також передаються через MQTT теми.

Миттєва потужність  $P_{i,j}(t)$  залежить від стану пристрою та визначається наступним виразом:

$$P_{i,j}(t) = \begin{cases} P_{nom,i}, & \text{if } S_{i,j}(t) = 1 \\ 0, & \text{if } S_{i,j}(t) = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Споживана енергія  $E_{i,j}(t)$  розраховується відповідно до наступного виразу:

$$E_{i,j}(t) = E_{i,j}(t - \Delta t) + P_{i,j}(t) \cdot \frac{\Delta t}{3600} \quad (3.10)$$

де  $\Delta t$  – час між двома вимірюваннями, перерахований в години.

Загальне енергоспоживання в кожному приміщенні  $r_i$  також відслідковується та публікується через MQTT:

$$E_{room}(i, t) = \sum_{j=1}^{n_i} E_{i,j}(t) \quad (3.11)$$

Всі ці дані доступні в реальному часі через веб-інтерфейс, що дозволяє користувачеві відстежувати енергоспоживання та стан пристроїв у приміщенні, а також здійснювати аналіз на основі історичних даних для подальшої автоматизації енергетичного моніторингу житлових будівель.

### 3.4 Висновки

Таким чином запропоновано кіберфізичну система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору. Дана КФС інтегрує кілька ключових компонентів, таких як одноплатна комп'ютерна система Raspberry Pi, пристрої ESP32 CAM з камерами для візуального моніторингу, хмарну

інфраструктуру для обробки даних і веб-інтерфейс для зручного доступу та керування.

У кіберфізичній системі енергетичного моніторингу житлових будівель реалізовано кілька ключових функцій, зокрема керування та моніторинг електроприладами через веб-додаток, що дає можливість дистанційно вмикати та вимикати пристрої, такі як освітлення, вентилятор, електрочайник, телевізор та пральна машина, що сприяє підвищенню енергоефективності. Іншою важливою функцією є моніторингу енергоспоживання на рівні окремих пристроїв та приміщень, аналізуючи ключові енергетичні метрики, зокрема миттєву потужність, загальний обсяг спожитої електроенергії та сумарне споживання енергії в приміщенні, а також відстеження показників електролічильника, що дозволяє оцінити загальне енергоспоживання будівлі.

Запропоновано модель процесу функціонування кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, яка ґрунтується на математичному описі взаємодії компонентів системи, що забезпечують збір, аналіз та управління енергоспоживанням у режимі реального часу. Представлена модель процесу є основою для реалізації функцій кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель.

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

### 4.1 Реалізація прототипу кіберфізичної системи енергетичного моніторингу

Реалізація прототипу кіберфізичної системи енергетичного моніторингу розроблена як інтегрована мережа взаємодіючих компонентів для збору, обробки та візуалізації енергетичних даних. Схему компонентів для реалізація прототипу кіберфізичної системи енергетичного моніторингу наведено на рис. 4.1

На початковому етапі система отримує вхідні дані від фізичних сенсорів або інших джерел інформації. Ці дані надходять до ESP32 CAM – компактного обчислювального модуля з камерою, який виконує первинну обробку та передачу даних. ESP32 CAM обрано через його низьке енергоспоживання, компактність та здатність забезпечувати візуальний моніторинг.

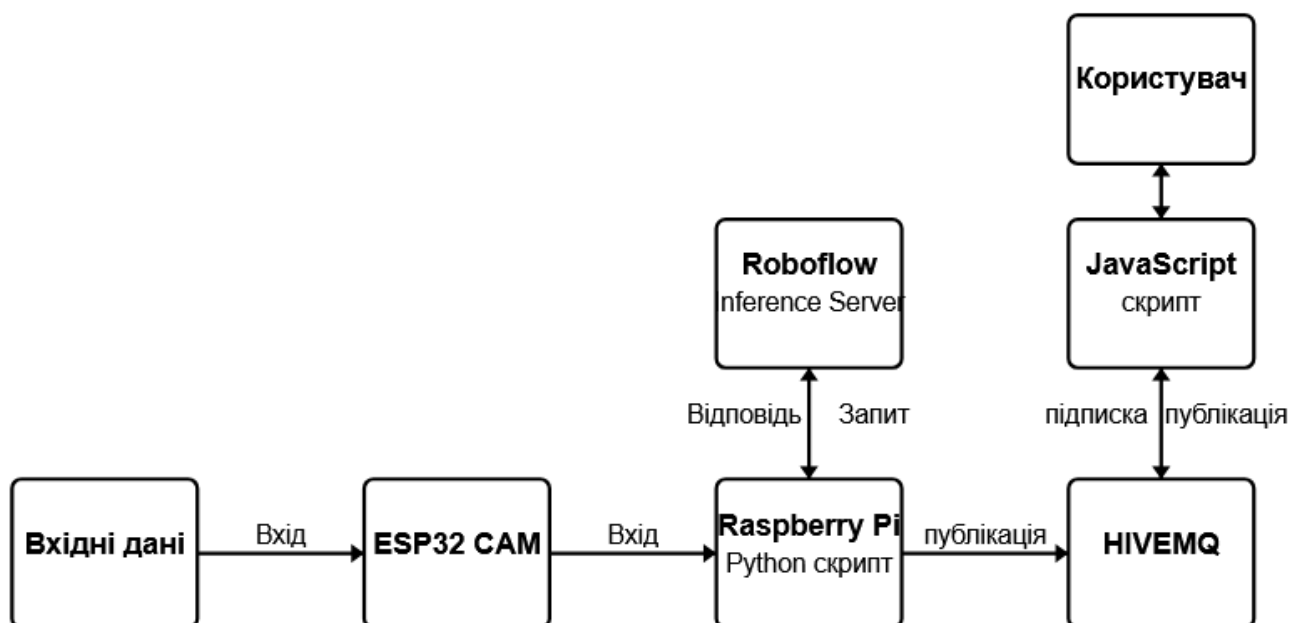


Рисунок 4.1 – Схема компонентів для реалізація прототипу кіберфізичної системи енергетичного моніторингу

Центральним елементом обробки даних слугує Raspberry Pi, на якому розгорнуто Python скрипт. Raspberry Pi отримує інформацію від ESP32 CAM та обробляє її відповідно до заданих алгоритмів. Python був вибраний як мова програмування через його потужність у роботі з даними та широкий вибір бібліотек для аналізу інформації. Частина скрипту для Raspberry Pi, що виконує функцію для обробки кожного потоку наведено у наступному лістингу:

```
def process_stream(location, url):
    video = cv2.VideoCapture(url)
    while True:
        ret, frame = video.read()
        if not ret:
            break
        result = CLIENT.infer(frame, model_id="home-monitoring/1")
        detections = result['predictions']
        for bounding_box in detections:
            confidence = bounding_box['confidence']
            if confidence < CONFIDENCE_THRESHOLD:
                continue
            if location == "kitchen" and class_name in ["light1_on", "light1_off",
"kettle_on", "kettle_off"]:
                client.publish("home/kitchen", class_name)
            elif location == "living_room" and class_name in ["tv_on", "tv_off"]:
                client.publish("home/living_room", class_name)
            elif location == "bedroom" and class_name in ["fan_on", "fan_off"]:
                client.publish("home/bedroom", class_name)
            elif location == "bathroom" and class_name in ["washing_machine_on",
"washing_machine_off"]:
                client.publish("home/bathroom", class_name)
```

Для глибокого аналізу та машинного розпізнавання образів система інтегрована з Roboflow Inference Server. Raspberry Pi надсилає запити до цього сервера та отримує відповіді щодо класифікації чи розпізнавання патернів у енергетичних даних. Це дозволило впровадити елементи штучного інтелекту для передбачення аномалій у енергоспоживанні.

Для забезпечення комунікації між компонентами системи використано NIVEMQ – брокер повідомлень, що працює за протоколом MQTT. Цей компонент створює надійний канал обміну інформацією між всіма частинами кіберфізичної системи енергетичного моніторингу. Після обробки даних на Raspberry Pi результати публікуються в NIVEMQ, звідки вони стають доступними для інших компонентів системи.

На клієнтській стороні розроблено JavaScript скрипт, який підписується на дані з NIVEMQ та відображає їх у зручному для сприйняття форматі. Мову JavaScript обрано через його універсальність та можливість створення інтерактивних веб-інтерфейсів без встановлення додаткового програмного забезпечення.

Кінцевою ланкою системи є користувач, який взаємодіє з JavaScript скриптом через веб-інтерфейс. Користувачеві надано можливість переглядати поточні енергетичні показники, історичні дані та аналітичні звіти. Інтерфейс розроблено з урахуванням принципів UX/UI дизайну для забезпечення інтуїтивно зрозумілої взаємодії.

Прототип реалізовано з використанням мікросервісної архітектури, що забезпечило гнучкість системи та можливість її масштабування. Кожен компонент може бути вдосконалений або замінений без необхідності переробляти всю систему. Така архітектура також підвищила надійність системи, оскільки збій одного компонента не призводить до повної відмови всієї системи.

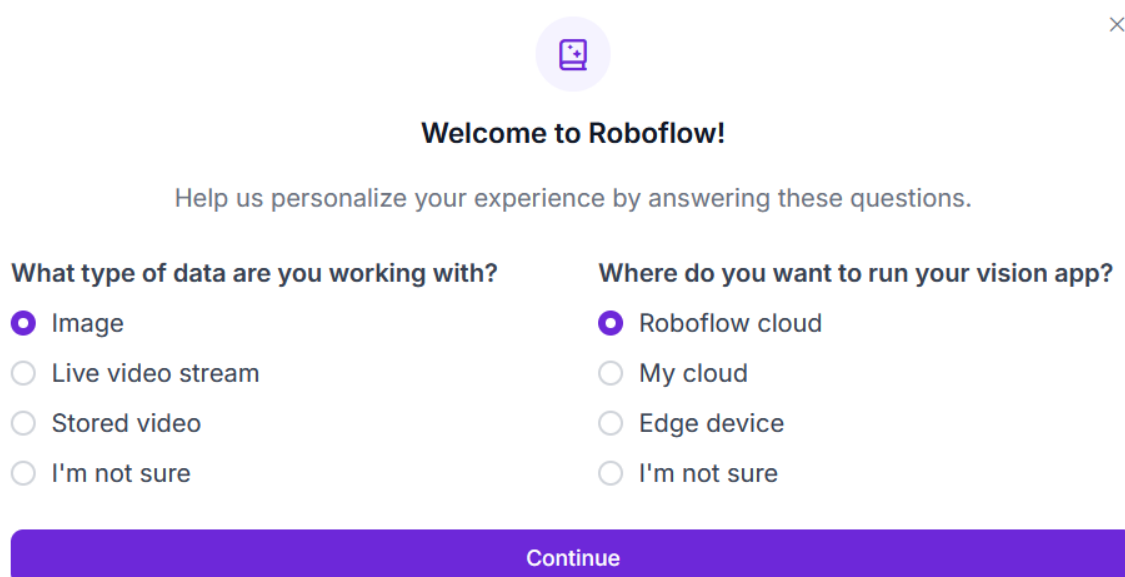
Таким чином запропонована реалізація дозволила протестувати основні функції, які були закладені при проєктуванні кіберфізичної системи, зокрема реалізацію технології комп'ютерного зору для моніторингу стану пристроїв,

взаємодію із користувачем і контроль пристроїв через хмарний брокер передачі повідомлень.

## 4.2 Створення та розгортання моделі комп'ютерного зору у Roboflow

Одним із етапів реалізації методу та кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель за допомогою комп'ютерного зору є створення та розгортання моделі комп'ютерного зору у хмарній платформі Roboflow.

Першочерговим етапом є налаштування середовища у платформі Roboflow (рис. 4.2, 4.3). На початку роботи пропонується обрати тип даних, із яким необхідно буде працювати моделі комп'ютерного зору. У даному випадку було обрано фото, оскільки ESP32 CAM будуть виконувати захоплення пристрою не у вигляді відео, а за допомогою фото. Також слід обрати місце розгортання самої моделі. Серед варіантів розгортання можна обрати хмарне сховище, приватну хмару, крайовий пристрій. Для даної кіберфізичної системи було обрано збереження у Roboflow cloud.



×

**Welcome to Roboflow!**

Help us personalize your experience by answering these questions.

<b>What type of data are you working with?</b>	<b>Where do you want to run your vision app?</b>
<input checked="" type="radio"/> Image	<input checked="" type="radio"/> Roboflow cloud
<input type="radio"/> Live video stream	<input type="radio"/> My cloud
<input type="radio"/> Stored video	<input type="radio"/> Edge device
<input type="radio"/> I'm not sure	<input type="radio"/> I'm not sure

**Continue**

Рисунок 4.2 – Вибір типу даних із якими буде працювати модель

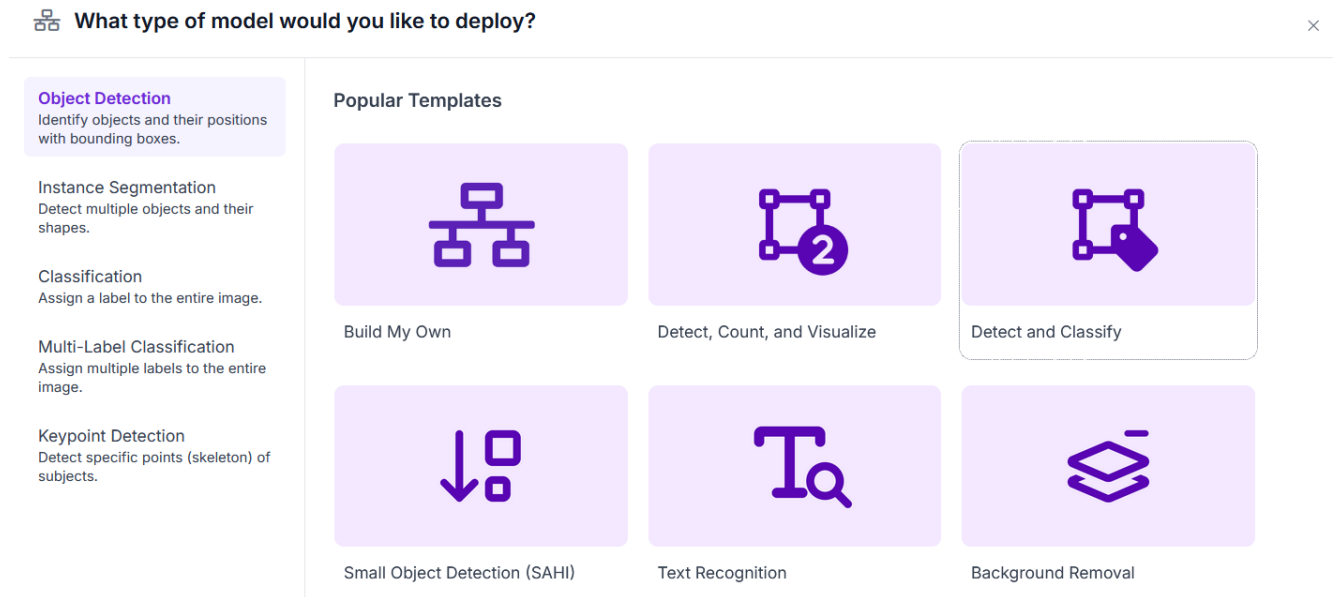


Рисунок 4.3 – Вибір шаблону у Roboflow

Процес роботи конвеєра комп'ютерного зору у Roboflow для визначення стану пристроїв було реалізовано через послідовну обробку вхідних зображень (рис. 4.4). Спочатку система отримала вхідні дані у вигляді зображень, які пройшли через модель об'єктного детектування. Ця модель проаналізувала кожен кадр, виявила та ідентифікувала об'єкти, що знаходилися на ньому. На основі отриманих результатів було здійснено подальшу обробку, яка включала застосування механізму динамічного обрізання (Dynamic Crop). На цьому етапі система сфокусувалася на найбільш важливих частинах зображення, виділила області з розпізнаними об'єктами та відсікла непотрібні деталі, які могли заважати подальшій класифікації.

Після цього кадр пройшов через класифікаційну модель, яка проаналізувала виявлені об'єкти та визначила їхню категорію, що дозволило отримати точну інформацію про кожен елемент зображення. Далі було виконано заміну класів для забезпечення узгодженості даних між різними етапами обробки. Це дозволило стандартизувати отримані результати та коректно інтерпретувати виявлені об'єкти у подальших процесах.

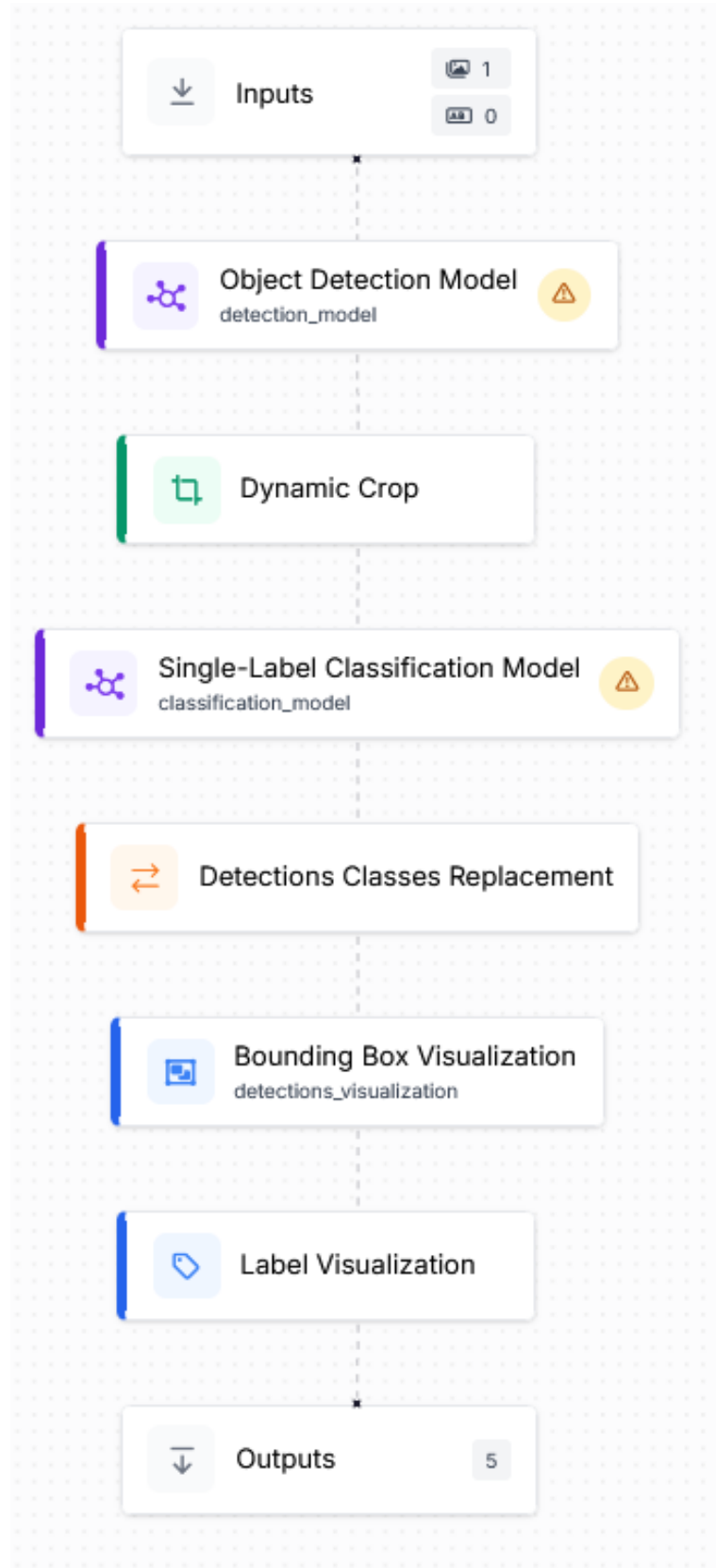


Рисунок 4.4 – Конвеєр комп’ютерного зору у Roboflow для визначення стану пристроїв

Завершальним етапом конвеєра стало візуалізація результатів роботи моделі комп'ютерного зору. Було накладено межові рамки (Bounding Box Visualization), які чітко позначили розташування кожного розпізнаного об'єкта на зображенні, а також додано текстові мітки (Label Visualization), що містили інформацію про відповідний клас об'єкта. Після цього оброблені дані передалися у вихідний потік, де вони могли бути використані для подальшого аналізу, збереження або прийняття рішень залежно від специфіки завдання. Такий підхід забезпечив ефективне та структуроване опрацювання вхідних зображень, що зробило його придатним для використання у системах автоматизованого контролю та розпізнавання об'єктів.

Після того як процес маркування було повністю завершено, було створено структурований набір даних, призначений для подальшого навчання моделі. Для навчання використовувалася опція автоматичного навчання, доступна у середовищі Roboflow, що дозволило значно оптимізувати процес побудови моделі комп'ютерного зору. Під час тренування нейронна мережа пройшла численні ітерації навчання, поступово покращуючи свої характеристики та адаптуючись до розпізнавання об'єктів у різних умовах. За результатами цього процесу модель досягла високого рівня точності, що склав 99.5%, що свідчило про ефективність використаної методики та якість підготовлених навчальних даних.

Після успішного завершення навчання було проведено тестування роботи моделі на реальних зображеннях. На рис. 4.5 наведено приклад результату роботи моделі комп'ютерного зору для розпізнавання вентилятора. У центрі зображення розміщувався кадр, на якому було чітко видно працюючий вентилятор. Модель виконала аналіз зображення, ідентифікувала вентилятор як об'єкт, після чого класифікувала його відповідно до визначених категорій. Виявлений вентилятор був розпізнаний як увімкнений пристрій, і система автоматично присвоїла йому клас "fan\_on". Оцінка ймовірності правильності класифікації склала 97%, що підтвердило високу впевненість моделі у зробленому прогнозі.

Trained On: home-monitoring 193 Images [View Version](#) →  
 Model Type: Roboflow 3.0 Object Detection (Accurate)  
 Checkpoint: COCOs

mAP 99.5% Precision 98.5% Recall 100.0%  
[View Model Graphs](#) →

Samples from Test Set

[View Test Set](#) →

Upload Image or a Video File

Drop files here or

[Select File](#)

Paste YouTube or Image URL

[Paste a link...](#)

[Try With Webcam](#)

[Try On My Machine](#)

1 object detected

Confidence Threshold: 50%

0%  100%

Overlap Threshold: 50%

0%  100%

Label Display Mode:

[Draw Confidence](#) ▾

```
{
  "predictions": [
    {
      "x": 553,
      "y": 398.5,
      "width": 984,
      "height": 435,
      "confidence": 0.967,
      "class": "fan_on",
      "class_id": 1,
      "detection_id": "aaa54ef8"
    }
  ]
}
```

[Copy](#)

Рисунок 4.5 – Результат роботи моделі комп’ютерного зору

З правого боку інтерфейсу наведені характеристики моделі:

- тип моделі: Roboflow 3.0 Object Detection (Accurate);
- контрольна точка: COCOs;
- метрика Accuracy: 99.5%;
- метрика Precision: 98.5%;
- метрика Recall: 100%.

Також відображено JSON-вихід із прогнозами моделі, де зазначені координати виявленого об’єкта, рівень впевненості (0.967), клас (fan\_on), ідентифікатор класу (1) та унікальний ідентифікатор класифікації.

Також зліва є можливість завантажити інше зображення або відео для тестування, а також кнопка для запуску моделі на локальному пристрої.

Для покращення узагальнюючої здатності моделі та забезпечення стабільної точності детекції в різних умовах була застосована аугментація даних. Під час підготовки набору даних використовувалися такі методи аугментації:

- зміна яскравості та контрасту – для врахування різних умов освітлення у приміщеннях;
- розмиття (Gaussian Blur) – для моделювання розфокусованих або рухомих об'єктів;
- додавання шуму, дозволяє виконати імітацію низькоякісних зображень із камер ESP32-CAM;
- зміна масштабу та обертання, дозволяє забезпечити виявлення незалежно від кута зйомки та розміру об'єкта.
- зсув і дзеркальне відображення дозволяє покращити розпізнавання пристроїв у різних положеннях.

Для аугментації даних було реалізовано скрипт на мові Python:

```
def augment_image(image_path, output_folder, num_augmentations=5):
    image = cv2.imread(image_path)
    if image is None:
        print("Error: Image not found.")
        return
    height, width = image.shape[:2]
    os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)

    for i in range(num_augmentations):
        transform = A.Compose([
            A.RandomBrightnessContrast(p=0.5), # Яскравість та контраст
            A.GaussianBlur(blur_limit=(3, 7), p=0.5), # Розмиття
            A.GaussNoise(var_limit=(10.0, 50.0), p=0.5), # Додавання шуму
            A.ShiftScaleRotate(shift_limit=0.1, scale_limit=0.2, rotate_limit=30,
p=0.7), # Зміна масштабу, обертання та зсув
            A.HorizontalFlip(p=0.5), # Дзеркальне відображення
        ])

        augmented = transform(image=image)
```

```

augmented_image = augmented["image"]
output_path = os.path.join(output_folder, f"augmented_{i}.jpg")
cv2.imwrite(output_path, augmented_image)
print(f"Збережено {num_augmentations} аугментованих зображень у
{output_folder}")
image_path = "fun_on.png"
output_folder = "augmented_images" # Папка для збереження
augment_image(image_path, output_folder)

```

Спочатку кожне вхідне зображення завантажується за допомогою бібліотеки OpenCV, яка дозволяє працювати з зображеннями – зчитувати їх з диска та зберігати результати. Далі, для виконання аугментації, було використано бібліотеку Albumentations, яка забезпечує набір трансформацій для змінення зображень, таких як коригування яскравості та контрасту, додавання розмиття, шуму, зміна масштабу, обертання та дзеркальне відображення. Для внутрішньої обробки зображень, а також виконання математичних операцій з ними, було підключено модуль NumPy. Кожен результат аугментації зберігався в окремому файлі. Таким чином було штучно збільшено і урізноманітнено вхідну вибірку даних для формування моделі.

Загалом тестова вибірка включала 100 зображень, що дозволило забезпечити рівномірний розподіл серед усіх класів.

Оцінка точності класифікації здійснювалася на основі порівняння передбачених результатів із реальними мітками, що дало змогу перевірити ефективність запропонованого підходу. У разі виявлення помилок або неточностей аналіз проводився для вдосконалення моделі та можливого коригування параметрів навчання.

Приклади застосування аугментації до вхідних зображень вентилятора наведено на рис. 4.6.

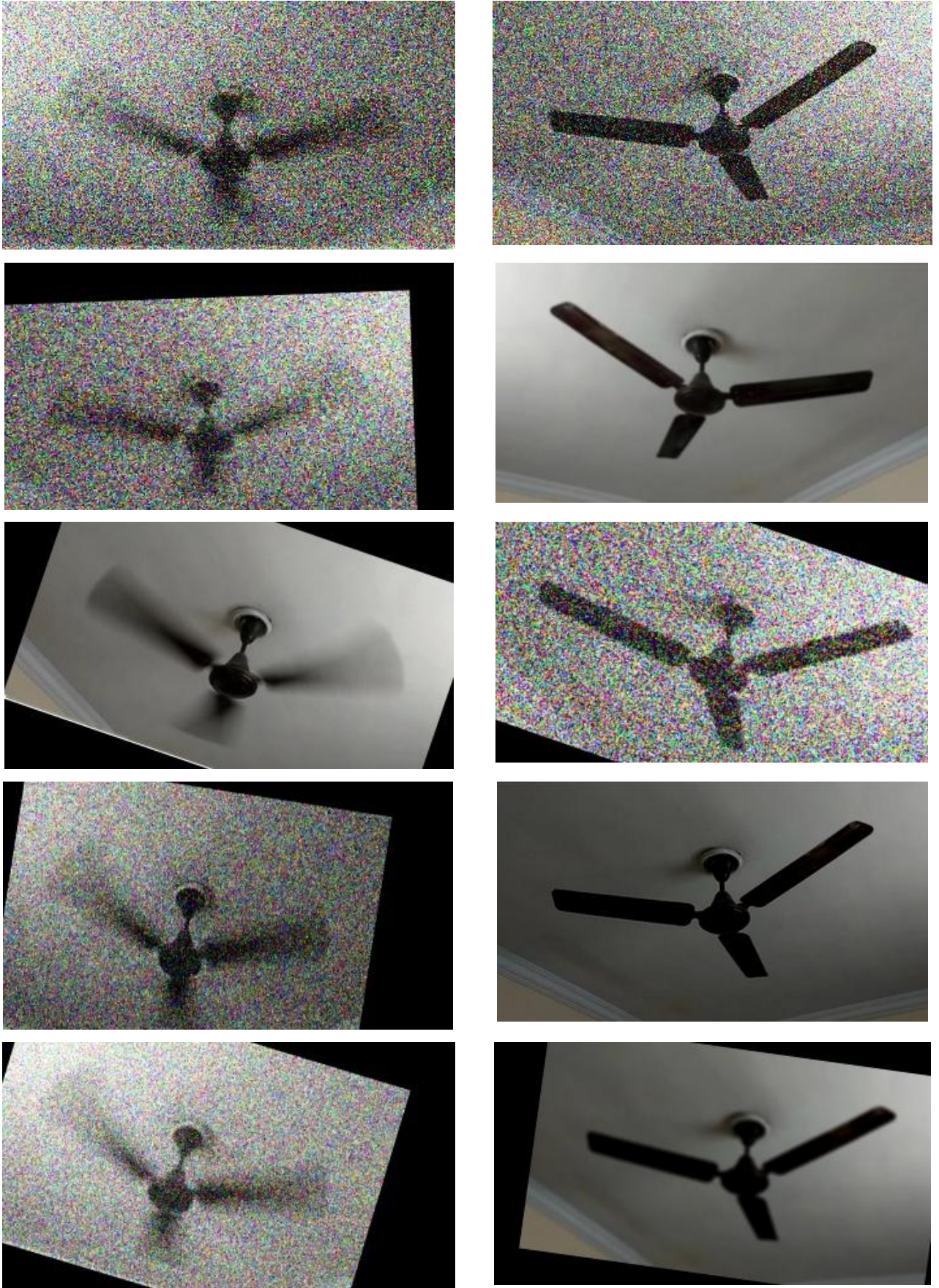


Рисунок 4.6 – Приклади застосування аугментації до вхідних зображень

У таблиці 4.1 приведено результати роботи моделі комп'ютерного зору для кіберфізичної системи енергетичного моніторингу.

Для кожного пристрою, який було протестовано, були визначені такі метрики оцінки класифікації як значення точності (Precision), повноти (Recall), F1-score (F1 міра) та загальної точності (Accuracy).

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP} \quad (4.1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4.2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4.3)$$

$$F \text{ міра} = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (4.4)$$

де  $TP$  – True positive;  $FP$  – False positive,  $TN$  – True negative,  $FN$  – False negative

Загальна точність системи для всіх пристроїв була однаковою і складала 99.5%, що вказує на досить високу ефективність у правильному розпізнаванні всіх типів пристроїв.

Проте значення точності та повноти варіюються для кожного пристрою: найкраще розпізнавання було досягнуто для телевізора вітальні з точністю 99.0% і повнотою 98.8%, що забезпечує відмінний баланс між точністю та здатністю виявляти всі необхідні сигнали. Варто відзначити, що всі пристрої мають високу ефективність з F1-score, що вказує на збалансовану точність та повноту для кожної категорії.

Таблиця 4.1 – Результати роботи моделі комп'ютерного зору для кіберфізичної системи енергетичного моніторингу

Пристрій	Локація	Precision	Recall	F1-score	Загальна точність
Освітлення	Кухня	98.7%	99.2%	98.9%	99.5%
Чайник	Кухня	97.5%	98.1%	97.8%	99.5%
Телевізор	Вітальня	99.0%	98.8%	98.9%	99.5%
Вентилятор	Спальня	98.5%	99.0%	98.7%	99.5%
Пральна машина	Ванна кімната	98.2%	98.9%	98.5%	99.5%

4.3 Програмна реалізація веб інтерфейсу для кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Програмна реалізація веб-інтерфейсу для кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору спрямована на моніторинг та управління енергоспоживанням кількох пристроїв, що працюють в різних кімнатах житлового приміщення. Це рішення поєднує в собі функціональність для вимірювання миттєвої потужності, обчислення спожитої енергії та відображення сумарного енергоспоживання в реальному часі на пристрої користувача.

Основним елементом системи є веб-інтерфейс, реалізований на платформі React Native, що дозволяє користувачам керувати різними пристроями через інтерактивні перемикачі та отримувати актуальні дані про енергоспоживання. Завдяки гнучкості та кросплатформеності React Native фреймворк, веб-інтерфейс адаптований для роботи на різних пристроях, включаючи смартфони, планшети та ПК, що забезпечує зручність користування незалежно від платформи. Інтерфейс також інтегрується з MQTT-брокером HIVEMQ, що дозволяє отримувати оновлення в реальному часі без затримок, гарантуючи швидку реакцію на зміну параметрів енергоспоживання.

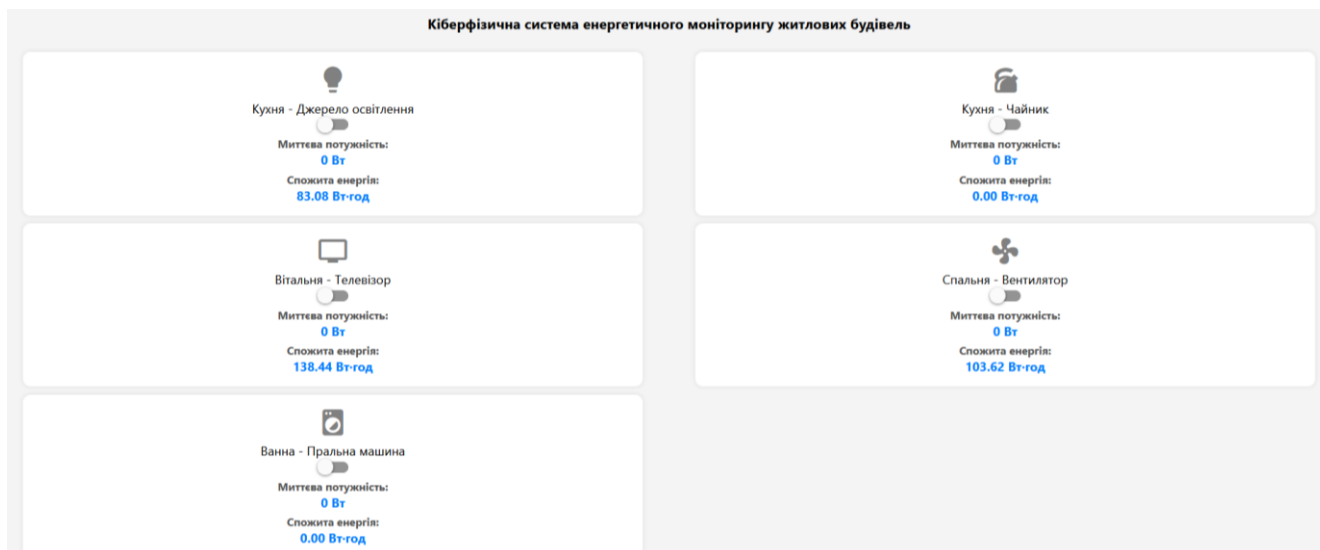


Рисунок 4.7 – Інтерфейсне вікно веб інтерфейсу для кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп’ютерного зору

Веб-інтерфейс відображає дані для п’яти пристроїв, моніторинг яких здійснюється у чотирьох приміщеннях: кухні (освітлення та чайник), вітальні (телевізор), спальні (вентилятор) та ванній кімнаті (пральна машина).

Програмне забезпечення працює таким чином, що кожен пристрій має свій унікальний ідентифікатор, який дозволяє відстежувати його поточний стан (увімнено чи вимкнено). Залежно від стану пристрою, миттєва потужність оновлюється, а також на основі цього обчислюється спожита енергія за певний період часу. Для кожного пристрою в реальному часі виводяться такі метрики, як миттєва потужність (в ватах) і спожита енергія (в ват-годинах). Ці значення динамічно оновлюються кожену секунду, що дозволяє отримувати точну інформацію про споживану енергію.

Користувач може керувати кожним пристроєм через перемикач, що дозволяє включати та вимикати пристрої. Для кожного пристрою відображається його поточний стан (включений чи вимкнений), а також його енергетичні показники. Унизу екрану також показується загальна кількість енергії, яку споживають всі пристрої за певний період часу, що дозволяє користувачам відстежувати загальне споживання енергії в житловому приміщенні.

Реалізований інтерфейс має досить простий та зрозумілий дизайн, зокрема дані про пристрої відображаються у форматі, де кожен пристрій показаний в окремій картці із інформацією про місце розташування, назвою пристрою, його піктограмою та відповідним перемикачем. Оновлення даних відбувається без необхідності оновлення сторінки, що забезпечує зручність користування системою в реальному часі.

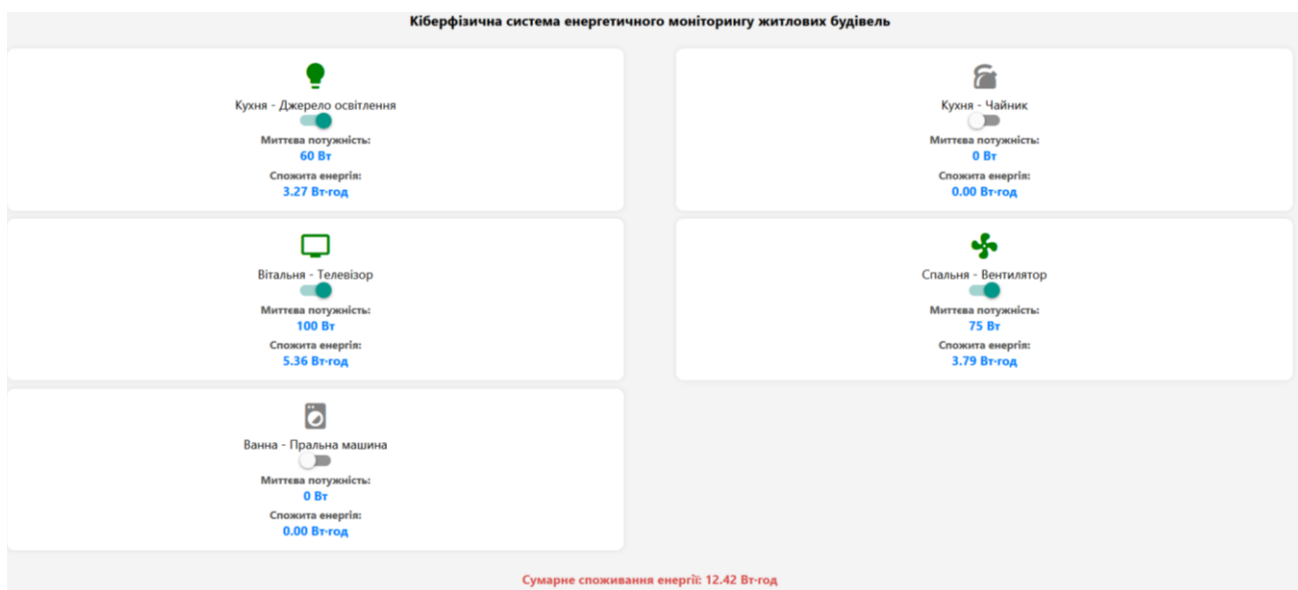


Рисунок 4.8 – Інтерфейсне вікно веб інтерфейсу для кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп’ютерного зору

Крім того, коли користувач вимикає пристрій через веб-інтерфейс, система публікує повідомлення у відповідну MQTT тему хмарного брокера HiveMQ. Це повідомлення містить інформацію про зміну стану пристрою. На цю тему підписаний також Raspberry Pi (RPi), який отримує сигнал про зміну стану пристрою та передає керуючий сигнал на ESP32 Cam. Цей сигнал ініціює дії на стороні клієнтських пристроїв ESP32 Cam, наприклад, вимкнення або включення певного пристрою (освітлення тощо).

Таким чином, цей веб-інтерфейс забезпечує ефективний моніторинг енергоспоживання різних пристроїв, що працюють у житлових приміщеннях, даючи користувачам можливість здійснювати контроль за енергоспоживанням та

приймати рішення щодо енергоефективності. Водночас інтеграція з MQTT-брокером та ESP32 Cam дозволяє реалізувати механізм автоматичного управління пристроями в реальному часі, підвищуючи зручність та ефективність використання енергетичних ресурсів.

#### 4.4 Висновки

Таким чином здійснено програмну реалізація веб-інтерфейсу для кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору спрямована на моніторинг та управління енергоспоживанням кількох пристроїв, що працюють в різних кімнатах житлового приміщення. Здійснено створення моделі комп'ютерного зору у Roboflow, підготовлено набори тестових даних, зокрема застосувавши методи аугментації даних. При тестуванні моделі комп'ютерного зору загальна точність кіберфізичної системи для всіх пристроїв була однаковою і складала 99.5%, що вказує на досить високу ефективність у правильному розпізнаванні всіх типів пристроїв.

## ВИСНОВКИ

Таким чином за результатами проведеного дослідження було запропоновано кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору. Запропонована кіберфізична система інтегрує кілька ключових компонентів, таких як одноплатна комп'ютерна система Raspberry Pi, пристрої ESP32 CAM з камерами для візуального моніторингу, хмарну інфраструктуру для обробки даних і веб-інтерфейс для зручного доступу та керування.

У першому розділі досліджено технологію комп'ютерного зору, здійснено аналіз відомих рішень та систем енергетичного моніторингу, виявлено їх переваги та недоліки. Виконано постановку задачі дослідження.

У другому розділі було запропоновано метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору дозволяє автоматично визначати стан електроприладів без використання додаткових сенсорів для вимірювання енергоспоживання. Замість традиційних підходів, що базуються на аналізі електричних параметрів за допомогою лічильників або датчиків струму, запропонована кіберфізична система використовує відеопотоки, отримані від модулів ESP32-CAM. Камери реєструють навколишнє середовище, а алгоритми комп'ютерного зору аналізують зображення для ідентифікації активних пристроїв. Особливістю методу є те, що кожен відеопотік з окремого приміщення обробляється окремим потоком на комп'ютері типу Raspberry Pi. Це дозволяє забезпечити паралельну обробку даних, підвищуючи швидкість аналізу та зменшуючи навантаження на центральний обчислювальний вузол. Завдяки такому підходу система здатна ефективно масштабуватися та адаптуватися до різної кількості приміщень у житловому будинку. Також запропонований метод передбачає використання MQTT для обміну даними, та передачу енергетичних метрик, таких як миттєва потужність, спожита енергія та загальне навантаження на приміщення. Це забезпечує детальний контроль за використанням електроенергії, дозволяючи знижувати витрати та покращувати енергетичну ефективність.

Також в рамках кіберфізичної системи запропонований метод визначення показників цифрового лічильника електроенергії на основі комп'ютерного зору підвищує точність обліку споживаної електроенергії, який заснований на аналізі зображень лічильника, сегментації 7-сегментних цифр та їх розпізнаванні за допомогою алгоритму K-Nearest Neighbors. Його інтеграція в систему забезпечує комплексний підхід до моніторингу, поєднуючи аналіз стану пристроїв із фактичними показниками лічильників.

У третьому розділі запропоновано структуру кіберфізичної системи енергетичного моніторингу, яка передбачає реалізацію кількох ключових функцій, зокрема керування та моніторинг електроприладами через веб-додаток, що дає можливість дистанційно вмикати та вимикати пристрої, такі як освітлення, вентилятор, електрочайник, телевізор та пральна машина, що сприяє підвищенню енергоефективності. Іншою важливою функцією є моніторингу енергоспоживання на рівні окремих пристроїв та приміщень. Запропоновано модель процесу функціонування кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, яка ґрунтується на математичному описі взаємодії компонентів системи, що забезпечують збір, аналіз та управління енергоспоживанням у режимі реального часу.

У четвертому розділі проведено експериментальне дослідження оцінки ефективності запропонованих рішень, розроблено прототип клієнтського додатку для кіберфізичної системи, що дозволяє відстежувати стан побутових пристроїв та метрик енергетичного моніторингу.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію у Збірнику наукових праць за матеріалами Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (Тернопіль, 5 листопада, 2024. С. 75-76).

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Peng C., Huang J. A home energy monitoring and control system based on ZigBee technology. *International Journal of Green Energy*. 2016. Vol. 13. P. 1615–1623.
2. Shivaraman N., Saki S., Liu Z., Ramanathan S., Easwaran A., Steinhorst S. Real-Time Energy Monitoring in IoT-enabled Mobile Devices. *Proceedings of the 2020 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. Grenoble, France, 9–13 March 2020. P. 991–994.
3. Galindo J. A., Caya M. V. Development of Street Lighting System with Object Detection. *Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. Baguio City, Philippines, 29 November–2 December 2018. P. 1–5.
4. Dizon E., Pranggono B. Smart Streetlights in Smart City: A Case Study of Sheffield. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2022. Vol. 13. P. 2045–2060.
5. Shih H. C. A robust occupancy detection and tracking algorithm for the automatic monitoring and commissioning of a building. *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 77. P. 270–280.
6. Tzempelikos A., Athienitis A. K. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*. 2017. Vol. 81. P. 369–382.
7. Yin B., Zhao L., Huang X., Zhang Y., Du Z. Research on non-intrusive unknown load identification technology based on deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 131. 107016.
8. Liu Y., Wang X., You W. Non-intrusive load monitoring by voltage–current trajectory enabled transfer learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 10. P. 5609–5619.
9. Kang J. S., Yu M., Lu L., Wang B., Bao Z. Adaptive Non-Intrusive Load Monitoring Based on Feature Fusion. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22. P. 6985–6994.

10. Kanda I., Veguillas J. M. Q. Data preprocessing and quantile regression for probabilistic load forecasting in the GEFCom2017 final match. *International Journal of Forecasting*. 2019. Vol. 35. P. 1460–1468.
11. Musbah H., Aly H. H., Little T. A. Energy management of hybrid energy system sources based on machine learning classification algorithms. *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 199. 107436.
12. Peng C., Huang J. A home energy monitoring and control system based on ZigBee technology. *International Journal of Green Energy*. 2016. Vol. 13. P. 1615–1623.
13. Kaman K. K., Faramarzi M., Ibrahim S., Yunus M. A. M. Artificial neural network for non-intrusive electrical energy monitoring system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2017. Vol. 6. P. 124–131.
14. Computer Vision in the Energy Sector. IoT-NGIN : вебсайт. URL: <https://iot-ngin.eu/index.php/2023/04/19/computer-vision-in-the-energy-sector/> (дата звернення: 19.04.2023).
15. Laayati O., Bouzi M., Chebak A. Smart Energy Management System: Design of a Monitoring and Peak Load Forecasting System for an Experimental Open-Pit Mine. *Applied System Innovation*. 2022. Vol. 5, № 1. 18.
16. He N. et al Learning-Based Non-Intrusive Electric Load Monitoring for Smart Energy Management. *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 10. 3109.
17. Khan H.R. et al A Low-Cost Energy Monitoring System with Universal Compatibility and Real-Time Visualization for Enhanced Accessibility and Power Savings. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, № 10. 4137.
18. Vanin A.S., Belan, P. Towards Sustainable Cities: Utilizing Computer Vision and AI for Efficient Public Lighting and Energy Management. *Urban Science*. 2023. Vol. 7, № 3. 94.
19. Tien P.W., Wei S., Calautit J. A Computer Vision-Based Occupancy and Equipment Usage Detection Approach for Reducing Building Energy Demand. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 1. 156.
20. Khayyam H. Adaptive intelligent energy management system of plug-in hybrid electric vehicle. *Energy*. 2014. 69 P. 319-335.

21. Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*. 2021.
22. Gaber M., El-Banna S. H., El-Dabah M., Hamad M. S. Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system. *Energy Reports*. 2021. 7 P.7989-7998
23. Kermani M., Adelmanesh B., Shirdare E., Sima C. A., Carnì D. L., Martirano L. Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*. 2021.
24. Elsisi M., Tran M.-Q., Mahmoud K., Lehtonen M., Darwish M.M. Deep Learning-Based Industry 4.0 and Internet of Things towards Effective Energy Management for Smart Buildings. *Sensors*. 2021. 21, 4. 1038.
25. Marinakis V, Doukas H. An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management in Buildings. *Sensors*. 2018. 18, 2. 610.
26. Bajaj S., Teja S. C., Yemula P. K. Computer vision based energy monitoring system using meter image capturing system (MICAPS). *First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)*, 7–8 Feb. 2020, Raipur, India. 2020. P. 246–249. DOI: 10.1109/ICPC2T48082.2020.9071459.
27. Вступ до OpenCV. Комп'ютерний зір. ITMaster: URL: <https://itmaster.biz.ua/programming/vision/opencv.html> (дата звернення: 29.04.2025).
28. Face recognition with OpenCV, Python, and deep learning URL: <https://pyimagesearch.com/2018/06/18/face-recognition-with-opencv-python-and-deep-learning/> (дата звернення: 29.04.2025).
29. OpenCV Python Tutorial. GeeksforGeeks: URL: <https://www.geeksforgeeks.org/opencv-python-tutorial/> (дата звернення: 29.03.2025).
30. OpenCV-Python Tutorials. OpenCV: URL: [https://docs.opencv.org/4.x/d6/d00/tutorial\\_py\\_root.html](https://docs.opencv.org/4.x/d6/d00/tutorial_py_root.html) (дата звернення: 29.03.2025).
31. Rohith M., Sunil A., Mohana. Comparative Analysis of Edge Computing and Edge Devices: Key Technology in IoT and Computer Vision Applications. *Proceedings of the 2021 International Conference on Recent Trends on Electronics, Information,*

*Communication & Technology (RTEICT)*. Bangalore, India, 2021. P. 722-727. DOI: 10.1109/RTEICT52294.2021.9573996.

32. Liu S. et al. Edge Computing for Autonomous Driving: Opportunities and Challenges. *Proceedings of the IEEE*. 2019. Vol. 107, № 8. P. 1697-1716.

33. Nikouei S. Y. et al. Kerman: A Hybrid Lightweight Tracking Algorithm to Enable Smart Surveillance as an EdgeService. *Proceedings of the Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*. 2019. P. 1-6.

34. Neff C. et al. REVAMP2T: Real-Time Edge Video Analytics for Multicamera Privacy-Aware Pedestrian Tracking. *Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7, № 4. P. 2591-2602.

35. Ashok K. et al. Grid edge analytics platform with AMI data. *Proceedings of the IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. 2018. P. 1-5.

36. Wang Z., Xie Q. Household Load Identification Based on Multi-label and Convolutional Neural Networks. *Proceedings of the 2022 6th International Conference on Deep Learning Technologies*. Xi'an, China, 26–28 July 2022. P. 42–48.

37. Jayant H. K., Rana K., Kumar V., Nair S. S., Mishra P. Efficient IIR notch filter design using Minimax optimization for 50Hz noise suppression in ECG. *Proceedings of the 2015 International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)*. Wagnaghat, India, 24–26 September 2015. P. 290–295.

38. Bouny L. E., Khalil M., Adib A. Removal of 50Hz PLI from ECG signal using undecimated wavelet transform. *Proceedings of the 2017 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. Rabat, Morocco, 1–4 November 2017. P. 1–6.

39. Dhayabaran R., Balachandar P., Arunkumar R., Elakkiyaselvan M. Design of FIR Filter for Reduction of Power Line Interference from ECG Signal. *Proceedings of the 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*. Coimbatore, India, 20–21 April 2018. P. 1205–1208.

40. Rahmani K., Ahriz A., Bouaziz N. Development of a new residential energy management approach for retrofit and transition, based on hybrid energy sources. *Sustainability*, 2022, Vol. 14, No. 7. P. 4069. DOI: 10.3390/su14074069.
41. Sait H.H. Auditing and analysis of energy consumption of an educational building in hot and humid area. *Energy Conversion and Management*, 2013, Vol. 66. P. 143-152.
42. Dall'O' G., Speccher A., Bruni E. The Green Energy Audit, a new procedure for the sustainable auditing of existing buildings integrated with the LEED Protocols. *Sustainable Cities and Society*, 2012, Vol. 3. P. 54–65. DOI: 10.1016/j.scs.2012.01.003.
43. Liu G., Zheng S., Xu P., Zhuang T. An ANP-SWOT approach for ESCOs industry strategies in Chinese building sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 93. P. 90–99.
44. Zhang X., Lovati M., Vigna I., Widén J., Han M., Gal C., Feng T. A review of urban energy systems at building cluster level incorporating renewable-energy-source (RES) envelope solutions. *Applied Energy*, 2018, Vol. 230. P. 1034-1056.
45. Abotah R., Daim T.U. Towards building a multi perspective policy development framework for transition into renewable energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2017, Vol. 21. P. 67–88.
46. Amin Z.M., Hawlader M.N.A. A review on solar assisted heat pump systems in Singapore. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, Vol. 26. P. 286-293.
47. Asaee S.R., Ugursal V.I., Beausoleil-Morrison I. Techno-economic assessment of solar assisted heat pump system retrofit in the Canadian housing stock. *Applied Energy*, 2017, Vol. 190. P. 439-452.
48. Han J., Cheng G. A survey on object detection in optical remote sensing images. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2016, Vol. 117. P. 11–28.
49. Zhang Q., Dong Y. A survey of depth semantic feature extraction of high-resolution remote sensing images based on CNN. *Remote Sens. Technol. Applied*, 2019, Vol. 34. P. 1–11.

50. Duarte D., et al. Satellite image classification of building damages using airborne and satellite image samples in a deep learning approach. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2018, Vol. IV-2. P. 89-96.
51. Bellos E., et al Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems. *Energy Conversion and Management*, 2016, Vol. 120. P. 306-319.
52. Conibeer G. Third-Generation Solar Cells. In: *Solar Cell Materials: Developing Technologies*, 2014. P. 283–314.
53. Yahiaoui A., Benmansour K., Tadjine M. Control, analysis and optimization of hybrid PV-Diesel-Battery systems for isolated rural city in Algeria. *Solar Energy*, 2016, Vol. 137. P. 1–10.
54. Casini M. Small Vertical Axis Wind Turbines for Energy Efficiency of Buildings. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2016, Vol. 4. P. 56–65.
55. Aiche-Hamane L., et al. Feasibility study of hydrogen production from wind power in the region of Ghardaia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, Vol. 34. P. 4947–4952.
56. Chang K.-C., Lin W.-M., Leu T.-S., Chung K.-M. Perspectives for solar thermal applications in Taiwan. *Energy Policy*, 2016, Vol. 94. P. 25–28.
57. Understanding and Building an Object Detection Model from Scratch in Python, URL: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2018/06/understanding-building-object-detection-model-python/> (дата звернення 29.03.2025)
58. Object and Animal Recognition With Raspberry Pi and OpenCV, URL: <https://core-electronics.com.au/guides/object-identify-raspberry-pi/> (дата звернення 29.03.2025).
59. Object Detection with Python, URL: <https://www.ris-ai.com/object-detection/> (дата звернення 29.03.2025).
60. Great Learning Editorial Team, Real-Time Object Detection Using TensorFlow, URL: <https://www.mygreatlearning.com/blog/object-detection-using-tensorflow/> (дата звернення 29.03.2025).

61. Thiel M., et al. Integration of optical and synthetic aperture radar imagery for improving crop mapping in northwestern Benin, West Africa. *Remote Sens.*, 2014, Vol. 6. P. 6472–6499.
62. Lin T.-Y., RoyChowdhury A., Maji S. Bilinear CNN models for fine-grained visual recognition. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, 2015. P. 1449–1457.
63. Maji S., Rahtu E., Kannala J., Blaschko M.B., Vedaldi A. Fine-grained visual classification of aircraft. *CoRR*, 2013. abs/1306.5151.
64. Liu X., Xia T., Wang J., Yang Y., Zhou F., Lin Y. Fully convolutional attention networks for fine-grained recognition. *arXiv preprint arXiv:1603.06765*, 2016.
65. Forestier G., et al. Knowledge-based region labeling for remote sensing image interpretation. *Comput. Environ. Urban System*, 2012, Vol. 36. P. 470-480.
66. Rigoll G., Hofmann M., Tiefenbacher P. Background segmentation with feedback: The pixel-based adaptive segmenter. In: *Proceedings of IEEE Conference*, 2012, June. P. 38–43.
67. Inglada J., Vincent A., Arias M., Marais-Sicre C. Improved early crop type identification by joint use of high temporal resolution SAR and optical image time series. *Remote Sens.*, 2016, Vol. 8. P. 362.
68. Chen L.X., et al. Superpixel based land cover classification of VHR satellite image combining multi-scale CNN and scale parameter estimation. *Earth Sci. Inform.*, 2019, Vol. 12. P. 341–363.
69. Peng Y., He X., Zhao J. Object-part attention model for fine-grained image classification. *IEEE Trans. Image Process.*, 2018, Vol. 27, No. 3. P. 1487–1500.
70. Russakovsky O. et al. ImageNet large scale visual recognition challenge. *Int. J. Comput. Vis.*, 2015, Vol. 115, No. 3. P. 211-252.
71. Lin T.-Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollár P., Zitnick C.L. Microsoft COCO: Common objects in context. In: *European Conference on Computer Vision*. Springer, 2014. P. 740-755.
72. Noroozi M., Favaro P. Unsupervised learning of visual representations by solving jigsaw puzzles. In: *Computer Vision – ECCV 2016*. Springer International Publishing, Cham, 2016. P. 69-84.

73. Wang Z., Xie Q. Household Load Identification Based on Multi-label and Convolutional Neural Networks. *Proceedings of the 2022 6th International Conference on Deep Learning Technologies*. Xi'an, China, 26–28 July 2022. P. 42–48.
74. Liu S. et al. Edge Computing for Autonomous Driving: Opportunities and Challenges. *Proceedings of the IEEE*. 2019. Vol. 107, № 8. P. 1697-1716.
75. Nikouei S. Y. et al. Kerman: A Hybrid Lightweight Tracking Algorithm to Enable Smart Surveillance as an EdgeService. *Proceedings of the Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*. 2019. P. 1-6.
76. Bellos E., et al Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems. *Energy Conversion and Management*, 2016, Vol. 120. P. 306-319.
77. Musbah H., Aly H. H., Little T. A. Energy management of hybrid energy system sources based on machine learning classification algorithms. *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 199. 107436.
78. Peng C., Huang J. A home energy monitoring and control system based on ZigBee technology. *International Journal of Green Energy*. 2016. Vol. 13. P. 1615-1623.
79. Sait H.H. Auditing and analysis of energy consumption of an educational building in hot and humid area. *Energy Conversion and Management*, 2013, Vol. 66. P. 143-152.
80. Lin T.-Y., RoyChowdhury A., Maji S. Bilinear CNN models for fine-grained visual recognition. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, 2015. P. 1449-1457.

## ДОДАТОК А Копія наукової публікації

ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
 ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
 КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ



**ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА  
 КОНФЕРЕНЦІЯ СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА  
 МОЛОДИХ ВЧЕНИХ  
 «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА  
 МЕРЕЖІ»**

**5 ЛИСТОПАДА 2024**



[KI.WUNU.EDU.UA/CONFERENCE/](http://KI.WUNU.EDU.UA/CONFERENCE/)

**ТЕРНОПІЛЬ**

**2024**



Рибанчук Д.М.  
магістрант 2 курсу ФІТ ХНУ  
Науковий керівник к.т.н., доцент Березька К.М., кафедра КПС ХНУ

## КОНЦЕПЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

**Вступ.** Енергетична ефективність стає критичною у сучасних умовах. Зростання вартості енергоресурсів і дедалі більша увага до змін клімату змушують уряди, бізнеси та споживачів шукати способи зниження енергоспоживання. На тлі глобальної кліматичної кризи уряди багатьох країн запроваджують суворі норми та стандарти для зниження викидів парникових газів і енергетичних втрат. Оптимізація енергоспоживання веде до суттєвого зниження витрат на комунальні послуги, що є важливою перевагою як для окремих домовласників, так і для великих житлових комплексів. Навіть невеликі покращення в енергоефективності можуть призвести до значних заощаджень у довгостроковій перспективі [1-4].

Моніторинг житлових будівель на основі комп'ютерного зору дозволяє будівлям відповідати екологічним стандартам, сприяє зниженню вуглецевого сліду та підтримує концепцію сталого розвитку. Отже, енергетичний моніторинг житлових будівель на основі комп'ютерного зору стає актуальним рішенням в умовах зростання вартості енергії, екологічних викликів та поширення "розумних" технологій. Його впровадження допомагає підвищити ефективність використання ресурсів, знизити витрати на енергоспоживання та сприяє збереженню довкілля. Тому задача розроблення кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору є актуальною та важливою.

**Постановка задачі.** Об'єкт дослідження – процес енергетичного моніторингу житлових будівель. Предмет дослідження – кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору. Головна мета даного дослідження полягає в автоматизації енергетичного моніторингу житлових будівель за допомогою кіберфізичної системи на основі комп'ютерного зору.

**Основний матеріал.** Комп'ютерний зір дозволяє автоматизувати процес моніторингу та контролю витрат енергії, виявляти точки неефективного споживання (наприклад, теплові витоки або неекономне використання електроенергії) та оперативно реагувати на проблеми.

Розвиток алгоритмів машинного навчання, штучного інтелекту та обробки зображень зробив можливим точне і ефективне застосування комп'ютерного зору для аналізу енергоспоживання. Камери високої роздільної здатності та спеціалізовані інфрачервоні датчики можуть швидко й точно оцінювати теплові втрати, а також інші показники, які традиційні методи моніторингу не можуть виявити з такою точністю.

Комп'ютерний зір спрощує процес моніторингу, дозволяючи проводити постійний контроль без участі людини. Це знижує ризик людських помилок і дозволяє автоматизувати не лише збір даних, а й прийняття рішень, наприклад, щодо автоматичного регулювання систем опалення, кондиціонування чи освітлення.

Енергетичний моніторинг із використанням комп'ютерного зору може не лише оптимізувати енергоспоживання, але й підвищити безпеку житлових приміщень. Наприклад, система може виявляти аномалії в роботі опалювальних систем або витоки газу та повідомляти власників будинків або технічні служби про потенційні проблеми.

Енергетичний моніторинг житлових будівель на основі комп'ютерного зору – це інноваційний підхід для контролю та оптимізації енерговитрат. Він полягає в аналізі та зборі даних за допомогою камер і технологій комп'ютерного зору для автоматичного виявлення і відстеження поведінки енергоспоживання в будинках.

Основні елементи такого моніторингу:

1) камери та сенсори – використання камер для зйомки інфрачервоних зображень або звичайних відеозаписів для збору інформації про теплові втрати, освітлення, наявність мешканців у приміщеннях;

2) алгоритми комп'ютерного зору – алгоритми аналізують зображення для визначення енергетичних параметрів, таких як температура поверхонь, джерела тепловтрат, або визначення режимів роботи пристроїв (наприклад, чи залишені вони увімкненими без потреби);

3) обробка даних – зібрані дані обробляються, і система може пропонувати рішення для підвищення енергоефективності, наприклад, автоматичне керування освітленням або опаленням, коли приміщення не зайняті.

Перевагами кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору будуть: точність даних (комп'ютерний зір може забезпечити точніші та більш деталізовані дані порівняно зі стандартними сенсорами), безперервний моніторинг (можливість постійного аналізу без необхідності вручну збирати дані), оптимізація витрат енергії (зниження непотрібних енергетичних витрат шляхом автоматичного регулювання).

Кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору може використовуватись для: визначення витоків тепла з будівлі (через вікна, стіни або дах), автоматичного ввімкнення або вимкнення світла та техніки в залежності від присутності мешканців; контролю за роботою систем опалення або кондиціонування повітря для зниження енергоспоживання в пустих приміщеннях.

Архітектура кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору поєднує фізичні компоненти (датчики, камери) з цифровими елементами (аналітичне програмне забезпечення, алгоритми комп'ютерного зору) для моніторингу та оптимізації енергоспоживання в реальному часі.

Основні компоненти архітектури:

1) фізичний рівень (камери, сенсори та виконавчі механізми) – це апаратна частина системи, що відповідає за збір даних про стан навколишнього середовища;

2) рівень обробки даних (локальна обробка) – алгоритми аналізу відео або зображень, що дозволяють виявити, наприклад, відкриті вікна, увімкнені прилади, що не використовуються;

3) мережевий рівень (зв'язок та передача даних) – передача зібраних сенсорами та камерами даних на сервери або хмарні системи для подальшого аналізу;

4) хмарний рівень (централізована обробка даних) – збір і аналіз даних у хмарних системах, де потужні алгоритми обробляють великі масиви даних для глибшого аналізу;

5) рівень прийняття рішень (керування енергоспоживанням) – система може самостійно приймати рішення про оптимізацію енергоспоживання на основі аналізу даних (наприклад, автоматичне відключення пристроїв або регулювання температури в приміщеннях).

Перевагами такої архітектури є: гнучкість та масштабованість, ефективність енергоспоживання та простота інтеграції.

Така архітектура кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору забезпечує ефективне управління енергоспоживанням та сприяє переходу до сталих технологій у житлових будівлях.

**Висновки.** Отже, було розроблено концепцію кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, яка дозволяє значно покращити енергоефективність і скоротити витрати на енергоресурси в житлових будівлях.

#### Список літератури

1. D. Wu et al., "Computer vision-based intelligent elevator information system for efficient demand-based operation and optimization", *J. Building Eng.*, p. 108126, November 2023.
2. A. Reichel, J. Döge, D. Mayer and J. Bräunig, "Application of AI-based Image Processing for Occupancy Monitoring in Building Energy Management", in *11th Int. Conf. Smart Cities Green ICT Syst.*, 27–29 April 2022. SCITEPRESS, 2022.
3. N. Khan, M. A. Al Hafiz Khan and N. Roy, "Unsupervised Spatio-Temporal Anomalous Thermal Behavior Monitoring of Inside-Built Environments", in *2023 19th Int. Conf. Distrib. Comput. Smart Syst. Internet Things (DCOSS-IoT)*, Pafos, Cyprus, 19–21 June 2023. IEEE, 2023.
4. J. Telicko and K. Bolotin, "Building Ventilation Optimization Through Occupant-Centered Computer Vision Analysis", *Latvian J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 60, s6, p. 60–70, December 2023.

ДОДАТОК Б Копія презентації до захисту кваліфікаційної роботи

# МЕТОД ТА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Виконав Дмитро РИБАНЧУК

Науковий керівник: Катерина БЕРЕЗЬКА



Хмельницький, 2025

## **Об'єкт, предмет, мета дослідження**

**Метою роботи** є автоматизація енергетичного моніторингу житлових будівель за допомогою кіберфізичної системи на основі комп'ютерного зору.

**Об'єктом дослідження** є процес енергетичного моніторингу житлових будівель.

**Предметом дослідження** є кіберфізична система та метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору.

**Метод дослідження** У роботі було застосовано наступні теорії та засоби:

- математичні та аналітичні методи дослідження ;
- теоретико-множинні моделі;
- методи штучного інтелекту та комп'ютерного зору для аналізу зображень та даних з сенсорів.



## Наукова новизна

- **удосконалено** метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, який відрізняється від відомих аналізом відеопотоків з модулів ESP32-CAM, обробка яких здійснюється на Raspberry Pi в кожному окремому потоці, що дозволило здійснювати автоматичне визначення стану електроприладів без використання додаткових сенсорів споживання енергії.
- **удосконалено** кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору, яка відрізняється від відомих інтеграцією функцій керування та моніторингу електроприладами, а також визначення енергетичних метрик, що дозволило підвищити ефективність енергетичного менеджменту.



## Актуальність теми дослідження

- **Глобальні виклики:**

Зростаюча потреба в енергоефективності та сталому розвитку.

- **Зростання цін на енергоресурси** та активний розвиток **цифрових технологій** роблять автоматизацію енергетичних систем у житлі **необхідною умовою**

- **Сучасні підходи:**

Інтеграція **Інтернету речей (IoT)** та **кіберфізичних систем (КФС)** дозволяє:

- Моніторити споживання енергії
- Оптимізувати роботу інженерних систем

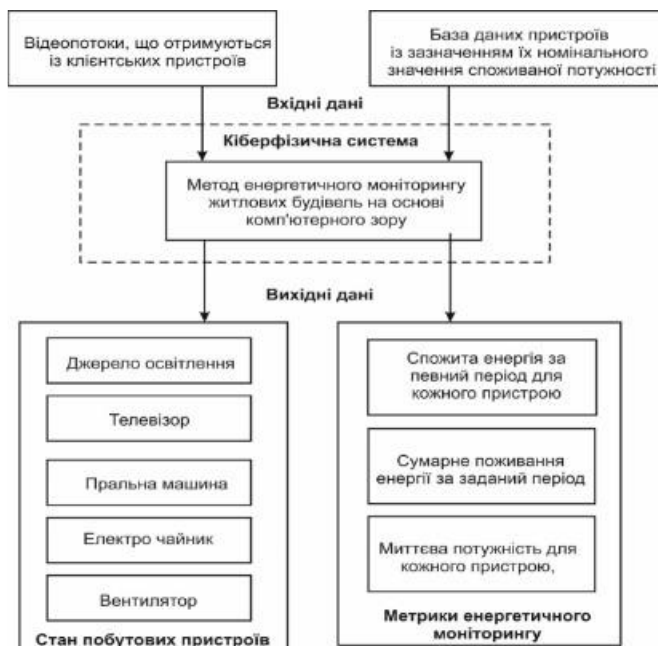
- **Комп'ютерний зір:**

Автоматичний аналіз елементів будівлі (вікна, двері)

- **Безпосередній вплив на споживання енергії**



## Метод енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору



Крок 1. Ініціалізація обладнання та програмного забезпечення

Крок 2. Збір даних з відеопотоків

Крок 3. Застосування моделі комп'ютерного зору. Кожен кадр, отриманий із відеопотоків клієнтів ESP32 -CAM, передається до API моделі комп'ютерного зору для виконання розпізнавання об'єктів у реальному часі.

**Вхідні дані:** Відеопотоки з ESP32-CAM пристроїв, номінальна потужність пристроїв

**Вихідні дані:** Статуси пристроїв та три ключові енергетичні метрики

```

1. Ініціалізувати MQTT клієнт та підключитися до брокера
2. Завантажити попередньо наванену модель комп'ютерного зору
3. Ініціалізувати базу даних потужностей пристроїв P_nom[i,j]
4. Ініціалізувати змінні для відстеження енергоспоживання:
- P[i,j] = 0 для всіх i,j // миттєва потужність
- E[i,j] = 0 для всіх i,j // спожита енергія за період
- E_room[i] = 0 для всіх i // сумарне енергоспоживання приміщення
5. Ініціалізувати часові мітки початку моніторингу t_start
6. Для кожного приміщення i в межах контрольованих приміщень:
7. Запустити потік для обробки відеопотоку з приміщення i
8. В межах кожного потоку:
9. Пока True:
10. Отримати кадр I_i(t) з відеопотоку
11. Отримати поточний час t_current
12. Застосувати модель комп'ютерного зору: результати = infer(I_i(t))
13. Для кожного виявленого об'єкта в результаті:
14. Витягти координати, назву, класу, рівня, достовірності
15. Визначити тип пристрою та слас з назви_класу
16. Оновити S(i,j,t) на основі стану
17. Опублікувати стан у MQTT тему home/приміщення/(пристрій)
// Розрахунок миттєвої потужності
18. Якщо S(i,j,t) == 1:
19. P[i,j] = P_nom[i,j]
20. Інакше:
21. P[i,j] = 0
22. Опублікувати P[i,j] у MQTT тему energy/приміщення/(пристрій)/power
// Розрахунок спожитої енергії
23.  $\Delta t = (t\_current - t\_prev[i,j]) / 3600$  // перетворення в години
24.  $E[i,j] += P[i,j] * \Delta t$ 
25. Опублікувати E[i,j] у MQTT тему energy/приміщення/(пристрій)/consumption
26.  $t\_prev[i,j] = t\_current$ 
// Розрахунок сумарного енергоспоживання по приміщенню
27. E_room[i] = 0
28. Для кожного пристрою j у приміщенні i:
29. E_room[i] += E[i,j]
30. Опублікувати E_room[i] у MQTT тему energy/приміщення/total
31. Нанести обмежувальні рамки та підпис на кадр
32. Відобразити кадр
33. Якщо натиснута клавіша виходу: break
34. Завільнити ресурси
35. Звершити всі потоки

```

```

{
  "predictions": [
    {
      "x": 320,
      "y": 240,
      "width": 100,
      "height": 150,
      "class": "person",
      "confidence": 0.85,
      "class_id": 0
    },
    {
      "x": 500,
      "y": 300,
      "width": 80,
      "height": 120,
      "class": "tv_on",
      "confidence": 0.92,
      "class_id": 1
    }
  ]
}

```

Результат (result) містить ключ predictions, який є списком словників. Кожен словник у цьому списку описує один виявлений об'єкт. Основні поля, в словнику:

1. **x**: Координата центру об'єкта по осі X (у пікселях).
2. **y**: Координата центру об'єкта по осі Y (у пікселях).
3. **width**: Ширина bounding box (прямокутника, що охоплює об'єкт).
4. **height**: Висота bounding box.
5. **class**: Назва класу об'єкта (наприклад, "person", "tv\_on", "light1\_off" тощо).
6. **confidence**: Рівень впевненості моделі у правильності розпізнавання (число від 0 до 1, де 1 — максимальна впевненість).
7. **class\_id**: Ідентифікатор класу (якщо модель використовує числові ідентифікатори).
8. **Додаткові поля**: Залежно від моделі, можуть бути інші поля, наприклад, час обробки, координати кутів bounding box тощо.

#### Крок 4. Застосування моделі комп'ютерного зору

$$f_c(d) = \begin{cases} 1, & C_d \geq \sigma \\ 0, & C_d < \sigma \end{cases} \quad (1)$$

Отримані об'єкти класифікуються за станом – увімкнено чи вимкнено – на основі їх розпізнаних класів.

$$S_{i,j,t} = f_{CV}(I_{i,t}, \theta) \quad (2)$$

Застосування темпорального критерію, тобто якщо у  $i$ -му потоці визначено стан пристрою  $S_t$  у момент часу  $t$ , і при чому  $S_{t-1}, S_{t-2}, \dots, S_{t-n}$  визначають стани пристрою у попередні моменти часу, то система підтверджує змінну стану лише якщо:

$$\sum_{i=0}^n [(S_{t-i} = S_t) \geq T_{stable}] \quad (3)$$

Крок 5. Передача статусів пристроїв через MQTT. Наступним кроком є передача даних із попереднього кроку у відповідні канали обміну даними

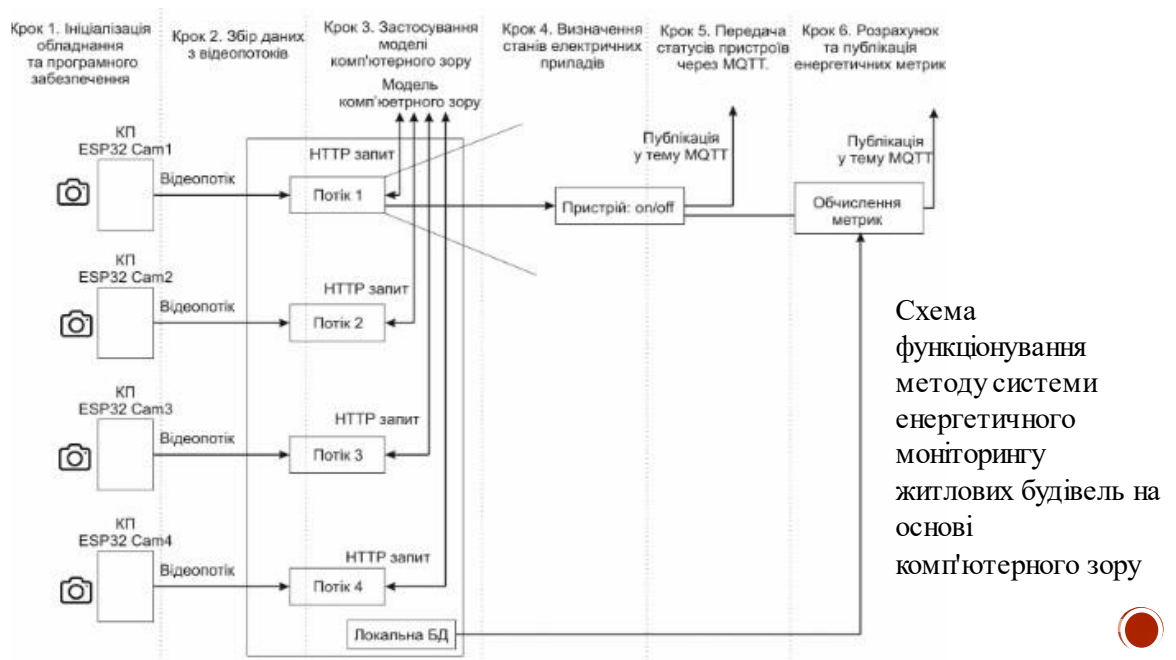
Крок 6. Розрахунок та публікація енергетичних метрик.

Першим етапом є визначення миттєвої потужності для кожного активного пристрою. Якщо пристрій перебуває у стані увімкнено, то його споживана потужність прирівнюється до номінального значення, що зберігається в локальній базі даних. У випадку, коли пристрій вимкнений, потужність дорівнює нулю:

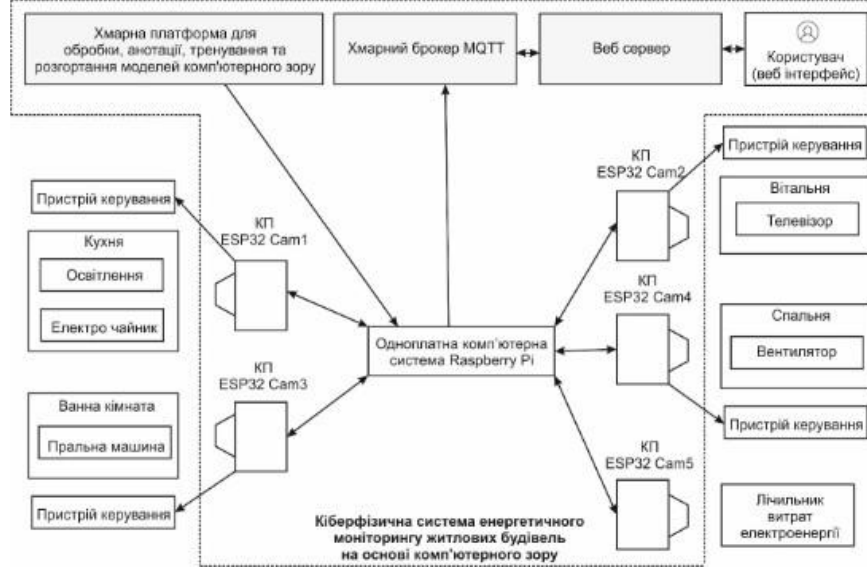
$$P_i = \begin{cases} P_{nom,i}, & \text{if } S_{i,j} = 1 \\ 0, & \text{if } S_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Наступний етап передбачає обчислення загального обсягу спожитої електроенергії кожним пристроєм за певний період. Для цього здійснюється накопичення часу, протягом якого пристрій перебував у стані "увімкнено":

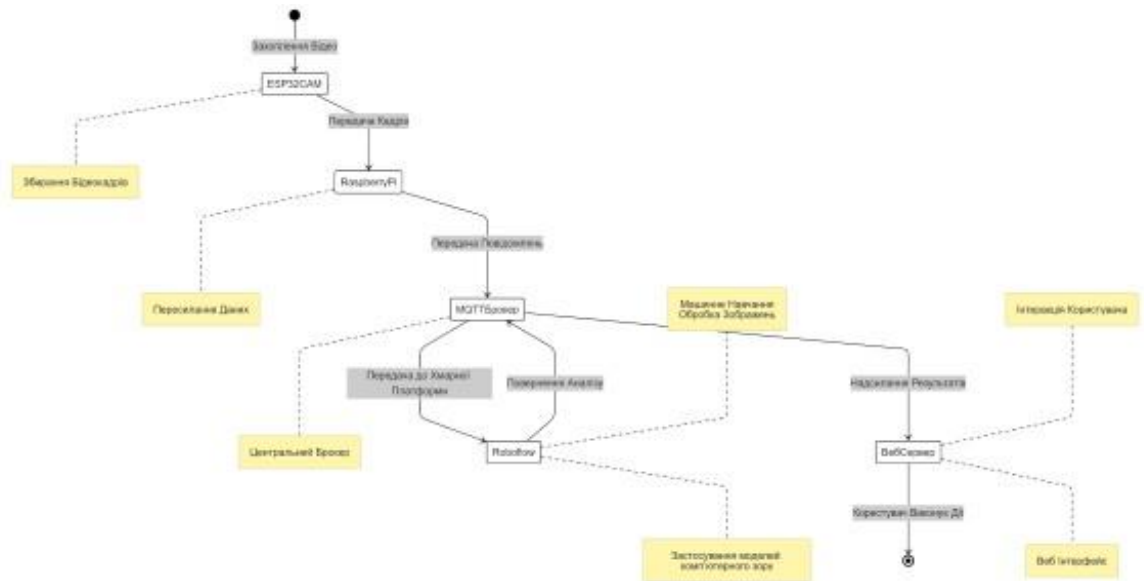
$$eE_i = P_{nom,i} \cdot T \quad (5)$$



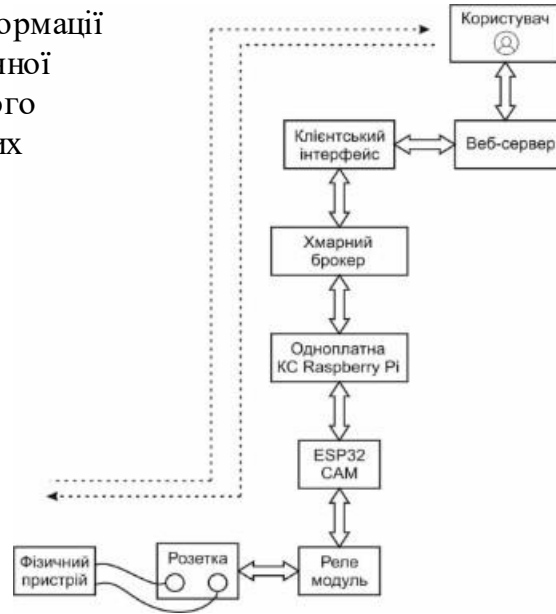
# КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ



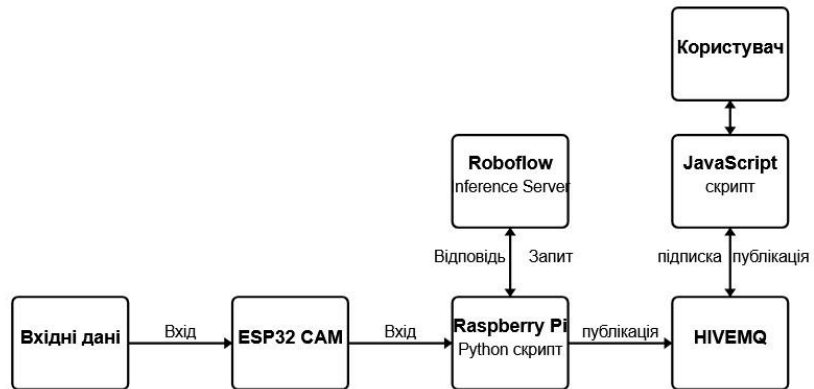
Діаграма взаємодії між компонентами кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору



Потоки передачі інформації в середині кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору



### Схема компонентів для реалізація прототипу кіберфізичної системи енергетичного моніторингу



## Результат роботи моделі комп'ютерного зору

Trained On: home-monitoring 193 images View Version →  
Model Type: Roboflow 3.0 Object Detection (Accurate)  
Checkpoint: COCOs

mAP 99.5% Precision 99.5% Recall 100.0%  
View Model Graphs →

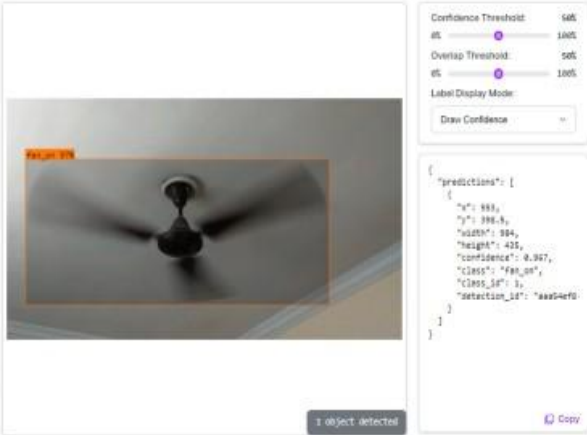
Samples from Test Set  
View Test Set →

Upload Image or a Video File  
Drop files here or  
Select File

Paste YouTube or Image URL  
Paste a link...

Try With Webcam

Try On My Machine



Confidence Threshold: 50%  
mAP 99.5%  
Overlap Threshold: 50%  
Precision 99.5%  
Recall 100.0%  
Label Display Mode:  
Draw Confidence

```
{  
  "predictions": [  
    {  
      "x": 883,  
      "y": 388.5,  
      "width": 994,  
      "height": 425,  
      "confidence": 0.997,  
      "class": "fan_on",  
      "class_id": 1,  
      "detection_id": "aa24ef0"  
    }  
  ]  
}
```

1 object detected Copy

Дякую за увагу

Завідувачу кафедри КІС  
доктору філософії, доценту  
Ользі ПАВЛОВІЙ

Рибанчука Дмитра Миколайовича

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-23-2

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

14 квітня 2025 року



РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Дмитро РИБАНЧУК

Тема: Метод та кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 71

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано метод та кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено дослідження технології комп'ютерного зору, виконано аналіз відомих рішень та систем енергетичного моніторингу. У другому розділі представлено методи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору. У третьому розділі запропоновано кіберфізичну систему енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору. У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження застосування кіберфізичної системи енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

4. Позитивні сторони роботи: Запропонована кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору дозволила здійснити розпізнавання статусу побутових приладів на рівні 99,5%.

5. Негативні сторони роботи: Запропонована кіберфізична система дозволяє відстежувати тільки по одному побутовому пристрою, наприклад освітлення, проте в

реальних сценаріях джерел освітлення буде більше. Тому доцільно було б спроектувати систему, що враховувала б множинні побутові пристрої.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: —

---

---

---

---

---

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на достатньому рівні.

---

---

---

---

---

8. Інші зауваження: —

---

---

---

---

---

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 3.75 (С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) —

д.т.н., проф., завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтелектуальних технологій та робототехніки Мартинюк В.В.

“ 1 травня ” 2025р.



## Anti-Plagiarism v-15.260 Educational

Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 9%

ID: 229459 Назва: МКР Метод та кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору Додано в БД: 2025-04-15 Автора: Дмитро РИБАНЧУК Керівники: Катерина БЕРЕЗЬКА Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	103644	753	1307 (1%)	21 (3%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Дмитро РИБАНЧУК

**Співавтор:**

**Назва:** РИБАНЧУК\_Метод та кіберфізична система енергетичного моніторингу житлових будівель на основі комп'ютерного зору

**Експерт:**

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:** 7.5%

**Коефіцієнт подібності 2:** 2.6%

**Мікропробіли:** 4

**Заміна букв:** 1

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2025-04-15 12:51:36.0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

**Обґрунтування:**

2025-04-15

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ**  
**КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**  
**ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Автор: Рибанчук Дмитро Миколайович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Березька К.М. М., к.т.н, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укривтя запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 7,5% і адресується до 42 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи



Катерина БЕРЕЗЬКА

Гарант ОП



Олег САВЕНКО

Завідувач кафедри КІІС



Ольга ПАВЛОВА