

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

Б.Ю. Шибецький¹, Я.Ю. Дорогий²

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

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

E-mail: bohdan7565@gmail.com

Отримано 15.11.2024

Прийнято до публікації 01.12.2024

Опубліковано 31.12.2024

АНОТАЦІЯ

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

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

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

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

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

ВСТУП

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

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

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

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

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

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

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

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

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

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

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

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

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

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

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

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

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

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

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

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

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК SENSE

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

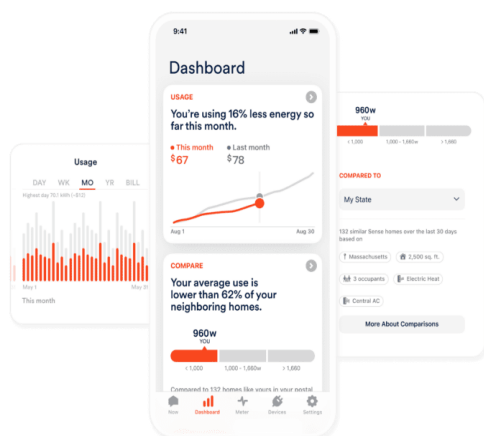


Рис. 1. Мобільний застосунок Sense [5]

До основних функцій мобільного застосунку Sense відносяться:

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

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

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

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

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

До основних переваг застосунку Sense належать:

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

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

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

Разом із перевагами Sense має і певні недоліки:

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

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

СТАРТАП ECOISME

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

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

Основні функції та можливості системи Ecoisme наступні:

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

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

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

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



Рис. 2. Стартуп Ecoisme [6]

Попри інноваційний підхід, Ecoisme має деякі недоліки:

- *Обмежена сумісність.* Система працює лише з певними типами електролічильників, що ускладнює її використання для деяких споживачів.

- *Необхідність оновлення програмного забезпечення.* Для підтримання точності аналізу потрібне регулярне оновлення, що створює додаткові технічні виклики.

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

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

СИСТЕМА ENERGYHUB

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

Мобільний застосунок Seeing AI представлений на Рис. 3.

Перевагами використання EnergyHub є:

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

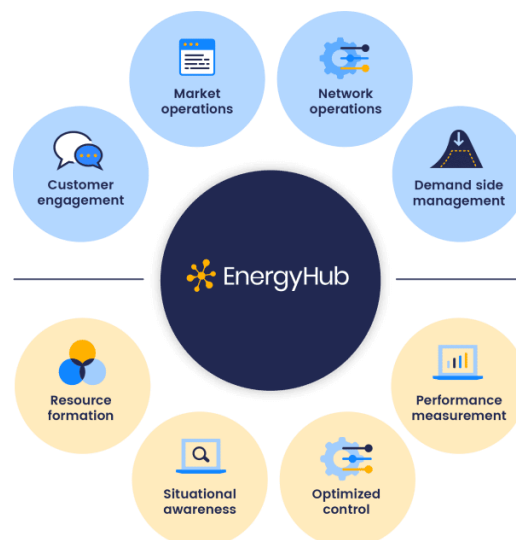


Рис. 3. Система EnergyHub [7]

- *управління через мобільний застосунок* – користувачі мають доступ до всіх функцій системи зі смартфона, що забезпечує зручність і оперативність управління;

- *широка сумісність* – EnergyHub підтримує інтеграцію з численними "розумними" пристроями, що дозволяє створити єдину екосистему для управління енергоспоживанням.

Серед обмежень EnergyHub можна виділити наступні:

- *залежність від "розумних" приладів* – функціональність EnergyHub безпосередньо залежить від наявності "розумних" пристроїв у домогосподарстві, що може обмежувати її ефективність у традиційних середовищах;

- *висока вартість впровадження* – ціна системи та необхідного обладнання може бути значною, що ускладнює її доступність для окремих категорій користувачів.

СИСТЕМА ECOBEE SMART THERMOSTAT

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

Система EcoBee Smart Thermostat представлена на Рис.

4.

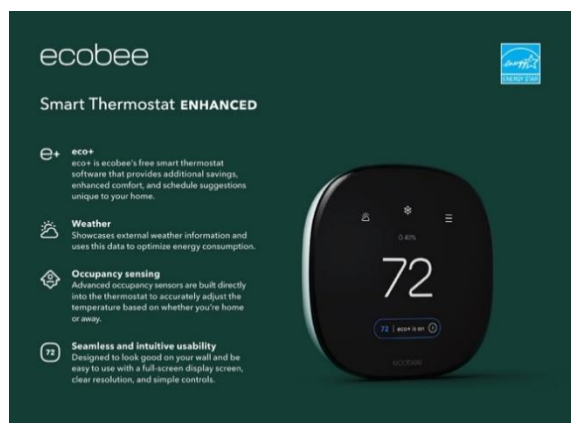


Рис. 4. Система EcoBee Smart Thermostat [8]

Основними функціями системи є:

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

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

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

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

Перевагами використання EcoBee Smart Thermostat є:

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

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

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

Серед обмежень EcoBee Smart Thermostat можна виділити наступні:

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

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

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

КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ

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

1. Функціональність.

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

2. Інтеграція.

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

3. Зручність використання.

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

4. Точність моніторингу.

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

5. Вартість впровадження.

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

6. Залежність від Інтернету.

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

7. Особливості.

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

Табл. 1. Компаративний аналіз систем

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

ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- шифрування даних під час їх передачі через мережу;

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

- відповідність стандартам безпеки для запобігання несанкціонованому доступу.

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

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

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

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

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

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

АРХІТЕКТУРА ТА СТРУКТУРА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

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

Основні підсистеми системи:

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

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

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

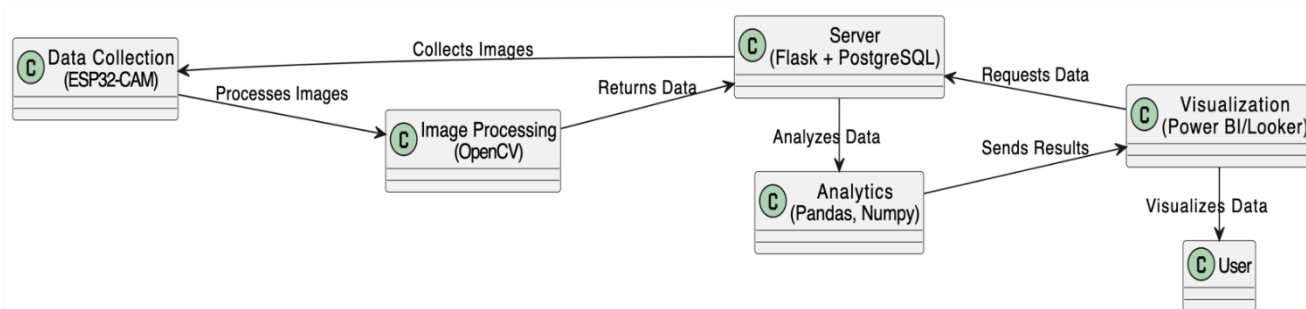


Рис. 5. Архітектура системи моніторингу та аналізу споживання електроенергії

Основні компоненти модуля збору даних:

- ESP32-CAM – забезпечує зйомку зображень показників електролічильника.

- Wi-Fi модуль – передає зображення на сервер для подальшого аналізу.

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

Основні компоненти серверної частини:

- Обробник зображень (OpenCV) – використовує алгоритми комп'ютерного зору для розпізнавання чисел на зображеннях.

- Сервер бази даних – зберігає оброблені дані, дозволяючи відстежувати історію споживання.

- API інтерфейс – надає доступ до даних для аналітичної та візуалізаційної підсистем.

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

Основні компоненти інтерфейсу візуалізації даних:

- Графічний інтерфейс (Power BI/Looker) – забезпечує інтерактивні звіти та графіки.

- Дашборди та віджети – дозволяють користувачу переглядати дані в зрозумілому форматі та проводити аналіз споживання.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

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

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

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

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

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

користувачам аналізувати дані та приймати обґрунтовані рішення щодо економії електроенергії.

ВИСНОВКИ

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

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

ДОСТУПНІСТЬ ДАНИХ

Програмний код викладено для вільного доступу за посиланням:

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

ЛІТЕРАТУРА

- [1] V. Marinakis and H. Doukas. An advanced IoT-based system for intelligent energy management in buildings. *Sensors*, vol. 18, no. 2, 2018. DOI: 10.3390/s18020610.
- [2] M. Shorfuzzaman and Y. Aboelmagd. IoT-A promising solution to energy management in smart buildings: A systematic review. *Buildings*, vol. 14, no. 11, 2024. DOI: 10.3390/buildings14113446.
- [3] Digi International. IoT Applications for Smart Buildings: Use Cases and Benefits. Digi International, [Онлайн]. URL: <http://surl.li/gkptdh>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [4] AppInventiv. IoT in Energy Management. AppInventiv, [Онлайн]. URL: <https://appinventiv.com/blog/iot-in-energy-management/>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [5] Sense: A Smart Energy Monitoring Solution. [Онлайн]. URL: <https://sense.com>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [6] Ecoisme: Energy Monitoring and Saving. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/minbkf>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [7] EnergyHub: Smart Home Energy Management. [Онлайн]. URL: <https://energyhub.com>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [8] EcoBee Smart Thermostat. [Онлайн]. URL: <https://www.ecobee.com/en-us/>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [9] OpenCV: Open Source Computer Vision Library. [Онлайн]. URL: <https://opencv.org>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [10] PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database. [Онлайн]. URL: <https://www.postgresql.org>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [11] ESP32: A Low-Cost, Low-Power System on a Chip with Wi-Fi & Bluetooth Capabilities. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/ycyejh>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [12] Flask: A Python Microframework for Building Web Applications. [Онлайн]. URL: <https://flask.palletsprojects.com>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [13] Power BI: Business Analytics Service by Microsoft. [Онлайн]. URL: <https://powerbi.microsoft.com>. Дата звернення: 01.11.2024.
- [14] Looker: Business Intelligence and Data Analytics. [Онлайн]. URL: <https://looker.com>. Дата звернення: 01.11.2024.

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

Bohdan Shybetskyi, Iaroslav Dorogyi

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

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

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

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

REFERENCES

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