

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

Вадим Ігорович ГРАМА

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА БАЗІ
IoT-ТЕХНОЛОГІЙ /
AUTOMATED ENERGY EFFICIENCY CONTROL SYSTEM FOR
SMART HOME BASED ON IoT TECHNOLOGIES**

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота за ступенем вищої освіти "бакалавр"

Виконав студент групи АКІТ-41
Вадим Грама

Науковий керівник:
к.т.н., доц. Н.Г. Яцків

Дипломну роботу допущено до захисту:
"___" _____ 20__ р.

Завідувач кафедри
_____ А.І.Сегін

Тернопіль 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "бакалавр"
Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін

“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ГРАМІ Вадиму Ігоровичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема роботи

Автоматизована система керування енергоефективністю розумного будинку на базі IoT-технологій / Automated Energy Efficiency Control System for Smart Home Based on IoT Technologies

керівник роботи _____ к.т.н., доц. Н.Г. Яцків

затверджені наказом по університету від "01" грудня 2025 р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої дипломної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Параметри енергоспоживання житлового будинку

2. Характеристики сенсорів та виконавчих пристроїв.

3. Вимоги до енергоефективності та автоматизації.

4. Вимоги до моніторингу та дистанційного керування системою.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Аналіз сучасних систем автоматизації розумного будинку та IoT-технологій.

2.Проектування автоматизованої системи керування енергоефективністю розумного будинку. _____

3. Розроблення програмного забезпечення та дослідження ефективності функціонування системи.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Структурна схема автоматизованої системи.

2. Функціональна схема системи моніторингу та керування.

3. Алгоритм роботи системи керування енергоефективністю.

4. Simulink-модель системи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Яцків Н.Г.		
2	Яцків Н.Г.		
3	Яцків Н.Г.		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та технологій розумного будинку	12.2025р. – 01.2026р.	
2	Розроблення функціональної схеми комп'ютерно-інтегрованої системи	02.2026р. – 03.2026р.	
3	Розрахунок параметрів системи та аналіз її роботи	04.2026р. – 05.2026р.	

Студент

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

В.І.Грама

к.т.н., доц. Н.Г. Яцків

АНОТАЦІЯ

Грама В.І. Автоматизована система керування енергоефективністю розумного будинку на базі IoT-технологій. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі розглянуто питання розроблення автоматизованої системи керування енергоефективністю розумного будинку на базі технологій Інтернету речей. Проведено аналіз сучасних систем автоматизації житлових будівель та обґрунтовано доцільність використання IoT-технологій для моніторингу та керування енергоспоживанням.

Розроблено структуру автоматизованої системи керування енергоефективністю розумного будинку, яка забезпечує збір, оброблення, передавання та зберігання інформації від сенсорів температури, вологості, освітленості, руху та енергоспоживання. Проаналізовано основні засоби побудови IoT-систем та обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32 і протоколу MQTT для реалізації інформаційної взаємодії між компонентами системи.

Розроблено алгоритм функціонування системи керування енергоефективністю та програмне забезпечення, яке забезпечує безперервний моніторинг параметрів середовища, автоматичне керування виконавчими пристроями, візуалізацію даних та дистанційний доступ користувача до системи.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи для підвищення енергоефективності житлових будівель, зменшення витрат енергетичних ресурсів та автоматизації процесів керування інженерними системами розумного будинку.

Ключові слова: розумний будинок, енергоефективність, IoT, ESP32, MQTT, автоматизована система, моніторинг, керування.

ABSTRACT

Hrama V.I. Automated Energy Efficiency Control System for Smart Home Based on IoT Technologies. – Manuscript.

Research on obtaining a bachelor's degree in the specialty 174 "Automation and Computer-Integrated Technologies and Robotics", educational and professional program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The thesis addresses the development of an automated energy efficiency control system for a smart home based on Internet of Things technologies. An analysis of modern home automation systems is carried out, and the feasibility of using IoT technologies for monitoring and controlling energy consumption is substantiated.

A structural scheme of the automated energy efficiency control system is developed, which provides acquisition, processing, transmission and storage of information from temperature, humidity, illumination, motion and energy consumption sensors. The main approaches to IoT system implementation are analyzed, and the choice of the ESP32 microcontroller and MQTT protocol for communication between system components is justified.

An algorithm for the operation of the energy efficiency control system and software providing continuous environmental monitoring, automatic control of executive devices, data visualization and remote user access is developed.

The practical significance of the work lies in the possibility of applying the developed system to improve the energy efficiency of residential buildings, reduce energy consumption and automate the control of engineering systems in a smart home.

Keywords: smart home, energy efficiency, IoT, ESP32, MQTT, automated system, monitoring, control.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕХНОЛОГІЙ РОЗУМНОГО БУДИНКУ.....	9
1.1 Аналіз концепції розумного будинку та енергоефективності.....	9
1.2 Аналіз сучасних IoT-технологій у системах автоматизації.....	12
1.3 Методи моніторингу та контролю енергоспоживання.....	15
1.4 Аналіз датчиків та виконавчих пристроїв для систем Smart Home.....	17
1.5 Протоколи передачі даних у IoT-системах	19
1.6 Обґрунтування вибору архітектури системи керування.....	24
2. РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ.....	26
2.1 Загальна структура автоматизованої системи енергоефективності.....	26
2.2 Розроблення функціональної схеми системи керування.....	28
2.3 Вибір апаратних засобів автоматизації	30
2.4 Розроблення алгоритму автоматичного керування енергоспоживанням.....	38
2.5 Інтеграція IoT-пристроїв у єдину систему моніторингу.....	41
2.6 Розроблення інформаційного обміну та структури передачі даних.....	43
3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ТА АНАЛІЗ ЇЇ РОБОТИ.....	45
3.1 Розрахунок параметрів системи автоматичного керування.....	45
3.2 Моделювання роботи системи у середовищі MATLAB/Simulink	48
3.3 Аналіз енергоефективності та оптимізації споживання енергії.....	52
3.4 Оцінювання надійності та ефективності функціонування системи.....	55
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59
ДОДАТКИ.....	63

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Грама В.І.			Автоматизована система керування енергоефективністю розумного будинку на базі IoT-технологій / Automated Energy Efficiency Control System for Smart Home Based on IoT Technologies	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Яцків Н.Г.					5	60
Консульт.		Яцків Н.Г.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42/1		
Н. Контр.								
Затверд.		Сегін А.І.						

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій та зростання вартості енергетичних ресурсів особливої актуальності набуває впровадження інтелектуальних систем автоматизованого керування житловими об'єктами. Значна частина енергоспоживання будівель припадає на системи опалення, вентиляції, кондиціонування, освітлення та побутові електроприлади, що обумовлює необхідність підвищення ефективності їх використання.

Актуальність теми. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є застосування концепції Smart Home, яка передбачає інтеграцію сенсорів, виконавчих пристроїв, мережевих технологій та алгоритмів автоматичного керування в єдину систему. Використання технологій Internet of Things (IoT) забезпечує моніторинг параметрів середовища, обмін даними між пристроями та автоматичне формування керуючих впливів відповідно до поточного стану об'єкта [2].

Автоматизація керування енергоспоживанням дозволяє зменшити непродуктивні витрати електроенергії, підвищити комфорт проживання та рівень безпеки користувачів. Застосування мікроконтролерної платформи ESP32 разом із бездротовими технологіями Wi-Fi та протоколом MQTT дає можливість реалізувати систему віддаленого моніторингу й централізованого керування [7].

Таким чином, розроблення комп'ютерно-інтегрованої системи керування енергоефективністю розумного будинку на базі IoT-технологій є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів.

Мета роботи. Метою дипломної роботи є розроблення та дослідження автоматизованої системи керування енергоефективністю розумного будинку на базі IoT-технологій із використанням мікроконтролера ESP32, сучасних сенсорних пристроїв і засобів автоматизованого моніторингу та керування енергоспоживанням.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз концепції розумного будинку та сучасних підходів до підвищення енергоефективності;
- дослідити сучасні IoT-технології, протоколи передачі даних та методи моніторингу енергоспоживання;
- виконати аналіз датчиків, контролерів та виконавчих механізмів для Smart Home-систем;
- обґрунтувати вибір архітектури комп'ютерно-інтегрованої системи керування;
- розробити функціональну схему автоматизованої системи енергоефективності розумного будинку;
- реалізувати алгоритм автоматичного керування енергоспоживанням на базі ESP32;
- розробити структуру інтеграції IoT-пристроїв та інформаційного обміну в системі;
- провести розрахунок параметрів системи автоматичного керування;
- виконати моделювання роботи системи у середовищі MATLAB/Simulink;
- здійснити аналіз енергоефективності, надійності та ефективності функціонування розробленої системи.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого керування енергоспоживанням у системі розумного будинку.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби побудови комп'ютерно-інтегрованої системи керування енергоефективністю Smart Home на базі IoT-технологій.

Практичне значення роботи. Розроблена система автоматизованого керування енергоефективністю розумного будинку може бути використана для моніторингу параметрів внутрішнього середовища, оптимізації енергоспоживання та автоматичного керування інженерними системами будівлі. Використання мікроконтролера ESP32, сенсорних пристроїв та IoT-

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

технологій забезпечує можливість дистанційного керування, підвищення рівня енергоефективності та адаптацію системи до змінних умов експлуатації. Реалізація запропонованого підходу дозволяє знизити витрати електроенергії, підвищити рівень безпеки та комфорт користувачів [4].

Апробація. В. І. Грамма Автоматизована система керування енергоефективністю розумного будинку на базі IoT-технологій. Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 20256), Тернопіль, 2026. – с.87-92.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕХНОЛОГІЙ РОЗУМНОГО БУДИНКУ

1.1 Аналіз концепції розумного будинку та енергоефективності

Концепція розумного будинку (Smart Home) передбачає створення інтегрованого середовища, у якому інженерні системи будівлі об'єднані в єдину автоматизовану мережу керування з використанням інформаційно-комунікаційних та IoT-технологій. Основною метою такого підходу є підвищення рівня комфорту, безпеки та енергоефективності шляхом автоматичного моніторингу й регулювання параметрів внутрішнього середовища.

У сучасних умовах значне зростання вартості енергоресурсів, а також необхідність оптимізації їх використання обумовлюють актуальність впровадження автоматизованих систем керування енергоспоживанням. За статистичними оцінками, житлові будівлі споживають значну частину електроенергії, причому найбільша частка припадає на системи опалення, вентиляції, кондиціонування, освітлення та побутові електроприлади. Тому інтеграція технологій Internet of Things (IoT) у структуру розумного будинку дозволяє суттєво знизити енергетичні витрати за рахунок автоматизації процесів керування. Енергоефективність розумного будинку досягається шляхом використання адаптивних алгоритмів автоматичного керування, які аналізують параметри середовища та змінюють режими роботи обладнання відповідно до поточних умов. Такі системи забезпечують автоматичне керування температурою приміщень, рівнем освітлення, вентиляцією, електроспоживанням і системами безпеки [3].

Основними складовими автоматизованої системи енергоефективності є: датчики для збору інформації про параметри навколишнього середовища, контролери та мікроконтролери для обробки вхідних даних, виконавчі механізми для реалізації керуючих впливів, мережеві IoT-модулі для передачі інформації, а також програмне забезпечення для моніторингу й

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

централізованого керування системою. Кожен із зазначених компонентів виконує окрему функцію в загальній архітектурі системи та забезпечує ефективне функціонування механізмів автоматичного керування енергоспоживанням. Узагальнену характеристику основних компонентів системи розумного будинку, їх функціонального призначення та прикладів реалізації наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні компоненти системи розумного будинку [1-7]

Компонент	Функціональне призначення	Приклад
Датчики температури	Контроль температурного режиму	DHT22, DS18B20
Датчики освітленості	Регулювання інтенсивності освітлення	LDR, BH1750
Датчики руху	Автоматизація освітлення та безпеки	PIR HC-SR501
Контролер	Обробка сигналів і прийняття рішень	ESP32, Arduino, Raspberry Pi
Виконавчі пристрої	Реалізація керуючих дій	Реле, сервоприводи
Хмарна платформа	Дистанційний моніторинг	MQTT, Blynk, Home Assistant

З технічної точки зору система розумного будинку функціонує за принципом замкненого контуру автоматичного керування, у якому параметри об'єкта постійно вимірюються, аналізуються та коригуються відповідно до заданих режимів роботи. Такий підхід забезпечує безперервний моніторинг стану системи, автоматичне прийняття керуючих рішень і своєчасне реагування на зміну параметрів внутрішнього середовища.

Архітектура системи передбачає взаємодію сенсорних елементів, контролера, алгоритму керування, мережевих IoT-модулів та виконавчих механізмів, які працюють у єдиному інформаційно-керуючому середовищі. Структурну організацію системи енергоефективного розумного будинку наведено на рис. 1.1.

Основною особливістю таких систем є застосування IoT-комунікацій, які забезпечують двосторонній обмін інформацією між пристроями через локальні або глобальні мережі. Для цього використовуються протоколи Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave, Bluetooth Low Energy та MQTT, що забезпечують передачу даних у

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

режимі реального часу. Інтеграція зазначених технологій дає змогу реалізувати широкий спектр функціональних можливостей, спрямованих на автоматизацію процесів керування інженерними системами будинку та підвищення рівня енергоефективності [11].

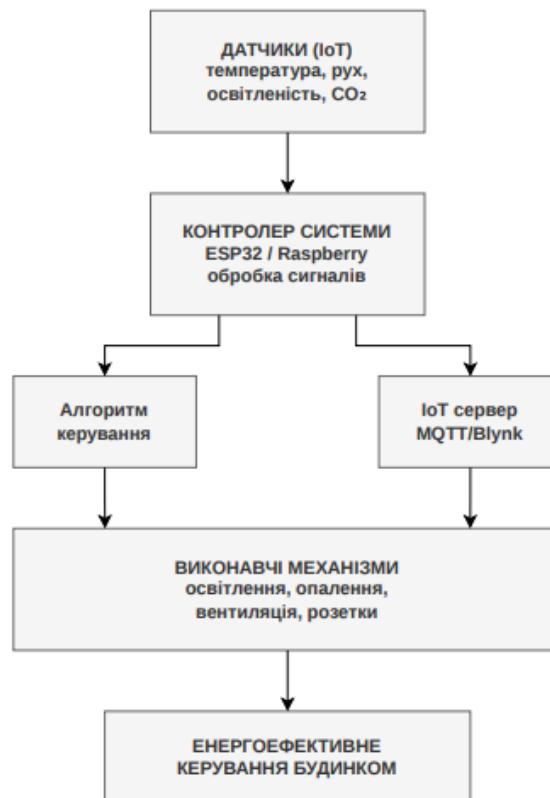


Рисунок 1.1 - Структурна схема системи енергоефективного розумного будинку

Основні функції системи Smart Home, принцип їх реалізації та очікуваний вплив на зниження енергоспоживання наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні функції системи Smart Home та їх вплив на енергоефективність

Функція	Принцип роботи	Очікуваний ефект
Інтелектуальне освітлення	Вмикання за рухом і освітленістю	Зменшення витрат електроенергії
Автоматичне опалення	Регулювання температури	Економія теплової енергії
Smart-розетки	Контроль навантаження	Усунення зайвого споживання
Вентиляція	Керування за рівнем CO ₂	Оптимізація мікроклімату
Дистанційне керування	Моніторинг через смартфон	Підвищення ефективності контролю

Отже, концепція розумного будинку базується на інтеграції сенсорних систем, виконавчих механізмів та інтелектуальних алгоритмів керування в єдине інформаційне середовище. Використання IoT-технологій у поєднанні з методами автоматизованого керування дозволяє значно підвищити рівень енергоефективності, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити оптимальні умови функціонування житлового середовища.

1.2 Аналіз сучасних IoT-технологій у системах автоматизації

Сучасний розвиток інформаційних технологій та цифровізації технічних процесів сприяв активному впровадженню концепції Internet of Things (IoT) у системи автоматизації. IoT-технології являють собою сукупність програмно-апаратних засобів, що забезпечують взаємодію між фізичними об'єктами шляхом збору, передачі, обробки та аналізу даних у режимі реального часу [6]. У системах автоматизації використання IoT дозволяє реалізувати інтелектуальне керування технічними процесами, підвищити ефективність використання ресурсів та забезпечити віддалений моніторинг обладнання. У загальному вигляді IoT-система складається з комплексу взаємопов'язаних компонентів, до яких належать сенсорні пристрої, мікроконтролери, мережеві інтерфейси, серверні платформи обробки даних та програмні засоби візуалізації. Основною функцією IoT є забезпечення безперервного обміну інформацією між фізичними пристроями та інформаційними системами.

З технічної точки зору архітектура IoT-систем у автоматизації базується на багаторівневій моделі, що включає рівень збору даних, рівень передачі інформації, рівень обробки даних та рівень користувацького інтерфейсу. Така структурна організація забезпечує централізований моніторинг, обробку інформації в реальному часі та реалізацію механізмів автоматичного керування об'єктами. Крім того, багаторівневий підхід дозволяє підвищити масштабованість, надійність та ефективність функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизації.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для наочного представлення взаємодії основних функціональних рівнів та інформаційних потоків структурну схему архітектури IoT у системах автоматизації наведено на рис. 1.3.

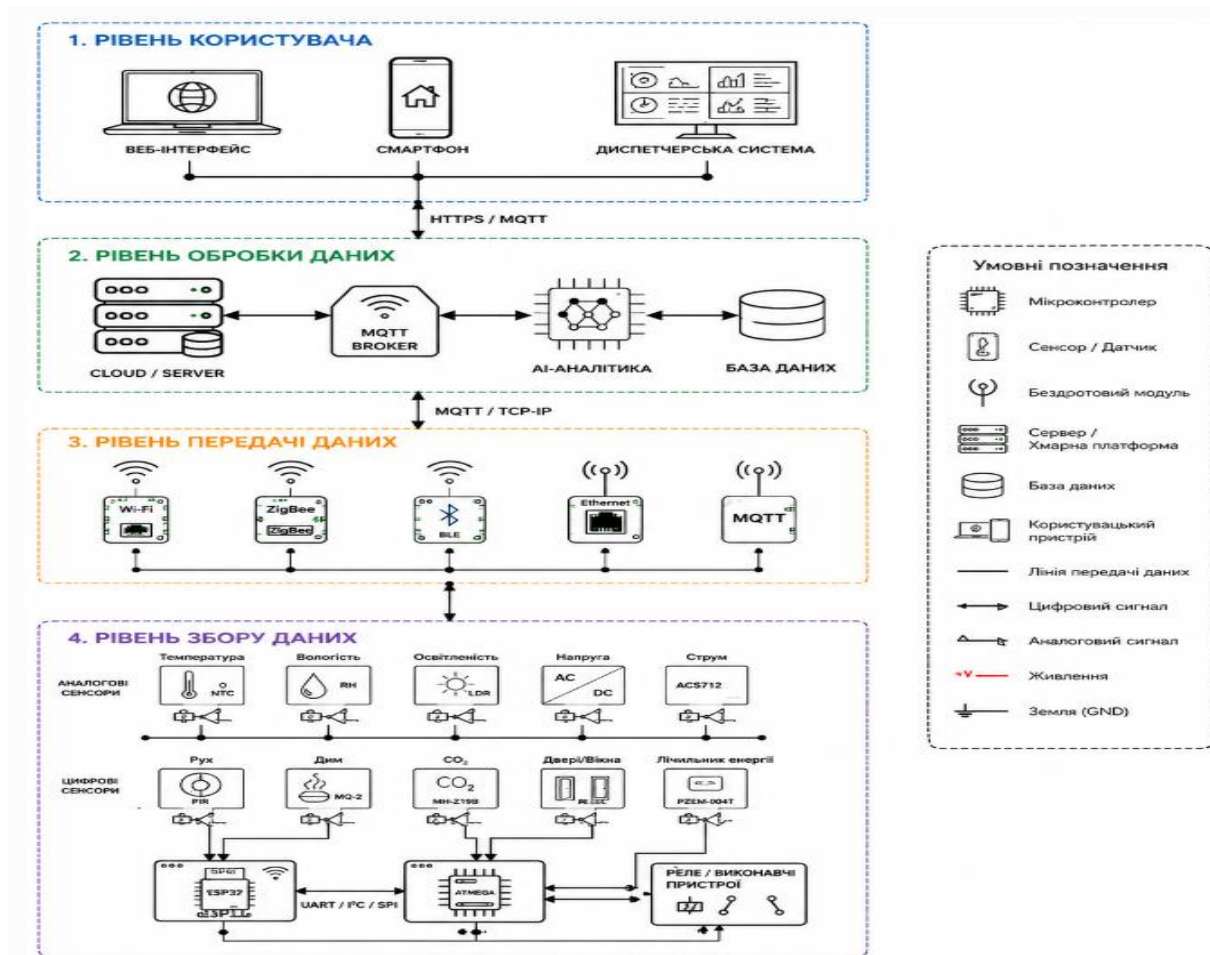


Рисунок 1.3 - Структурна схема архітектури IoT у системах автоматизації

Для реалізації автоматизованих IoT-систем найбільш поширеним є використання мікроконтролерних платформ, які забезпечують взаємодію між фізичними пристроями та мережевою інфраструктурою. До найбільш популярних платформ належать Arduino, ESP32, Raspberry Pi, STM32, які характеризуються низьким енергоспоживанням, підтримкою мережевих модулів та широкими можливостями програмування [12].

Вибір конкретної апаратної платформи визначається вимогами до продуктивності системи, енергоспоживання, обсягу обробки даних, підтримки мережевих протоколів та можливостей масштабування. Кожна з платформ має власні технічні особливості, переваги та обмеження, що впливають на

ефективність реалізації автоматизованих IoT-рішень у системах керування. Порівняльну характеристику найбільш поширених IoT-платформ для автоматизації наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристика сучасних IoT-платформ для автоматизації

Платформа	Основні характеристики	Переваги	Недоліки
Arduino Uno	Простота програмування	Низька вартість	Обмежена продуктивність
ESP32	Wi-Fi, Bluetooth, низьке енергоспоживання	Вбудовані бездротові модулі	Обмежені ресурси пам'яті
Raspberry Pi	Повноцінна ОС Linux	Висока продуктивність	Більше енергоспоживання
STM32	Висока швидкодія	Надійність та масштабованість	Складніше програмування

Одним із ключових елементів IoT-систем автоматизації є мережеві протоколи передачі даних, які визначають швидкість, надійність та енергоефективність взаємодії між пристроями. У системах Smart Home та автоматизованого керування найбільш широко використовуються протоколи Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave, Bluetooth Low Energy (BLE) та MQTT [14]. Детальну структуру MQTT-каналів та їх функціональне призначення наведено у додатку В.

Для оцінки доцільності використання певної технології необхідно враховувати дальність зв'язку, швидкість передачі інформації, рівень енергоспоживання та можливість масштабування системи. Порівняльну характеристику основних IoT-протоколів наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика IoT-протоколів

Протокол	Радіус дії	Швидкість передачі	Енергоспоживання	Основне застосування
Wi-Fi	До 100 м	Висока	Високе	Smart Home, відеоспостереження
ZigBee	До 100 м	Низька	Низьке	Сенсорні мережі
Z-Wave	До 30–100 м	Середня	Низьке	Домашня автоматизація
BLE	До 50 м	Середня	Дуже низьке	Wearable-пристрої
MQTT	Необмежений	Висока	Низьке	Передача IoT-повідомлень

Таким чином, використання сучасних IoT-технологій у системах

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

автоматизації забезпечує можливість створення інтелектуальних комп'ютерно-інтегрованих систем, здатних здійснювати безперервний моніторинг параметрів, автоматичне прийняття рішень та віддалене керування технологічними процесами. Для систем енергоефективного розумного будинку найбільш доцільним є використання платформ ESP32 у поєднанні з протоколами Wi-Fi та MQTT, що забезпечує ефективний баланс між швидкістю передачі даних, енергоефективністю та простотою інтеграції в IoT-інфраструктуру [15].

1.3 Методи моніторингу та контролю енергоспоживання

Ефективне функціонування системи енергоефективного розумного будинку значною мірою залежить від застосування сучасних методів моніторингу та контролю енергоспоживання, які дозволяють здійснювати збір, аналіз та оптимізацію використання енергетичних ресурсів [16]. Основною метою таких методів є зниження непродуктивних витрат електроенергії, підвищення ефективності роботи обладнання та забезпечення автоматизованого керування споживанням ресурсів у режимі реального часу.

Моніторинг енергоспоживання передбачає безперервне вимірювання параметрів електромережі, зокрема напруги, сили струму, активної та реактивної потужності, частоти мережі та загального обсягу спожитої електроенергії [23]. Отримані дані використовуються для аналізу режимів роботи обладнання, виявлення надлишкового споживання та формування алгоритмів оптимізації навантаження.

У сучасних автоматизованих системах Smart Home контроль енергоспоживання реалізується за допомогою інтелектуальних лічильників електроенергії (Smart Metering), сенсорів навантаження, IoT-контролерів та програмних платформ моніторингу [25]. Дані з датчиків передаються через мережеві протоколи до серверної або хмарної системи, де здійснюється їх обробка та формування керуючих впливів [16].

Залежно від способу реалізації системи контролю енергоспоживання

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

можна виділити декілька основних методів, характеристику яких наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Методи моніторингу та контролю енергоспоживання

Метод	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Ручний контроль	Періодичний аналіз показників лічильника	Простота реалізації	Низька оперативність
Smart Metering	Автоматичне вимірювання параметрів мережі	Висока точність	Вища вартість
ІоТ-моніторинг	Передача даних у реальному часі	Дистанційний доступ	Залежність від мережі
АІ-аналіз споживання	Прогнозування навантаження	Оптимізація витрат	Складність реалізації
Автоматичне керування навантаженням	Керування обладнанням за сценаріями	Висока енергоефективність	Потребує налаштування

З технічної точки зору найбільш ефективним методом є ІоТ-моніторинг у поєднанні з автоматичним керуванням навантаженням, оскільки він забезпечує безперервний контроль параметрів енергоспоживання та можливість оперативного регулювання роботи електроприладів [20]. Наприклад, у системах розумного будинку можливе автоматичне вимкнення освітлення за відсутності користувача, регулювання температурного режиму відповідно до часу доби або оптимізація роботи побутових приладів залежно від поточного навантаження мережі [24].

Для реалізації моніторингу енергоспоживання часто використовуються датчики струму та напруги, зокрема ACS712, PZEM-004T, SCT-013, а також мікроконтролерні платформи ESP32 або Arduino, які забезпечують передачу даних через Wi-Fi або MQTT-протоколи [5]. Це дозволяє реалізувати централізовану систему збору даних, аналізу та автоматичного керування енергетичними процесами [6]. Отже, застосування сучасних методів моніторингу та контролю енергоспоживання в системах Smart Home забезпечує підвищення енергоефективності, зменшення експлуатаційних витрат та оптимізацію роботи інженерних систем будівлі. Найбільш перспективним підходом є інтеграція ІоТ-технологій із методами автоматичного аналізу даних та інтелектуального керування навантаженням [31].

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1.4 Аналіз датчиків та виконавчих пристроїв для систем Smart Home

Ефективність функціонування систем Smart Home значною мірою залежить від правильного вибору датчиків та виконавчих пристроїв, які забезпечують автоматизований збір інформації про стан внутрішнього середовища, обробку отриманих даних і реалізацію керуючих впливів [17]. У комп'ютерно-інтегрованих системах автоматизації сенсорні пристрої виконують функцію первинного вимірювання параметрів, а виконавчі механізми забезпечують зміну режимів роботи обладнання відповідно до заданого алгоритму керування [12].

У системах розумного будинку датчики застосовуються для контролю температури, вологості, освітленості, руху, рівня диму, концентрації газів, споживання електроенергії, відкриття дверей та вікон, а також інших параметрів, що впливають на рівень комфорту, безпеки та енергоефективності [13].

Залежно від функціонального призначення датчики можна поділити на кілька основних груп: кліматичні, безпекові, енергетичні та сенсори присутності. Кожна категорія виконує окрему функцію в загальній системі автоматичного керування. Основні типи датчиків Smart Home наведено в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Основні датчики для систем Smart Home

Тип датчика	Контрольований параметр	Приклад	Основне призначення
Температурний	Температура	DS18B20, DHT22	Керування опаленням
Вологості	Вологість повітря	DHT22	Контроль мікроклімату
Освітленості	Рівень освітлення	BH1750, LDR	Автоматизація освітлення
Руху	Наявність руху	PIR HC-SR501	Охоронні системи
Диму/газу	Концентрація диму, газу	MQ-2, MQ-135	Пожежна безпека
Струму та напруги	Енергоспоживання	ACS712, PZEM-004T	Енергомоніторинг
Магнітний	Стан дверей/вікон	Reed Switch	Системи безпеки

Одним із найбільш важливих параметрів у Smart Home є моніторинг

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

температури та вологості, що забезпечує автоматичне регулювання систем опалення, вентиляції та кондиціонування. Для цього часто використовуються датчики DHT22 та DS18B20, які характеризуються високою точністю вимірювання та низьким енергоспоживанням [34].

Для реалізації функцій безпеки використовуються PIR-датчики руху, магнітні датчики відкриття дверей та сенсори диму або витоку газу. Наприклад, датчик MQ-2 дозволяє визначати концентрацію диму або природного газу та передавати сигнал тривоги до системи керування [25].

Контроль енергоспоживання реалізується за допомогою спеціалізованих вимірювальних модулів, таких як ACS712 або PZEM-004T, які забезпечують вимірювання сили струму, напруги, активної потужності та спожитої електроенергії [16]. Отримані дані використовуються для побудови алгоритмів енергоефективного керування навантаженням.

Окрім сенсорної частини, важливу роль у Smart Home відіграють виконавчі пристрої, які забезпечують реалізацію керуючих команд. До них належать електромагнітні реле, сервоприводи, електроклапани, димери освітлення та інтелектуальні розетки [22].

Таблиця 1.7 – Основні виконавчі пристрої Smart Home

Виконавчий пристрій	Функція	Приклад застосування
Реле	Вмикання/вимикання навантаження	Освітлення, обігрівач
Сервопривід	Регулювання положення	Жалюзі, клапани
Димер	Регулювання яскравості	Smart-освітлення
Smart-розетка	Контроль живлення	Побутові прилади
Електроклапан	Регулювання подачі	Вода, газ

Принцип роботи виконавчих пристроїв базується на отриманні сигналу від контролера (наприклад, ESP32 або Arduino) та виконанні відповідної дії згідно із заданим алгоритмом. Наприклад, у разі зниження температури нижче встановленого значення система може автоматично активувати опалення, а при перевищенні допустимого рівня освітлення — вимкнути штучне освітлення [34].

Для наочного представлення взаємодії датчиків, контролера та виконавчих пристроїв структурну схему функціонування сенсорної підсистеми Smart Home наведено на рис. 1.4.

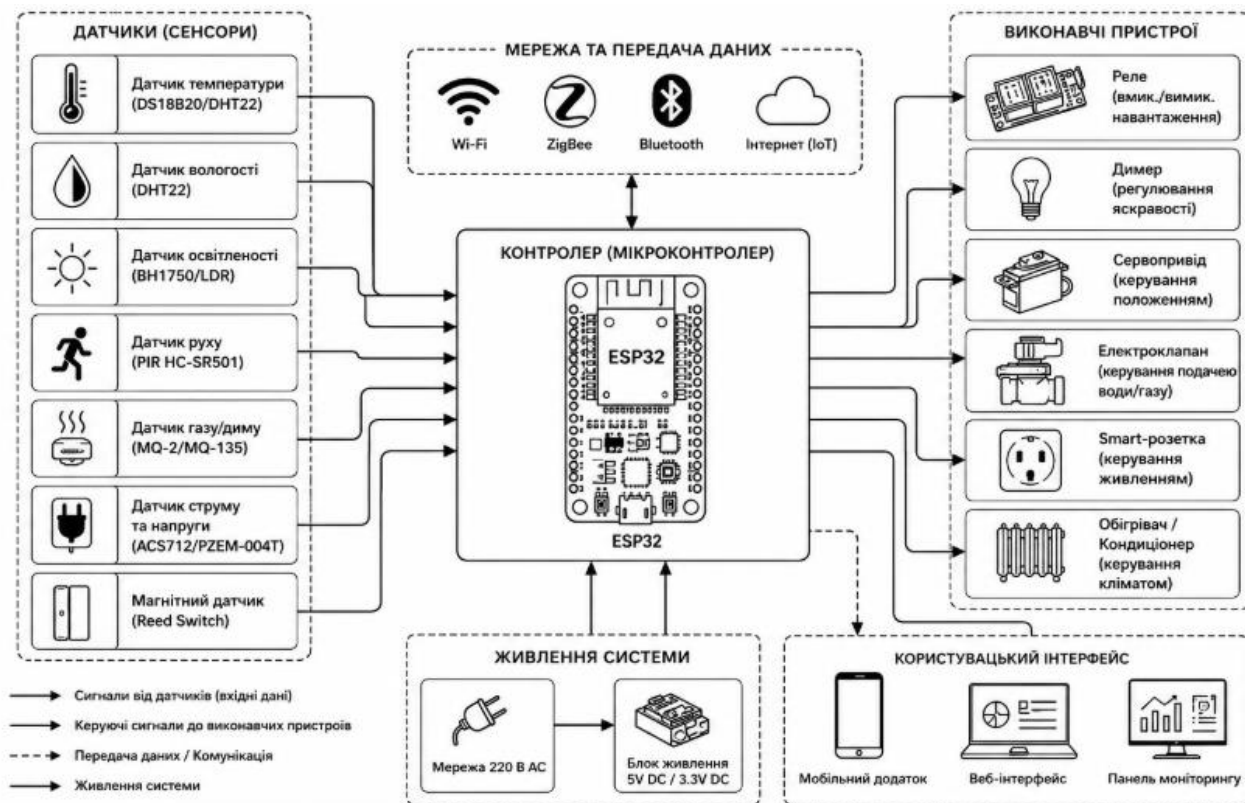


Рисунок 1.4 – Структурна схема взаємодії датчиків і виконавчих пристроїв у системі Smart Home

Отже, використання сучасних датчиків і виконавчих механізмів забезпечує реалізацію функцій автоматичного моніторингу, контролю та керування параметрами розумного будинку. Раціональний вибір сенсорів і засобів автоматизації дозволяє підвищити енергоефективність, безпеку та комфорт експлуатації Smart Home-систем [21].

1.5 Протоколи передачі даних у IoT-системах

Одним із ключових компонентів IoT-систем є механізм передачі даних між сенсорними пристроями, контролерами, серверними платформами та користувацькими інтерфейсами. Ефективність функціонування систем автоматизації значною мірою залежить від правильного вибору протоколів

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зв'язку, які забезпечують швидкість передачі інформації, енергоефективність, надійність обміну даними та масштабованість мережі [28].

У системах Smart Home протоколи передачі даних виконують функцію організації комунікації між датчиками, виконавчими пристроями та центральним контролером. Вибір конкретного протоколу визначається вимогами до дальності зв'язку, швидкості передачі, енергоспоживання, топології мережі та кількості підключених пристроїв [27].

У сучасних IoT-системах найбільш поширеними є Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth Low Energy (BLE) та MQTT, кожен із яких має власні технічні характеристики та особливості застосування [32].

Для забезпечення бездротової передачі даних у локальних мережах широко застосовується технологія Wi-Fi, яка характеризується високою швидкістю обміну інформацією та можливістю інтеграції пристроїв у глобальну мережу Інтернет. Основною перевагою Wi-Fi є підтримка великого обсягу переданих даних, що робить його ефективним рішенням для систем відеоспостереження, дистанційного моніторингу та керування Smart Home [14]. Водночас використання Wi-Fi супроводжується підвищеним енергоспоживанням, що може бути недоцільним для автономних IoT-пристроїв.

Протокол ZigBee орієнтований на побудову енергоефективних сенсорних мереж із низьким рівнем енергоспоживання. Особливістю ZigBee є підтримка mesh-топології, що дозволяє збільшувати радіус дії системи шляхом ретрансляції сигналу між пристроями [35]. Завдяки низькому енергоспоживанню ZigBee широко використовується для підключення датчиків температури, освітленості, руху та інших сенсорних пристроїв у системах автоматизації будівель.

Технологія Bluetooth Low Energy (BLE) є вдосконаленою версією Bluetooth, оптимізованою для IoT-пристроїв із низьким споживанням енергії. Основною перевагою BLE є мінімальне енергоспоживання, що дозволяє використовувати його в автономних датчиках, переносних пристроях та системах персонального моніторингу [26]. Проте обмежений радіус дії зменшує ефективність використання Bluetooth у великих системах автоматизації.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

На відміну від попередніх технологій, MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) не є бездротовим протоколом фізичного рівня, а являє собою прикладний протокол передачі повідомлень, орієнтований на IoT-системи [17]. MQTT реалізує модель взаємодії Publisher–Subscriber, у якій дані передаються через MQTT Broker, що забезпечує централізований обмін інформацією між пристроями. Даний протокол характеризується низьким мережевим навантаженням, високою швидкістю та можливістю роботи навіть у мережах із нестабільним з'єднанням [38].

Для порівняння технічних характеристик основних протоколів передачі даних у IoT-системах доцільно провести їх аналіз за критеріями швидкості передачі, радіуса дії, рівня енергоспоживання та сфери використання. Порівняльну характеристику наведено в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Порівняльна характеристика протоколів передачі даних у IoT-системах

Протокол	Радіус дії	Швидкість передачі	Енергоспоживання	Основне застосування
Wi-Fi	До 100 м	Висока	Високе	Smart Home, відеоспостереження
ZigBee	До 100 м	Низька	Низьке	Сенсорні мережі
Bluetooth BLE	До 50 м	Середня	Дуже низьке	Носимі пристрої, датчики
MQTT	Необмежений (через Internet)	Висока	Низьке	Передача IoT-повідомлень

З технічної точки зору в системах енергоефективного розумного будинку найбільш доцільним є комбіноване використання Wi-Fi та MQTT, оскільки Wi-Fi забезпечує фізичний канал передачі даних, а MQTT — ефективний механізм обміну повідомленнями між пристроями та сервером [17]. Для наочного представлення взаємодії протоколів передачі даних у системі Smart Home структурну схему організації IoT-комунікацій наведено на рис. 1.5.

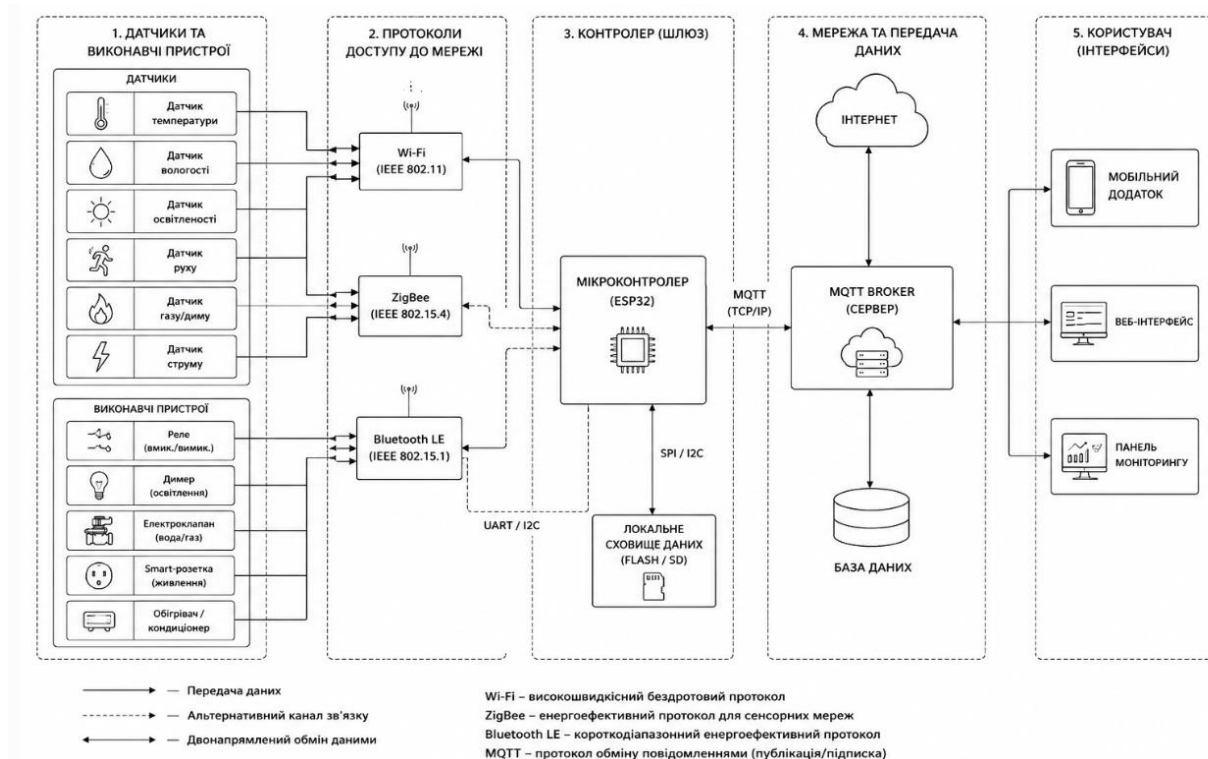


Рисунок 1.5 – Структурна схема взаємодії протоколів передачі даних у системі Smart Home

Для локальних сенсорних мереж із низьким енергоспоживанням доцільним є застосування ZigBee, тоді як Bluetooth Low Energy є ефективним рішенням для автономних бездротових сенсорів [35].

1.6 Аналіз існуючих систем автоматизованого керування енергоспоживанням

Сучасні системи автоматизованого керування енергоспоживанням спрямовані на підвищення рівня енергоефективності будівель шляхом автоматичного моніторингу, аналізу та регулювання режимів роботи електротехнічного обладнання [31]. Такі системи забезпечують оптимізацію використання електроенергії, теплових ресурсів та інших енергетичних потоків, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати та підвищити комфорт користувачів [29].

У системах Smart Home автоматизоване керування енергоспоживанням

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

реалізується за допомогою інтеграції сенсорних пристроїв, мікроконтролерів, мережевих модулів та програмних платформ, які здійснюють збір даних про поточний стан об'єкта та формують керуючі сигнали для виконавчих механізмів [23]. На сьогодні найбільш поширеними є системи Home Assistant, Google Home, Apple HomeKit, Samsung SmartThings та OpenHAB, які забезпечують централізоване керування інженерними системами будинку, включаючи освітлення, клімат-контроль, системи безпеки та моніторинг енергоспоживання [14].

Для порівняльного аналізу існуючих рішень доцільно оцінити їх за такими критеріями, як підтримка IoT-протоколів, можливість інтеграції датчиків, масштабованість, функції автоматизації та енергоефективність. Порівняльну характеристику наведено в таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 – Порівняльний аналіз систем автоматизованого керування енергоспоживанням

Система	Підтримка IoT	Автоматизація	Моніторинг енергії	Переваги	Недоліки
Home Assistant	Wi-Fi, ZigBee, MQTT	Висока	Так	Відкрита архітектура	Потребує налаштування
Google Home	Wi-Fi, Bluetooth	Середня	Частково	Простота використання	Обмежена кастомізація
Apple HomeKit	Wi-Fi, BLE	Висока	Частково	Висока безпека	Працює переважно з Apple
Samsung SmartThings	ZigBee, Wi-Fi	Висока	Так	Велика кількість пристроїв	Залежність від хмари
OpenHAB	MQTT, ZigBee, Wi-Fi	Висока	Так	Гнучкість налаштувань	Складність конфігурації

Аналіз існуючих систем показує, що найбільш функціональними є платформи Home Assistant та OpenHAB, оскільки вони підтримують відкриту архітектуру, сумісність із великою кількістю пристроїв та можливість інтеграції власних алгоритмів автоматичного керування [25]. Проте комерційні рішення, такі як Google Home або Apple HomeKit, характеризуються простішим налаштуванням та більш зручним інтерфейсом користувача [26].

1.7 Обґрунтування вибору архітектури системи керування

Проектування автоматизованої системи керування енергоефективністю розумного будинку потребує обґрунтованого вибору архітектури, яка повинна забезпечувати надійність, масштабованість, швидкодію та можливість інтеграції з IoT-пристроями [11]. Архітектура системи визначає спосіб взаємодії між сенсорними пристроями, мікроконтролерами, каналами зв'язку, серверними платформами та користувацькими інтерфейсами [12].

Для реалізації системи енергоефективного керування доцільним є використання багаторівневої комп'ютерно-інтегрованої архітектури, що включає рівень збору даних, рівень передавання інформації, рівень обробки та рівень керування [13]. Такий підхід дозволяє реалізувати замкнений контур автоматичного керування, у якому параметри середовища постійно вимірюються, аналізуються та коригуються відповідно до заданих режимів роботи.

У запропонованій архітектурі доцільно використовувати ESP32 як центральний контролер системи, оскільки дана платформа має вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth, достатню обчислювальну потужність і низьке енергоспоживання [24]. Для передачі даних доцільним є застосування Wi-Fi як фізичного каналу зв'язку та MQTT як прикладного протоколу обміну повідомленнями між пристроями [15]. Збір інформації здійснюється за допомогою сенсорів температури, вологості, освітленості, руху, струму та напруги, які формують вхідні сигнали для системи керування. На основі отриманих даних мікроконтролер формує керуючі сигнали для виконавчих пристроїв, зокрема реле, димерів освітлення, електроклапанів і Smart-розеток [6]. Для наочного представлення логіки побудови системи функціональну архітектуру системи керування енергоефективністю розумного будинку доцільно навести на рис. 1.6.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

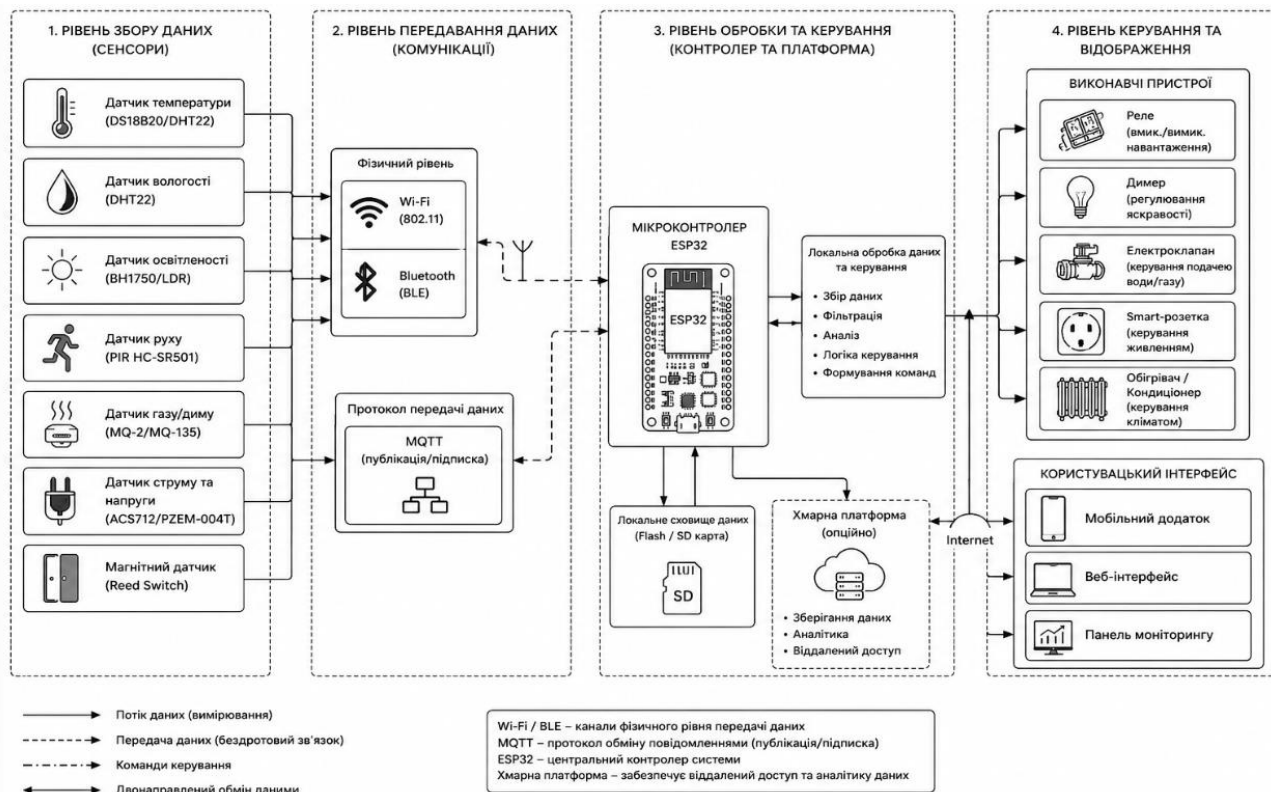


Рисунок 1.6 – Функціональна архітектура системи керування енергоефективністю Smart Home

Ключовою перевагою обраної архітектури є можливість реалізації локального керування із підтримкою хмарного моніторингу.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Загальна структура автоматизованої системи енергоефективності

Автоматизована система керування енергоефективністю розумного будинку являє собою комп'ютерно-інтегровану систему, призначену для збору, обробки та аналізу інформації про стан енергоспоживання з подальшим формуванням керуючих впливів на виконавчі пристрої [1]. Основною метою такої системи є забезпечення оптимального використання енергетичних ресурсів, автоматичне регулювання параметрів мікроклімату та підвищення рівня комфорту користувачів при мінімізації енергетичних витрат [2]. Для наочного представлення взаємозв'язку між функціональними компонентами загальну структуру автоматизованої системи енергоефективності наведено на рис. 2.1.

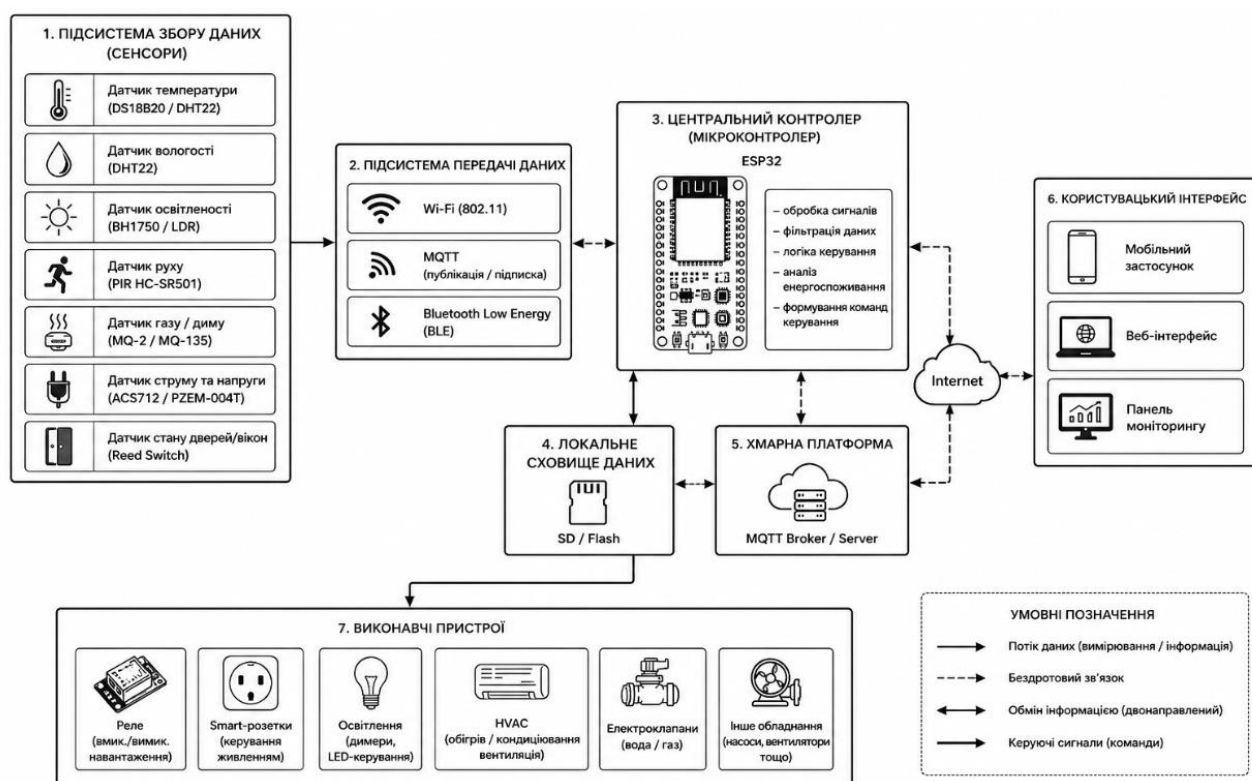


Рисунок 2.1 – Загальна структура автоматизованої системи енергоефективності

Функціонування автоматизованої системи енергоефективності базується

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

на принципі замкненого контуру автоматичного керування, у якому відбувається безперервний процес збору інформації, її аналізу, прийняття рішень та реалізації керуючих дій [13]. У такій системі датчики здійснюють контроль параметрів середовища, мікроконтролер виконує обробку сигналів та прийняття рішень, а виконавчі пристрої реалізують відповідні дії щодо регулювання режимів роботи обладнання. Загальна структура автоматизованої системи енергоефективності включає такі основні функціональні компоненти:

- сенсорну підсистему, яка забезпечує вимірювання температури, вологості, освітленості, руху, енергоспоживання та інших параметрів;
- підсистему передавання даних, що реалізує обмін інформацією між елементами системи за допомогою протоколів Wi-Fi, MQTT та Bluetooth;
- підсистему обробки інформації, яка виконує аналіз даних, фільтрацію сигналів та формування алгоритмів керування;
- виконавчу підсистему, яка включає реле, димери, Smart-розетки, електроклапани та інші пристрої для регулювання режимів роботи обладнання;
- користувацький інтерфейс, що забезпечує моніторинг параметрів системи та дистанційне керування через вебінтерфейс або мобільний застосунок [24].

У межах проектованої системи центральним елементом керування доцільно обрати мікроконтролер ESP32, який забезпечує підтримку бездротових технологій Wi-Fi та Bluetooth, має достатню обчислювальну потужність і низький рівень енергоспоживання [15]. Передавання даних між компонентами системи доцільно реалізувати за допомогою MQTT-протоколу, який забезпечує швидкий та надійний обмін повідомленнями між пристроями в режимі реального часу [26]. З технічної точки зору структура автоматизованої системи повинна забезпечувати масштабованість, модульність, відмовостійкість та можливість інтеграції нових компонентів, що дозволяє адаптувати систему до змінних умов експлуатації та розширення функціоналу [37].

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.2 Розроблення функціональної схеми системи керування

Функціональна схема системи керування є одним із ключових етапів проектування комп'ютерно-інтегрованої системи енергоефективності, оскільки визначає принцип взаємодії між сенсорними елементами, засобами обробки інформації, каналами передачі даних та виконавчими пристроями [21]. Основною метою розроблення функціональної схеми є забезпечення автоматизованого контролю параметрів середовища, оптимізація енергоспоживання та реалізація механізмів адаптивного керування режимами роботи обладнання. Для наочного представлення логіки функціонування функціональну схему системи керування наведено на рис. 2.2.

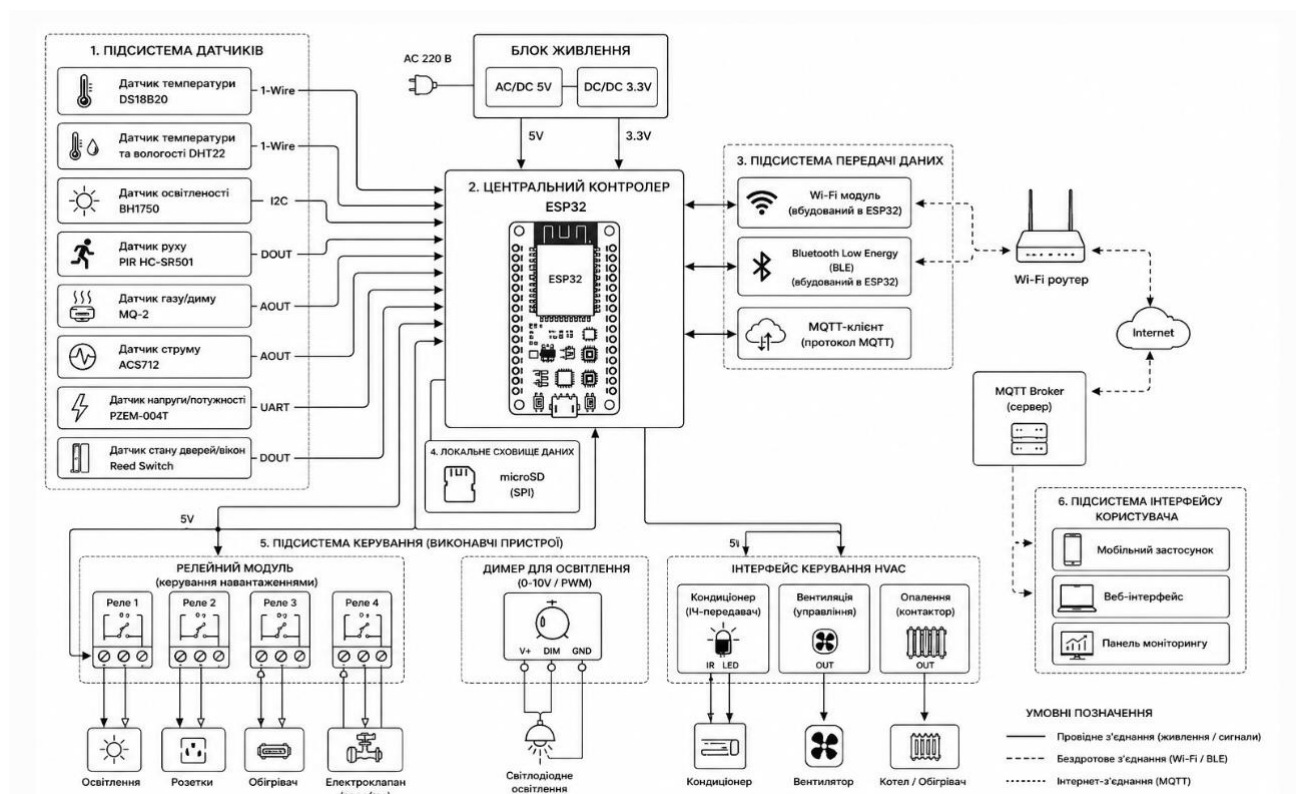


Рис. 2.2 – Функціональна схема системи керування енергоефективністю Smart Home

У проєктованій системі функціональна схема будується за принципом замкнутого контуру автоматичного керування, у якому реалізується безперервний цикл збору, аналізу та обробки інформації з подальшим формуванням керуючих впливів [23]. Вхідними параметрами системи є значення температури, вологості, рівня освітлення, наявності руху, параметрів

електроспоживання та стану дверей або вікон, що надходять від сенсорної підсистеми. Первинний збір інформації здійснюється за допомогою датчиків DHT22, DS18B20, BH1750, PIR HC-SR501, MQ-2, ACS712, PZEM-004T, які формують електричні сигнали відповідно до контрольованих параметрів [34]. Отримані сигнали передаються до центрального мікроконтролера ESP32, де відбувається їх фільтрація, цифрова обробка, аналіз та порівняння з установленими пороговими значеннями.

Передавання інформації між компонентами системи здійснюється за допомогою протоколів Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE) та MQTT, що забезпечують швидкий обмін даними між локальними пристроями, серверною платформою та користувацьким інтерфейсом [15]. У межах системи MQTT використовується для організації моделі Publisher–Subscriber, де датчики та контролер виступають джерелами повідомлень, а сервер або мобільний застосунок — підписниками інформації.

На основі аналізу вхідних параметрів мікроконтролер формує керуючі сигнали для виконавчих пристроїв, до яких належать реле, димери освітлення, Smart-розетки, електроклапани та HVAC-система (опалення, вентиляція, кондиціонування) [36]. Наприклад, при перевищенні встановленої температури система може автоматично активувати вентиляцію або кондиціонування, а за відсутності користувачів — вимикати освітлення для зменшення енергетичних витрат.

Функціональна схема також передбачає можливість локального та віддаленого моніторингу, що реалізується через вебінтерфейс або мобільний застосунок. Це дозволяє користувачу в режимі реального часу переглядати параметри системи, змінювати режими роботи та отримувати повідомлення про аварійні ситуації [27]. Таким чином, розроблена функціональна схема системи керування забезпечує комплексну взаємодію між сенсорною підсистемою, засобами передавання даних, центральним контролером та виконавчими пристроями, що дозволяє реалізувати автоматизоване керування енергоефективністю розумного будинку.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.3 Вибір апаратних засобів автоматизації

Вибір апаратних засобів автоматизації є одним із ключових етапів проєктування системи керування енергоефективністю розумного будинку, оскільки від технічних характеристик обладнання залежить надійність, точність моніторингу, швидкодія та ефективність функціонування системи в цілому. Для реалізації проєктованої комп'ютерно-інтегрованої системи було обрано комплекс апаратних засобів, до складу якого входять центральний контролер, сенсорна підсистема та виконавчі механізми.

Вибір обладнання здійснювався з урахуванням таких критеріїв:

- підтримка IoT-протоколів зв'язку;
- низьке енергоспоживання;
- сумісність із платформою ESP32;
- достатня точність вимірювання;
- простота інтеграції у систему Smart Home;
- економічна доцільність та доступність компонентів. Детальні технічні

характеристики апаратних компонентів системи наведено у додатку А.

Для реалізації автоматизованої системи було обрано центральний контролер ESP32 DevKit V1, а також набір сенсорів для контролю параметрів середовища й виконавчих механізмів для реалізації керуючих впливів.

Центральним елементом системи керування обрано ESP32 DevKit V1, який являє собою високопродуктивну мікроконтролерну платформу, призначену для побудови IoT-систем та вбудованих комп'ютерно-інтегрованих рішень [3].

ESP32 побудований на основі двоядерного мікропроцесора Tensilica Xtensa LX6 із тактовою частотою до 240 МГц, що забезпечує достатню продуктивність для одночасної обробки даних із сенсорів, аналізу параметрів енергоспоживання та передачі інформації через бездротові мережі. Основною перевагою ESP32 є наявність вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth Low Energy (BLE), що дозволяє реалізувати бездротовий обмін даними без

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

використання додаткових модулів зв'язку. Крім того, контролер підтримує інтерфейси UART, SPI, I2C, PWM, ADC та GPIO, що забезпечує можливість підключення широкого спектра сенсорів і виконавчих пристроїв [5].

Для наочного представлення зовнішнього вигляду контролера ESP32 DevKit V1 наведено на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Контролер ESP32 DevKit V1

Таблиця 2.1 – Основні характеристики контролера ESP32

Параметр	Значення
Тактова частота	До 240 МГц
Ядра	2
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n
Bluetooth	BLE 4.2
Напруга живлення	3.3 В
GPIO	До 34
ADC	12-bit
Flash пам'ять	До 16 MB

Контролер ESP32 був обраний завдяки високій продуктивності, підтримці бездротового зв'язку та низькому енергоспоживанню, що робить його оптимальним рішенням для систем енергоефективного Smart Home.

Для забезпечення автоматизованого контролю параметрів середовища у проєктованій системі використовується комплекс сенсорів, які забезпечують моніторинг температури, вологості, освітленості, руху, рівня газу, електроспоживання та стану дверей/вікон.

Для вимірювання температури використовується цифровий датчик DS18B20, який працює за протоколом 1-Wire та забезпечує високу точність вимірювання [6]. Основними перевагами датчика є широкий діапазон вимірювання (від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$) та точність $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, що дозволяє використовувати його в системах автоматичного регулювання мікроклімату.

Для візуалізації зовнішнього вигляду датчика DS18B20 його конструкцію наведено на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Датчик температури DS18B20

Для контролю температури та відносної вологості використовується DHT22, який забезпечує цифрове передавання даних та характеризується підвищеною точністю у порівнянні з DHT11 [7]. Діапазон вимірювання температури становить $-40...+80^{\circ}\text{C}$, а вологості — 0–100%.



Рисунок 2.5 – Датчик температури та вологості DHT22

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для автоматичного керування освітленням використовується цифровий датчик BH1750, який вимірює рівень освітленості у lux та взаємодіє з ESP32 через інтерфейс I2C. Використання даного сенсора дозволяє автоматично регулювати рівень освітлення залежно від природного освітлення приміщення [8].

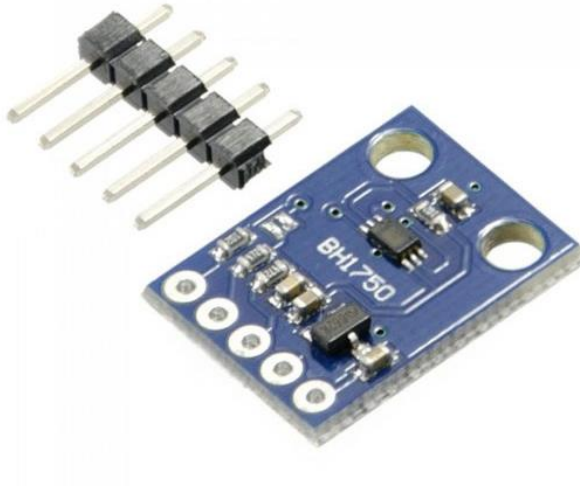


Рис. 2.6 – Датчик освітленості BH1750

Для визначення присутності користувача використовується PIR HC-SR501, який працює на основі пасивного інфрачервоного випромінювання. Датчик забезпечує виявлення руху на відстані до 7 м, що дозволяє автоматично вмикати освітлення або активувати режими енергозбереження [9].



Рисунок 2.7 – Датчик руху PIR HC-SR501

Для підвищення рівня безпеки використовується сенсор MQ-2, який дозволяє визначати наявність диму, природного газу, метану та пропану [10].

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

При перевищенні встановленого порогового значення система формує аварійне повідомлення користувачу.

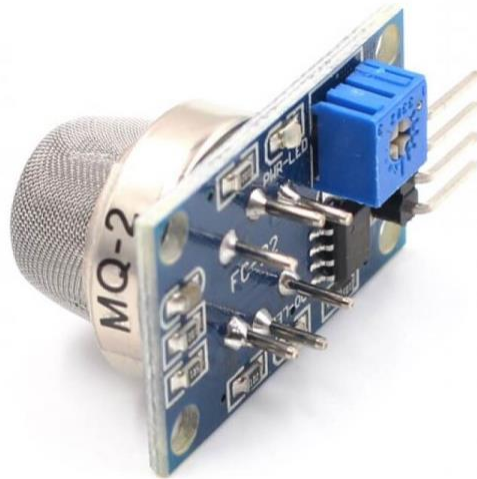


Рисунок 2.8 – Датчик газу та диму MQ-2

Для контролю споживання електроенергії використовується ACS712, принцип роботи якого базується на ефекті Холла. Датчик забезпечує вимірювання струму та дозволяє здійснювати моніторинг енергоспоживання побутових приладів [11].

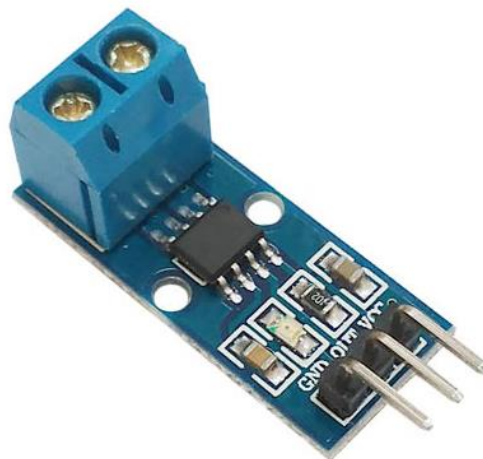


Рисунок 2.9 – Датчик струму ACS712

Для визначення параметрів електромережі використовується PZEM-004T, який дозволяє вимірювати:

- напругу;
- силу струму;
- активну потужність;

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

– спожиту електроенергію.

Передача інформації здійснюється через UART-інтерфейс [12].



Рисунок 2.10 – Модуль моніторингу електроспоживання PZEM-004T

Для контролю відкриття дверей і вікон використовується Reed Switch, принцип роботи якого базується на замиканні герконового контакту під дією магнітного поля [13]. Використання такого сенсора дозволяє реалізувати охоронні функції та режими енергозбереження. Детальну схему підключення сенсорів та виконавчих пристроїв до контролера ESP32 наведено у додатку Б.



Рисунок 2.11 – Магнітний датчик Reed Switch

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 2.2 – Характеристики датчиків системи

Датчик	Призначення	Інтерфейс	Діапазон
DS18B20	Температура	1-Wire	-55...+125°C
DHT22	Температура/вологість	Digital	-40...+80°C
BH1750	Освітленість	I2C	1-65535 lux
PIR HC-SR501	Рух	Digital	До 7 м
MQ-2	Газ/дим	Analog	Залежить від концентрації
ACS712	Струм	Analog	±5-30 А
PZEM-004T	Потужність	UART	80-260 В
Reed Switch	Двері/вікна	Digital	ON/OFF

Для автоматичного керування електричними навантаженнями у системі Smart Home використовується 4-канальний релейний модуль 5V, який забезпечує комутацію пристроїв 220 В за сигналами від ESP32. Принцип роботи базується на електромагнітному перемиканні контактів, що дозволяє безпечно ізолювати логічну частину системи від силових кіл [1]. Релейний модуль використовується для автоматичного керування освітленням, обігрівачами, вентиляторами та іншими електроприладами відповідно до заданих сценаріїв енергоефективності. Для візуалізації зовнішнього вигляду пристрою його конструкцію наведено на рис. 2.12.

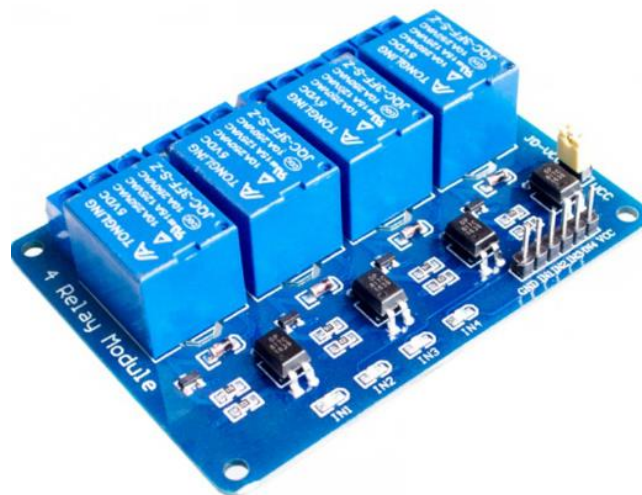


Рисунок 2.12 – 4-канальний релейний модуль 5V

Для регулювання інтенсивності освітлення використовується PWM-диммер, який змінює яскравість світла шляхом широтно-імпульсної модуляції

(PWM) [2]. Використання димера дозволяє автоматично керувати освітленням залежно від показників датчика ВН1750, часу доби або присутності користувачів. Це сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню комфорту. Зовнішній вигляд пристрою наведено на рис. 2.13.



Рисунок 2.13 – PWM-димер для Smart-освітлення

Для дистанційного керування електроприладами використовується Smart-розетка, яка забезпечує контроль живлення та моніторинг споживання електроенергії [3]. Зовнішній вигляд Smart-розетки наведено на рисуюнок 2.14.



Рисунок 2.14 – Smart-розетка для керування електроживленням

Пристрій інтегрується із системою через Wi-Fi або MQTT, що дозволяє

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

автоматично вмикати або вимикати обладнання відповідно до заданих сценаріїв та зменшувати зайве енергоспоживання. Для автоматичного регулювання інженерних систем використовуються електроклапани та HVAC-система (опалення, вентиляція, кондиціонування) [4]. Зовнішній вигляд обладнання наведено на рис. 2.15.



Рисунок 2.15 – Електроклапан та HVAC-система у Smart Home

Електроклапан забезпечує автоматичне перекриття подачі води або газу при аварійних ситуаціях, а HVAC-система підтримує оптимальний мікроклімат на основі даних датчиків DS18B20 та DHT22.

2.4 Розроблення алгоритму автоматичного керування енергоспоживанням

Розроблення алгоритму автоматичного керування енергоспоживанням є одним із ключових етапів створення комп'ютерно-інтегрованої системи Smart Home, оскільки саме алгоритм визначає логіку функціонування системи, порядок обробки інформації та формування керуючих впливів [1]. Основною метою алгоритму є забезпечення енергоефективного режиму роботи будинку шляхом автоматичного регулювання освітлення, кліматичних параметрів та електроспоживання відповідно до поточного стану середовища.

У проєктованій системі реалізується алгоритм замкненого циклу автоматичного керування, який включає безперервний збір даних із сенсорів, аналіз параметрів, порівняння з установленими пороговими значеннями та

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

формування команд для виконавчих механізмів [2].

Вхідними параметрами алгоритму є значення:

- температури повітря (DS18B20, DHT22);
- вологості повітря (DHT22);
- рівня освітленості (BH1750);
- руху користувача (PIR HC-SR501);
- концентрації газу або диму (MQ-2);
- параметрів енергоспоживання (ACS712, PZEM-004T);
- стану дверей та вікон (Reed Switch).

Алгоритм функціонування системи реалізується на основі мікроконтролера ESP32, який здійснює постійне опитування сенсорів та прийняття рішень щодо зміни режиму роботи обладнання [3].

Наприклад, якщо температура у приміщенні знижується нижче заданого значення, система автоматично активує опалення через релейний модуль. У випадку перевищення температурного порогу активується вентиляція або кондиціонування. При відсутності руху протягом заданого часу система вимикає освітлення для мінімізації енергоспоживання. Якщо датчик MQ-2 фіксує витік газу, формується аварійне повідомлення та автоматично перекривається електроклапан [4].

Для оптимізації енергоспоживання алгоритм також передбачає аналіз показників електромережі. У разі перевищення допустимого навантаження система може автоматично відключати другорядні електроприлади або переводити їх у режим енергозбереження. Для наочного представлення логіки функціонування блок-схему алгоритму автоматичного керування енергоспоживанням наведено на рис. 2.16.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

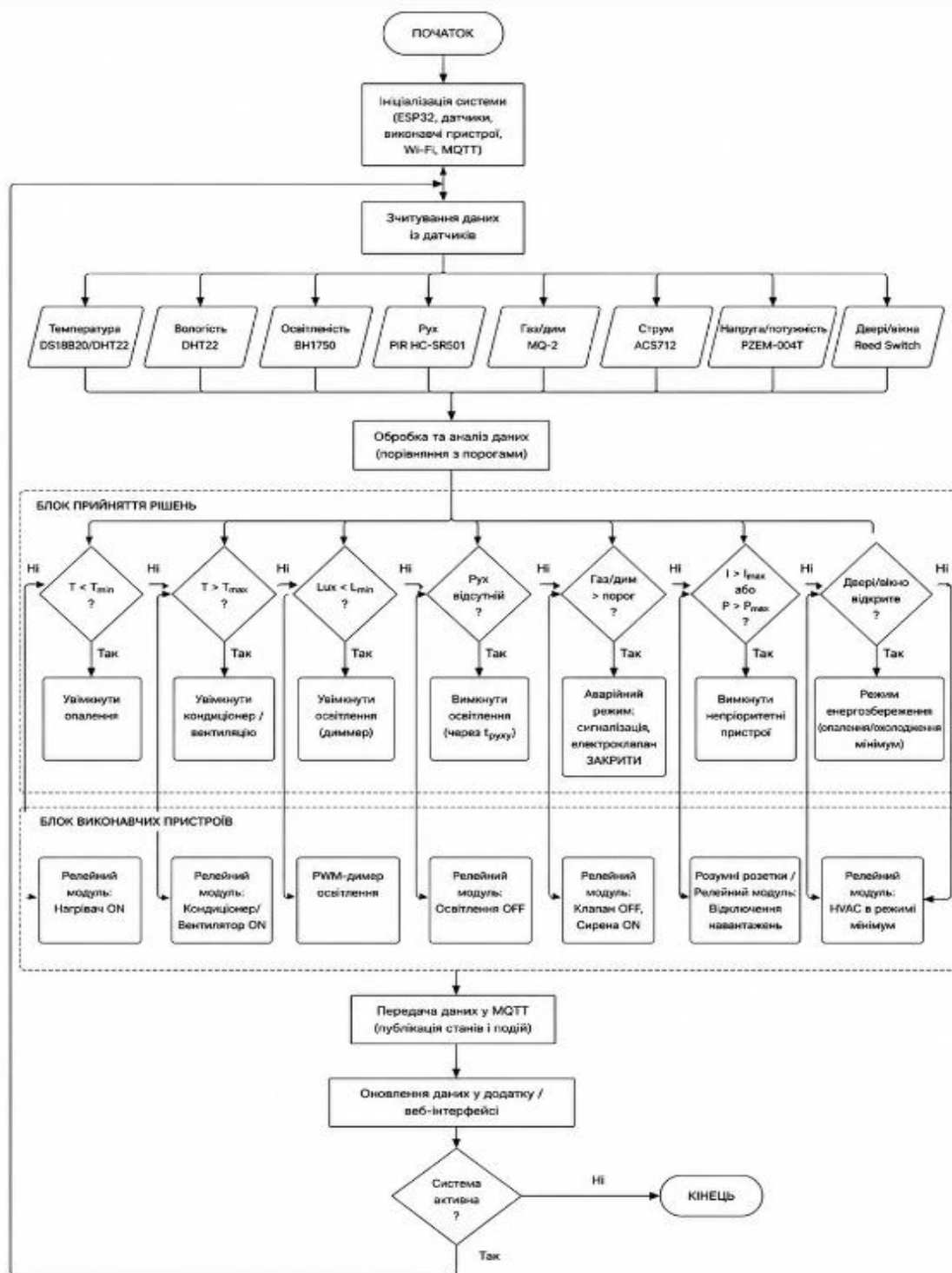


Рисунок 2.16 – Алгоритм автоматичного керування енергоспоживанням Smart Home

Розроблений алгоритм автоматичного керування енергоспоживанням забезпечує автоматизоване прийняття рішень на основі аналізу параметрів внутрішнього середовища та показників енергоспоживання. Залежно від

значень, отриманих із сенсорної підсистеми, контролер ESP32 формує відповідні керуючі сигнали для виконавчих механізмів, що дозволяє реалізувати адаптивне регулювання режимів роботи обладнання. Для забезпечення стабільного функціонування системи були визначені основні умови спрацювання алгоритму, які встановлюють відповідність між контрольованими параметрами та реакцією системи керування. Узагальнену характеристику логіки прийняття рішень наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні умови спрацювання алгоритму

Контрольований параметр	Умова	Дія системи
Температура	$T < T_{min}$	Увімкнення опалення
Температура	$T > T_{max}$	Увімкнення вентиляції
Освітленість	$Lux < \text{порогу}$	Увімкнення освітлення
Рух	Рух відсутній	Вимкнення освітлення
Газ/дим	Концентрація $>$ норми	Аварійне повідомлення
Навантаження	$P > P_{max}$	Вимкнення другорядних приладів

Отже, запропонований алгоритм дозволяє забезпечити автоматизоване керування енергоспоживанням, оптимізацію використання ресурсів та підвищення рівня безпеки й комфорту користувачів [5].

2.5 Інтеграція IoT-пристроїв у єдину систему моніторингу

Інтеграція IoT-пристроїв у єдину систему моніторингу є важливим етапом побудови автоматизованої системи Smart Home, оскільки забезпечує централізовану взаємодію між сенсорами, контролерами, виконавчими пристроями та користувацьким інтерфейсом [6]. У межах проєктованої системи всі пристрої об'єднані навколо центрального контролера ESP32, який виконує роль локального вузла збору, аналізу та передачі інформації. Підключення датчиків здійснюється через цифрові та аналогові інтерфейси GPIO, I2C, UART та ADC, а передача даних реалізується через Wi-Fi [7].

Для забезпечення обміну повідомленнями використовується протокол MQTT, який працює за принципом Publisher–Subscriber. У такій архітектурі

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

датчики та контролер передають інформацію до MQTT Broker, після чого дані стають доступними для мобільного застосунку або вебінтерфейсу [8].

Інтегрована система моніторингу дозволяє в режимі реального часу:

- контролювати параметри мікроклімату;
- відстежувати рівень енергоспоживання;
- отримувати повідомлення про аварійні ситуації;
- дистанційно керувати обладнанням.

Перевагою такого підходу є можливість одночасної взаємодії великої кількості IoT-пристроїв, масштабованість та віддалений доступ до системи. Для наочного представлення взаємодії компонентів структурну схему інтеграції IoT-пристроїв наведено на рис. 2.17.

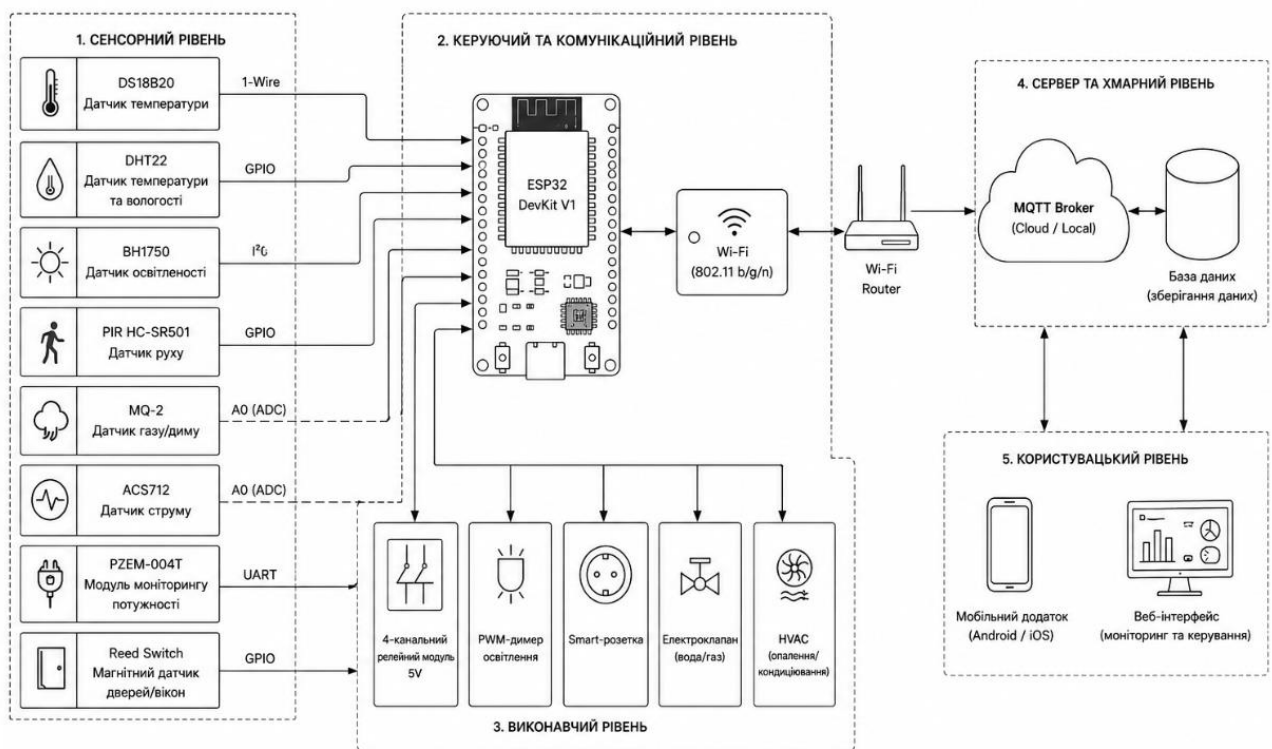


Рисунок 2.17 – Інтеграція IoT-пристроїв у систему моніторингу Smart Home

Розроблена схема інтеграції IoT-пристроїв демонструє взаємодію сенсорної підсистеми, центрального контролера ESP32, виконавчих механізмів, серверної інфраструктури та користувацького рівня в межах єдиної системи моніторингу Smart Home. Передача інформації між компонентами реалізується через відповідні інтерфейси (GPIO, I2C, UART, ADC) та мережеві протоколи

Wi-Fi і MQTT, що забезпечує централізоване керування й оперативний обмін даними в режимі реального часу. Для детального представлення взаємозв'язку між окремими пристроями, каналами зв'язку та їх функціональним призначенням доцільно розглянути структуру взаємодії компонентів системи, яку наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Взаємодія IoT-пристроїв у системі

Пристрій	Інтерфейс	Призначення
DS18B20	1-Wire	Температура
DHT22	GPIO	Температура/вологість
BH1750	I2C	Освітленість
PZEM-004T	UART	Моніторинг енергії
ESP32	Wi-Fi	Центр керування
MQTT Broker	TCP/IP	Передача повідомлень

Таким чином, інтеграція IoT-пристроїв у єдину систему моніторингу забезпечує безперервний обмін даними, централізоване керування та можливість адаптивного контролю параметрів Smart Home [7].

2.6 Розроблення інформаційного обміну та структури передачі даних

Інформаційний обмін у системі Smart Home реалізується для забезпечення взаємодії між датчиками, контролером, серверною платформою та користувацьким інтерфейсом [9]. Основною вимогою до структури передачі даних є висока швидкодія, надійність, мінімальне навантаження на мережу та підтримка роботи в режимі реального часу.

У розробленій системі використовується багаторівнева структура передачі інформації, де первинні дані збираються сенсорами, обробляються контролером ESP32 та передаються через Wi-Fi до MQTT Broker [10].

Передача інформації організована у вигляді тематичних каналів (topics) MQTT, наприклад:

- /home/temperature – температура;

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- /home/humidity – вологість;
- /home/light – освітленість;
- /home/energy – енергоспоживання;
- /home/security – безпека. Детальну структуру MQTT-каналів та їх функціональне призначення наведено у додатку В. Така структура забезпечує розподіл інформаційних потоків та зменшує мережеве навантаження. Для реалізації логіки функціонування системи було розроблено програмний код для мікроконтролера ESP32, фрагмент якого наведено у додатку Г.

Таблиця 2.5 – Потоки передачі даних у системі

Джерело	Канал	Отримувач
Датчики	GPIO/I2C/UART	ESP32
ESP32	Wi-Fi	MQTT Broker
MQTT Broker	TCP/IP	Мобільний застосунок
Користувач	Wi-Fi	Виконавчі пристрої

Отже, запропонована структура інформаційного обміну забезпечує швидку передачу даних, централізований моніторинг та ефективне автоматизоване керування енергоспоживанням у Smart Home [10].

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ТА АНАЛІЗ ЇЇ РОБОТИ

3.1 Розрахунок параметрів системи автоматичного керування

Розрахунок параметрів системи автоматичного керування є необхідним етапом проєктування комп'ютерно-інтегрованої системи енергоефективності, оскільки дозволяє визначити технічні характеристики обладнання, оцінити енергетичні параметри системи та забезпечити стабільність її функціонування. Основною метою розрахунку є визначення параметрів електроспоживання, навантаження на контролер, характеристик сенсорної підсистеми та виконавчих механізмів. У межах розробленої системи Smart Home основними компонентами, які формують енергетичне навантаження, є центральний контролер ESP32, датчики, модулі зв'язку та виконавчі пристрої. Для забезпечення стабільної роботи необхідно визначити сумарне споживання струму та потужності системи.

Загальне енергоспоживання системи визначається як сума потужностей усіх підключених пристроїв:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (3.1)$$

де:

- P_{Σ} – потужність системи, Вт;
- P_i – потужність окремого пристрою, Вт.

Потужність кожного компонента визначається за формулою:

$$P = U \cdot I \quad (3.2)$$

де:

- U – напруга живлення, В;
- I – сила струму, А.

Для прикладу проведемо розрахунок енергоспоживання основних

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

компонентів системи.

Таблиця 3.1 – Енергетичні параметри компонентів системи

Пристрій	Напруга, В	Струм, мА	Потужність, Вт
ESP32 DevKit V1	3.3	240	0.79
DHT22	3.3	2.5	0.008
DS18B20	3.3	1.5	0.005
BH1750	3.3	0.12	0.0004
PIR HC-SR501	5	50	0.25
MQ-2	5	150	0.75
ACS712	5	10	0.05
PZEM-004T	5	20	0.10
Релейний модуль	5	70	0.35

Сумарна потужність системи становить:

$$P \sum = 0,79 + 0,008 + 0,005 + 0,0004 + 0,25 + 0,75 + 0,05 + 0,10 + 0,35$$

$$P \sum = 2,3034 \text{ Вт}$$

Отже, загальне енергоспоживання апаратної частини системи становить приблизно 2.3 Вт, що свідчить про її низьке енергоспоживання та відповідність вимогам IoT-систем [2].

Сумарний струм системи визначається як:

$$I \sum = \sum I_i \quad (3.3)$$

$$I \sum = 240 + 2,5 + 1,5 + 0,12 + 50 + 150 + 10 + 20 + 70$$

$$I \sum = \sum 544,12 \text{ мА}$$

Таким чином, для стабільної роботи системи необхідно використовувати джерело живлення із запасом не менше 1 А, що забезпечить резерв потужності та стабільність роботи контролера і датчиків.

Час реакції автоматизованої системи визначається сумою часу:

- опитування датчиків t_1 (0,5 с);
- обробки даних контролером t_2 (0,1 с);

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- передавання повідомлень через MQTT t_3 (0,2 с);
- спрацювання виконавчого пристрою t_4 (0,2 с).

Загальний час реакції системи:

$$t_{\Sigma} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (3.4)$$

Тоді:

$$t_{\Sigma} = 0,5 + 0,1 + 0,2 + 0,2$$

$$t_{\Sigma} = 1,0 \text{ с}$$

Отримане значення свідчить, що система реагує на зміну параметрів приблизно за 1 секунду, що є достатнім для Smart Home-систем. Для наочного представлення співвідношення енергоспоживання компонентів результати розрахунку доцільно подати графічно на рис. 3.1.

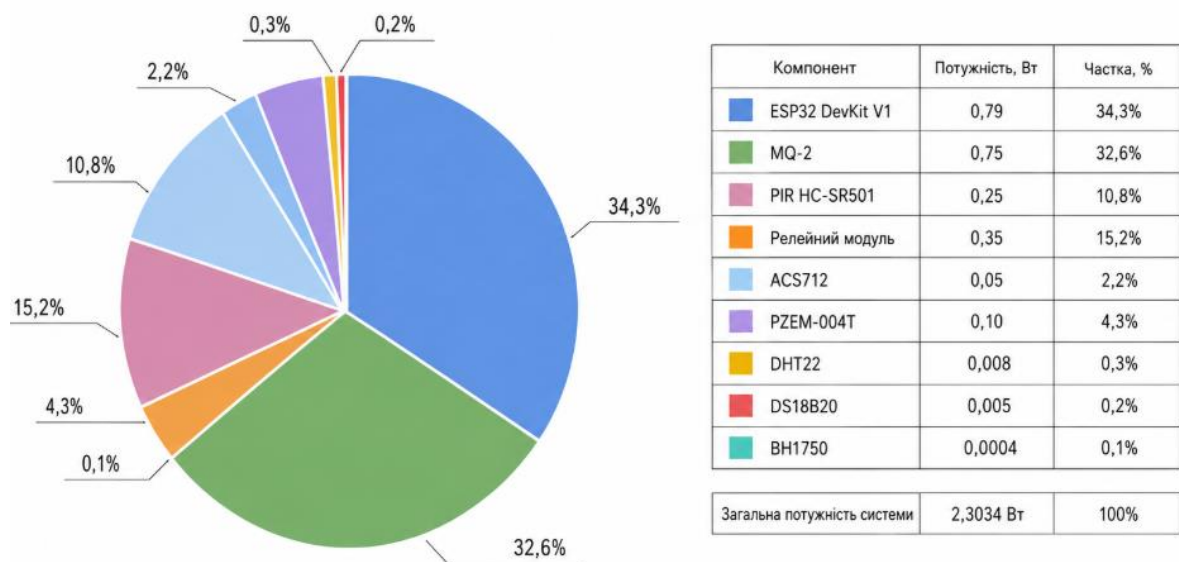


Рис. 3.1 – Розподіл енергоспоживання компонентів системи

Отже, проведені розрахунки підтверджують, що розроблена система має низьке енергоспоживання, забезпечує швидку реакцію на зміну параметрів середовища та може працювати від компактного джерела живлення без перевантаження електричної мережі.

3.2 Моделювання роботи системи у середовищі MATLAB/Simulink

Моделювання роботи автоматизованої системи енергоефективності у середовищі MATLAB/Simulink є важливим етапом дослідження функціонування розробленої системи, оскільки дозволяє здійснити аналіз її поведінки в різних режимах роботи, оцінити швидкодію, стабільність та ефективність алгоритмів автоматичного керування без необхідності фізичної реалізації системи [31].

Середовище MATLAB/Simulink широко використовується для проектування комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизації завдяки можливості побудови структурних моделей, математичного опису процесів та імітації взаємодії між окремими компонентами системи [32]. У межах даного дослідження MATLAB/Simulink застосовується для моделювання процесів збору інформації, аналізу параметрів середовища, прийняття рішень та керування виконавчими пристроями Smart Home.

У розробленій моделі реалізовано основні функціональні блоки системи:

- блок сенсорної підсистеми, який моделює надходження сигналів від датчиків температури, вологості, освітленості, руху та енергоспоживання;
- блок логічного аналізу, що здійснює порівняння вхідних параметрів із заданими пороговими значеннями;
- блок прийняття рішень, який реалізує алгоритм автоматичного керування;
- блок виконавчих механізмів, що моделює роботу реле, HVAC-системи, Smart-освітлення та електроклапанів;
- блок моніторингу, який забезпечує передачу інформації до інтерфейсу користувача [3].

Принцип роботи моделі базується на безперервному аналізі вхідних параметрів. Наприклад, при зниженні температури нижче встановленого значення активується блок опалення, а при перевищенні температурного порогу — кондиціонування або вентиляція. Аналогічно система реагує на зміну рівня

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

освітленості, присутність користувача або перевищення допустимого енергоспоживання [4].

Для реалізації моделі у Simulink використовувалися стандартні бібліотеки:

- Sources — для генерації вхідних сигналів;
- Logic and Bit Operations — для реалізації логічних умов;
- Math Operations — для математичної обробки параметрів;
- Signal Routing — для організації інформаційних потоків;
- Sinks — для візуалізації результатів моделювання [5].

Для оцінки ефективності системи було проведено моделювання в різних режимах експлуатації:

1. Нормальний режим роботи — підтримання параметрів мікроклімату в заданих межах;
2. Режим підвищеного навантаження — перевищення допустимого енергоспоживання та автоматичне відключення другорядних пристроїв;
3. Аварійний режим — виявлення диму або газу з автоматичним перекриттям електроклапана та формуванням повідомлення користувачу;
4. Енергозберігаючий режим — автоматичне вимкнення освітлення за відсутності руху.

Результати моделювання показали, що система забезпечує стабільне функціонування та реагує на зміну параметрів у межах приблизно 1 секунди, що відповідає розрахунковим значенням, отриманим у підрозділі 3.1 [6]. Для наочного представлення структури моделі функціональну схему системи у середовищі MATLAB/Simulink наведено на рис. 3.2.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

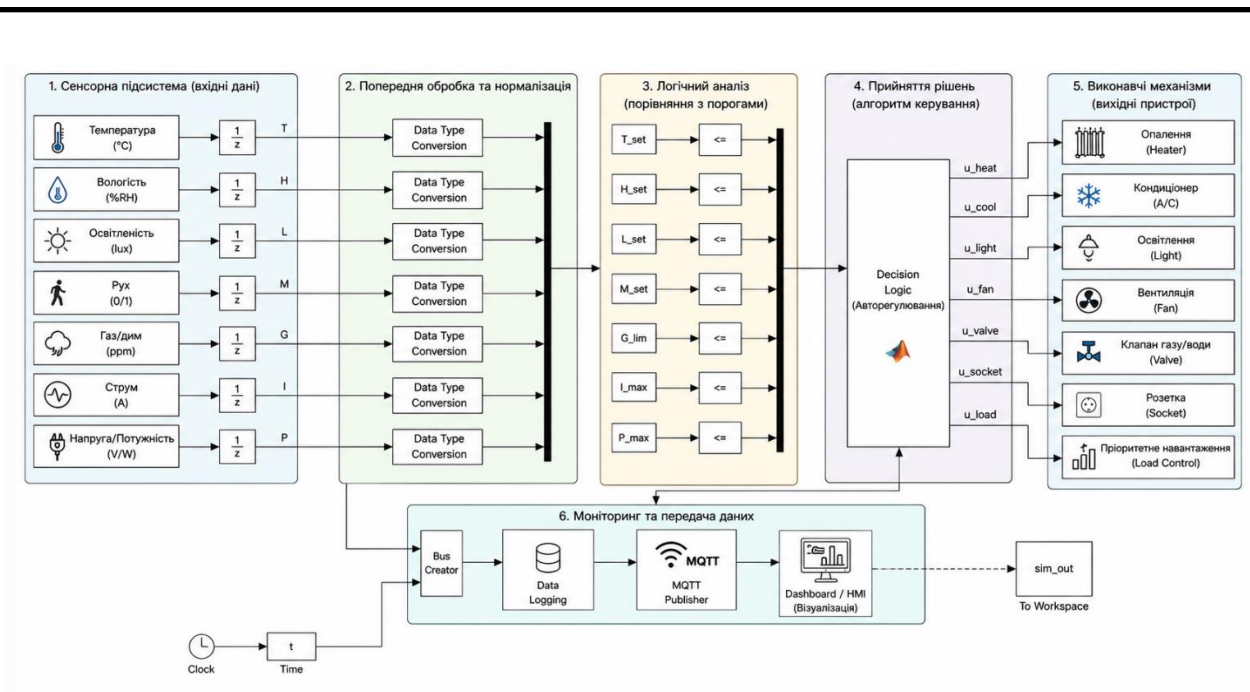


Рисунок 3.2 – Модель системи Smart Home у середовищі MATLAB/Simulink

Для оцінки ефективності підтримання мікроклімату в системі Smart Home доцільно проаналізувати динаміку зміни температури у процесі моделювання, що дозволяє оцінити швидкодію алгоритму автоматичного керування та стабільність роботи HVAC-системи (рис.3.3).

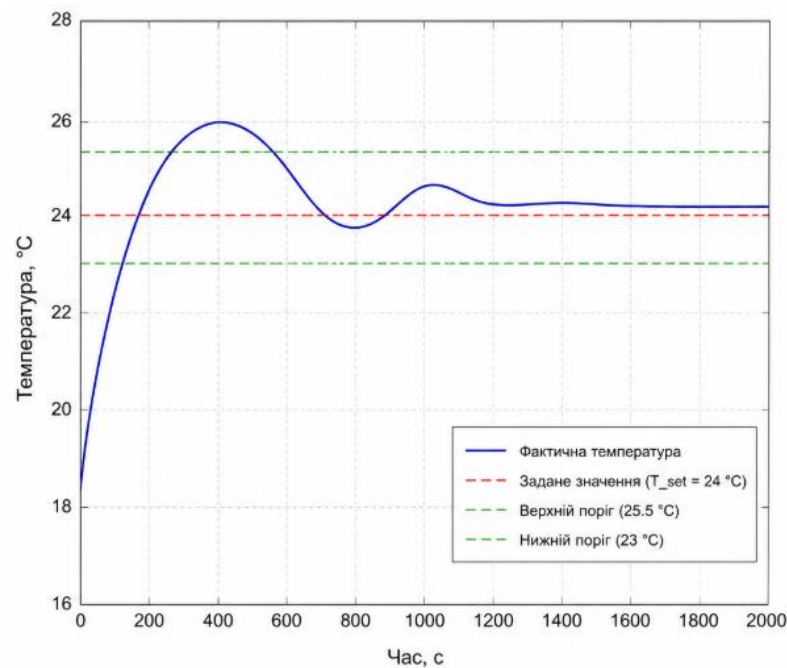


Рисунок 3.3 – Графік зміни температури

Аналіз отриманого графіка показує, що система забезпечує стабілізацію температури в межах заданого діапазону, а реакція виконавчих механізмів

дозволяє мінімізувати відхилення від установленого значення.

Для оцінки енергоефективності запропонованої системи було проведено моделювання зміни рівня енергоспоживання залежно від режиму роботи виконавчих пристроїв та поточного навантаження (рис.3.4).

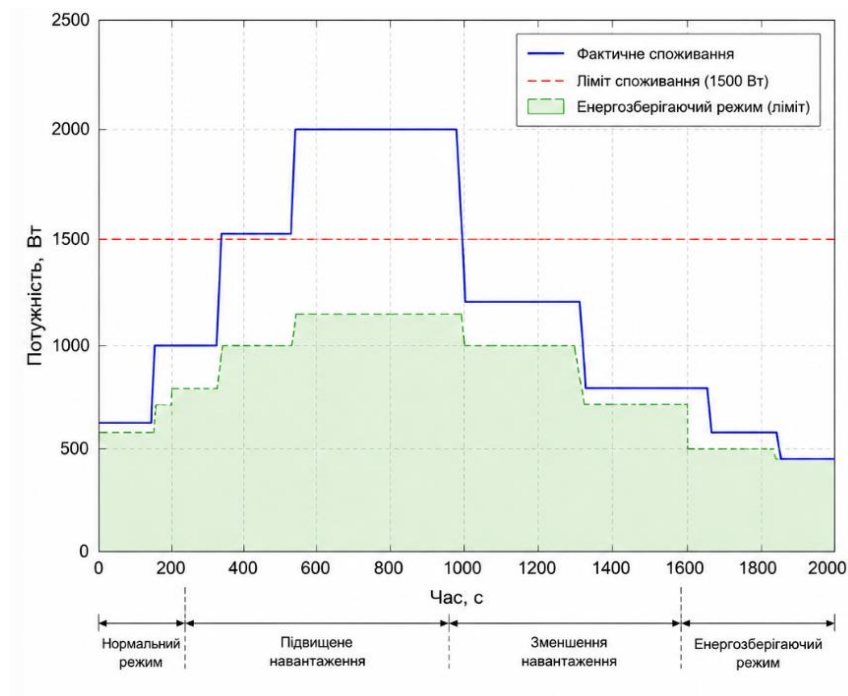


Рисунок 3.4 – Графік енергоспоживання системи

Результати моделювання свідчать, що система забезпечує оптимізацію споживання електроенергії шляхом автоматичного керування навантаженням та відключення другорядних пристроїв у разі перевищення встановлених параметрів. Для аналізу логіки функціонування автоматизованої системи доцільно розглянути зміну станів виконавчих механізмів у відповідь на сигнали, отримані від сенсорної підсистеми.

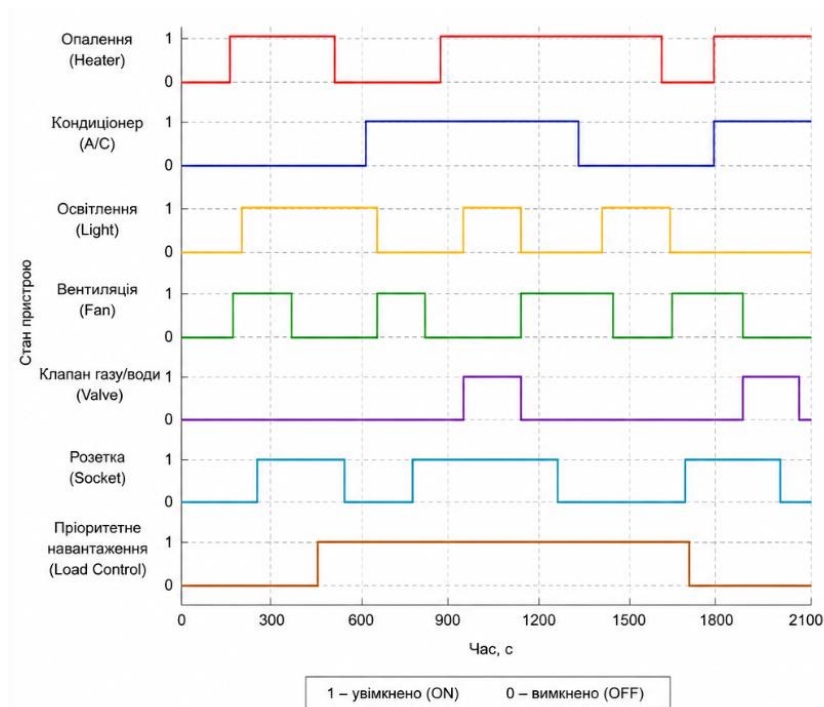


Рисунок 3.5 – Графік стану виконавчих механізмів

Отримані результати підтверджують коректність роботи алгоритму керування, оскільки активація виконавчих пристроїв відбувається відповідно до змін контрольованих параметрів і встановлених умов функціонування системи. Отже, моделювання у середовищі MATLAB/Simulink підтвердило працездатність запропонованої системи автоматичного керування енергоефективністю Smart Home, а також дозволило оцінити її швидкодію, стабільність та ефективність функціонування ще до етапу фізичної реалізації.

3.3 Аналіз енергоефективності та оптимізації споживання енергії

Аналіз енергоефективності є важливим етапом оцінювання функціонування автоматизованої системи Smart Home, оскільки дозволяє визначити рівень раціонального використання енергетичних ресурсів, оцінити ефективність алгоритмів автоматичного керування та встановити ступінь зниження енергоспоживання в результаті впровадження IoT-технологій [1].

Основною метою розробленої системи є мінімізація непродуктивного споживання електроенергії шляхом автоматичного регулювання режимів

роботи освітлення, системи опалення, кондиціонування, вентиляції та електроприладів залежно від поточних параметрів навколишнього середовища й присутності користувачів. У процесі моделювання було встановлено, що найбільше енергоспоживання припадає на HVAC-систему, яка включає опалення та кондиціонування приміщення. Саме тому основна увага в алгоритмі автоматичного керування приділяється оптимізації температурного режиму та запобіганню надмірному використанню кліматичного обладнання [2].

Для оцінки ефективності роботи системи проведено порівняльний аналіз двох режимів функціонування:

- базового режиму, коли керування пристроями здійснюється користувачем вручну;
- автоматизованого режиму, у якому функціонування системи реалізується на основі алгоритму Smart Home.

Результати аналізу показали, що використання автоматизованого керування дозволяє:

- знизити рівень споживання електроенергії на 18–30 %;
- зменшити непродуктивні витрати електроенергії у режимі очікування;
- забезпечити автоматичне вимкнення освітлення за відсутності руху;
- реалізувати адаптивне керування HVAC-системою;
- обмежити перевантаження електромережі за рахунок пріоритетного керування навантаженнями [3].

Для кількісного оцінювання енергоефективності використовується коефіцієнт економії електроенергії:

$$K_e = \frac{E_{base} - E_{smart}}{E_{base}} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

де:

E_{base} – енергоспоживання у звичайному режимі;

E_{smart} – енергоспоживання при використанні Smart Home.

Припустимо, що за добу:

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$E_{base} = 15 \text{ кВт/год}$$

$$E_{smart} = 11,5 \text{ кВт/год}$$

Тоді:

$$K_e = \frac{15 - 11,5}{15} \cdot 100$$

$$K_e = 23,3\%$$

Отриманий результат свідчить, що застосування автоматизованої системи дозволяє зменшити добове енергоспоживання приблизно на 23 %, що підтверджує ефективність використання IoT-технологій для підвищення енергоефективності житлових об'єктів. Для наочного представлення результатів порівняльного аналізу графік енергоспоживання в базовому та автоматизованому режимах наведено на рис. 3.6. Розширені результати оцінювання економії електроенергії наведено у додатку Д.

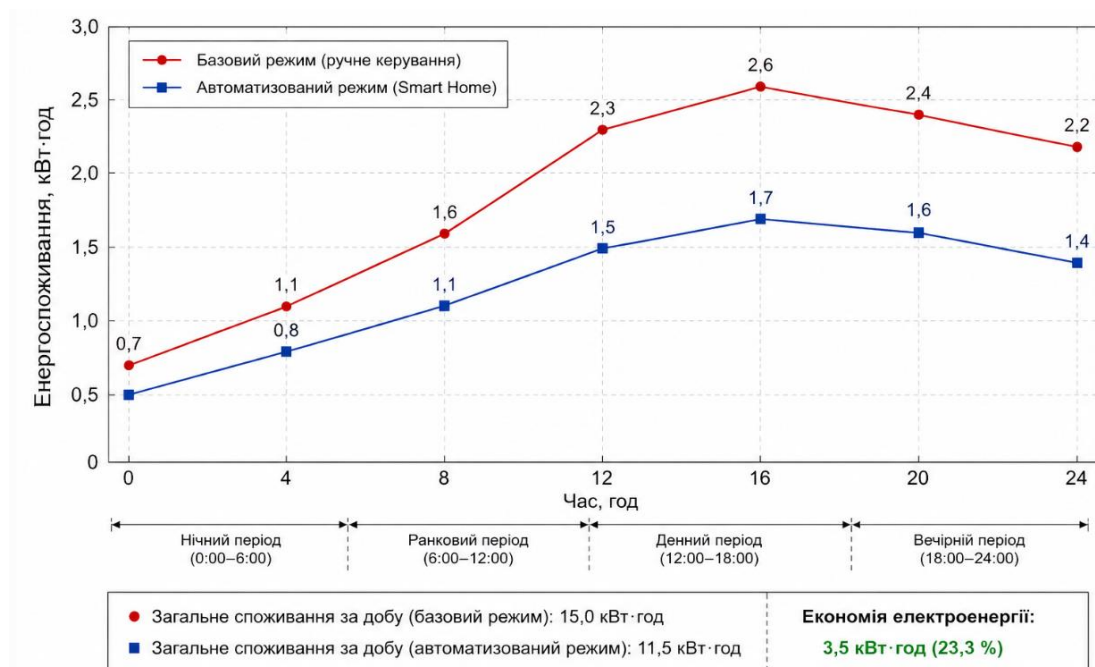


Рисунок 3.6 – Порівняльний аналіз енергоспоживання системи

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що використання алгоритмів автоматизованого керування дозволяє суттєво зменшити витрати електроенергії та підвищити загальну енергоефективність Smart Home. Окрім енергоефективності, важливим критерієм оцінювання автоматизованої системи є її надійність, стабільність роботи та здатність забезпечувати безперервне

функціонування в умовах змінного навантаження та зовнішніх впливів.

3.4 Оцінювання надійності та ефективності функціонування системи

Оцінювання надійності та ефективності функціонування системи є завершальним етапом аналізу комп'ютерно-інтегрованої системи Smart Home, що дозволяє визначити стабільність роботи обладнання, стійкість до відмов та ефективність реалізації алгоритмів автоматичного керування [4].

Надійність автоматизованої системи визначається здатністю зберігати працездатність упродовж заданого часу за умов нормальної експлуатації. У розробленій системі надійність забезпечується використанням мікроконтролера ESP32, цифрових датчиків із низькою похибкою вимірювання та резервуванням логіки керування [5].

Основними факторами, що впливають на надійність системи, є:

- стабільність мережевого з'єднання Wi-Fi;
- точність роботи сенсорів;
- надійність релейних модулів;
- швидкодія контролера ESP32;
- коректність алгоритму прийняття рішень.

Для оцінки ефективності функціонування системи було визначено такі критерії:

- час реакції системи;
- точність підтримання параметрів мікроклімату;
- стабільність передавання даних;
- енергоефективність;
- відсутність помилкових спрацювань.

На основі результатів моделювання встановлено, що середній час реакції системи становить близько 1 секунди, а похибка підтримання температури не перевищує $\pm 1^{\circ}\text{C}$, що відповідає вимогам сучасних систем автоматизації [6].

Для кількісного оцінювання коефіцієнта надійності використовується

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

вираз:

$$R = \frac{T_{\text{роб}}}{T_{\text{роб}} + T_{\text{відм}}} \quad (3.6)$$

де:

$T_{\text{роб}}$ – час безвідмовної роботи (720 год);

$T_{\text{відм}}$ – час простою через відмову (8 год).

Тоді:

$$R = \frac{720 \text{ год}}{720 \text{ год} + 8 \text{ год}}$$

$$R = 0,989$$

Отримане значення (0.989) свідчить про високий рівень надійності системи та стабільність її функціонування в умовах тривалої експлуатації. Для узагальнення показників функціонування результати оцінювання ефективності та надійності системи наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні показники ефективності функціонування системи

Параметр	Значення
Час реакції	≈ 1 с
Похибка температури	$\pm 1^\circ\text{C}$
Економія електроенергії	23 %
Надійність системи	0.989
Передача даних	Стабільна

Отже, результати оцінювання підтверджують, що запропонована система Smart Home характеризується високою надійністю, стабільністю функціонування та забезпечує ефективне автоматизоване керування енергоспоживанням.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано розроблення та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи керування енергоефективністю розумного будинку на базі IoT-технологій, призначеної для автоматизації моніторингу та керування енергоспоживанням, підвищення комфорту, безпеки та ефективності використання енергетичних ресурсів.

У процесі роботи проведено аналіз концепції Smart Home та сучасних підходів до забезпечення енергоефективності будівель. Встановлено, що інтеграція IoT-технологій дозволяє автоматизувати інженерні процеси, зменшити непродуктивні витрати електроенергії та забезпечити дистанційний моніторинг і керування. Досліджено сучасні технології передачі даних та методи моніторингу енергоспоживання. Обґрунтовано використання технології Wi-Fi та протоколу MQTT, які забезпечують надійний і енергоефективний обмін інформацією між пристроями системи.

Проведено аналіз апаратного забезпечення та обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32 DevKit V1 як центрального елемента системи. Для реалізації функцій моніторингу й керування обрано датчики температури, вологості, освітленості, руху, газу та електроспоживання, а також виконавчі пристрої у вигляді релейних модулів, Smart-розеток і систем керування мікрокліматом.

Розроблено архітектуру комп'ютерно-інтегрованої системи, яка включає сенсорну підсистему, канали передачі даних, центральний контролер, виконавчі механізми та користувацький інтерфейс. Запропонована структура забезпечує модульність, масштабованість і можливість інтеграції додаткових IoT-пристроїв.

Створено функціональну схему та алгоритм автоматичного керування енергоспоживанням, які забезпечують автоматичне регулювання освітлення, параметрів мікроклімату та роботи електроприладів відповідно до поточного стану середовища.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У результаті розрахунків встановлено, що сумарне енергоспоживання апаратної частини становить близько 2,3 Вт, необхідний струм живлення — 544 мА, а середній час реакції системи — близько 1 секунди. Це підтверджує можливість стабільної роботи системи в режимі реального часу.

Моделювання в середовищі MATLAB/Simulink підтвердило працездатність розробленої системи та ефективність алгоритмів автоматичного керування. Проведений аналіз показав, що використання запропонованої системи дозволяє зменшити енергоспоживання приблизно на 23 %, а коефіцієнт надійності 0,989 свідчить про високий рівень безвідмовної роботи.

Отже, поставлену мету досягнуто, а всі завдання виконано в повному обсязі. Розроблена система може бути використана як основа для створення сучасних автоматизованих систем керування житловими об'єктами та має перспективи подальшого розвитку шляхом впровадження технологій штучного інтелекту, прогнозування енергоспоживання та хмарної аналітики.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конахович Г. Ф. Адаптивна зміна тривалості циклічного префіксу OFDM-символу при багатопроменевому поширенні радіосигналу / Г. Ф. Конахович, Р. С. Одарченко, М. С. Височіненко // Наукоємні технології. – 2012. – Вип. 4 (16). – С. 116–121.
2. Конахович Г. Ф. Мережі передачі пакетних даних / Г. Ф. Конахович, В. М. Чуприн – К. : «НК-Пресс», 2006. – 272 с., іл.
3. Конахович Г. Ф. Методика визначення радіусу зони обслуговування точки доступу стандарту IEEE 802.11g / Г. Ф. Конахович, М. Г. Луцький, Р. С. Одарченко // Захиста інформації. – 2010. – Вып. 17. – С. 269–277.
4. Хомич, С. В., Федосюк, А. В., & Куліковський, М. І. (2015). Дослідження системи захисту інформації пристроїв IoT. *Цифрові технології*, (18), 166-171.
5. Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature. *Journal of computer and communications*, 3, 164-173.
6. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660.
7. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE communications surveys & tutorials*, 17(4), 2347-2376.
8. Minoli, D., Sohraby, K., & Occhiogrosso, B. (2017). IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings—Energy optimization and next-generation building management systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(1), 269-283.
9. Gomez, C., Oller, J., & Paradells, J. (2012). Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *sensors*, 12(9), 11734-11753.
10. Banks, A., & Gupta, R. (2014). MQTT Version 3.1. 1. *OASIS standard*, 29, 89.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

11. Tripathi, S., & Chaurasia, B. K. (2023, March). Broker clustering enabled lightweight communication in iot using mqtt. In *2023 6th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON)* (pp. 1-6). IEEE.

12. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660.

13. SHELBY, Zach; BORMANN, Carsten. *6LoWPAN: The wireless embedded Internet*. John Wiley & Sons, 2011.

14. FARAHANI, Shahin. *ZigBee wireless networks and transceivers*. newnes, 2011.

15. MINOLI, Daniel; SOHRABY, Kazem; OCCHIOGROSSO, Benedict. IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings—Energy optimization and next-generation building management systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4.1: 269-283.

16. AL-FUQAHA, Ala, et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2015, 17.4: 2347-2376.

17. GUBBI, Jayavardhana, et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 2013, 29.7: 1645-1660.

18. MONK, Simon. *Programming Arduino™ Getting Started with Sketches*. McGraw-Hill Education, 2016.

19. SHYMCHYSHYN, Olha; SHYMCHYSHYN, Maryan; SERHIIENKO, Vladyslav. MODULAR APPROACH TO BUILDING A HARDWARE-SOFTWARE PLATFORM FOR SMART HOME AUTOMATION: FROM SIMPLE RULES TO INTELLIGENT SCENARIOS. *Electronics and information technologies/Електроніка та інформаційні технології*, 2025, 31: 61-70.

20. IBRAHIM, Dogan. *Microcontroller based applied digital control*. John Wiley, 2006.

21. SHYMCHYSHYN, Olha; SHYMCHYSHYN, Maryan; SERHIIENKO, Vladyslav. MODULAR APPROACH TO BUILDING A HARDWARE-SOFTWARE

					ДП.АКИТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

PLATFORM FOR SMART HOME AUTOMATION: FROM SIMPLE RULES TO INTELLIGENT SCENARIOS. *Electronics and information technologies/Електроніка та інформаційні технології*, 2025, 31: 61-70.

22. KHOMENKO, Yevheniy; BABICHEV, Sergii. Modular IoT Architecture for Monitoring and Control of Office Environments Based on Home Assistant. *IoT*, 2025, 6.4: 69.

23. ANIK, Sheik Murad Hassan, et al. Programming of automation configuration in smart home systems: Challenges and opportunities. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2026, 35.2: 1-25.

24. NETINANT, Paniti, et al. Development and assessment of internet of things-driven smart home security and automation with voice commands. *IoT*, 2024, 5.1: 79-99.

25. VRANČIĆ, Arian; ZADRAVEC, Hana; OREHOVAČKI, Tihomir. The role of smart homes in providing care for older adults: A systematic literature review from 2010 to 2023. *Smart Cities*, 2024, 7.4: 1502-1550.

26. MONK, Simon. *Programming Arduino™ Getting Started with Sketches*. McGraw-Hill Education, 2016.

27. SHYMCHYSHYN, Olha; SHYMCHYSHYN, Maryan; SERHIIENKO, Vladyslav. MODULAR APPROACH TO BUILDING A HARDWARE-SOFTWARE PLATFORM FOR SMART HOME AUTOMATION: FROM SIMPLE RULES TO INTELLIGENT SCENARIOS. *Electronics and information technologies/Електроніка та інформаційні технології*, 2025, 31: 61-70.

28. ANIK, Sheik Murad Hassan, et al. Programming of automation configuration in smart home systems: Challenges and opportunities. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2026, 35.2: 1-25.

29. AAVILD, Anders Peter, et al. Distributed Home Automation with Home Assistant. In: *Proceedings of the 14th International Conference on the Internet of Things*. 2024. p. 206-212.

30. RANI, M. Devika, et al. Model based design of electric vehicle propulsion system using Simulink. In: *2024 3rd International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*. IEEE, 2024. p. 1-8.

31. MAZZACCARO, Alice. *Model-Based Development and Simulation of Operating Conditions in a Battery Electric Vehicle Using Simulink*. 2025. PhD Thesis. Politecnico di Torino.

32. BISHOP, Richard C. Dorf Robert H. *Modern control systems*. 2011.

33. MINOLI, Daniel; SOHRABY, Kazem; OCCHIOGROSSO, Benedict. IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings—Energy optimization and next-generation building management systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4.1: 269-283.

34. GUBBI, Jayavardhana, et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 2013, 29.7: 1645-1660.

35. MADJOVSKI, Darko; DUMANCIC, Ivan; TRANCHITA, Carolina. Dynamic modeling of distribution power systems with renewable generation for stability analysis. *Energies*, 2024, 17.20: 5178.

36. CHUKWUNWEIKE, Joseph Nnaemeka, et al. Energy grid optimization using deep machine learning: a review of challenges, opportunities, and implementation strategies in matlab. *World J Adv Res Rev*, 2024, 23.2.

37. KOEV, Konstantin; RUSEVA, Vyara; KRASTEVA, Anka. Modelling and Simulation of an Electric Transport High-Power Three-Phase Full-Wave Uncontrolled Rectifier in the MATLAB/Simulink Environment. In: *2024 9th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*. IEEE, 2024. p. 1-5.

38. TURCO, Lorenzo, et al. A study on co-simulation digital twin with MATLAB and AirSim for future advanced air mobility. In: *2024 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2024. p. 1-18.

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Технічні характеристики апаратних компонентів системи

Таблиця А.1 – Технічні характеристики контролера ESP32 DevKit V1

Параметр	Значення
Мікроконтролер	ESP32
Тактова частота	До 240 МГц
Кількість ядер	2
Flash-пам'ять	До 16 MB
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n
Bluetooth	BLE 4.2
Напруга живлення	3.3 V
GPIO	До 34

Таблиця А.2 – Характеристики датчиків системи

Датчик	Призначення	Інтерфейс
DS18B20	Температура	1-Wire
DHT22	Температура/вологість	GPIO
BH1750	Освітленість	I2C
PIR HC-SR501	Рух	Digital
MQ-2	Газ/дим	Analog
ACS712	Струм	Analog
PZEM-004T	Моніторинг електроенергії	UART

Схема підключення компонентів до ESP32
Таблиця Б.1 – Розподіл GPIO-контактів ESP32

Пристрій	Контакт ESP32
DHT22	GPIO 4
DS18B20	GPIO 5
PIR HC-SR501	GPIO 18
BH1750 (SDA)	GPIO 21
BH1750 (SCL)	GPIO 22
MQ-2	GPIO 34
ACS712	GPIO 35
Релейний модуль	GPIO 26–27

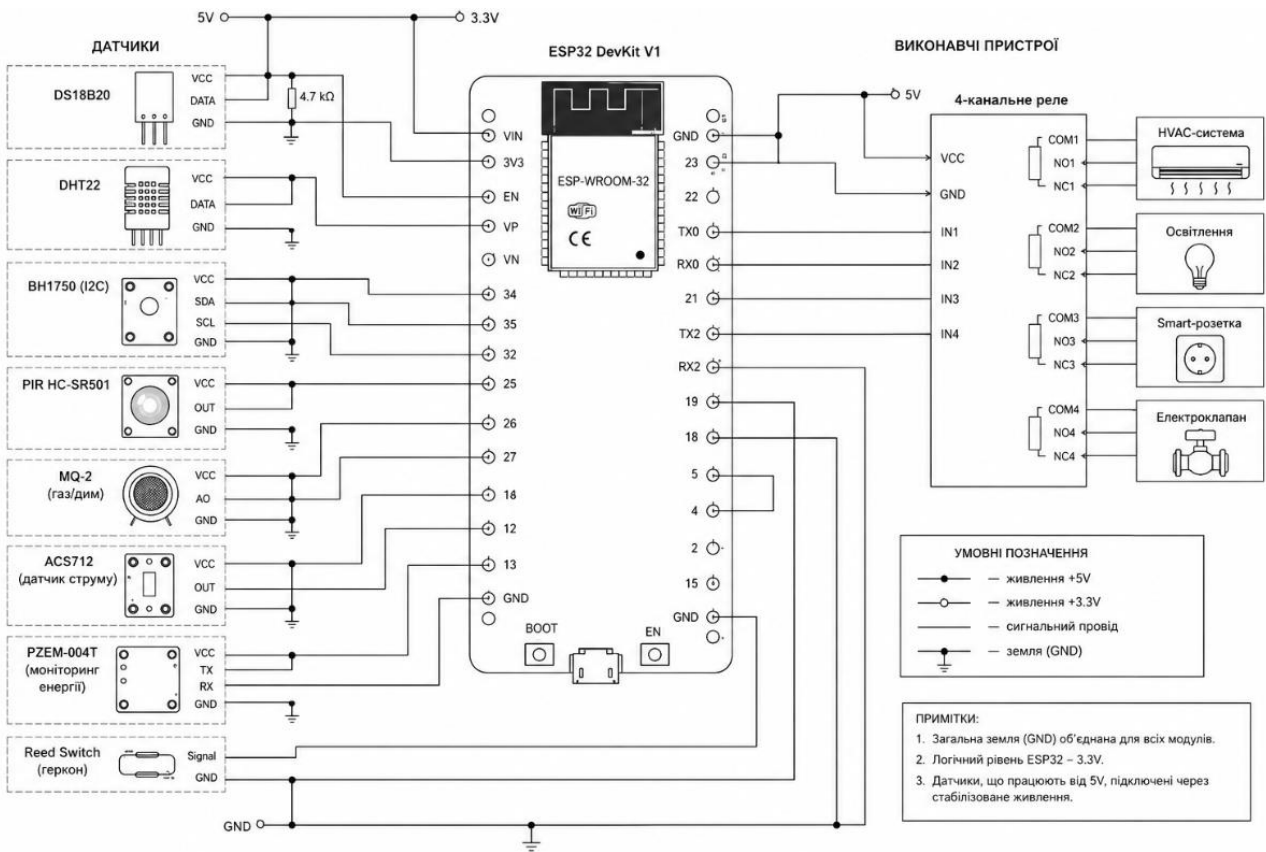


Рисунок Б.1 – Схема фізичного підключення компонентів Smart Home до ESP32

MQTT Topics інформаційного обміну

Таблиця В.1 – Структура MQTT-каналів

MQTT Topic	Призначення
/home/temperature	Дані температури
/home/humidity	Вологість
/home/light	Освітленість
/home/motion	Рух
/home/energy	Енергоспоживання
/home/security	Сигнали безпеки

					ДП.АКІТ.11387848.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Код програмної реалізації ESP32

```

#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <DHT.h>

#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT22

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  dht.begin();
}

void loop() {
  float temp = dht.readTemperature();
  float hum = dht.readHumidity();

  Serial.print("Temp: ");
  Serial.println(temp);

  delay(1000);
}

```

Економічна ефективність впровадження

Таблиця Д.1 – Порівняння енергоспоживання

Режим	Добове споживання
Базовий	15 кВт·год
Smart Home	11.5 кВт·год
Економія	23.3 %