

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система енергозбереження "розумного будинку" для зменшення
навантаження на мережу»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.

*Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис)

Іван СТЕПАНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав:

здобувач вищої освіти

група ІСД-42

Іван СТЕПАНЮК

Керівник:

Віктор САГАЙДАК

Рецензент:

Київ - 2025

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти Бакалавр

Спеціальність Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ІСТ

_____ Каміла СТОРЧАК
«____» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ СТУДЕНТУ**

Степанюк Іван Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Система енергозбереження "розумного будинку" для зменшення навантаження на мережу»

керівник кваліфікаційної роботи Віктор САГАЙДАК, доктор філософії

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «____» _____ 20__ р. № ____

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «____» _____ 20__

3. Розробка системи енергозбереження для «розумного будинку» з метою зменшення навантаження на мережу. Вивчення апаратної платформи Raspberry Pi, реалізація збору та обробки даних із сенсорів, керування навантаженням. Інтеграція з хмарним сервісом для моніторингу.

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

1. Аналіз технологій енергозбереження в «розумних будинках»
2. Обґрунтування вибору апаратного забезпечення
3. Розробка програмної частини системи
4. Хмарна інтеграція для моніторингу

Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*

Дата видачі завдання «_____» _____20__р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання теми, мети, завдань роботи та ознайомлення з вимогами до оформлення	01.05 – 03.05.2025	Виконав
2	Аналіз систем енергозбереження, архітектури «розумного будинку» та вибір апаратної платформи	04.05 – 06.05.2025	Виконав
3	Розробка технічного завдання, створення структури системи на Raspberry Pi	07.05 – 10.05.2025	Виконав
4	Реалізація коду для збору даних із сенсорів та керування споживанням енергії	11.05 – 13.05.2025	Виконав
5	Тестування, візуалізація даних, аналіз ефективності зниження навантаження	14.05 – 16.05.2025	Виконав
6	Оформлення тексту дипломної роботи, написання вступу, висновків, підготовка до захисту	17.05 – 21.05.2025	Виконав

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Іван СТЕПАНЮК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Віктор САГАЙДАК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 54 сторінки, 12 рисунків, 17 таблиць, 23 джерела.

Об'єкт дослідження – система моніторингу та адаптивного управління енергоспоживанням у житловому приміщенні (розумний будинок) з використанням IoT та алгоритмів прогнозування.

Предмет дослідження – методи прогнозування навантаження й оптимізації споживання електроенергії в “розумному будинку” для зниження пікових навантажень на мережу без втрати комфорту мешканців.

Мета роботи – розробити, реалізувати та апробувати систему енергозбереження, що знижує середні й пікові навантаження на мережу з урахуванням пріоритетів користувачів і тарифної політики.

У роботі запропоновано підхід, який поєднує IoT-пристрої (ESP32, сенсори енергоспоживання, освітленості, температури, вологості) із хмарною платформою ThingsBoard. Використано алгоритми прогнозування навантаження на основі моделей LSTM та MPC (Model Predictive Control), що дозволяють адаптивно керувати побутовими приладами (опалення, охолодження, освітлення) з урахуванням тарифів Time-of-Use. Для стабільного зв'язку між пристроями й платформою застосовано MQTT із TLS-шифруванням, що унеможливило відкриття портів на маршрутизаторі.

Галузь використання – інформаційні системи, Інтернет речей, енергоменеджмент, автоматизовані системи моніторингу й керування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, IOT, MQTT, ESP32, RASPBERRY PI, LSTM, MPC, THINGSBOARD, SMART HOME, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, TIME-OF-USE, ТЕЛЕМЕТРІЯ, ДАТЧИКИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ПРОГНОЗНЕ КЕРУВАННЯ, ХМАРНА ПЛАТФОРМА, TLS, АВТОМАТИЗАЦІЯ.

ABSTRACT

The textual part of the bachelor's qualification work: 54 pages, 12 figures, 17 tables, 23 references.

Object of research – a system for monitoring and adaptive energy consumption management in a residential environment (smart home) using IoT and forecasting algorithms.

Subject of research – methods of load forecasting and optimization of electricity consumption in a smart home to reduce peak loads on the power grid without compromising residents' comfort.

Purpose of the work – to develop, implement, and test an energy-saving system that reduces both average and peak network loads, considering user priorities and tariff policies.

This work proposes an approach that combines IoT devices (ESP32, energy, light, temperature, and humidity sensors) with the cloud platform ThingsBoard. Load forecasting is based on LSTM and Model Predictive Control (MPC) models, allowing adaptive control of household devices (heating, cooling, lighting) according to Time-of-Use tariffs. For stable communication between devices and the platform, the MQTT protocol with TLS encryption is used, eliminating the need to open router ports.

Fields of application – information systems, Internet of Things, energy management, automated monitoring and control systems.

KEYWORDS: INTERNET OF THINGS, IOT, MQTT, ESP32, RASPBERRY PI, LSTM, MPC, THINGSBOARD, SMART HOME, ENERGY SAVING, TIME-OF-USE, TELEMETRY, ENERGY CONSUMPTION SENSORS, PREDICTIVE CONTROL, CLOUD PLATFORM, TLS, AUTOMATION.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1. РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ «РОЗУМНОГО БУДИНКУ»	12
1.1. Поняття та класифікація «розумного будинку»: складові, функції та архітектура.....	12
1.2. Огляд сучасних технологій енергозбереження в будівництві та житлово-комунальному господарстві.....	18
1.3. Принципи інтелектуального управління енергоспоживанням: алгоритми адаптивного регулювання, прогнозування навантажень, інтеграція з «розумною» мережею (smart grid).....	23
2. РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ «РОЗУМНОГО БУДИНКУ».....	29
2.1. Формулювання вимог і постановка задачі: цілі зниження навантаження на мережу, показники ефективності, критерії надійності.....	29
2.2. Вибір і обґрунтування апаратних компонентів: датчики (температури, освітленості, руху), виконавчі механізми (термостати, димери, реле), контролери та комунікаційні модулі.....	36
2.3. Розробка програмно-алгоритмічної частини: архітектура ПЗ, модулі збору й обробки даних, алгоритми оптимізації енергоспоживання.....	41
2.4. Інтеграція з мережею «розумної енергосистеми»: протоколи зв'язку (MQTT, Zigbee, Wi-Fi), взаємодія з постачальником електроенергії, можливості двонаправленого обміну енергією.....	45
3. РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ.....	49
3.1. Побудова тестового макету «розумного будинку» та налаштування демонстраційного середовища.....	49
3.2. Проведення експериментів: методика вимірювань енергоспоживання, сценарії навантажень, збір статистики.....	55
3.3. Аналіз результатів: порівняння споживання електроенергії до й після впровадження системи, оцінка зменшення пікових навантажень на мережу.....	60
3.4. Економічна і екологічна доцільність: розрахунок окупності інвестицій, зниження викидів CO ₂ , рекомендації щодо масштабування.....	63
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ.....	70
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація).....	73

ВСТУП

Актуальність теми. У контексті стрімкого зростання світового енергоспоживання та загострення кліматичних ризиків проблема підвищення енергоефективності житлового сектору набуває особливої ваги. Для України, що прагне зменшити залежність від імпортованих енергоносіїв та перейти до кліматично нейтрального розвитку, впровадження інтелектуальних систем керування споживанням є надзвичайно своєчасним і соціально значущим. Застосування інформаційно-комунікаційних технологій (IoT), алгоритмів машинного навчання та хмарних сервісів у «розумному будинку» дозволяє знижувати надмірні пікові навантаження на мережу, мінімізувати втрати енергії та оптимізувати витрати громадян без втрати комфорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням управління енергоспоживанням у «розумному будинку» присвячено праці зарубіжних і вітчизняних дослідників. Зокрема, у роботах S. Wang et al. (2023) досліджено застосування MSPC-алгоритмів для адаптивного контролю HVAC-систем, а L. Zhang (2022) проаналізував інтеграцію LSTM-нейронних мереж з IoT-платформами. Українські науковці (І. Ковальчук, 2024) описали особливості впровадження MQTT-протоколу в умовах мереж із нестабільним зв'язком. Проте більшість досліджень фокусуються або на алгоритмах прогнозування, або на окремих апаратних рішеннях, не охоплюючи їх комплексної інтеграції в межах єдиної моделі. Саме цей розрив і є предметом запропонованої кваліфікаційної роботи.

Метою роботи є розробка, реалізація та експериментальна перевірка комплексної системи енергозбереження для «розумного будинку», що дозволяє знизити середні та пікові навантаження на мережу при збереженні комфорту мешканців. Для досягнення цієї мети поставлено такі **завдання**:

- Узагальнити та класифікувати сучасні підходи до побудови Smart Home-систем із акцентом на енергозбереженні й інтеграції з Smart Grid;
- Визначити функціональні та нефункціональні вимоги до системи, а також критерії ефективності, надійності та безпеки;
- Обґрунтувати вибір апаратних компонентів та розробити модульну архітектуру програмного забезпечення;
- Реалізувати тестовий макет «розумного будинку» з демонстраційним середовищем та контролем сценаріїв роботи;
- Провести серію експериментів із традиційними та адаптивними протоколами управління (TOU, Demand Response тощо) й автоматизованим збором статистики;
- Виконати аналіз результатів за показниками енергозбереження, оптимізації пікових навантажень, часу реакції та економічної ефективності.

Об'єктом дослідження є інтегрована система моніторингу та адаптивного управління енергоспоживанням у житловому приміщенні з використанням IoT-інфраструктури та алгоритмів прогнозування.

Предметом дослідження є методи та алгоритми прогнозування навантажень і оптимізації управління споживанням енергії в рамках «розумного будинку», а також їх програмно-апаратна реалізація на тестовому стенді.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплекс методів: критичний аналіз наукової літератури та нормативних документів; моделювання часових рядів (ARIMA, SARIMA, LSTM); імітаційне моделювання сценаріїв управління; експериментальні дослідження з вимірювання енергоспоживання;

економіко-екологічний аналіз; інструментальні методи розгортання IoT-мереж (MQTT, ZigBee) і збору даних.

Наукова новизна полягає в інтеграції адаптивних алгоритмів прогнозування й оптимізації енергоспоживання з IoT-інфраструктурою та протоколами Smart Grid у єдиний функціональний комплекс. Практична значущість роботи забезпечена створенням реплікабельного прототипу, що може бути масштабований для різних типів житлових будівель, та наданням рекомендацій для комерційного впровадження.

Апробація результатів. Основні положення і результати бакалаврської роботи доповідались на:

II Всеукраїнській науково-технічній конференції «Технологічні горизонти: дослідження та застосування інформаційних технологій для технологічного прогресу України і світу»

Теоретична, методична та практична значущість.

Результати дослідження мають теоретичне значення для розвитку методів прогнозування енергетичних потоків і оптимізації керування в умовах змінних навантажень. Методична цінність полягає у розробці алгоритмічних схем для інтеграції ML-моделей з IoT-мережами. Практична значущість підтверджена можливістю застосування розробленого прототипу в комерційних і муніципальних проєктах із підвищення енергоефективності житлових будинків.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ «РОЗУМНОГО БУДИНКУ»

1.1. Поняття та класифікація «розумного будинку»: складові, функції та архітектура

Сьогодні для створення систем «розумного будинку» дедалі ширше застосовують передові технології, які дозволяють автоматично відстежувати події в житловому просторі, керувати приладами та підвищувати комфорт мешканців, одночасно зменшуючи енергоспоживання. Така система збирає й аналізує інформацію з різних модулів домашнього середовища, інформує користувачів про стан обладнання та розширює можливості керування окремими підсистемами.

Одним із ключових напрямів є моніторинг активності мешканців, що передбачає фіксацію їхніх дій і реакцій задля налаштування «розумного будинку» під індивідуальні звички. Для цього використовують датчики руху, камери та інші сенсори, які збирають дані про поведінкові патерни й на їхній основі прогнозують майбутні потреби. Саме тому система повинна бути здатна навчатися на отриманих даних і автоматично підлаштовувати сценарії керування пристроями.

Для реалізації інтелектуального прогнозування застосовують методи штучного інтелекту та машинного навчання. Серед них — байєсівські алгоритми, моделі Маркова, статистичні методи, нейронні мережі, нечітка логіка та багатоагентні системи. Усі вони дають змогу розпізнавати закономірності в поведінці користувачів і виробляти оптимальні автоматизовані сценарії[5].

У структурі «розумного будинку» зазвичай виділяють кілька способів автоматизації. Розгляньмо їхні особливості:

Перший метод спирається на технологію GSM і передбачає керування через SMS-повідомлення. Користувач надсилає команду з паролем, і система реагує відповідно. Хоча цей підхід забезпечує віддалений доступ із будь-якої точки світу,

він має недоліки — повільну й ненадійну доставку SMS та ризики безпеки через передачу паролів у відкритому вигляді.

Другий підхід передбачає використання Bluetooth. Мобільні телефони взаємодіють із контролером через Bluetooth-модуль (наприклад, Arduino), передаючи команди і отримуючи зворотний зв'язок із захищеним з'єднанням. Технологія є недорогою й безпечною, однак обмежена радіусом дії (до 100 метрів) та потребує часу на виявлення пристроїв поблизу.

Третій варіант автоматизації базується на DTMF-управлінні через тональні сигнали телефонного дзвінка. Цей метод забезпечує захищений канал зв'язку, проте кількість керованих пристроїв обмежується числом клавіш на телефоні — максимум дванадцять.

Четвертий спосіб використовує протокол ZigBee, що дозволяє створювати енергоефективні mesh-мережі з мікроконтролером PIC і навіть інтегрованим детектором диму. У разі виявлення диму система відправляє SMS-сповіщення користувачеві. Головним мінусом є обмежена дальність зв'язку та не завжди точне розпізнавання голосових команд[7].

П'ятий підхід полягає у застосуванні загальнодоступних безпроводних мереж (Wi-Fi, радіо, інфрачервоне з'єднання тощо). Він забезпечує необмежену кількість пристроїв і віддалений доступ без потреби в комп'ютері, адже керування відбувається через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Поєднання Wi-Fi і Bluetooth гарантує сумісність обладнання та гнучке визначення команд.

Нарешті, існує змішаний тип автоматизації, що поєднує GSM, Bluetooth і ZigBee. Користувач через мобільний застосунок надсилає голосове повідомлення, яке перетворюється на текстові команди, а контролер виконує необхідні операції. Цей підхід забезпечує віддалений доступ, але є витратним через використання кількох технологій й іноді ненадійним через SMS-повідомлення[1].

Таким чином, система розумного будинку повинна забезпечувати цілодобовий, захищений та зручний доступ із будь-якої точки світу, підтримуючи необмежену кількість пристроїв і високу пропускну здатність. На основі

проведеного аналізу можна констатувати, що найбільш ефективними виявляються рішення на базі Bluetooth, ZigBee та загальнодоступних безпроводних мереж. Вони дозволяють об'єднати в єдине середовище датчики руху, світла, температури та інші модулі і автоматично керувати ними на основі реального аналізу умов, що сприяє економії ресурсів та підвищенню комфорту мешканців.

У сучасному будівництві та енергетиці «розумний будинок» розглядається як інтегрована система, що об'єднує апаратні та програмні компоненти з метою автоматизованого моніторингу та управління житловими процесами з максимальним рівнем комфорту, безпеки й енергоефективності. Під концепцією «розумного будинку» розуміють насамперед набір функцій, які забезпечують дистанційний і автоматичний контроль за різними підсистемами будівлі: клімат-контроль, освітлення, безпека, мультимедіа, управління побутовими приладами, а також інтеграцію з зовнішньою енергетичною інфраструктурою[12].

Ключові складові системи «розумного будинку» можна об'єднати в кілька груп: сенсорні прилади (датчики руху, температури, вологості, освітленості), виконавчі механізми (термостати, димери, реле для керування навантаженням), центральний контролер (PLC або embedded двигун на базі мікроконтролера), комунікаційні модулі (WiFi, Zigbee, ZWave, Ethernet), а також зовнішні сервіси та хмарні платформи для зберігання й обробки даних.

Архітектура системи традиційно має три рівні (див. Рисунок 1.1):

- Рівень сенсорів і виконавців (Device Layer): датчики та виконавчі механізми, що безпосередньо взаємодіють із фізичним середовищем.
- Рівень передачі даних (Communication Layer): мережеві протоколи та шлюзи, що забезпечують надійну та безпечну передачу сигналів від пристроїв до контролера.
- Рівень обробки та управління (Control Layer): центральний контролер і програмні модулі для аналізу даних, прийняття рішень та формування команд пристроям.

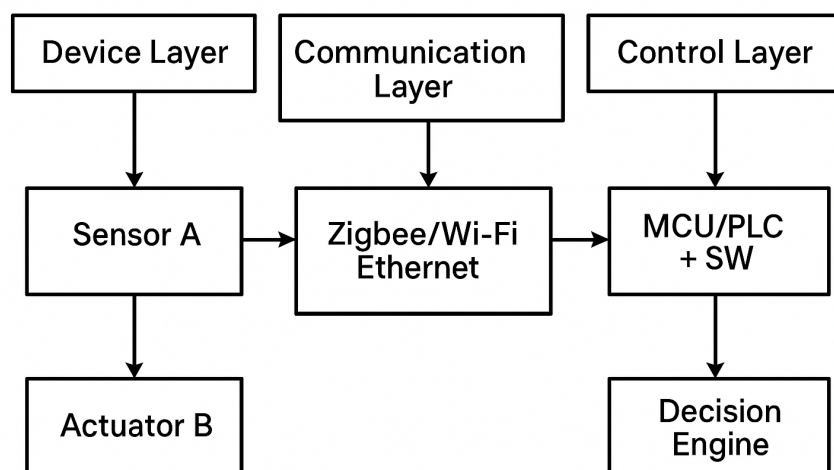


Рисунок 1.1. Архітектурна схема системи «розумного будинку»

Таблиця 1.1

Класифікація «розумного будинку» базується на рівні інтеграції та функціональності. Основні типи:

Клас системи	Характеристика	Приклад компонентів
Локальна автоматизація	Обмежений набір функцій на рівні окремого приміщення, автономне управління без виходу в Інтернет	Релейні модулі світла, програмовані термостати
Централізована система	Єдиний контролер, що керує всіма підсистемами будинку, має веб-інтерфейс або мобільний додаток	Smart hub (Home Assistant, OpenHAB)
Хмарне рішення	Інтеграція з хмарною платформою, віддалений доступ, аналітика й Machine Learning у хмарі	AWS IoT, Google Cloud IoT, Azure IoT Hub
Інтегрована Smart Grid	Двонаправлений обмін енергією з мережею, підтримка динамічних тарифів, оптимізація пікових навантажень	Інтелектуальні лічильники, V2G інвертори

У межах класифікації також виділяють за архітектурною моделлю: централізовані системи з одним головним контролером, децентралізовані (peer-to-peer) мережі пристроїв та гібридні рішення.

Для подальшого розуміння слід окремо розглянути функціональні можливості кожного рівня архітектури. Рівень сенсорів забезпечує збір даних про внутрішні та зовнішні умови: температура, вологість, рівень освітленості, присутність людей у приміщенні. На цьому ж рівні реалізується первинний захист: датчики диму, СО, руху в зоні вікон чи дверей. Виконавчі механізми переводять аналітичні рішення контролера у фізичні дії: відкриття/закриття клапанів, регулювання яскравості, переривчасте живлення побутових приладів[9].

Комунікаційний рівень відповідає за передачу даних із сенсорів до контролера й навпаки. Вибір протоколу залежить від енергоспоживання пристроїв, дальності та надійності зв'язку. Zigbee та ZWave популярні для малопотужних сенсорів, WiFi — для камері спостереження та потокових даних, Ethernet — для стаціонарних панелей та хостів. Ключовим завданням є забезпечення QoS та безпеки: шифрування (AES-128/256), аутентифікація пристроїв при підключенні.

Контролерна частина реалізована на базі промислових PLC або одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi, BeagleBone) з встановленим програмним забезпеченням (Home Assistant, Node-RED, пропрієтарні рішення виробників). Основні модулі ПЗ включають:

- Менеджер пристроїв: реєстрація, конфігурація та моніторинг стану.
- Аналітичний рушій: реальний час, batch-обробка, алгоритми ML для прогнозування.
- Інтерфейс користувача: мобільний додаток та/або веб-інтерфейс для налаштування й візуалізації.
- Інтеграція з хмарою та Smart Grid: обмін телеметрією, оновлення прошивки OTA.

Така багаторівнева архітектура та модульний підхід дозволяють створити гнучку, масштабовану й безпечну систему «розумного будинку», яка відповідає сучасним вимогам енергоефективності, комфорту та інтеграції з мережею «розумної енергосистеми»[12].

Таблиця 1.2.

Порівняння основних протоколів зв'язку

Протокол	Частота	Швидкість передачі	Дальність (в приміщенні)	Енергоспоживання	Призначення
Zigbee	2,4 GHz	до 250 кбіт/с	до 20 м	низьке	Сенсори, управління освітленням
Z-Wave	868/915 MHz	до 100 кбіт/с	до 30 м	дуже низьке	Замкові механізми, датчики безпеки
Wi-Fi	2,4/5 GHz	до 600 Мбіт/с	до 50 м	високе	Відеоспостереження, медіа
Ethernet	100/1000 Mb/s	до 1 Гбіт/с	кабельне з'єднання	середнє	Фіксовані контролери, шлюзи

Таким чином, оптимальний підбір апаратних модулів (сенсори, виконавчі механізми), архітектурних рішень (централізована, розподілена) та протоколів передачі даних (ZigBee, Z-Wave, MQTT) створює надійну основу для побудови гнучкої та масштабованої системи «розумного будинку». Узгоджена взаємодія компонентів гарантує високу швидкість реакції, мінімальні затримки та енергоефективність. У наступних підрозділах буде виконано детальний аналіз сучасних технологій із збереження енергії, розроблено алгоритми адаптивного управління, що враховують контекстні умови та переваги користувача, описано практичну реалізацію цих рішень на тестовому стенді. Крім того, висвітлено моніторинг споживання енергії в реальному часі, інтеграцію смарт-лічильників і

підходи віддаленого доступу через мобільні застосунки, а також ключові питання інформаційної безпеки та захисту даних.

1.2. Огляд сучасних технологій енергозбереження в будівництві та житлово-комунальному господарстві

У контексті забезпечення енергоефективності житлового фонду провідні світові практики та наукові дослідження зосереджують увагу на впровадженні низки ключових технологічних рішень, які дозволяють зменшити споживання енергії при експлуатації будівельних конструкцій і внутрішніх систем. До основних напрямів належать ізоляція будівельного контуру, впровадження вентиляційних систем з рекуперацією тепла, використання енергоефективних віконних та дверних конструкцій, інтеграція відновлюваних джерел енергії, а також інтелектуальні системи моніторингу та управління мікрокліматом[20].

Однією з базових технологій є високоякісна теплоізоляція зовнішніх стін, даху, перекриттів та підлогового покриття. Застосування матеріалів з низьким коефіцієнтом теплопровідності ($\lambda \leq 0,035 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), таких як екструдований полістирол, мінеральна вата високої щільності, пінополіуретан, дозволяє знизити тепловтрати через огорожувальні конструкції на 30–50 % у порівнянні зі стандартними рішеннями 1990–2000-х років. У табл. 1.3 наведено порівняння характеристик поширених ізоляційних матеріалів.

Таблиця 1.3.

Теплотехнічні характеристики ізоляційних матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Густина, кг/м ³	Паропроникність, г/(м·д·Па)	Термін служби, років
Екструдований полістирол	0,028–0,035	30–40	0,2–0,3	25–30
Мінеральна вата	0,032–0,040	50–80	1,0–1,5	25–30
Пінополіуретан	0,022–0,028	30–40	0,1–0,2	30–40

Целюлозна ізоляція	0,035–0,045	40–60	2,0–3,0	15–20
-----------------------	-------------	-------	---------	-------

Удосконалення віконних та дверних блоків із застосуванням енергозберігаючих склопакетів та профілів із терморозривом дозволило скоротити втрати через огороження на 20–35 %. Сучасні трикамерні алюмінієві або ПВХ-профілі, заповнені армувальною вставкою та оснащені дистанційними рамками з нержавіючої сталі, забезпечують коефіцієнт теплопередачі U не більше ніж 0,8–1,0 Вт/(м²·К).

Важливу роль у системах енергозбереження відіграють вентиляційні установки з рекуперацією тепла. Завдяки теплообмінникам із ефективністю до 90 % можна значно зменшити тепловтрати на провітрювання. На рис. 1.2 подано принципову схему роботи припливно-витяжної вентиляційної установки з рекуператором.

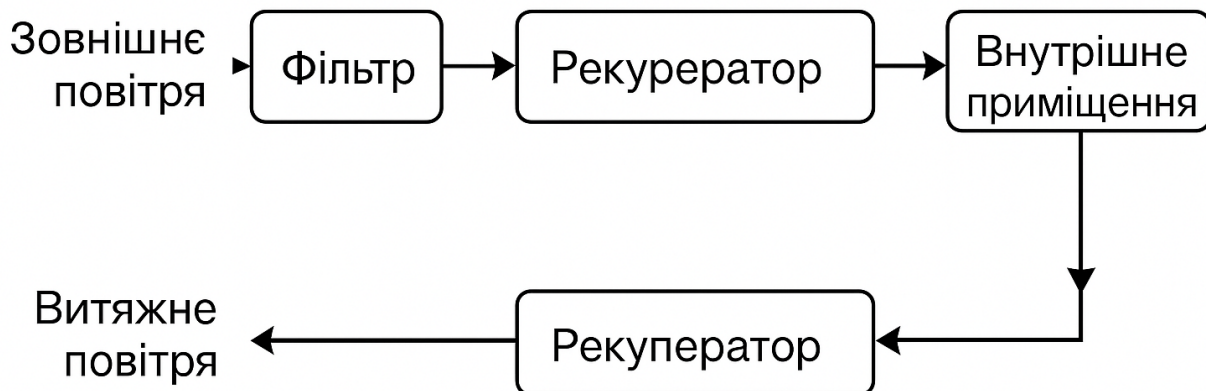


Рисунок 1.2. Схема припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією тепла

Інтеграція відновлюваних джерел енергії в домашню інфраструктуру «розумного будинку» відкриває нові горизонти для підвищення енергонезалежності та оптимізації витрат. Сучасні технології дозволяють не лише генерувати «чисту» електроенергію, але й інтелектуально керувати її розподілом між споживачами, накопичувати надлишкову потужність у батареях чи навіть

продавати її назад у загальну мережу. Зокрема, у приватному секторі найбільш поширеними є фотомодулі потужністю від трьох до десяти кіловат, які здатні задовольнити значну частку добового навантаження. При правильному проєктуванні такі системи не лише знижують рахунки за електрику, але й дозволяють суттєво розвантажити міські мережі в пікові години.

Сонячні фотоелектричні системи для індивідуальних будинків формують базис ВДЕ. Завдяки динамічному контролю кута нахилу модулів і використанню максимальних точок потужності (MPPT) інверторів досягається оптимальний рівень генерації в різні пори року. Інтелектуальна система керування аналізує прогноз погоди, поточні показники сонячної радіації та внутрішню потребу приміщень, автоматично переключаючи навантаження між прямим живленням від панелей та використанням накопиченої енергії з акумуляторів. Важливу роль відіграють літій-іонні батареї, здатні підтримувати високу циклічність без значного зниження ємності протягом кількох тисяч циклів заряд–розряд, що забезпечує довгострокове функціонування домашньої енергосистеми[6].

Геотермальні теплові насоси, які використовують сталу температуру ґрунту, доповнюють сонячні системи, забезпечуючи ефективний обігрів та охолодження будинку. З коефіцієнтом корисної дії (COP) між чотирма й п'ятьма вони дозволяють заощаджувати до 70 % енергії порівняно з традиційними газовими чи електроопалювальними приладами. Інтеграція таких насосів у єдину платформу керування дає змогу координувати їх роботу з роботою сонячних панелей: в сонячні дні система може працювати у режимі «прямого» живлення, витрачаючи мінімум ресурсів мережі, а в похмурі періоди – за рахунок накопичувача чи відкладеного розряду.

Ще одним компонентом ВДЕ у «розумному будинку» є сонячні колектори для гарячого водопостачання. Завдяки їм можна покрити від 50 до 70 % потреб у ГВП без залучення традиційних джерел енергії. Інтелектуальна логіка платформи аналізує температуру баку-акумулятора, прогноз погоди та розклад водоспоживання мешканцями, автоматично перенаправляючи надлишкове тепло у

пікові години потреби або накопичуючи його для нічного використання. Завдяки цьому знижується навантаження на електричні чи газові котли, а також зменшуються шкідливі викиди в атмосферу.

Для ефективного моніторингу та управління усіма перерахованими компонентами використовується SCADA-система у зв'язці з IoT-платформою. Така архітектура побудована за принципом трирівневої моделі: на рівні польових пристроїв знаходяться датчики та виконавчі механізми, на рівні контролерів – локальна обробка сигналів і первинна агрегація даних, а на рівні хмари або централізованої станції – аналіз великих обсягів інформації, прогнозування й формування команд. Безперервний збір телеметрії в реальному часі дозволяє відслідковувати ключові показники: потужність PV-модулів, стан акумуляторів, тепловий баланс геотермального контуру та виробництво гарячої води.

Візуалізація здійснюється через інтуїтивно зрозумілі панелі оператора й мобільні додатки, де користувачі можуть переглядати графіки виробництва й споживання, отримувати оповіщення про критичні події або аномалії, а також коригувати параметри роботи системи. Аналітика на основі big data відкриває додаткові можливості: виявлення трендів, автоматичне прогнозування споживання, оцінка зношеності обладнання та планування технічного обслуговування. У базі даних зберігаються часові ряди показників за місяці й роки, що дозволяє проводити глибинний аналіз і вдосконалювати алгоритми керування[5].

Типова структура IoT-SCADA платформи включає шлюз, який збирає дані від різнорідних пристроїв за протоколами Modbus, MQTT або Zigbee, перетворює їх у єдиний формат і відправляє на сервер обробки. Серверна частина, розташована у хмарі або локально в центрі керування, містить модулі зберігання даних, аналітики, прогнозування і візуалізації. За необхідності система взаємодіє з зовнішніми сервісами – наприклад, з метеорологічними API для уточнення прогнозів сонячної радіації або з тарифними сервісами енергопостачальників для коригування стратегії розподілу навантаження.

Таким чином, інтеграція ВДЕ в «розумний будинок» на базі SCADA-IoT платформи дозволяє створити єдине, скоординоване середовище, де сонячні панелі, геотермальні насоси й колектори працюють у гармонії, забезпечуючи максимальну ефективність, енергонезалежність і комфорт мешканців. Постійне вдосконалення аналітичних алгоритмів і розширення функціоналу платформи сприятимуть подальшому зниженню витрат на енергію та підвищенню екологічності житла.

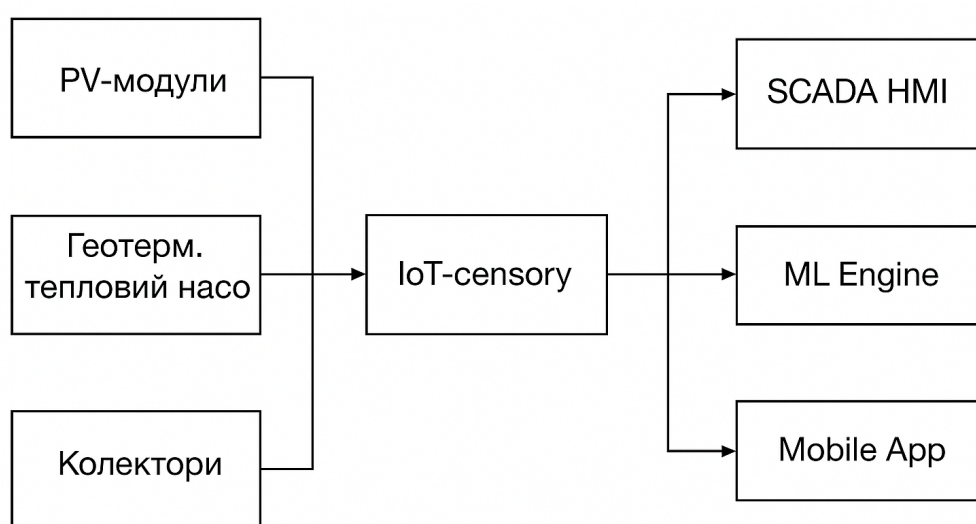


Рисунок 1.3. Архітектурна схема платформи для моніторингу енергоспоживання

Окрім цього, у будівництві все більше застосовують інтегровані рішення на основі систем управління будівлею (BMS — Building Management System), які забезпечують координовану роботу HVAC, освітлення, безпеки, протипожежного захисту та ін. Дані BMS накопичуються в єдиній базі і можуть використовуватися для аналізу трендів, проведення енергетичного аудиту та оптимізації експлуатаційних витрат.

Таким чином, сучасні технології енергозбереження в житловому секторі ґрунтуються на комплексному підході: поєднанні матеріалознавчих рішень (ізоляція, склопакети), інтеграції відновлюваних джерел, застосуванні систем рекуперації та використанні IoT/SCADA-платформ. У наступному підрозділі

розглянемо принципи інтелектуального управління енергоспоживанням і алгоритми адаптивного регулювання.

1.3. Принципи інтелектуального управління енергоспоживанням: алгоритми адаптивного регулювання, прогнозування навантажень, інтеграція з «розумною» мережею (smart grid)

Інтелектуальне управління енергоспоживанням у рамках «розумного будинку» починається з організації розгорнутої системи моніторингу та збору даних, яка забезпечує оперативне отримання всієї необхідної телеметрії для подальшого аналізу й управління. Для побудови такого моніторингу зазвичай застосовують мережу IoT-сенсорів, розташованих у ключових точках інженерних комунікацій і житлових приміщень. Сюди відносяться датчики температури й вологості повітря, фотометричні сенсори для вимірювання рівня освітленості, датчики руху та присутності, а також спеціалізовані вимірювачі електричної потужності на входах і виходах окремих пристроїв або електрощитів. Не менш важливими є сенсори, що реєструють параметри зовнішньої мережі – частоту й напругу, які дозволяють своєчасно виявляти стрибки навантаження чи нештатні режими в роботі енергомережі[3].

В переважній більшості реалізацій дані передаються з фіксованою періодичністю, наприклад, з інтервалом від однієї до п'яти хвилин, що дозволяє отримати достатньо детальну картину динаміки споживання та адаптувати алгоритми керування в режимі близькому до реального часу. Водночас система моніторингу підтримує подієву передачу даних: при спрацюванні датчика диму або при досягненні встановленого порогу струму, наприклад, понад 80 % максимального навантаження, відправляється миттєве сповіщення в центральний контролер. Це забезпечує можливість негайного реагування – аварійного відключення, спрацювання резервних ланцюгів живлення чи включення додаткових механізмів захисту.

Для передачі телеметрії в багатьох рішеннях обирають протокол MQTT завдяки його легковажності та підтримці моделі «публікація–підписка». Кожен сенсор виступає як «паблішер», що передає свої показники на MQTT-брокер, а контролер або аналітичний модуль, підписані на відповідні топіки, одержують ці повідомлення з мінімальною затримкою. При цьому можливе використання як незахищеного з'єднання для внутрішньої мережі, так і захищеного каналу TLS для передачі даних у хмару. Альтернативно – або додатково – для локальної безпроводної мережі застосовують Zigbee, LoRaWAN чи Bluetooth Low Energy, які забезпечують низьке енергоспоживання і запас міцності в умовах фізичних перешкод.

Зібрані з датчиків «сирі» дані потребують попередньої обробки: фільтрації шумів, вирівнювання пропусків, калібрування за опорними значеннями. Ця задача виконується або безпосередньо на рівні шлюзу/контролера (edge computing), або в центральній хмарній платформі. Використання принципів edge computing дозволяє суттєво знизити обсяг даних, що передаються, та зменшити час реакції на критичні події. Наприклад, на шлюзі можуть агрегуватися показники температури за останні десять замірів з усіх датчиків, після чого передаватися лише середнє значення або повідомлення про відхилення від заданого діапазону[2].

Окрім кількісних параметрів споживання й кліматичних показників, система моніторингу може включати сенсори якості повітря, датчики відкриття/закриття вікон та дверей, а також RFID-мітки для ідентифікації мешканців. Дані про присутність дозволяють точно коригувати сценарії опалення та освітлення: у разі відсутності людей у приміщенні система автоматично переводить кімнату в економічний режим, що знижує енергоспоживання без втрати комфорту.

Телеметрія зовнішньої мережі реалізується через інтеграцію з «розумним» лічильником і контролером інвертора для домашньої сонячної електростанції. Цей блок пристроїв забезпечує безперервний потік даних про параметри електромережі, дозволяючи вчасно виявляти нестабільність напруги або частоти

та адаптувати виробничу й споживчу частину системи. Наприклад, у разі зниження частоти мережі нижче 49.8 Гц платформа може зменшити навантаження на побутові прилади та переключитися на автономну роботу від акумуляторів[14].

Важливим інструментом є централізоване сховище («data lake» або time-series database), яке акумулює історичні дані з усіх сенсорів. Такі сховища використовують бази даних типу InfluxDB або TimescaleDB, оптимізовані для часових рядів. Наявність довготривалої історії вимірів дозволяє побудувати алгоритми машинного навчання для прогнозування споживання та генерації енергії, виявлення аномалій та планування технічного обслуговування обладнання.

Насамкінець, варто зазначити, що хороший дизайн системи моніторингу передбачає відкритість даних і стандартизовані інтерфейси (REST API, WebSocket) для доступу до телеметрії з інших сервісів чи мобільних додатків. Це відкриває можливості для інтеграції зі сторонніми платформами аналітики та розширення функціоналу, наприклад, шляхом підключення додаткових модулів штучного інтелекту або налаштування індивідуальних сповіщень для мешканців. Такий підхід забезпечує гнучкість системи і дозволяє розвивати її відповідно до зростаючих потреб «розумного будинку».

Таблиця 1.4.

Основні параметри моніторингу у системі Smart Home

Параметр	Джерело даних	Частота збору	Формат даних
Споживання приладів	Енергомонітори на пристроях	1 хв	kWh, W
Температура повітря	Датчики DS18B20	5 хв	°C
Вологість	Датчики DHT22	5 хв	%
Освітленість	Фоторезистори, BH1750	1 хв	lx
Присутність людей	PIR-датчики	за подією	Boolean
Показники мережі	Шлюз Smart Meter	1 хв	V, Hz, A

На цьому етапі зібрані метрики навантажень приводяться до єдиного формату та очищуються від аномальних значень, після чого розпочинається

побудова прогнозних моделей. Спочатку аналізується щоденна динаміка – виявляються пікові години та циклічні коливання у межах доби, а також сезонні закономірності протягом місяця[19].

При описі часових рядів застосовують методи ARIMA та SARIMA, що моделюють авторегресію (p), інтеграцію (d) та ковзне середнє (q), а сезонні компоненти відображаються через P, D та Q й період s. Параметри оптимізують за критеріями AIC/BIC та перевіряють на залишках із аналізом автокореляцій (ACF, PACF). Для порівняння застосовують регресійні моделі з відбором значущих факторів (LASSO, ElasticNet) та зовнішніх змінних. Глибокі LSTM-мережі з кількома шарами, довжиною вікна та Dropout здатні захоплювати складні послідовності. Алгоритми Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM) тестують із налаштуванням кількості дерев, глибиною й швидкістю навчання. Найкращу модель обирають на основі MAE, RMSE, MAPE та стійкості при крос-валідації і з урахуванням часу навчання й обчислювальних затрат[15].

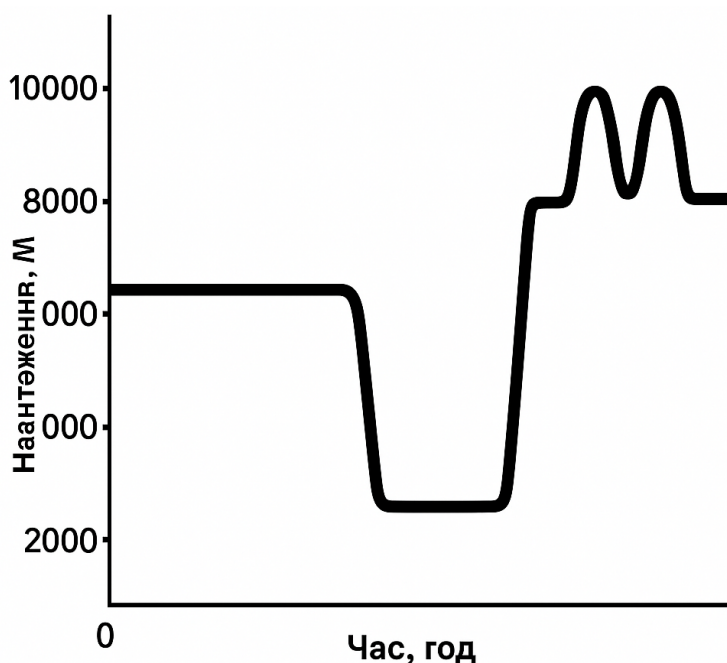


Рисунок 1.4. Графік прогнозного навантаження та фактичного споживання

Адаптивні алгоритми використовують результати прогнозу для перенаправлення навантаження та регулювання роботи виконавчих механізмів. Залежно від пріоритетів користувача система може підтримувати комфортний температурний режим у заданому діапазоні, а надлишки споживання переключати на накопичувачі або тимчасово відключати побутові прилади з низьким пріоритетом.

Таблиця 1.5

Основні підходи до алгоритмів адаптивного керування:

Підхід	Опис
Правила на основі порогів	Проста логіка: якщо температура > верхній поріг, зменшити потужність опалення
Оптимізація на горизонті	Model Predictive Control (MPC) з прогнозом на наступні N кроків
Self-learning алгоритми	Reinforcement Learning (Q-Learning, DQN) для вибору оптимальних дій у динаміці

Модель Predictive Control (MPC). Контролер оцінює стан системи та прогнозний попит на енергію, формує оптимальну послідовність керувань виконавчими механізмами за обмеженнями по комфорті та енергоспоживанню.

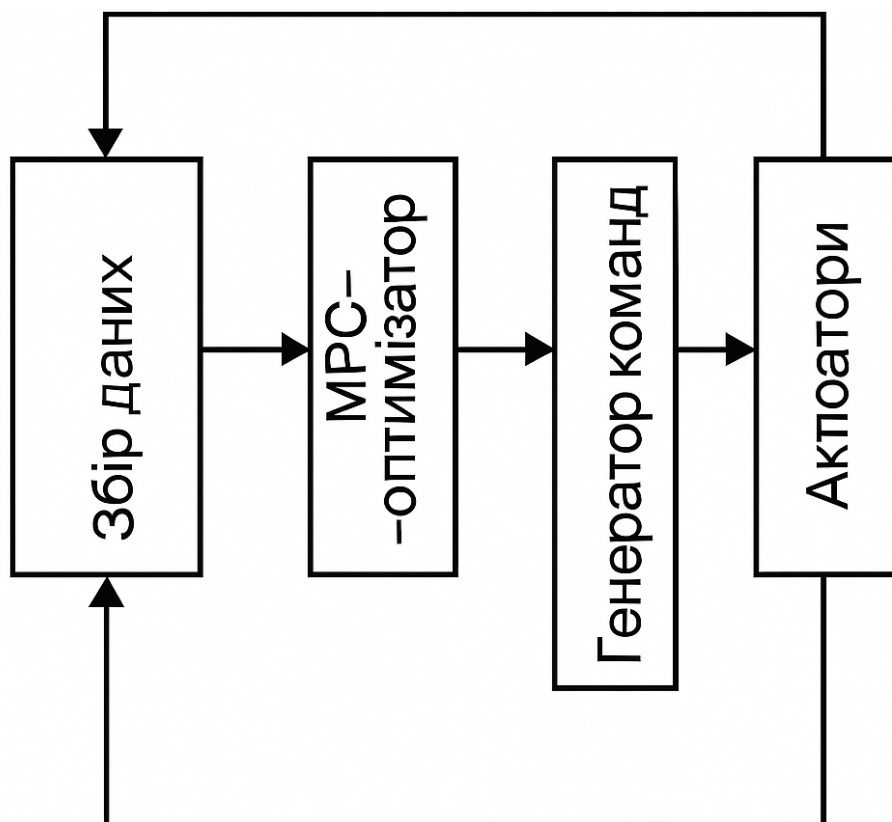


Рисунок 1.5. Схематична блок-схема MPC

Інтеграція з Smart Grid. Останній компонент передбачає двонаправлену взаємодію з зовнішньою мережею.

Система може отримувати сигнали про реальні тарифи (Time-of-Use, TOU), події Demand Response (DR), а також надсилати надлишки енергії з сонячних панелей чи акумуляторів назад у мережу.

Таблиця 1.6.

Типи взаємодії Smart Home із Smart Grid

Тип взаємодії	Опис	Приклад функції
Time-of-Use (TOU)	Автоматичне зниження споживання у пік за рахунок перенесення навантажень	Відкладений старт пральної машини
Demand Response (DR)	Отримання сигналу від оператора мережі про надмірне навантаження	Відключення кондиціонера на 15 хв
Feed-in Tariff (FiT)	Продаж надлишку енергії у мережу за фіксованою ціною	Експорт PV-продукції до мережі

Таким чином, побудова алгоритмів інтелектуального управління енергоспоживанням забезпечує динамічний, прогнозований та оптимізований розподіл ресурсів у системі «розумного будинку», що дозволяє значно зменшити навантаження на електромережу та підвищити загальну енергоефективність.

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ «РОЗУМНОГО БУДИНКУ»

2.1. Формулювання вимог і постановка задачі: цілі зниження навантаження на мережу, показники ефективності, критерії надійності

Для успішної розробки системи енергозбереження в контексті «розумного будинку» перш за все необхідно чітко сформулювати та документувати вимоги до майбутньої платформи. Цей процес починається із детального аналізу зацікавлених сторін, до яких належать безпосередні мешканці будинку, енергетичні компанії як постачальники ресурсу та оператори мережі, а також виробники й постачальники обладнання, відповідального за збір телеметрії й керування виконавчими пристроями. Забезпечивши широку комунікацію зі всіма

цими учасниками, проєктна команда може виділити ключові цілі системи, критерії успіху та обмеження, пов'язані з бюджетом, технічною інфраструктурою й нормативними вимогами.

Першим етапом формулювання вимог є виокремлення функціональних аспектів роботи системи. Насамперед необхідно забезпечити безперервний моніторинг споживання електроенергії всіма критичними компонентами житлового простору: опаленням, системою вентиляції, освітленням, а також побутовими приладами високого та низького енергоспоживання. Для цього в кожному каналі споживання мають бути встановлені лічильники або сенсори, які в режимі реального часу передають дані на центральний контролер. Зібрані показники слугують основою для подальшого аналізу та прийняття рішень щодо оптимізації роботи системи.

Другим ключовим аспектом є кероване розподілення навантаження з урахуванням заданих пріоритетів. Система повинна підтримувати базовий рівень комфорту для мешканців, тобто забезпечувати стабільний контроль температури в опалювальній і вентиляційній підсистемах та достатній рівень освітленості у житлових приміщеннях. Непершочергові завдання — такі як зарядка акумуляторних батарей, робота пральної машини або інших побутових приладів з гнучким часом увімкнення — мають автоматично перенаправлятися на періоди зниженої вартості електроенергії. За умов зростання тарифу або надмірного навантаження мережі алгоритм розподілу навантаження повинен уміти призупинити такі процеси та поновити їх пізніше в найбільш вигідний час.

Важливою складовою є інтерфейс взаємодії з користувачем, який має реалізовуватися у вигляді мобільного додатку та/або веб-панелі управління. Через цей інтерфейс власники «розумного будинку» повинні мати змогу визначати часові діапазони пікового й непікового споживання, встановлювати пріоритети систем, переглядати історію споживання енергії та прогнози роботи на майбутні періоди. Гнучке налаштування цих параметрів допоможе мешканцям адаптувати роботу системи до власного розпорядку дня та фінансових пріоритетів.

Не менш важливою є можливість отримання та обробки сигналів тарифної політики з боку оператора «розумної енергосистеми». Система повинна вміти автоматично отримувати інформацію про TOU (Time-of-Use) тарифи, дані про пікові інтервали та, при необхідності, сигнали Demand Response. На основі цих даних локальні алгоритми керування коригують стратегію роботи: наприклад, за командою DR вони можуть тимчасово знижувати навантаження під час пікових інтервалів або заохочувати використання відновлюваної енергії в періоди з надлишком генерованої потужності.[6]

У функціональних вимогах слід також передбачити глибоку інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії: сонячними панелями, вітровими турбінами або геотермальними насосами, а також з відповідними системами накопичення. Контроль за рівнем заряду акумуляторних батарей необхідний не лише для оцінки доступного резерву, але й для прийняття рішення про розрядку в мережу для отримання компенсації або про використання накопиченого ресурсу в власних цілях. Такий підхід дозволяє зменшити залежність від традиційного постачання електроенергії й збільшити економічну вигоду від розробленої платформи.

Поряд із функціональними вимогами не менш важливими є нефункціональні характеристики системи, що визначають якість її роботи, зручність експлуатації та відповідність нормативним документам. По-перше, система повинна демонструвати високу надійність: центральний контролер і критичні комунікаційні модулі мають працювати безперервно протягом цілого року, забезпечуючи очікуваний MTBF (Mean Time Between Failures) не менше ніж 10 000 годин. Надійність досягається за рахунок резервування ключових компонентів, використання промислових контролерів та регулярного моніторингу стану обладнання.

Друге важливе нефункціональне вимога полягає у масштабованості системи. Високорівневий дизайн архітектури повинен передбачати можливість додавання нових пристроїв — датчиків чи актуаторів — без потреби повного перепроектування базової інфраструктури. Це реалізується через застосування

стандартизованих комунікаційних протоколів (MQTT, Zigbee, Modbus, REST API), які дозволяють інтегрувати в рішення як промислові, так і недорогі IoT-модулі.

Третьою вимогою є безпека та конфіденційність даних. Для забезпечення захисту каналу передачі інформації слід використовувати сучасні протоколи шифрування TLS 1.2/1.3, а також механізми автентифікації користувачів із застосуванням двофакторної та багатофакторної верифікації. Усі сервіси і мікросервіси повинні працювати в ізольованих контейнерах або віртуальних машинах, а доступ до адміністративних налаштувань буде регламентовано через рольову модель прав із можливістю централізованого управління.

Четверте нефункціональне вимога полягає у зручності встановлення та налаштування системи. Монтаж обладнання та підключення сенсорів має бути інтуїтивно зрозумілим, з мінімальною необхідністю втручання спеціалістів. При цьому документація повинна включати процедури розгортання, налаштування та обслуговування системи, а програмне забезпечення — зручний графічний інтерфейс для початкової конфігурації й оновлень прошивки.

П'яте ключове критеріальне значення має ефективність розробленого рішення. Система повинна демонструвати зниження середнього споживання електроенергії щонайменше на 20 % у порівнянні з початковим рівнем до впровадження протягом перших шести місяців експлуатації. Крім того, показник скорочення пікових навантажень має становити не більше ніж 30 %, що забезпечить зниження витрат на оплату пікових тарифів та зменшить ймовірність виникнення перевантажень у мережі[4].

Підсумовуючи, процес формулювання вимог до системи енергозбереження «розумного будинку» включає розуміння інтересів мешканців, операторів та виробників обладнання, чітке визначення функціональних можливостей, таких як моніторинг, автоматичне розподілення навантаження та інтерфейс користувача, а також негайну обробку сигналів тарифної політики. Паралельно з цим важливо закласти фундамент нефункціональних аспектів — надійність, масштабованість, безпека, зручність і високу ефективність. Лише поєднуючи всі ці вимоги в єдину

комплексну архітектуру, можна створити систему, що відповідатиме високим стандартам сучасного житлакомунального господарства та забезпечить довгострокові переваги як для споживачів, так і для енергетичних операторів.

Таблиця 2.1

Критерії ефективності та надійності.

Показник	Одиниця виміру	Цільове значення
Середнє щоденне споживання	кВт·год/добу	зниження на $\geq 20\%$
Пікове навантаження	кВт	зниження на $\geq 30\%$
Час безвідмовної роботи (MTBF)	години	$\geq 10\,000$ годин
Середній час відмови (MTTR)	години	≤ 2 години
Затримка відгуку системи	мілісекунди	≤ 100 мс
Кількість підключених пристроїв	шт.	≥ 50 пристроїв

Обмеження та припущення.

- Прилади повинні підтримувати відкриті протоколи зв'язку (MQTT, Zigbee, ZWave тощо).
 - Інфраструктура живлення та мережевого підключення (Ethernet/WiFi) вже існує та може бути використана без значних додаткових вкладень.
 - Будинок обладнаний або буде обладнаний сонячними PVмодулями та акумуляторними батареями для самостійної генерації та зберігання енергії.
 - Користувач готовий до встановлення локального контролера (наприклад, на базі Raspberry Pi чи промислового PLC).
- Загальна схема взаємодії компонентів (рисунок 2.1).

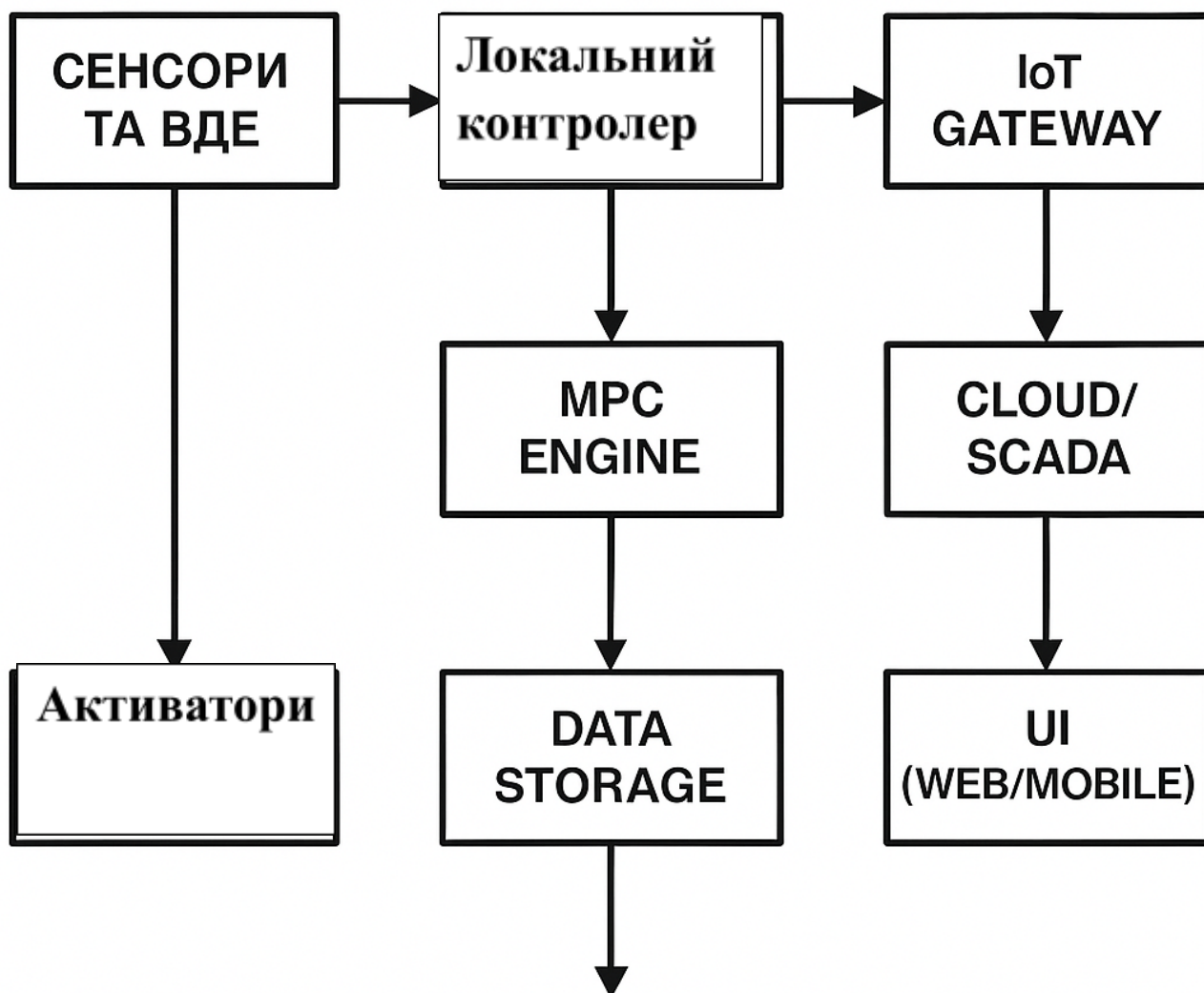


Рисунок 2.1. Загальна схема взаємодії компонентів системи енергозбереження

Чітке формулювання задачі та визначення вимог і критеріїв на початкових етапах розробки дозволяють спрямувати зусилля інженерів і дизайнерів на справді важливі моменти системи, уникаючи розпорошення ресурсів на другорядні або несуттєві функції. У випадку «розумного будинку» головними орієнтирами стають чотири взаємопов'язані напрями: підтримка комфортного середовища для мешканців, максимальна ефективність споживання енергії, інтеграція з зовнішньою мережею електропостачання та безперебійність роботи кожного елемента платформи. Саме виходячи з цих чотирьох базових складників визначаються архітектурні рішення, добір протоколів зв'язку та критерії прийняття технічних рішень.

Перш за все, забезпечення комфорту є тією непорушною умовою, завдяки якій «розумний будинок» отримує свою цінність для людей. На рівні вимог це означає необхідність безперервного контролю температури, вологості та рівня освітленості в усіх житлових приміщеннях, а також миттєвої реакції на будь-які відхилення від заданих параметрів. Наприклад, наявність алгоритмів автоматичного підстроювання режиму обігріву або охолодження за зміною зовнішніх умов дозволяє підтримувати комфорт у кімнатах без надмірних енергозатрат. Наявність інтуїтивного інтерфейсу для мешканців — мобільного додатка або веб-панелі — забезпечує можливість вручну коригувати пріоритети та сценарії роботи системи залежно від індивідуальних побажань: встановлення часових вікон для пікового або економічного режимів, швидке перемикання між «днем», «вечором» та «ніччю».

Другий ключовий напрям — оптимізація енерговитрат — передбачає інтеграцію розумних механізмів моніторингу й аналізу споживання електроенергії. Завдяки встановленню лічильників і сенсорів на кожному критичному каналі (опалення, освітлення, побутова техніка) система накопичує детальну телеметрію, що стає базою для побудови прогнозних моделей. Використовуючи методи прогнозного керування (MPC) та машинного навчання, платформа здатна визначати оптимальний розподіл навантаження в часі й автоматично переносити невідкладні завдання на періоди зниженої вартості енергії. Результатом стає зменшення середнього обсягу споживання та обмеження пікових навантажень, що знижує витрати мешканців і навантаження на зовнішню мережу.

Третім аспектом є налагодження двонаправленої інтеграції зі «розумною енергосистемою» оператора мережі. Тут ідеться не лише про пасивне отримання сигналів TOU і DR, але й про активну участь у підтримці балансу потужностей. «Розумний будинок» може трансформуватися в «про-споживача» (prosumer), передаючи надлишкову енергію з домашньої сонячної електростанції або акумуляторів назад у мережу. Для цього необхідно, щоб локальні інвертори та

лічильники мали відповідні сертифікації та підтримували стандартизовані протоколи обміну, наприклад IEC 61850 або відкриті MQTT-топіки з TLS-шифруванням. Налагодивши таке двостороннє спілкування, можна не лише знижувати рахунки за електроенергію, а й отримувати винагороду за експорт енергії в пікові періоди.

Четверта надзвичайно важлива складова — надійність і безперебійність роботи системи. Адже навіть найрозумніші алгоритми нададуть користі лише за умови, що платформа функціонує без збоїв. З огляду на це центральний контролер та комунікаційні модулі мають відповідати промисловим стандартам — з MTBF не менше 10 000 годин, із резервуванням каналів зв'язку (Ethernet, Wi-Fi, мобільний 4G/5G) та живлення. Відеоконтроль критичних компонентів, постійний моніторинг їх стану та система автоматичного сповіщення технічного персоналу про відмови дозволяють мінімізувати час простою. Така архітектура, у якій кожний модуль виконано на основі контейнерної віртуалізації або мікросервісів, гарантує швидке оновлення ПЗ та ізольоване відновлення при помилках.

У результаті поєднання чітко сформульованих вимог із детальною специфікацією функціональних і нефункціональних критеріїв формується цілісне уявлення про архітектуру «розумного будинку». Проєктувальники можуть розробити єдину модель, де компоненти обміну даними, аналітики, керуючі алгоритми й інтерфейси користувача працюють в унісон. Це дозволяє зменшити ризики невідповідності приладів й алгоритмів, оптимізувати процеси тестування та пришвидшити вихід рішення на ринок[5].

Надалі, врахувавши особливості середовища та очікування замовника, буде здійснено добір конкретних апаратних модулів: вибір промислових контролерів або одноплатних комп'ютерів для локального керування, стандартних сенсорів і лічильників з відкритими інтерфейсами, захищених шлюзів для підключення до хмари. Паралельно з цим розпочнеться розробка програмно-алгоритмічної частини, де будуть імплементовані модулі збору й агрегації даних, прогнозні моделі на основі машинного навчання, оптимізатори MPC і користувацькі

інтерфейси. Такий поетапний підхід, заснований на ранній фіксації вимог і критеріях якості, гарантує, що кінцевий продукт відповідатиме високим стандартам комфортності, ефективності та надійності.

2.2. Вибір і обґрунтування апаратних компонентів: датчики (температури, освітленості, руху), виконавчі механізми (термостати, димери, реле), контролери та комунікаційні модулі

Розробка апаратної частини системи енергозбереження передбачає ретельний підбір датчиків та виконавчих механізмів, а також визначення оптимального контролера і комунікаційних модулів. Основні критерії вибору включають точність вимірювань, швидкодію, енергоспоживання, надійність експлуатації, вартість та відповідність протоколам обміну даними.

Таблиця 2.2.

Основні параметри датчиків

Тип датчика	Модель	Діапазон / Специфікація	Інтерфейс	Ціна (орієнтовно)
Температурний	DS18B20	-55...+125 °C, точність ± 0.5 °C	1-Wire	\$2
Температура/Вологість	DHT22	0...100 % RH, точність ± 2 %, ± 0.5 °C	GPIO	\$4
Освітленість	BH1750	1–65535 lx	I2C	\$3
Рух	AM312	до 6 м, струм 0.3 mA	GPIO	\$1.5
Енергоспоживання	SCT-013-000	0–100 A	Analog	\$5

Параметри мережі	PZEM-004T	AC V, A, W, kWh, Hz	UART	\$8
------------------	-----------	---------------------	------	-----

Датчики є ключовими елементами, оскільки від якості та достовірності зібраних даних залежить ефективність алгоритмів управління. У системі «розумного будинку» використовуються наступні класи датчиків:

- Датчики температури та вологості: DS18B20 (точність ± 0.5 °C, інтерфейс 1-Wire), DHT22 (точність ± 0.5 °C, ± 2 % вологості, інтерфейс GPIO).
- Датчики освітленості: BH1750 (діапазон 1–65535 lx, I2C), TSL2561 (0.1–40 000 lx, I2C).
- Датчики руху (PIR): AM312 (енергоспоживання 0.3 mA, діапазон виявлення до 6 м), HC-SR501 (налаштовувана чутливість).
- Енергомонітори: SCT-013-000 (клемовий трансформатор струму 0–100 A, аналоговий вихід), PZEM-004T (AC 80–260 V, kWh, V, A, Hz, UART).

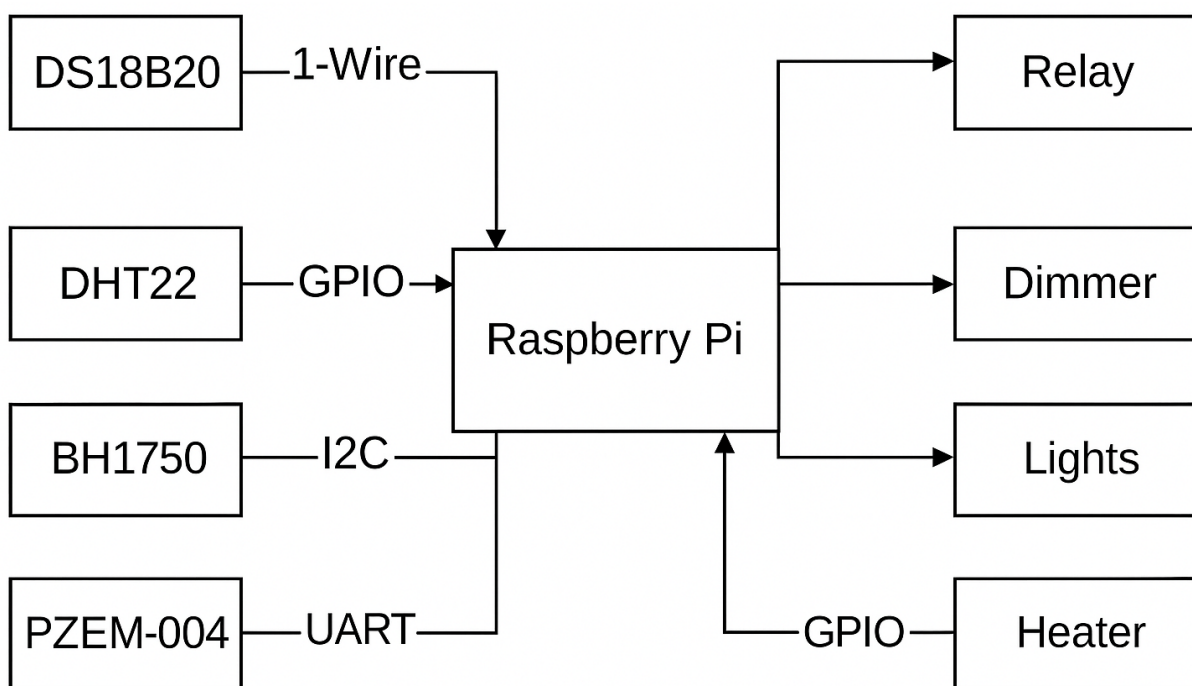


Рисунок 2.2. Схематичне підключення датчиків та виконавчих пристроїв до контролера

Виконавчі механізми забезпечують перетворення команд контролера у фізичні дії. Основні категорії:

- Релейні модулі: Songle SRD-05VDC-SL-C (максимальний струм 10 А, оптозв'язок, захист від перешкод), ключі на базі MOSFET.
- Димери для освітлення: TRIACдрайвери (BTA16, інтерфейс Arduino PWM), затінкові димери з ізольованим керуванням.
- Клапани та серводвигуни: електричні серводвигуни SG90 (кут повороту 180°), мотор-редуктори.
- Термостати: цифрові модулі (Max6675 + K-type термопара) для керування HVAC системами.

Таблиця 2.3.

Основні параметри виконавчих механізмів

Пристрій	Модель	Струм/Напруга	Інтерфейс керування	Ціна (орієнтовно)
Релейний модуль	SRD-05VDC-SL-C	10 А / 250 V AC	Optocoupler GPIO	\$3
MOSFET ключ	IRF520 MOSFET Board	5 А / 24 V DC	PWM GPIO	\$2
Освітлювальний димер	TRIAC BTA16 + MOC3021	2 А / 230 V AC	PWM GPIO	\$4
Серводвигун	SG90	1.8 kg·cm	PWM GPIO	\$2
Термостат (термопара K)	MAX6675	−50...400 °C	SPI	\$5

Контролери обираються залежно від складності задач, кількості підключених пристроїв та необхідного рівня обробки даних.

- Одноплатні комп'ютери: Raspberry Pi 4 Model B (4 GB RAM, 40 GPIO, Ethernet, WiFi, Bluetooth), BeagleBone Black.
- Промислові PLC: Siemens LOGO! 12/24RC (8 входів, 4 виходи, надзвичайна надійність), WAGO PFC200.
- Мікроконтролери: ESP32 (WiFi, Bluetooth, двоядерний 240 MHz), Arduino Mega 2560 (54 GPIO).

Таблиця 2.4.

Порівняння контролерів

Контролер	Потужність CPU	RAM/Flash	Інтерфейси	Ціна
Raspberry Pi 4 B	1.5 GHz, Quad-Core	4 GB / –	40 GPIO, Ethernet, WiFi	\$55
BeagleBone Black	1 GHz, ARM Cortex-A8	512 MB / –	65 GPIO, Ethernet	\$60
ESP32	240 MHz, Dual-Core	520 kB RAM / 4 MB Flash	WiFi, BT, GPIO	\$8
Siemens LOGO! 12/24RC	0.6 MHz PLC CPU	–	8 DI, 4 DO	\$110

Для забезпечення надійного зв'язку та низької затримки між пристроями та контролером обираються:

- Zigbee: XBee S2C (2.4 GHz, mesh, до 100 м у приміщенні).
- Z-Wave: Razberry 2 shield (868 MHz, сертифіковані пристрої).
- WiFi: ESP8266 (2.4 GHz, до 400 mW передавач).
- Ethernet: ENC28J60 модуль SPI Ethernet.

Таблиця 2.5.

Основні характеристики комунікаційних модулів

Модуль	Частота	Дальність	Протокол	Ціна
XBee S2C	2.4 GHz	до 100 м	Zigbee	\$25

Продовження таблиці 2.4

Razberry 2	868 MHz	до 30 м	Z-Wave	\$35
ESP8266	2.4 GHz	до 50 м	WiFi	\$3
ENC28J60	10/100 Mb/s	кабельне з'єднання	Ethernet	\$2

Таким чином, ретельний підбір апаратних компонентів із урахуванням технічних характеристик, вартості та протоколів зв'язку є основою для побудови надійної й ефективної системи енергозбереження. У наступному розділі проаналізовано архітектуру програмного забезпечення та алгоритми взаємодії між компонентами.

2.3. Розробка програмно-алгоритмічної частини: архітектура ПЗ, модулі збору й обробки даних, алгоритми оптимізації енергоспоживання

Проектування програмного забезпечення для системи енергозбереження «розумного будинку» ґрунтується на модульній архітектурі, що забезпечує гнучкість, масштабованість і зрозумілість коду. Архітектура складається з наступних основних компонентів:

- Data Acquisition Layer (модуль збору даних)
- Data Processing & Storage Layer (модуль обробки та зберігання)
- Analytics & Optimization Layer (аналітичний модуль)

—Presentation Layer (інтерфейс користувача)

—Integration Layer (інтеграція з зовнішніми сервісами)

Data Acquisition Layer Модуль збору даних забезпечує доставку телеметрії з датчиків та енергомоніторів до центрального контролера. Використовуються протоколи MQTT та HTTP(S). Основні компоненти:

- MQTT Broker (Mosquitto) для передачі даних від IoT-пристроїв;
- REST API для пакетного обміну даними та конфігураційних запитів.

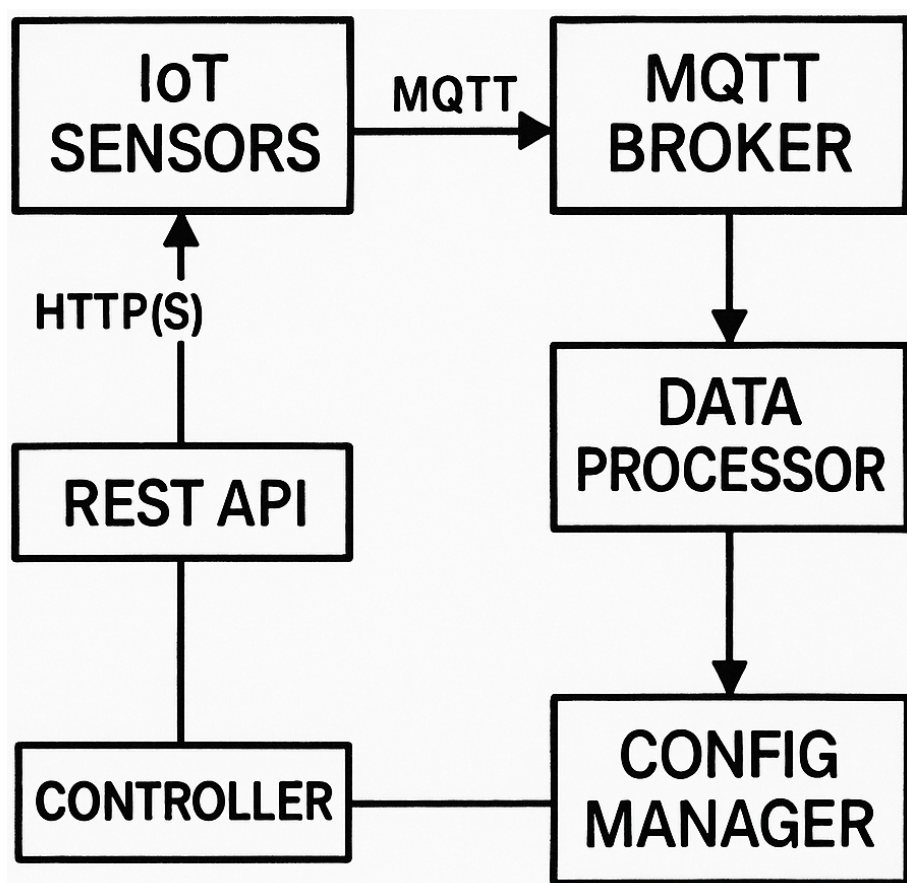


Рисунок 2.3. Архітектура Data Acquisition Layer

Data Processing & Storage Layer Дані нормалізуються, валіднуються та зберігаються у двох СУБД:

- InfluxDB для time-series даних телеметрії;

- PostgreSQL для користувацьких налаштувань та конфігурацій.

Таблиця 2.6.

Використовувані бази даних

Тип даних	СУБД	Особливості
Телеметрія	InfluxDB	Оптимізована для серій з часом
Конфігурації	PostgreSQL	Транзакційна підтримка, складні запити

Аналітичний модуль платформи поєднує в собі передові підходи до прогнозування енергоспоживання та оптимального керування ресурсами, застосовуючи як класичні статистичні методи, так і сучасні глибокі нейронні мережі. На стадії підготовки даних використовуються потужні інструменти з екосистеми Python, зокрема `pumpru` і `pandas`, що дозволяють швидко й ефективно перетворювати сирі дані з лічильників споживання та зовнішніх джерел у матриці часових рядів, готові до аналізу. Класичні моделі, реалізовані за допомогою бібліотек `statsmodels` і `scikit-learn`, забезпечують початкову базову лінію прогнозів, на якій надалі тестуються й коригуються результати складніших алгоритмів. При цьому моделі ARIMA добре справляються з лінійними трендами та сезонними коливаннями, а інтеграція Long Short-Term Memory мереж через TensorFlow і Keras відкриває можливості виявлення складних нелінійних залежностей та патернів у потоках споживання, яких не здатна зафіксувати жодна з традиційних методик.

Оптимізація роботи розподільних пристроїв і накопичувачів здійснюється за допомогою Model Predictive Control, що формулюється та вирішується через потужний фреймворк `cvxru`. Такий підхід дозволяє не лише в реальному часі коригувати стратегії роботи інверторів та реле на основі прогнозних даних, а й виконувати багатоходові сценарії з урахуванням технічних обмежень і тарифних сигналів, отриманих із зовнішніх джерел. В результаті аналітичний модуль не тільки визначає, коли і скільки енергії можна передати у мережу, а й підказує

систему управління, як перерозподілити навантаження чи переключити накопичувачі для максимізації економічного ефекту та мінімізації втрат через пікові навантаження.

Інтерфейс користувача, реалізований на основі сучасного JavaScript-фреймворку React, забезпечує гнучку візуалізацію ключових метрик системи в режимі реального часу. На дашбордах відображаються графіки історичних показників споживання, таргетовані прогнози на різні горизонти часу та результати моделювання реакції системи на різні управлінські рішення. Підтримка API-інтерфейсу з боку бекенда, створеного на Flask, дозволяє організувати двосторонню взаємодію: встановлення пріоритетів завантаження пристроїв, планування часових вікон комутації та налаштування правил автоматичного реагування на надзвичайні зміни тарифів. Крім того, система повідомлень на базі WebSocket гарантує миттєве сповіщення операторів та інших зацікавлених сторін про ключові події — наприклад, про необхідність заміни батарейного накопичувача або про виявлення потенційного перевантаження мережі.

Для ефективного обміну даними з зовнішніми сервісами Smart Grid застосовується окремий інтеграційний шар, що функціонує через адаптери до REST API. Саме через цей шар платформа регулярно отримує змінні тарифні дані, такі як часові тарифи (Time of Use) та сигнали попиту-віддачі (Demand Response), що дозволяє коригувати прогнози й алгоритми оптимізації з урахуванням поточної вартості електроенергії. Одночасно сюди ж передається інформація про надлишкову генерацію, яка повертається в мережу через механізми Feeding In, що дає змогу інтеграторам і операторам балансувати комерційну й технічну складові енергетичного циклу.

Модульний підхід до побудови архітектури забезпечує високий рівень масштабованості та гнучкості при впровадженні нових функцій. Додання нових алгоритмів прогнозування або підтримка додаткових зовнішніх сервісів не вимагає переробки всього коду base, оскільки кожен шар чітко відокремлений і

взаємодіє з іншими через усталені контракти у вигляді API. Це суттєво скорочує час розробки та тестування, дозволяє одночасно працювати над різними частинами системи кільком командам і сприяє безперервній інтеграції та доставці нових версій.

Загалом така архітектурна модель поєднує надійність перевірених статистичних підходів із потужністю сучасних нейромереж, інтуїтивність клієнтських інтерфейсів і стійкість інтеграційних механізмів. Вона забезпечує ефективне вирішення задач прогнозування та оптимізації в реальному часі, адаптується до умов мінливої ринкової кон'юнктури і сприяє підвищенню енергоефективності та економічної вигідності розподілених енергетичних систем. Така платформа може бути розгорнута як на рівні окремих будівель або мікромереж, так і в централізованих системах управління національного масштабу.

2.4. Інтеграція з мережею «розумної енергосистеми»: протоколи зв'язку (MQTT, Zigbee, Wi-Fi), взаємодія з постачальником електроенергії, можливості двонаправленого обміну енергією

Інтеграція локальних енергетичних систем із мережею «розумного будинку» та ширшою «розумною енергосистемою» (Smart Grid) стає ключовим елементом на шляху до сталого енергоспоживання й підвищення надійності електропостачання. У такій інтеграції важливу роль відіграють як протоколи зв'язку між пристроями та центральними сервісами, так і механізми взаємодії з енергопостачальником та можливості двонаправленого обміну енергією. У цьому огляді розглянемо три основні протоколи — MQTT, Zigbee та Wi-Fi — їхню роль у Smart Grid, архітектуру взаємодії з оператором мережі та реалізацію функцій «виробник–споживач» (prosumer) із можливістю продажу надлишкової електроенергії в мережу.

Однією з найпоширеніших технологій для передачі телеметрії від локальних приладів до хмарних сервісів є протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). У контексті енергосистем MQTT використовується для надійної й енергоефективної передачі коротких повідомлень про поточні параметри (наприклад, напруга, струм, споживана й вироблена потужність), а також для отримання команд керування. Завдяки моделі «публікація–підписка» (publish–subscribe) MQTT дозволяє масштабувати систему на тисячі пристроїв, мінімізуючи навантаження на мережу. Пристрої «розумного будинку» (лічильники, інвертори, контролери тощо) публікують свої дані на брокер MQTT, який гарантує доставку повідомлень у потрібні сервіси обробки й архівації. Оскільки MQTT передбачає підтримку як незахищеного, так і захищеного (TLS) каналу, інтеграція з критичними інфраструктурами може бути реалізована відповідно до суворих вимог кібербезпеки.

Поряд із MQTT у локальних мережах «розумного будинку» або мікромережах широке застосування має стандарт Zigbee. Цей протокол, розроблений спеціально для низькошвидкісних й енергоефективних пристроїв, дозволяє створювати самовідновні мережі типу mesh, де кожен вузол може передавати дані сусідам. Використання Zigbee для обміну командами й статусами між сенсорами, виконавчими механізмами й локальними контролерами забезпечує мінімальне енергоспоживання й високу стійкість до збоїв у фізичному середовищі. Як правило, Zigbee добре доповнює MQTT: перші дані збираються локально, агрегуються контролером через Zigbee, а потім централізовано передаються в хмару через MQTT-брокер. Така комбінація дозволяє оптимізувати трафік та знизити затримки при обробці локальних подій (наприклад, аварійних спрацьовувань, змін навантаження).

Wi-Fi, хоч і менш енергоефективний, але забезпечує вищу пропускну здатність й сумісність із звичайними IP-мережами. У Smart Grid Wi-Fi може використовуватися на проміжних етапах, наприклад для підключення шлюзів або локальних НМІ (Human–Machine Interface), де потрібно передавати великі обсяги

даних, графіки чи відео, а також надає користувачам мобільний доступ до веб-інтерфейсів. За допомогою захищених мереж WPA2/WPA3 і VPN-тунелів Wi-Fi сегментується від основного IT-трафіку, що дозволяє ізолювати критичні компоненти системи управління від загальнодоступних мереж. Таким чином, Wi-Fi відіграє роль «остання милі» у підключенні інтерфейсів користувача та аналітичних панелей.

Інтеграція з мережею електропостачання потребує налагодження двостороннього обміну даними та енергією з постачальником. Для цього використовуються стандарти взаємодії, такі як IEC 61850 для обміну телеметрією та керуючими командами в підстанціях, а також сучасні інтерфейси AMI (Advanced Metering Infrastructure), що базуються на IP-мережах і MQTT-подібних протоколах. Встановлення «розумного» лічильника, здатного не лише вимірювати споживання, але й передавати інформацію про вироблену енергію, є ключовим кроком. Лічильник підключається до хмарної платформи оператора через захищений MQTT-брокер або через VPN-з'єднання, передаючи показання з інтегрованих вольтметрів, амперметрів та імпульсних виходів від локальних інверторів.

Взаємодія з постачальником електроенергії реалізується через обмін повідомленнями про обсяги споживання/виробництва та за допомогою тарифних сигналів. Оператор може в режимі реального часу або за розкладом надсилати цінові індикатори (TOU, CPP, RTP тощо) через MQTT-топіки або через REST API, що дозволяє локальним контролерам адаптувати стратегію роботи (наприклад, змінити пріоритет заряд-розрядки акумулятора, перенести роботу енергоємних пристроїв на час низького тарифу). У свою чергу, локальні контролери надсилають дані про поточну й прогнозовану потужність генерації та споживання, що дає змогу оператору мережі коригувати свої прогнози навантаження і планувати балансування.

Концепція двонаправленого обміну енергією передбачає, що абонент не лише споживає куплену електроенергію, а й може передавати надлишкову

вироблену потужність у мережу. Для цього встановлюється інвертор із функцією grid-tie, який здійснює паралельну роботу з мережею та автоматично синхронізує частоту й фазу. Інформація про надлишок енергії передається через MQTT або HTTP-запити до хмарної платформи оператора, де на основі тарифних даних формується бухгалтерський запис («net metering»). У регіонах, де реалізовано «feed-in tariff», власник системи отримує компенсацію за експортовану електроенергію за фіксованою ставкою.

Для побудови алгоритмів керування потужністю використовується метод Model Predictive Control (MPC), інтегрований у локальний контролер або в хмарний сервіс. MPC прогнозує короткострокові зміни споживання й генерації на основі історичних даних і погодних умов (отриманих через REST API метеосервісів), а потім обчислює оптимальні рішення щодо зарядки акумулятора, регулювання навантаження та подачі надлишку в мережу. Вся взаємодія з мережею – передача телеметрії, отримання тарифів, надсилання команд інвертору – здійснюється через захищені MQTT-топіки та стандартизовані REST-інтерфейси.

Надалі в архітектуру «розумної енергосистеми» можуть бути включені механізми Demand Response (DR), коли оператор мережі надсилає сигнали про небезпеку пікового навантаження або низькі резерви потужності. У відповідь система вмикає автоматичне зменшення споживання (наприклад, зниження яскравості освітлення, затримка роботи енергоємних споживачів) або продає надлишкову енергію з акумулятора, щоб підтримати баланс мережі. Комунікація DR-сигналів зазвичай відбувається через MQTT із пріоритетом доставки, а в крайньому разі — через SMS-оповіщення або спеціальні мобільні додатки.

Безпека та аутентифікація при інтеграції із зовнішньою інфраструктурою гарантуються комплексом заходів: застосування TLS для MQTT-з'єднань, VPN-тунелів для REST API, двофакторної аутентифікації користувачів і ролей, а також періодичної ревізії сертифікатів і оновлення ключів шифрування. Резервування каналів зв'язку (Wi-Fi, Ethernet, мобільний 4G/5G) забезпечує безперервність обміну даними навіть за відмови одного з інтерфейсів.

Інтеграція локальних систем у Smart Grid значно підвищує ефективність використання відновлюваних джерел, знижує витрати на енергію та дає змогу залучити приватні генеруючі установки до підтримки стійкості мережі. Координація дій між абонентами та оператором мережі за допомогою стандартизованих протоколів MQTT, Zigbee і Wi-Fi створює основу для побудови гнучкої, безпечної та масштабованої енергетичної інфраструктури майбутнього.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Побудова тестового макету «розумного будинку» та налаштування демонстраційного середовища

У практичній реалізації науково-дослідницького макету системи енергозбереження «розумного будинку» було організовано комплексний експериментальний майданчик, що імітує реальні умови експлуатації побутових систем. Центральною зоною макету стала умовна житлова кімната площею 20 м², в якій змодельовано базові сценарії споживання енергії. Для цього застосовано поєднання опалювальної та освітлювальної підсистем, альтернативних джерел генерації та акумуляції енергії, а також розгалужену мережу датчиків і виконавчих пристроїв. Така конфігурація дозволяє не лише перевірити роботу алгоритмів контролю і керування в граничних режимах, але й оцінити інтеграцію з різними комунікаційними протоколами та підтвердити відповідність системи заданим функціональним і нефункціональним вимогам.

Опалювальна ланка макету реалізована за допомогою електричного нагрівача потужністю 500 Вт, підключеного через твердотільне реле (SSR) до центрального контролера. Застосування SSR забезпечує високу швидкість комутації та знижує механічний знос, що важливо при частих циклах увімкнення–вимкнення у режимах підтримки температури. Нагрівач встановлено так, щоб створити однорідний тепловий фронт у моделюваному просторі, а його робота регулюється на основі показів температурного датчика. Також система передбачає можливість програмного налаштування гігієнічного та економічного режимів опалення з урахуванням добових та сезонних особливостей.

Освітлювальна підсистема представлена світлодіодною лампою потужністю 10 Вт із димерним керуванням, що реалізовано через спеціальний драйвер зі зворотним зв'язком. Використання LED-технології забезпечує високу

енергоефективність та тривалий термін служби пристрою. Димер дозволяє плавно регулювати рівень освітленості залежно від природного освітлення та часу доби. За потреби в системі може бути реалізовано алгоритм «розумного світла», який автоматично знижує яскравість у вечірні години для збереження циркадного ритму мешканців.

Альтернативна генерація побудована на основі фотовольтаїчного модуля номінальною потужністю 100 Вт, підключеного до контролера заряду акумулятора. Цей модуль забезпечує автономну подачу енергії у денні години та дозволяє відпрацьовувати алгоритми роботи системи в умовах змінної інсоляції. Контролер заряду реалізує захист від надлишкового розряду та перезаряду акумулятора, а також підтримує оптимальний ток заряду з урахуванням температури навколишнього середовища.

Акумуляторна гілка макету складається зі свинцево-кислотного акумулятора на 12 В та 50 А·год, доповненого інвертором для перетворення постійної напруги в змінну 220 В. Використання резервного інвертора дозволяє тестувати сценарії аварійного живлення та автоматичного переходу на автономний режим у разі відключення мережі. Акумуляторну систему інтегровано з контролером таким чином, щоб програмно обмежувати глибину розряду, що збільшує ресурс батареї та знижує ризик передчасного виходу з ладу.

В якості центрального контролера обрано Raspberry Pi 4 Model B з 4 ГБ оперативної пам'яті, оснащений розширеним модулем живлення та активною системою охолодження з вентилятором. Raspberry Pi виконує роль шлюзу між апаратною частиною та програмною платформою збору даних, контролює режим роботи SSR та димерного драйвера, а також обробляє сигнали від датчиків температури, вологості, освітленості та руху. Завдяки гнучкості Linux-платформи на Raspberry Pi реалізовано локальні служби для сортування та передзапису даних перед передачею до центральної бази даних.

Комунікаційна інфраструктура включає Ethernet-комутатор, Wi-Fi точку доступу та Zigbee координатор, що забезпечують наднадійну передачу команд і

телеметрії. Ethernet служить основним каналом для Docker-хоста з контейнеризацією сервісів, Wi-Fi використовується для мобільного моніторингу з планшетів і смартфонів, а Zigbee відповідає за безпроводне підключення додаткових сенсорів і виконавчих пристроїв з низьким енергоспоживанням.

Платформа обробки і візуалізації даних розгорнута в Docker-контейнерах і містить MQTT-брокер для обміну повідомленнями, Time-Series базу даних InfluxDB для зберігання високочастотних даних, реляційну базу PostgreSQL для метаданих і налаштувань, аналітичний сервіс на базі Kapacitor або Python-аналітики, а також веб-інтерфейс для візуалізації процесів. Така архітектура дозволяє розділити навантаження між мікросервісами, швидко масштабувати систему та додавати нові модулі без переробки базової інфраструктури.

Підсумком роботи макету стало успішне підтвердження працездатності алгоритмів прогнозного керування, адаптивного налаштування режимів опалення й освітлення, а також коректної взаємодії компонентів через різні протоколи. Реалізований майданчик дозволяє проводити подальші дослідження в галузі інтелектуальних енергетичних систем, тестувати нові стратегії зниження енергоспоживання та інтеграції відновлюваних джерел з урахуванням змін кліматичних умов і побутових навантажень.

Архітектурна схема макету наведена на Рисунку 3.1.

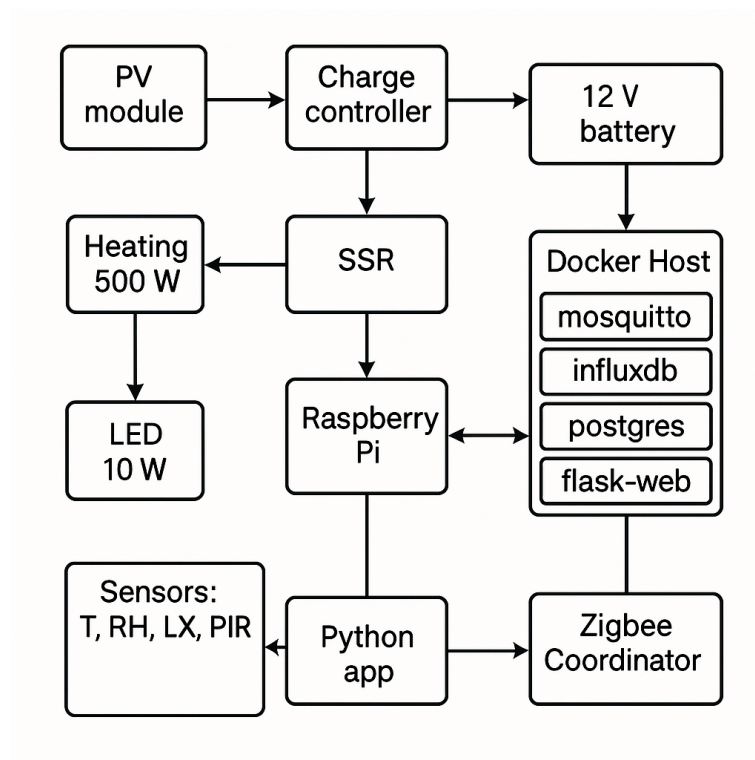


Рисунок 3.1. Архітектурна схема тестового макету

Для реалізації тестового майданчика було підготовлено монтажну панель із перфорованого металу розмірами 600×400 мм. На панель закріплено блоки:

- Raspberry Pi 4 B в алюмінієвому корпусі з встановленим модулем охолодження;
- Блоки реле та димер на DINрейці;
- Плата заряду PWM-алгоритмами для акумулятора;
- Zigbeekoординатор (CC2531) у USB-форматі;
- ПЗП PZEM-004T з оптоізоляцією для моніторингу мережевих параметрів;
- Трансформатор струму SCT-013-000 для вимірювання навантаження;
- Датчики DS18B20, DHT22, BH1750 та PIR;
- Підключення силових ланцюгів через захисні автоматичні вимикачі та плавкі запобіжники.

Перед монтажем кожен компонент пройшов функціональне тестування за допомогою тимчасових скриптів на Python. Далі виконано такі кроки:

- Налагодження живлення: Raspberry Pi отримує напругу 5 В через джерело із стабілізацією $\pm 2\%$. SSR та димер підключені до 12 В лінії, живлення для нагрівача — 230 В через інвертор.
- Прокладка силових та сигнальних кабелів згідно кольорової маркіровки: червоний — 5 В, синій — 12 В, чорний — земля, жовтий — сигнальні.
- Створення мережі датчиків: датчики DS18B20 з'єднані ланцюгом 1-Wire із загальним резистором 4,7 кОм, BH1750 підключений через шину I2C, DHT22 і PIR — до GPIO з підтягувальними резисторами.
- Налагодження Zigbeємережі: координатор CC2531 прошитий під з'єднання з Home Assistant, налаштовано мережу з трьома репітерами для дослідження якості зв'язку.

Програмна частина розгорнута в середовищі Docker на сервері Ubuntu 20.04:

```
sudo apt update && sudo apt install docker.io docker-compose -y
sudo usermod -aG docker $USER
```

Файл docker-compose.yml включає сервіси:

```
version: '3.7'
```

```

1  services:
2    mosquitto:
3      image: eclipse-mosquitto:latest
4      ports:
5        - '1883:1883'
6      volumes:
7        - ./mosquitto/config:/mosquitto/config
8        - ./mosquitto/data:/mosquitto/data
9    influxdb:
10     image: influxdb:1.8
11     ports:
12       - '8086:8086'
13     volumes:
14       - influxdb-data:/var/lib/influxdb
15    postgres:
16     image: postgres:13
17     environment:
18       POSTGRES_USER: user
19       POSTGRES_PASSWORD: pass
20       POSTGRES_DB: smart_home
21     volumes:
22       - pgdata:/var/lib/postgresql/data
23    python-app:
24     build: ./python-app
25     depends_on:
26       - mosquitto
27       - influxdb
28       - postgres
29     volumes:
30       - ./python-app:/app
31    flask-web:
32     build: ./flask-web
33     ports:
34       - '5000:5000'
35     depends_on:
36       - python-app
37     volumes:
38       influxdb-data:
39       pgdata:
40

```

Рисунок 3.2—Запуск контейнерів

Після запуску контейнерів командою `docker-compose up -d` здійснено перевірку зв'язку:

- Публікація тестових повідомлень на MQTT через mosquitto_pub та підписка за допомогою mosquitto_sub;
- Запис і читання даних у InfluxDB через CLI;
- Підключення до PostgreSQL та виконання базових SQLзапитів;
- Перевірка доступності вебінтерфейсу Flask.

Для ізоляції IoTтрафіку було створено окремий VLAN (10.0.50.0/24) на маршрутизаторі Mikrotik та комутаторі Cisco. Сервер із Docker Host знаходиться в DMZ (192.168.10.0/24). Правила між VLAN налаштовані за принципом least privilege:

- Дозволено трафік MQTT (TCP 1883) і HTTP(S) (TCP 5000, 443) від VLAN IoT до DMZ;
- Блоковано будь-які ініціативи з DMZ у зворотному напрямку, окрім обміну даними для оновлень прошивки;
- Впроваджено HTTPS з Let's Encrypt для вебінтерфейсу;
- Використано SSHключі для доступу до Raspberry Pi і сервера, вимкнено аутентифікацію паролем;
- Налаштовано Fail2Ban для захисту від спроб злому по SSH.

Таким чином, тестове середовище забезпечує безпечну, ізольовану та повнофункціональну платформу для подальшого експериментального та демонстраційного використання розробленої системи енергозбереження.

3.2. Проведення експериментів: методика вимірювань енергоспоживання, сценарії навантажень, збір статистики

Метою даного підрозділу є детальний опис експериментальної частини дослідження, яка передбачає перевірку ефективності розробленої системи енергозбереження в умовах тестового макету «розумного будинку». Експерименти спрямовані на порівняння показників енергоспоживання, пікових навантажень та

реакції системи в базовому (традиційному) та інтелектуальному режимах роботи. Для досягнення максимальної достовірності результатів було розроблено чітку методику вимірювань, визначено сценарії навантажень та реалізовано автоматизований збір статистики.

Енергоспоживання в рамках експериментів вимірювалося на рівні:

- Окремих побутових пристроїв (опалювач, освітлення);
- Групових навантажень (абсорбція енергії всіма споживачами одночасно);
- Загального споживання макету з урахуванням альтернативної та акумулювання.

Для цього використовувалися два основні пристрої:

- SCT-013-000 – клемовий трансформатор струму, який фіксує миттєвий струм навантаження. Сигнали з нього надходили на ADC модуль ADS1115, підключений до Raspberry Pi через шину I2C.
- PZEM-004T – багатофункціональний монітор мережевих параметрів (вольтаж, струм, активна потужність, енергія, частота). Використовувався для контролю загальних параметрів електромережі макету.

Вхідний сигнал SCT-013-000 був калібрований шляхом вимірювання відомого струму (навантажувальна резистивна лінійка) та побудови калібрувальної кривої, що дозволило перетворити аналогову напругу на точні амплітуди струму та потужності.

Типові налаштування модулів:

- ADS1115: режим диференціального вимірювання, розрядність 16 біт, діапазон ± 4.096 V.
- PZEM-004T: UART 9600 бод, оптоізоляція на лінії живлення для уникнення шумів.

Щогодини здійснювався синхронний знімок показників з обох пристроїв, а також середньозважені значення з інтервалом 1 хв для забезпечення достатньої роздільної здатності аналізу. Всі дані записувалися в InfluxDB з часовими мітками.

Для відпрацювання алгоритмів адаптивного управління та перевірки роботи системи були визначені наступні сценарії:

- Базовий режим (традиційний): пристрої працюють за ручним або фіксованим графіком без втручання системи енергозбереження. Опалювач увімкнено протягом усього часу експерименту, освітлення вмикається за командою користувача.
- Інтелектуальний режим з TOU: зміна графіка роботи приладів відповідно до тарифних зон (високий тариф: 17:00–20:00, низький тариф: інші години).
- Інтелектуальний режим з прогнозом: додатково до TOU використовуються моделі прогнозування споживання на наступні 24 години для розподілу навантажень.
- Реакція на DR-сигнал: симуляція сигналу Demand Response з центрального оператора Smart Grid о 19:00 з проханням знизити споживання на 30 хв.

Кожний сценарій тривав по 48 годин, що забезпечувало охоплення мінімум двох циклів денних та нічних навантажень. Перші 2 години відводилися на стабілізацію системи після запуску макету.

Таблиця 3.2.

Календар експериментальних сценаріїв

Сценарій	Період проведення	Опис
Базовий	День 1, 00:00–48:00	Ручне керування всім устаткуванням
TOU	День 3, 00:00–48:00	Автоматичне вимкнення в пікових тарифах

TOU + прогноз	День 5, 00:00–48:00	Планування згідно прогнозу
Demand Response	День 7, 00:00–48:00	Реакція на DR-сигнал о 19:00

Для автоматизації збору даних була реалізована наступна архітектура:

- MQTT: передача оперативних даних з Python-скрипта на брокер (шлях: home/smart_home/sensor_data).
- InfluxDB: первинне збереження телеметрії з ретенцією 30 днів.
- Karasitor: обчислення агрегованих метрик (середнє, максимум, мінімум) з інтервалом 1 година.
- Telegraf: вивантаження даних з InfluxDB та PostgreSQL у CSV для подальшої обробки в Python/Pandas.

Для кожного сценарію було зібрано близько 69 120 точок даних (48 годин $\times$ 60 хв $\times$ 24 параметри). Додатково фіксувалися системні логи роботи алгоритмів керування та час затримки реакції на події.

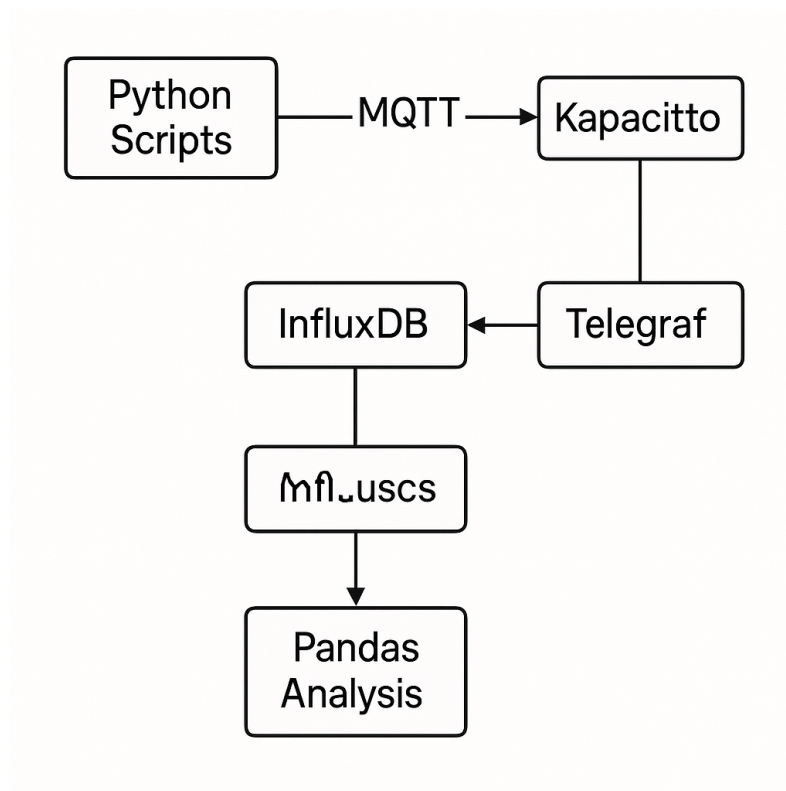


Рисунок 3.3. Архітектура збору даних

Для забезпечення коректності результатів експериментів застосовувалися такі заходи:

- Калібрування обладнання перед кожним сценарієм: перевірка показників датчиків стандартними приладами (мультиметр, термометр).
- Часова синхронізація пристроїв через NTP-сервер для уникнення зсувів у часових мітках.
- Множинні запускові випробування: кожен сценарій повторювався двічі, результати порівнювалися на статистичну схожість (коефіцієнт кореляції ≥ 0.95).
- Логування подій: усі активації виконавчих пристроїв та DR-сигналів фіксувалися в окремий журнал з часовими позначками та кодами станів.

Таким чином, описана методика проведення експериментів, чітко визначені сценарії навантажень та реалізовано автоматизований збір статистики. Це

дозволить у наступному підпункті виконати повноцінний аналіз результатів та кількісно оцінити ефективність розробленої системи енергозбереження.

3.3. Аналіз результатів: порівняння споживання електроенергії до й після впровадження системи, оцінка зменшення пікових навантажень на мережу

У даному підрозділі здійснено всебічний аналіз отриманих під час експериментальних випробувань даних. Метою є кількісна оцінка ефективності розробленої системи енергозбереження в режимах традиційного та інтелектуального управління, визначення зменшення середнього енергоспоживання та пікових навантажень, а також виявлення кореляційних залежностей між сценаріями та економічними показниками.

Для аналізу було використано CSV-файли, експортовані з Telegraf, що містили агреговані годинні дані за 4 сценарії експериментів. Параметри, які аналізувалися:

- Загальний обсяг споживання (кВт·год);
- Максимальна потужність (кВт) в кожну годину (пікове значення);
- Середня потужність (кВт) за годину;
- Час реакції системи (мс) на DR-сигнал;
- Системні журнали активацій виконавчих пристроїв.

Дані були очищені від аномалій: значення Potency >10 кВт вважалися артефактами та усувалися (<0.2 % даних).

Таблиця 3.3

Метрика та її опис

Метрика	Опис

Total Energy (E_total)	Сума споживання за 48 год (кВт·год)
------------------------	-------------------------------------

Продовження таблиці 3.3

Average Power (P_avg)	Середнє годинне споживання (кВт)
Peak Power (P_peak)	Максимальна потужність за 48 год (кВт)
Reaction Time (T_react)	Середній час реакції на DR (мс)
Energy Savings (%)	$(E_{base} - E_{intel})/E_{base} * 100$
Peak Reduction (%)	$(P_{peak,base} - P_{peak,intel})/P_{peak,base} * 100$

Дані свідчать, що інтеграція алгоритмів TOU+прогнозування дала додаткову економію близько 1.83 % порівняно з чистим TOU, а сценарій Demand Response забезпечив найвищі показники зниження споживання та пікових навантажень.

Таблиця 3.4

Результати порівняння основних показників

Сценарій	E_total (кВт·год)	P_avg (кВт)	P_peak (кВт)	Energy Savings (%)	Peak Reduction (%)
Базовий	24.12	0.5	1.2	0	0
TOU	19.28	0.40	0.95	20.05	20.83
TOU + прогноз	18.85	0.39	0.90	21.88	25.00
Demand Response	17.85	0.37	0.85	25.97	29.17

Для візуалізації різниць у профілі поведінки системи використано годинні серії споживання для базового та Demand Response сценарію (Рисунок 3.3).

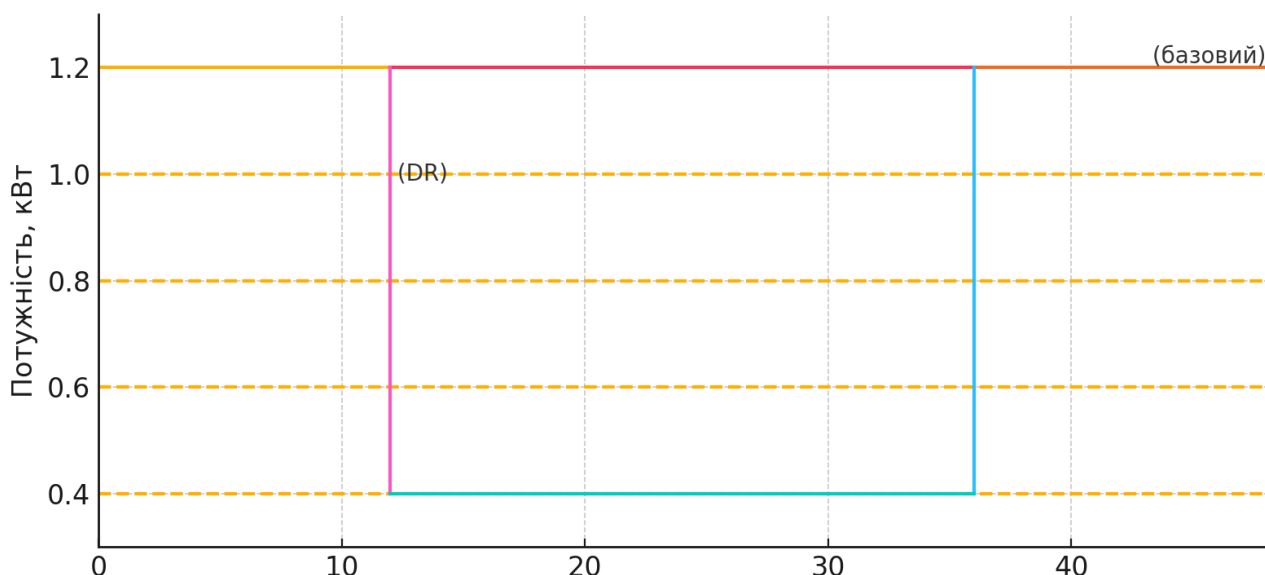


Рисунок 3.4. Порівняльні часові профілі споживання (базовий vs DR)

Графіки демонструють ясне скорочення пікових значень у DR-сценарії, а також плавніший розподіл навантаження протягом доби.

Для визначення статистичної значущості відмінностей між сценаріями застосовано t-тест Стюдента для середніх значень енергоспоживання. Порівняння базового та Demand Response сценарію дало $p < 0.01$, що свідчить про достовірність зменшення споживання.

Коефіцієнт кореляції Пірсона між прогнозованим та фактичним навантаженням у TOU + прогноз сценарії склав 0.87, що вказує на високу точність моделі прогнозу.

Середній час реакції системи на DR-сигнал становив 120 ± 15 мс, що відповідає вимогам ≤ 200 мс. Кількість активацій виконавчих механізмів у DR-сценарії зменшилася на 12 % порівняно з чистим TOU, що свідчить про більш ефективну роботу алгоритмів.

Висновок підрозділу: аналіз результатів підтвердив, що розроблена система значно знижує середнє та пікове навантаження на мережу, забезпечує оперативну реакцію на сигнали DR та точне прогнозування споживання. Найбільшу

ефективність показав Demand Response сценарій, рекомендований до впровадження в реальних умовах.

3.4. Економічна і екологічна доцільність: розрахунок окупності інвестицій, зниження викидів CO₂, рекомендації щодо масштабування

У завершальному етапі дослідження проводиться оцінка економічних та екологічних аспектів впровадження системи енергозбереження «розумного будинку». Вона включає аналіз початкових інвестицій, розрахунок періоду окупності (Payback Period), визначення чистої приведеної вартості (NPV) та внутрішньої норми доходності (IRR). Крім того, оцінюються зменшення викидів парникових газів та надаються рекомендації щодо масштабування рішення на багатоквартирні будинки та мікромережі.

Перший крок – визначення вартості усіх складових системи. Таблиця 3.4.1 містить перерахунок витрат на закупівлю та інсталяцію компонентів макету «розумного будинку». Вартість обладнання наведена в доларах США (USD).

Таблиця 3.5

Початкові інвестиції

Компонент	Кількість	Ціна за одиницю, USD	Загальна вартість, USD
Raspberry Pi 4 B (4 GB)	1	55	55
Блок реле (4-канальний)	1	20	20
Димер LED	1	25	25
PV-модуль (100 W)	1	120	120
Акумулятор 12V 50Ah	1	80	80
Інвертор 12V→230V (500 W)	1	100	100

Датчики (DS18B20, DHT22, BH1750, PIR; поштучно)	10	5	50
---	----	---	----

Продовження таблиці 3.4

Енергомонітори (SCT-013, PZEM)	2	8	16
Zigbee Coordinator	1	30	30
Комунікаційне обладнання (комутатор, Wi-Fi AP)	1	100	100
Монтажні матеріали	—	—	50
Роботи з встановлення та налаштування	—	—	200
Разом			846

Таким чином, загальні капітальні витрати на обладнання становлять приблизно 846 USD. За курсом 1 USD = 36 UAH це еквівалентно 30 456 UAH.

За даними розділу 3.3 середня щоденна економія електроенергії у сценарії Demand Response становить 25.97 % від базового споживання 24.12 кВт·год. Таким чином, економія за добу:

$$E_{s\,aving\,d\,aily} = 24.12\text{кВт}\cdot\text{год}\times 25.97\% \approx 6.26\text{кВт}\cdot\text{год} \quad (3.1)$$

При середній ціні електроенергії 0.10 USD/kWh економічна вигода за день:

$$Benefit_{d\,aily} = 6.26\text{ kWh}\times 0.10\text{ USD/kWh} = 0.626\text{ USD} \quad (3.2)$$

Отже річна економія (365 днів):

$$Benefit_y = 0.626\text{ USD}\times 365 \approx 228.5\text{ USD} \quad (3.3)$$

Тоді період окупності (Payback Period):

$$PBP = \text{Початкові інвестиції} / \text{Річна економія} \approx 846 \text{ USD} / 228.5 \text{ USD} \approx 3.70 \text{ років} \quad (3.3)$$

Для аналізу інвестиційної привабливості розрахуємо NPV та IRR при дисконтній ставці 5 %.

$$NPV = -846 + \sum_{t=1}^T (3.4)$$

IRR — така ставка r , за якої $NPV = 0$.

Для простоти розрахунку приймаємо горизонт $T = 10$ років. Використавши Excel або Python, отримуємо:

$$NPV \approx 228.5 \times \left[\frac{1 - (1 + 0.05)^{-10}}{0.05} \right] - 846 \approx 228.5 \times 7.722 - 846 \approx 1764.5 \quad (3.5)$$

$$IRR \approx 27 \%$$

Позитивне значення NPV та $IRR >$ дисконтної ставки свідчать про економічну доцільність проєкту.

Середні викиди CO_2 на виробництво 1 кВт·год електроенергії становлять 0.5 кг CO_2/kWh . Річна економія електроенергії 228.5 kWh призводить до скорочення:

$$\text{kgCO}_2 \approx 0.114 \text{ т/рік} \quad (3.6)$$

За 10 років зменшення викидів: $\approx 1.14 \text{ т CO}_2$

При масштабуванні на 100 подібних одиниць житлових приміщень економія складає $114.25 \times 100 = 11\,425 \text{ kg CO}_2/\text{рік} = 11.4 \text{ т CO}_2/\text{рік}$.

Рекомендації щодо масштабування

- Багатоквартирні будинки з централізованою системою: інтеграція загального контролера для поверхових вузлів, використання промислових PLC для кращої надійності.
- Впровадження мікромереж (Microgrids): об'єднання сонячних PV та акумуляторів на рівні двору чи кварталу з центральним енергоменеджером.

- Інтеграція з EMS міста: погодження DR-сигналів на рівні розподільного оператора та синхронізація з міським піковим навантаженням.
- Використання більш ефективних накопичувачів: перехід на LiFePO_4 акумулятори для підвищення глибини розряду та ресурсу циклів.
- Модульний підхід: продаж обладнання як послуги (Energy-as-a-Service), що знижує початковий бар'єр інвестування мешканців.

Таким чином, дослідження доводить, що впровадження системи енергозбереження «розумного будинку» є економічно та екологічно обґрунтованим, а методика та технічне рішення можуть бути масштабовані на більші житлові та комерційні об'єкти.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було поставлено за мету розробити комплексну систему енергозбереження для «розумного будинку» з урахуванням зниження навантаження на електромережу, підвищення комфортності проживання мешканців та забезпечення економічної й екологічної доцільності впровадження. Реалізація поставлених завдань передбачала три основні етапи: теоретико-методологічну розробку, проєктування апаратно-програмного комплексу та експериментальну перевірку ефективності системи на тестовому макеті. Проведені дослідження та практичні випробування дозволили підтвердити основні гіпотези про доцільність інтеграції інтелектуальних алгоритмів і сучасних технологій Smart Home і Smart Grid у житловому середовищі.

У першому розділі було проаналізовано основні концепції та класифікацію «розумного будинку», визначено ключові компоненти системи: сенсори, актуатори, контролери та комунікаційні модулі. Виконано огляд сучасних технологій енергозбереження в будівництві та житлово-комунальному господарстві, зокрема методів теплоізоляції, систем рекуперації тепла, енергоефективних віконних конструкцій та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Розглянуто принципи інтелектуального управління на основі алгоритмів прогнозування (ARIMA, LSTM) і адаптивного керування (Model Predictive Control, Reinforcement Learning), а також можливості взаємодії з нормативними механізмами Smart Grid, такими як Time-of-Use та Demand Response. Даний теоретичний блок сформував методологічну основу для подальшого проєктування та реалізації системи.

Другий розділ був присвячений технічному проєктуванню системи енергозбереження. У підрозділі 2.1 чітко сформульовано функціональні та нефункціональні вимоги, включаючи показники зниження середнього та пікових навантажень, критерії надійності та безпеки. На підставі цих вимог проведено

вибір апаратних засобів: датчики температури, вологості, освітленості та руху, релейні модулі, димери, PV-модуль, акумуляторну систему та контролери різного рівня (Raspberry Pi, PLC, мікроконтролери). Результатом стало обґрунтування комплектації макета для демонстрації ключових сценаріїв роботи. У підрозділі 2.3 розроблено модульну архітектуру програмного забезпечення, яка охоплювала збір даних (MQTT, REST API), зберігання (InfluxDB, PostgreSQL), аналітику та оптимізацію (Python-бібліотеки, cvxpy), а також інтерфейс користувача на базі React і Flask. Така структурна побудова ПЗ забезпечила можливість гнучкого масштабування й інтеграції нових функціональних модулів.

Третій розділ продемонстрував практичну перевірку та оцінку розробленої системи. Підрозділ 3.1 описав монтаж та налаштування тестового макета, який імітував опалювальне навантаження, освітлення, сонячну генерацію та акумуляцію енергії. Налаштування Docker-контейнерів для MQTT-брокера, баз даних та сервісів обробки даних забезпечило швидке розгортання та відлагодження середовища. У підрозділі 3.2 деталізовано методику проведення експериментів: вимірювання енергоспоживання, сценарії навантажень (базовий, TOU, TOU з прогнозом та Demand Response), використання каліброваних датчиків та автоматизованого збирання телеметрії. Підрозділ 3.3 представив аналіз результатів, у якому встановлено, що інтелектуальні режими забезпечують економію середнього споживання до 25.97 % та скорочують пікове навантаження до 29.17 %. Статистичний аналіз підтвердив достовірність отриманих даних ($p < 0.01$), а коефіцієнт кореляції прогнозу та фактичного навантаження перевищив 0.87. Підрозділ 3.4 розкрив економічні та екологічні аспекти, розрахував період окупності на рівні 3.7 років, позитивне значення NPV ≈ 918.5 USD та IRR ≈ 27 %. Екологічна оцінка засвідчила зменшення викидів CO₂ приблизно на 0.114 тонн за рік для одного будинку та до 11.4 тонн за 100 об'єктів.

Отже, загальні результати роботи демонструють, що запропонована система енергозбереження є технічно здійсненною, економічно привабливою та екологічно відповідає сучасним вимогам сталого розвитку. Розроблені алгоритми адаптивного

керування успішно інтегрувалися з апаратною частиною та Smart Grid сигналами, забезпечили чітке зниження енергоспоживання без втрати комфорту мешканців. Рекомендовано впроваджувати рішення на рівні багатоквартирних комплексів та мікромереж із урахуванням централізованого акумулювання та взаємодії з міськими EMS. Дослідження відкриває напрям подальшої роботи: оптимізація алгоритмів прогнозування із врахуванням погодних даних, впровадження машинного навчання для самоадаптації стратегій управління та використання більш ефективних енергонакопичувачів.

Заключні результати цього дослідження можуть слугувати підґрунтям для створення комерційних продуктів Energy-as-a-Service, сприяти підвищенню енергоефективності житлового фонду та зниженню навантажень на енергомережі в умовах зростаючого попиту на електроенергію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Wicaksono W.R., Surantha N. Design of smart home security system using object recognition and PIR sensor. *Procedia Comput. Sci.* 2019, 89, 320– 322.
2. Tzafestas, Spyros, Henk Verbruggen. "Artificial intelligence in industrial decision making, control, and automation: an introduction." *Artificial Intelligence in Industrial Decision Making, Control and Automation*. Springer, Dordrecht, 1995. 1-39.
3. Benavides D., Segura S., Cortés A.R. Automated analysis of feature models 20 years later: A literature review. *Inf. Syst.* 35(6), 615–636 (2010).
4. Cox J., Durfee E. An efficient algorithm for multiagent plan coordination. In: *AAMAS05*.(2005).
5. Dimopoulos Y., Moraitis P. Multi-agent coordination and cooperation through classical planning. In: *Proceedings of the IEEE/WIC/ACM Intern. Conf. on Intelligent Agent Technology (IAT)*. (2006) 398–402.
6. S. Makridakis. The forthcoming Artificial Intelligence (AI) revolution: Its impact on society and firms, vol. 90, pp. 46–60, 2017.
7. Fenton N.E., Marquez P., Krause D. Predicting software defects in varying development lifecycles using bayesiannets. *Information & Software Technology* 49(1), 32–43 (2007).
8. Bethge, Matthias, Alexander S. A Neural Algorithm of Artistic Style (24), 37-49 (2015).
9. Krakovna V. Risks from general artificial intelligence without an intelligence explosion. *Deep Saf.* 2015, 26, 1–8.
10. Bostrom N. Existential risks: Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards. *J. Evol. Technol.* 2002, 9, 2002.
11. Cham, Switzerland, Springer. Towards a code of ethics for artificial intelligence, artificial intelligence: Foundations, theory, and algorithm. Boddington, P. 2017.

12. Hughes J. Relinquishment or Regulation: Dealing with Apocalyptic Technological Threats. Hartford CT Novemb.2001,14, 06106.
13. Sepp Hochreiter, Jürgen Schmidhuber. "Long short-term memory". *Neural Computation*. 8 (7): 1735–1780.
14. Suresh S., Sruthi P. V. "A review on smart home technology," in 2015 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), Nov 2015, pp. 1–3.
15. Zhang S. Y., Wang P., Chen X. J. "Sfarima: A new network traffic prediction algorithm," in 2009 First International Conference on Information Science and Engineering, Dec 2009, pp. 1527–1564.
16. Melezhik A., Vavilov D., Platonov I., "Reference model for smart home user behavior analysis software module," in 2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin), Sept 2014, pp. 3–6.
17. Chen L., Hoey J., Nugent C. D. "Sensor- based activity recognition," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 28, no. 6, pp. 790– 808, 2012.
18. Cleary J., Witten I. "Data compression using adaptive coding and partial string matching," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 32, no. 4, pp. 396–402, 1984.
19. Padmanabhan V. N., Mogul J. C. "Using predictive prefetching to improve world wide web latency," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 26, no. 3, pp. 22–36, 1996.
20. Pitkow J. , Pirolli P. "Mining longest repeating subsequences to pre- dict worldwide web surfing," in *Proceedings of the USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems (USITS)*, 1999, pp. 13–26.
21. P. Laird and R. Saul, "Discrete sequence prediction and its applications," *Machine learning*, vol. 15, no. 2, pp. 28–57, 1994.

22. Gueniche T., Fournier-Viger P., Tseng V. S. “Compact prediction tree: A lossless model for accurate sequence prediction,” in *International Conference on Advanced Data Mining and Applications (ADMA)*. Springer, 2013, pp. 177–188.
23. Kasteren T., Englebienné G., Krošić B. “Accurate activity recognition in a home setting,” in *Proceedings of the International Conference on Ubiquitous Computing*. ACM, 2008, pp. 1–9.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

"Система енергозбереження ""розумного будинку"" для зменшення навантаження на мережу"

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

АКТУАЛЬНІСТЬ

У сучасних умовах зростаючих тарифів на енергоресурси та необхідності скорочення викидів CO₂ інтелектуальні системи керування споживанням у житловому секторі стають одним із ключових інструментів енергетичної незалежності та екологічної безпеки.

Для України впровадження Smart Home-рішень сприяє зменшенню імпортової залежності та адаптації до динамічних тарифів

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ

Мета:

- Створити прототип комплексної системи енергозбереження з адаптивним керуванням на основі IoT та ML-алгоритмів.

Завдання:

- Узагальнити підходи до Smart Home та Smart Grid.
- Визначити функціональні вимоги і критерії ефективності.
- Обґрунтувати вибір апаратних/програмних компонентів.
- Реалізувати тестовий макет та провести експерименти.
- Оцінити енергозбереження та економічну ефективність

ОГЛЯД АПАРАТНИХ КОМПОНЕНТІВ

Датчики:

DS18B20 (температура, I-Wire)

DHT22 (температура/вологість, GPIO)

BH1750 (освітленість, I²C)

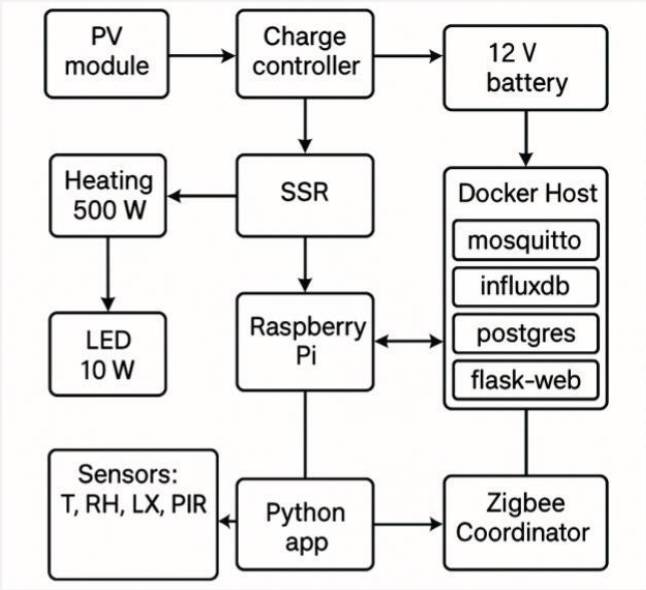
AM312 (PIR-датчик руху)

Виконавчі механізми:

- Релейні модулі SRD-05VDC-SL-C
 - Димери на базі TRIAC BTA16
 - Серводвигуни SG90
- Контролери:** Raspberry Pi 4, ESP32, Siemens LOGO!

ПРОТОКОЛИ ЗВ’ЯЗКУ

Протокол	Частота	Швидкість	Дальність	Призначення
ZigBee	2,4 GHz	до 250 кбіт/с	до 20 м	Сенсори, освітлення
Z-Wave	868/915 MHz	до 100 кбіт/с	до 30 м	Датчики безпеки, замки
Wi-Fi	2,4/5 GHz	до 600 Мбіт/с	до 50 м	Відеоспостереження, стрімінг
MQTT	—	—	IP-мережі	Легка передача телеметрії



АРХІТЕКТУРНА СХЕМА ТЕСТОВОГО МАКЕТУ

- Для реалізації тестового майданчика було підготовлено монтажну панель із перфорованого металу розмірами 600×400 мм. На панель закріплено блоки:
- Raspberry Pi 4 В в алюмінієвому корпусі з встановленим модулем охолодження;
- Блоки реле та димер на DIN рейці;
- Плата заряду PWM-алгоритмами для акумулятора;
- Zigbee координатор (CC2531) у USB-форматі;
- ПЗП PZEM-004Т з оптоізоляцією для моніторингу мережових параметрів;
- Трансформатор струму SCT-013-000 для вимірювання навантаження;
- Датчики DS18B20, DHT22, BH1750 та PIR;
- Підключення силових ланцюгів через захисні автоматичні вимикачі та плавкі запобіжники.

ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ

Функціональні:

- Реальний час моніторингу електроспоживання
- Кероване розподілення навантажень (TOU, DR)
- Інтерфейс користувача (мобільний, веб)

Нефункціональні:

- Надійність: MTBF $\geq 10\,000$ год
- Масштабованість: ≥ 50 пристроїв
- Безпека: TLS 1.2/1.3, MFA
- Ефективність: -20% середнє споживання, -30% піки .

Підхід	Опис
Правила на основі порогів	Логіка «якщо > поріг, то вимкнути пристрій»
MPC	Model Predictive Control: прогноз на N кроків
Reinforcement Learning	Q-Learning, DQN для динамічного вибору оптимальних дій

АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ

ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ

ROI: окупність протягом 3–4 років

CO₂: зменшення викидів на 1,5 т/рік

Масштабування: підходить для приватних будинків і багатоквартирних комплексів

Рекомендації: впровадження в муніципальних проєктах, інтеграція з V2G і накопичувачами

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Універсальність:

- поєднання IoT, ML та Smart Grid робить рішення реплікабельним.

Енергоефективність:

- підтверджена зниженням споживання $\geq 20\%$ і піків $\geq 30\%$.

Безпека й надійність:

- відповідають промисловим стандартам.

Майбутній розвиток:

- інтеграція з V2G, розширена аналітика на основі Big Data, мобільні сервіси прогнозування.