

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Методи і засоби підвищення енергоефективності кіберфізичної системи розумного будинку шляхом оптимізації використання сонячної електростанції

Виконав: студент(ка) 6 курсу, групи СІм-61
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Павлик А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Паламар А.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Тиш Є.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Деркач М.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«17» листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Павлику Андрію Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи і засоби підвищення енергоефективності кіберфізичної системи розумного будинку шляхом оптимізації використання сонячної електростанції

Керівник роботи Паламар Андрій Михайлович кандидат технічних наук, доцент кафедри КС.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » листопада 2025 року № 4/7-987

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики сонячної електростанції, гібридного Інвертора, акумуляторної батареї та електромережі будинку, параметри модулів Raspberry Pi 4 і ESP32

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ

1 Аналітичний огляд в області досліджень

2 Загальні підходи та основні методи досліджень

3 Розроблення та дослідження кіберфізичної системи розумного будинку з СЕС

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Актуальність і мета дослідження.

2. Завдання, об'єкт і предмет, наукова новизна і практична цінність дослідження.

3. Модель функціонування системи

4. Структурна схема системи

5. Схема електричних з'єднань

6. Блок-схема алгоритму роботи системи

7. Результати роботи системи

8. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Осухівська Г.М., зав.каф. КС</i>	<i>04.12.2025</i>	
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Стручок В.С, викл. каф. ОХ</i>		

7. Дата видачі завдання 17.11.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літературних джерел. Постановка завдання на кваліфікаційну роботу.</i>	<i>17.11.2025р. – 23.11.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
2.	<i>Загальні підходи та основні методи дослідження.</i>	<i>24.11.2025р. – 02.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
3.	<i>Розроблення та дослідження кіберфізичної системи розумного будинку з СЕС.</i>	<i>03.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
4.	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>04.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
5.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>11.12.2025р. – 19.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
6.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>16.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
7.	<i>Захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>26.12.2025</i>	<i>Викон.</i>

Студент

(підпис)

Павлик А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Паламар А.М.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Павлик А.В. Методи і засоби підвищення енергоефективності кіберфізичної системи розумного будинку шляхом оптимізації використання сонячної електростанції: кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра: спец. 123 — комп'ютерна інженерія / наук. кер. Паламар А.М. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025.

Ключові слова: кіберфізична система, розумний будинок, сонячна електростанція, енергоменеджмент, Інтернет речей, ESP32, Home Assistant.

Кваліфікаційна робота присвячена розробленню кіберфізичної системи розумного будинку з інтегрованою сонячною електростанцією, спрямованої на підвищення енергоефективності та рівня самоспоживання електроенергії. Виконано аналіз сучасних рішень у сфері енергоменеджменту та визначено їхні обмеження, пов'язані з використанням закритих хмарних сервісів.

Система реалізована на базі Raspberry Pi 4 з Home Assistant, MQTT-брокера Mosquitto та мікроконтролера ESP32, що забезпечує обмін даними з гібридним інвертором і акумуляторною батареєю. Для віддаленого доступу використано ZeroTier One. Реалізовано алгоритми керування електричним бойлером з урахуванням надлишкової генерації СЕС і рівня заряду акумулятора.

Експериментальні результати підтверджують доцільність впровадження запропонованої системи для зменшення споживання електроенергії з мережі та підвищення енергоефективності житлових будинків.

ANNOTATION

Pavlyk A.V. Methods and tools for improving the energy efficiency of a smart-home cyber-physical system by optimizing the use of a solar power plant: Master's Qualification Thesis: specialty 123 — Computer Engineering / scientific supervisor Palamar A.M. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2025.

Keywords: cyber-physical system, smart home, solar power plant, energy management, Internet of Things, ESP32, Home Assistant.

This master's qualification thesis is devoted to the development of a cyber-physical smart home system with an integrated solar power plant aimed at improving energy efficiency and increasing self-consumption of generated electricity. An analysis of modern energy management solutions is conducted, highlighting their limitations related to the use of closed cloud services.

The proposed system is implemented using a Raspberry Pi 4 running Home Assistant, the Mosquitto MQTT broker, and an ESP32 microcontroller that provides communication with a hybrid inverter and a battery storage system. ZeroTier One is used for secure remote access. Control algorithms for an electric water heater are implemented based on surplus solar generation and battery soc.

Experimental results confirm the feasibility of the proposed system for reducing grid electricity consumption and improving the energy efficiency of residential buildings.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ	10
1.1. Кіберфізичні системи розумного будинку та задачі енергоменеджменту.....	10
1.2. Інтеграція сонячних електростанцій у інфраструктуру розумного будинку	12
1.3. Апаратно-програмна платформа енергоменеджменту	14
1.4. IoT-підхід до систем енергоменеджменту розумного будинку	15
1.5. Віддалений доступ і інформаційна безпека	17
1.6. Аналіз існуючих рішень та формулювання задачі дослідження	18
1.7. Висновки до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	23
2.1. Постановка задачі та вибір підходу до моделювання	23
2.2. Математична модель енергетичних потоків кіберфізичної системи	24
2.3. Модель сонячної електростанції	26
2.4. Модель акумуляторної батареї та системи BMS	27
2.5. Модель споживання електроенергії будинком	28
2.6. Енергетичний баланс і критерії ефективності	29
2.7. Методи керування режимами роботи СЕС, акумулятора та навантажень	31
2.8. Теоретичні основи організації інформаційного обміну та віддаленого доступу.....	32
2.9. Методи експериментальних досліджень	33
2.10. Висновки до розділу 2.....	34
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ РОЗУМНОГО БУДИНКУ З СЕС	36
3.1. Загальна структура реалізованої системи	36
3.2. Вибір і конфігурація апаратної частини	37

3.3. Розгортання програмної платформи на Raspberry Pi 4	40
3.4. Розробка прошивки для ESP32	41
3.5. Інтеграція інвертора, BMS і керованих навантажень у Home Assistant	43
3.6. Реалізація сценаріїв енергоменеджменту та автоматизацій	44
3.7. Методика експериментальних досліджень	47
3.8. Аналіз результатів та оцінка ефективності	48
3.9. Обґрунтування доцільності впровадження та елемент новизни	50
3.10. Висновки до розділу 3	51
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	53
4.1 Охорона праці.....	53
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	57
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
Додаток А Тези конференцій	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

BMS (англ. Battery Management System) система керування акумуляторною батареєю

ESP32 мікроконтролер із вбудованими засобами бездротового зв'язку Wi-Fi та Bluetooth

IDS (англ. Intrusion Detection System) система виявлення вторгнень

IoT (англ. Internet of Things) Інтернет речей

MQTT (англ. Message Queuing Telemetry Transport) легковаговий мережевий протокол обміну повідомленнями

PV (англ. Photovoltaic) фотоелектрична система

SOC (англ. State of Charge) рівень заряду акумуляторної батареї

СЕС сонячна електростанція

КФС кіберфізична система

ВСТУП

Актуальність роботи. Зростання вартості електроенергії та активний розвиток відновлюваної енергетики зумовлюють необхідність підвищення енергоефективності житлових будинків. Кіберфізичні системи розумного будинку з інтегрованою сонячною електростанцією та акумуляторними накопичувачами забезпечують нові можливості керування енергоспоживанням, однак більшість існуючих рішень базуються на закритих хмарних сервісах і мають обмежені можливості адаптації. Це обґрунтовує доцільність розроблення відкритої та масштабованої системи енергоменеджменту з локальним керуванням і віддаленим доступом.

Метою кваліфікаційної роботи є кіберфізична система розумного будинку для підвищення енергоефективності шляхом оптимізації використання СЕС та керування навантаженнями на основі відкритої апаратно-програмної архітектури.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- виконати аналіз сучасних наукових підходів до енергоменеджменту розумних будинків із СЕС та акумуляторами;
- розробити енергетичну модель взаємодії системи «СЕС – будинок – акумулятор – електромережа»;
- спроектувати апаратно-програмну архітектуру кіберфізичної системи на базі Raspberry Pi 4 та ESP32;
- реалізувати алгоритми керування керованими навантаженнями та оцінити ефективність запропонованого рішення.

Об'єкт дослідження: процес енергоспоживання та керування потоками електроенергії в кіберфізичній системі розумного будинку з СЕС.

Предмет дослідження: методи та засоби підвищення енергоефективності розумного будинку шляхом оптимізації роботи сонячної електростанції, акумуляторної батареї та керованих навантажень.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу для огляду існуючих рішень, математичного моделювання для опису енергетичних процесів, алгоритмічні методи для розроблення логіки керування навантаженнями, а також експериментальні методи для оцінювання ефективності функціонування системи.

Наукова новизна дослідження:

1. Уперше запропоновано відкриту кіберфізичну архітектуру енергоменеджменту розумного будинку, що поєднує ESP32, Raspberry Pi 4, Home Assistant, MQTT, Batmon і ZeroTier One без використання закритих хмарних сервісів;
2. Удосконалено алгоритм керування електричним бойлером з урахуванням надлишкової генерації СЕС і рівня заряду акумулятора.

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи. Результати роботи можуть бути використані для впровадження систем енергоменеджменту в житлових будинках з сонячними електростанціями, а також як основа для подальшого розвитку систем прогностного та оптимізаційного керування енергоспоживанням.

Публікації. Результати дослідження апробовано на XIII науково-технічній конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі, системи та технології» та XIV міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» у вигляді тез доповідей.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Кіберфізичні системи розумного будинку та задачі енергоменеджменту

Кіберфізичні системи являють собою поєднання фізичних об'єктів, вбудованих обчислювальних засобів та мережевих технологій, які працюють як єдине кероване ціле. Для житлових будівель це означає перехід від традиційної електромережі й простих реле до «розумної» інфраструктури з датчиками, мікроконтролерами, локальними серверами та засобами віддаленого доступу. Розумний будинок у такому підході виступає характерним прикладом кіберфізичної системи, де фізичні процеси споживання та генерації електроенергії безперервно пов'язані з обробкою даних і програмними алгоритмами керування.

Структурно розумний будинок можна уявити як систему з кількох рівнів (рис. 1.1). На фізичному рівні знаходяться датчики температури, вологості, освітленості, руху, лічильники електроенергії, а також виконавчі пристрої: реле, електроклапани, приводи, гібридні інвертори, акумуляторні батареї, сонячні панелі. На проміжному рівні діють мікроконтролери та шлюзи, які збирають дані з датчиків, здійснюють попередню обробку та передають їх на сервер. Верхній рівень утворюють програмні компоненти – локальний сервер керування, база даних, аналітичні модулі, веб-інтерфейси та мобільні застосунки. Саме на цьому рівні реалізуються алгоритми енергоменеджменту та сценарії автоматизації.

Енергоменеджмент розумного будинку передбачає організований процес вимірювання, аналізу та керування потоками енергії з метою зменшення витрат, підвищення частки використання власної генерації й покращення енергетичної автономності. На відміну від пасивного обліку, що обмежується періодичним зняттям показників лічильника, тут важливим є активний вплив на режими роботи обладнання. Система має мати можливість автоматично обирати, коли вмикати та вимикати окремі споживачі, як використовувати акумулятор, чи слід у даний момент імпортувати енергію з мережі, чи, навпаки, експортувати надлишки.

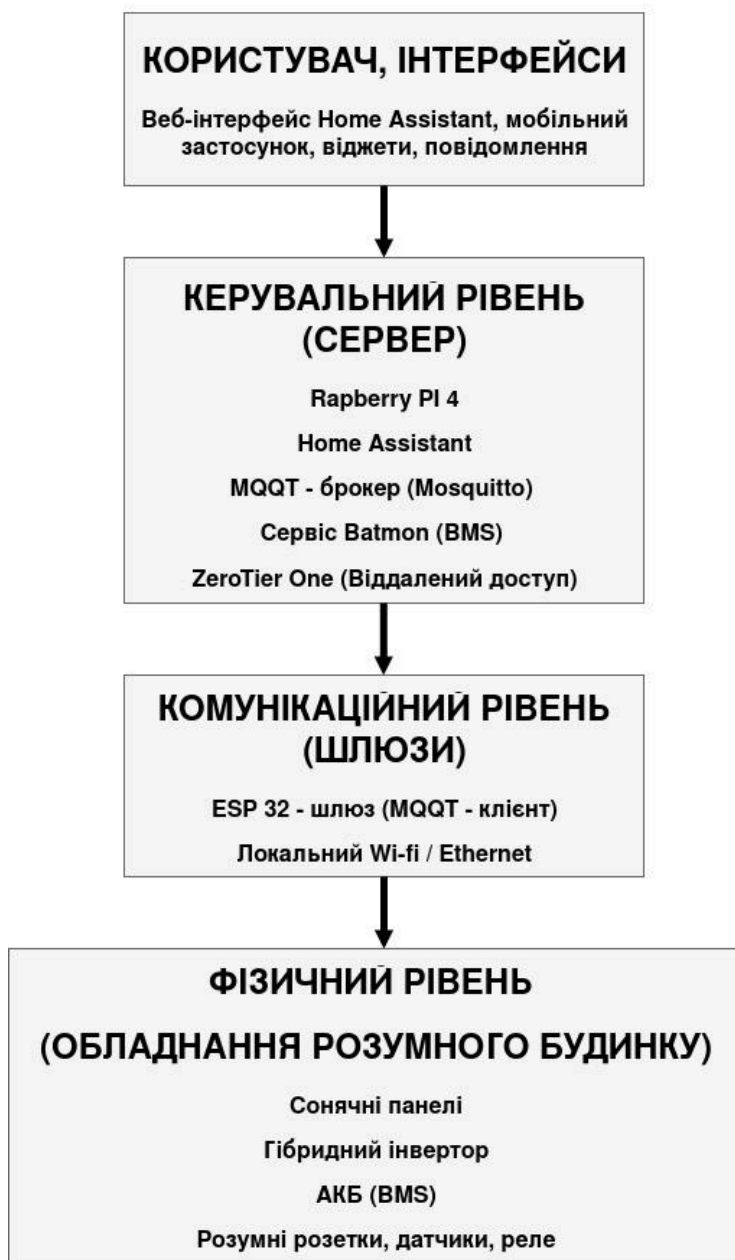


Рис. 1.1. Узагальнена структурна схема кіберфізичної системи розумного будинку

Побутове споживання електроенергії має випадковий характер: профіль навантаження змінюється протягом доби й сильно залежить від поведінки мешканців. Додавання СЕС у систему робить картину ще складнішою, оскільки генерація залежить від інсоляції, хмарності, пори року та стану панелей. Виникає задача узгодження змінних у часі графіків генерації й споживання, а також доцільного використання акумулятора для накопичення надлишкової енергії та покриття дефіциту в інші періоди.

З огляду на це розумний будинок з інтегрованою СЕС розглядається як активний учасник енергосистеми, а не просто пасивний споживач. Завдання кіберфізичної системи полягає в тому, щоб на основі даних у реальному часі формувати керуючі впливи: розподіляти енергію між будинком, акумулятором і мережею, а також гнучко керувати не критичними навантаженнями. Це визначає актуальність досліджень, пов'язаних із побудовою відкритих, гнучких і розширюваних платформ енергоменеджменту, на базі яких можна створювати індивідуальні рішення для конкретних домогосподарств.

1.2. Інтеграція сонячних електростанцій у інфраструктуру розумного будинку

Сонячні електростанції малої потужності є одним із найпоширеніших способів зменшити витрати на електроенергію та підвищити енергетичну незалежність приватного будинку. За схемою підключення прийнято розрізняти мережеві, автономні та гібридні системи. У мережевих СЕС надлишок енергії просто віддається в зовнішню мережу, а при нестачі енергія береться з тієї ж мережі; автономні системи покладаються переважно на акумуляторні батареї та практично не залежать від зовнішнього живлення; гібридні поєднують переваги обох підходів, дозволяючи одночасну роботу з панелями, акумулятором і мережею.

З точки зору розумного будинку гібридна схема (рис. 1.2) є найбільш цікавою, оскільки вона дає змогу гнучко керувати потоками енергії. Гібридний інвертор може живити навантаження від СЕС і акумулятора, у разі потреби підключати мережу, заряджати батарею від панелей або від мережі, а також обмежувати експорт у зовнішню мережу згідно з налаштуваннями. Це створює передумови для реалізації різних стратегій енергоменеджменту — від простих правил до оптимізаційних алгоритмів.

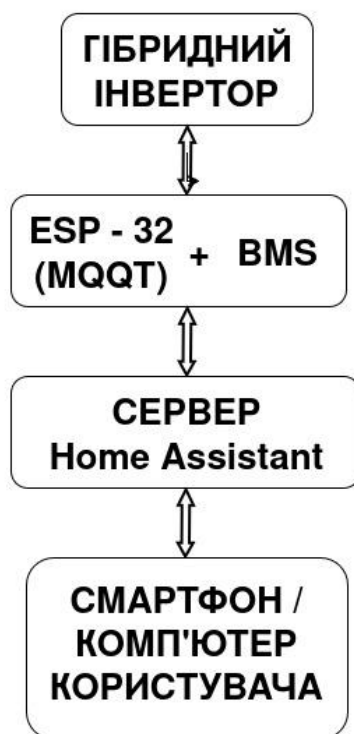


Рис. 1.2. Типова схема інтеграції гібридної сонячної електростанції у розумний будинок

Важливою особливістю сучасних інверторів є наявність цифрових інтерфейсів обміну даними — RS-232, RS-485, Ethernet, Wi-Fi. Через них можна отримати інформацію про потужність генерації, навантаження, стан акумуляторів, обмін з мережею, а також службові параметри й коди помилок. Виробники зазвичай пропонують власні програмні комплекси або хмарні сервіси для моніторингу, проте такі рішення часто закриті, обмежені в інтеграції з іншими системами та не дозволяють гнучко змінювати логіку керування. Для побудови повноцінного розумного будинку потрібен відкритіший підхід, коли дані інвертора доступні у стандартних протоколах і можуть використовуватися будь-якими додатками.

З цією метою до інтерфейсу інвертора підключається окремий контролер, наприклад на базі ESP32, який реалізує протокол виробника й перетворює дані в повідомлення MQTT. У такому випадку телеметрія СЕС і акумулятора стає доступною для Home Assistant та інших компонентів розумного будинку. Паралельно інтегрується система BMS, яка контролює параметри акумуляторної

батареї та передає інформацію про рівень заряду, струми, напруги, температури. Завдяки цьому рішення щодо керування навантаженнями можуть прийматися з урахуванням реального стану як інвертора, так і батареї.

Отже, інтеграція СЕС у розумний будинок — це не тільки електротехнічне підключення панелей і інвертора, а й побудова інформаційної інфраструктури, яка забезпечує надійний двосторонній обмін даними між усіма ключовими компонентами.

1.3. Апаратно-програмна платформа енергоменеджменту

У сучасних кіберфізичних системах все більшого поширення набувають відкриті апаратно-програмні платформи, оскільки вони дозволяють створювати гнучкі, модульні та довгоживучі рішення. У даній роботі в якості центральної платформи обрано комбінацію Raspberry Pi 4, Home Assistant, MQTT-брокера Mosquitto, мікроконтролера ESP32 та сервісів для роботи з BMS і віддаленим доступом.

Raspberry Pi 4 виконує роль сервера розумного будинку й енергоменеджменту. На ньому розміщуються Home Assistant, MQTT-брокер, база даних, а також допоміжні сервіси, зокрема інструмент для інтеграції з BMS (наприклад, Batmon) і ZeroTier One для організації віртуальної приватної мережі. Продуктивності Raspberry Pi 4 достатньо для постійного збору й обробки телеметрії, роботи з інтерфейсом користувача та запуску автоматизацій, при цьому енергоспоживання залишається порівняно невеликим.

Мікроконтролер ESP32 слугує польовим контролером і шлюзом до інвертора. Він підключається до інтерфейсу інвертора, періодично опитує його, розбирає відповіді й публікує виміряні параметри в MQTT. За потреби до ESP32 можуть бути підключені додаткові датчики — наприклад, температури або струму, — що розширює можливості моніторингу. Прошивка ESP32 може бути змінена або доповнена, завдяки чому система залишається відкритою для подальших удосконалень.

MQTT виступає стандартним транспортом для передачі телеметрії й керуючих команд. Брокер Mosquitto, розгорнутий на Raspberry Pi 4, приймає повідомлення від ESP32, сервісу BMS та інших пристроїв, а Home Assistant підписується на потрібні теми й перетворює повідомлення на внутрішні сутності (сенсори, лічильники, перемикачі). При необхідності Home Assistant може також сам виступати джерелом команд, публікуючи їх у відповідні MQTT-теми для керування реле, розетками або параметрами обладнання.

Home Assistant є ключовим програмним компонентом системи. Він забезпечує уніфікований інтерфейс керування, зручну візуалізацію показників, механізми автоматизацій та інтеграції з великою кількістю пристроїв. У контексті енергоменеджменту важливо, що Home Assistant має вбудовані засоби роботи з енергією: можна створювати панелі для відображення генерації, споживання, рівня заряду акумулятора, а також налаштовувати правила керування навантаженнями на основі значень сенсорів і подій.

Поєднання Raspberry Pi 4, ESP32, MQTT, Home Assistant і сервісів для роботи з BMS формує відкриту й розширювану платформу, на якій можна реалізувати як прості сценарії керування, так і складніші дослідницькі задачі. Важливою перевагою є відсутність прив'язки до конкретного виробника, можливість модифікації прошивки й конфігурацій, а також незалежність від закритих хмарних сервісів.

1.4. IoT-підхід до систем енергоменеджменту розумного будинку

Системи енергоменеджменту, побудовані за принципами IoT, розглядають кожен компонент — датчик, інвертор, акумулятор, реле, сервер — як окремий вузол мережі, що обмінюється повідомленнями. У такій архітектурі енергоменеджмент є результатом взаємодії множини вузлів через стандартні протоколи. Це дозволяє легко додавати нові пристрої, не змінюючи основної логіки системи.

З погляду керування можна виділити два типи підходів. Перший — це керування на основі правил, коли система реагує на поточні значення параметрів за допомогою наперед заданих умов. Наприклад, при достатньо високій генерації та високому рівні заряду акумулятора дозволяється вмикати бойлер, а при зниженні SOC нижче певного порога навантаження вимикається. Така логіка є прозорою, легко налаштовується користувачем і добре підходить для реалізації в Home Assistant.

Другий тип підходів — оптимізаційний. У цьому випадку будується математична модель із цільовою функцією, наприклад, мінімізувати витрати на електроенергію або максимізувати частку споживання за рахунок СЕС, з урахуванням обмежень по потужності, SOC, часу роботи навантажень та тарифів. На основі прогнозів генерації й споживання алгоритм обчислює оптимальний графік роботи керованих пристроїв. Такі методи дають змогу досягти кращих результатів, але потребують складнішої реалізації та, як правило, більших обчислювальних ресурсів.

У рамках даної кваліфікаційної роботи основний акцент зроблено на реалізації rule-based підходу, який є природним продовженням наведених у теоретичній частині моделей і добре інтегрується з можливостями Home Assistant. Водночас архітектура системи спроектована таким чином, щоб у майбутньому можна було додати окремий модуль оптимізації, який використовуватиме ті самі потоки даних MQTT та інтерфейси керування.

Особливе значення в IoT-системах має питання віддаленого доступу. У багатьох комерційних рішеннях віддалений моніторинг реалізовано через хмарні сервіси виробника, що не завжди відповідає вимогам безпеки й гнучкості. У даному проєкті застосовується підхід із використанням накладеної віртуальної мережі ZeroTier One, завдяки якому сервер Home Assistant залишається локальним, а доступ до нього отримується через шифрований тунель. Це поєднує переваги віддаленого керування й локальної автономії.

1.5. Віддалений доступ і інформаційна безпека

Можливість керувати системою розумного будинку з будь-якої точки світу є важливою з точки зору зручності, але водночас створює додаткові вимоги до інформаційної безпеки. Пряме відкриття веб-інтерфейсу Home Assistant в Інтернеті через проброс портів на маршрутизаторі підвищує ризик несанкціонованого доступу, особливо за умов слабких паролів або відсутності додаткових механізмів захисту.

Використання ZeroTier One дозволяє організувати віртуальну приватну мережу, в якій Raspberry Pi 4 та мобільні пристрої користувача знаходяться в одному логічному сегменті, незалежно від реальної мережевої топології. Трафік між ними шифрується, а доступ контролюється через центральний контролер ZeroTier, де адміністратор мережі підтверджує приєднання кожного нового вузла. У результаті інтерфейс Home Assistant доступний лише з довірених пристроїв, без необхідності відкривати порти в загальнодоступний Інтернет.

Як додаткові заходи безпеки використовуються облікові записи з надійними паролями, можливість двофакторної автентифікації в Home Assistant, обмеження доступу до MQTT-брокера лише з локальної мережі й мережі ZeroTier, а також регулярне оновлення програмного забезпечення. Важливою складовою є журналювання подій: фіксуються спроби входу, зміни конфігурації, спрацювання автоматизацій. Це дозволяє відстежувати потенційно небажані дії й аналізувати поведінку системи у разі інцидентів.

У системах, де керуються реальні навантаження та елементи енергосистеми, кібербезпека тісно пов'язана з фізичною безпекою. Некоректний або зловмисний вплив на параметри інвертора, акумулятора чи сценарії керування навантаженнями може спричинити перевантаження, прискорений знос батарей або потенційно небезпечні режими. Тому частина захисту реалізується на апаратному рівні (апаратні обмеження струмів і напруг, захисні автомати, робота BMS), а частина — на програмному (перевірка діапазонів допустимих значень,

заборона критичних дій із боку користувачів без відповідних прав, резервне копіювання конфігурації).

1.6 Аналіз існуючих рішень та формулювання задачі дослідження

Відповідно до методичних вказівок до виконання кваліфікаційних робіт магістра, структура дослідження повинна спиратися на аналіз сучасного стану наукової проблематики та виявлення невирішених задач, що обґрунтовують новизну роботи [4]. У контексті кіберфізичних систем енергоменеджменту розумного будинку з СЕС та акумуляторною батареєю особливий інтерес становлять праці, присвячені цифровим двійникам енергосистем, інтеграції IoT-технологій та алгоритмам оптимізації роботи побутових мікромереж. У роботі [5] розглядається концепція цифрових двійників кіберфізичних енергосистем і підходи до їх побудови для підвищення спостережуваності, надійності та керованості енергетичної інфраструктури. Запропоновані моделі орієнтовані насамперед на рівень електроенергетичних систем і мікромереж, однак практичні аспекти інтеграції таких рішень у побутові системи «розумного будинку» розкриті лише на загальному рівні. Стаття [6] присвячена інтеграції IoT та відновлюваних джерел енергії в контексті сталого розвитку розумних міст. Автори показують, що поєднання сенсорних мереж, хмарних сервісів та відновлюваної генерації дозволяє зменшити вуглецевий слід і підвищити ефективність енергоспоживання в міському масштабі, однак конкретні реалізації на рівні індивідуальних домогосподарств здебільшого розглядаються як елементи більш загальної інфраструктури, без детального опису локальних архітектур на кшталт Home Assistant, ESP32 чи брокера MQTT.

Оглядова робота [7] систематизує підходи до інтелектуального енергоменеджменту з використанням IoT у фотоелектричних системах, зокрема методи прогнозування генерації та моделі керування режимами роботи СЕС. Основна увага приділяється алгоритмам прогнозування та управління на рівні мікромереж і невеликих електростанцій, тоді як інтеграція з побутовими

навантаженнями розглядається переважно в узагальненому вигляді. У праці [8] проводиться детальний аналіз оптимізаційних алгоритмів, які застосовуються в системах домашнього енергоменеджменту. Розглянуто генетичні алгоритми, рій частинок, цілочислове програмування та інші методи, орієнтовані на мінімізацію вартості електроенергії або максимізацію самоспоживання генерації. Автори підкреслюють, що для практичного впровадження оптимізаційних підходів потрібна надійна телеметрія, гнучкі інтерфейси керування навантаженнями та сумісність із реальним обладнанням, проте питання побудови відкритої апаратно-програмної платформи, яка б забезпечувала таку інтеграцію, у роботі не вирішується.

Близькою до тематики даної роботи є публікація [9] де запропоновано використання контролера ESP32 для непрямого керування комерційними інверторами в житлових PV-мікромережах. Показано, що за допомогою недорогого мікроконтролера можна підвищити гнучкість керування інвертором та адаптувати його роботу до потреб користувача, однак описана система зосереджена переважно на рівні інвертора й мікромережі, без повномасштабної інтеграції з платформами типу Home Assistant, системами BMS побутових акумуляторів і сценаріями керування окремими побутовими навантаженнями. У роботі [10] розглянуто інтеграцію гібридних відновлюваних джерел енергії в архітектуру розумного будинку з використанням IoT-підходу. Запропоновано загальну схему взаємодії відновлюваних джерел, накопичувачів та навантажень, показано потенціал зниження енергоспоживання з мережі й підвищення енергоефективності, однак реалізація системи переважно спирається на хмарні сервіси, а питання побудови повністю локальної, відкритої платформи на базі Raspberry Pi, ESP32, MQTT і Home Assistant не деталізується.

У статті [11] розглянуто інтелектуальне моделювання мікромереж типу PV-BESS (CEC – система зберігання енергії) з акцентом на підвищення стабільності, кіберфізичної стійкості та запобігання блекаутам. Аналізуються різні стратегії керування та їхній вплив на поведінку мікромережі в аварійних режимах, проте фокус дослідження зміщено в бік системного рівня, тоді як

прикладні аспекти керування окремими побутовими пристроями в реальному розумному будинку залишаються поза увагою. В статті [12] пропонують IoT-орієнтований підхід до реалізації demand response у енергоефективних розумних будинках. Показано, що керування гнучкими навантаженнями на основі сигналів від енергосистеми та локальних вимірювань дозволяє значно зменшити пікові навантаження й витрати на електроенергію, однак конкретні реалізації на базі відкритих платформ, інтеграція з гібридними інверторами та локальними СЕС описані лише концептуально. В [13] демонструють приклад IoT-керування тепловими насосами в контексті енергетичного переходу. Запропонована архітектура забезпечує оптимізацію теплового комфорту й енергоспоживання шляхом гнучкого керування обладнанням на основі даних від сенсорів та зовнішніх сервісів; при цьому реалізація прив'язана до конкретного класу обладнання й не охоплює інтеграцію з сонячною генерацією та акумуляторними системами зберігання енергії.

Проведений аналіз публікацій [5–13] дозволяє зробити висновок, що нині добре опрацьовані питання моделювання кіберфізичних енергосистем, застосування оптимізаційних алгоритмів у домашньому енергоменеджменті, а також інтеграції IoT-рішень у мікромережі та розумні будинки, однак недостатньо висвітленими залишаються такі аспекти, як побудова повністю відкритої апаратно-програмної платформи енергоменеджменту на базі Raspberry Pi 4, ESP32, MQTT, Home Assistant і сервісів для роботи з BMS, глибока інтеграція телеметрії від гібридного інвертора та BMS акумулятора в сценарії автоматизованого керування побутовими навантаженнями, реалізація системи, що не залежить від закритих хмарних сервісів виробника й забезпечує безпечний віддалений доступ через віртуальні мережі на кшталт ZeroTier One, а також детальне опрацювання прикладів керування конкретними «гнучкими» навантаженнями (зокрема електричним бойлером) з урахуванням стану СЕС, акумулятора та профілю споживання будинку. З урахуванням виявлених обмежень існуючих рішень задача, розв'язувана в даній кваліфікаційній роботі, формулюється як розроблення та дослідження інтегрованої кіберфізичної системи

розумного будинку з СЕС й акумуляторною батареєю, реалізованої на базі відкритих апаратно-програмних платформ, яка забезпечує збір детальної телеметрії від інвертора та BMS, її передачу через MQTT-брокер Mosquitto на сервер Home Assistant, реалізацію rule-based сценаріїв енергоменеджменту з керуванням некритичними навантаженнями (на прикладі електричного бойлера) та можливість безпечного віддаленого доступу через ZeroTier One, створюючи тим самим основу для подальшого впровадження прогнозних та оптимізаційних алгоритмів, описаних у працях [4–5, 8–9].

1.7. Висновки до розділу 1

У першому розділі виконано аналітичний огляд сучасних підходів до побудови кіберфізичних систем розумного будинку з інтегрованими сонячними електростанціями та акумуляторними системами зберігання енергії. Показано, що такі системи природно описуються в термінах КФС, оскільки об'єднують фізичні енергетичні процеси з розвиненою інформаційно-комунікаційною інфраструктурою. Розглянуто типові конфігурації СЕС і обґрунтовано переваги гібридних систем для задач енергоменеджменту.

Проаналізовано можливості відкритої платформи, що поєднує Raspberry Pi 4, ESP32, MQTT, Home Assistant, засоби інтеграції з BMS та ZeroTier One. Показано, що така архітектура дозволяє організувати повністю локальну систему, яка не залежить від закритих хмарних сервісів і забезпечує гнучку інтеграцію нових пристроїв та алгоритмів. Окремо розглянуто IoT-підхід до енергоменеджменту, порівняно rule-based і оптимізаційні методи керування, а також підкреслено важливість інформаційної безпеки та безпечного віддаленого доступу.

На основі аналізу існуючих рішень сформульовано задачу даної кваліфікаційної роботи: розробити й дослідити інтегровану кіберфізичну систему енергоменеджменту розумного будинку з СЕС, побудовану з використанням відкритих апаратно-програмних засобів, із акцентом на оптимізацію роботи

некритичних навантажень, насамперед електричного бойлера. Подальші розділи присвячено теоретичному моделюванню енергетичних процесів, проєктуванню архітектури системи, реалізації програмного забезпечення та експериментальній оцінці досягнутих результатів.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Постановка задачі та вибір підходу до моделювання

У першому розділі було показано, що кіберфізична система розумного будинку з інтегрованою СЕС й акумуляторною батареєю є складним динамічним об'єктом, в якому взаємодіють кілька джерел та споживачів енергії. Для обґрунтованого вибору алгоритмів енергоменеджменту необхідно сформулювати узагальнену математичну модель енергетичних потоків та визначити показники ефективності, за якими оцінюватиметься робота системи.

Ця модель повинна, з одного боку, бути достатньо простою, щоб її можна було реалізувати на практиці, а з іншого – достатньо точною, щоб коректно відображати основні процеси: генерацію електроенергії СЕС, заряджання й розряджання акумуляторної батареї, споживання будинку, обмін енергією з зовнішньою мережею. Крім того, модель повинна бути придатною для реалізації алгоритмів автоматизованого керування, які функціонуватимуть у Home Assistant та/або на мікроконтролері ESP32.

У роботі приймається підхід, за якого енергетичні процеси описуються у вигляді балансових співвідношень між миттєвими потужностями, а накопичення енергії в акумуляторі – у вигляді диференційно-різницевого рівняння для енергії та рівня заряду. Для практичної реалізації зручно дискретизувати час із кроком Δt (наприклад, 1 хвилина або 5 хвилин), що відповідає періоду оновлення телеметрії від інвертора й BMS.

Розглядається наступний набір основних змінних:

$P_{gen}(t)$ – потужність генерації СЕС у момент часу t ;

$P_{load}(t)$ – сумарна потужність споживання будинку;

$P_{bat}(t)$ – потужність заряджання/розряджання акумулятора (зі знаком: додатна – заряджання, від'ємна – розряджання);

$P_{\text{grid}}(t)$ – потужність, що надходить із зовнішньої мережі або передається в мережу (з урахуванням знаку);

$E_{\text{bat}}(t)$ – запасена в акумуляторі енергія;

$\text{SOC}(t)$ – відносний рівень заряду акумулятора.

Подальші підрозділи присвячені уточненню цих величин, побудові математичних моделей для окремих компонентів системи та формуванню загальної балансової моделі, яка використовується як основа для алгоритмів керування.

2.2. Математична модель енергетичних потоків кіберфізичної системи

У найзагальнішому вигляді енергетичний баланс у точці з'єднання СЕС, акумулятора, навантаження та мережі можна записати як:

$$P_{\text{gen}}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{loss}}(t). \quad (2.1)$$

де $P_{\text{loss}}(t)$ – сукупні втрати потужності в перетворювачах, кабелях, інверторі тощо.

Для спрощення подальших викладок у першому наближенні втрати об'єднуються в ефективності відповідних елементів, а сама модель розглядається в квазістаціонарному режимі для кожного дискретного кроку часу. Тоді баланс можна записати у вигляді:

$$P_{\text{gen}}(t) + P_{\text{grid}}(t) \approx P_{\text{load}}(t) + P_{\text{bat}}(t). \quad (2.2)$$

Акумуляторна батарея виконує роль буфера між змінною генерацією СЕС та змінним споживанням будинку. Її енергетичний стан описується функцією $E_{\text{bat}}(t)$, яка змінюється за законом:

$$E_{\text{bat}}(t + \Delta t) = E_{\text{bat}}(t) + \eta_{\text{ch}} P_{\text{ch}}(t) \Delta t - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} P_{\text{dis}}(t) \Delta t. \quad (2.3)$$

де $P_{\text{ch}}(t)$ – додатна складова потужності заряджання (якщо акумулятор заряджається);

$P_{\text{dis}}(t)$ – додатна складова потужності розряджання (якщо акумулятор віддає енергію);

η_{ch} , η_{dis} – коефіцієнти корисної дії під час заряджання та розряджання відповідно.

На практиці зручно працювати з відносним рівнем заряду акумулятора $\text{SOC}(t)$, який визначається як:

$$\text{SOC}(t) = \frac{E_{\text{bat}}(t)}{E_{\text{nom}}}. \quad (2.4)$$

де E_{nom} – номінальна ємність акумуляторної батареї в одиницях енергії (наприклад, ват-годинах).

Тоді рівняння для SOC набуває вигляду:

$$\text{SOC}(t + \Delta t) = \text{SOC}(t) + \frac{\eta_{\text{ch}} P_{\text{ch}}(t) \Delta t - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} P_{\text{dis}}(t) \Delta t}{E_{\text{nom}}}. \quad (2.5)$$

Фізично рівень заряду обмежений інтервалом:

$$\text{SOC}_{\text{min}} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\text{max}}. \quad (2.6)$$

де SOC_{max} задаються виробником або користувачем для забезпечення прийняттого ресурсу батареї.

Потужність акумулятора також обмежена максимально допустимими значеннями:

$$-P_{\text{bat}}^{\text{max,dis}} \leq P_{\text{bat}}(t) \leq P_{\text{bat}}^{\text{max,ch}}. \quad (2.7)$$

У поєднанні з інвертором, який має власні обмеження по потужності, це створює область допустимих режимів, всередині якої мають працювати алгоритми керування.

У відповідності до поставленої задачі енергоменеджменту метою є побудова таких законів керування $P_{bat}(t)$ та станами некритичних навантажень, за яких досягається покращення енергетичних показників системи: зменшення споживання з мережі, збільшення частки використання власної генерації, зниження пікових навантажень, забезпечення прийняттого ресурсу акумуляторної батареї.

2.3. Модель сонячної електростанції

СЕС є джерелом потужності $P_{gen}(t)$, яке залежить від умов освітлення, температури та параметрів фотогальванічних модулів. У загальному випадку потужність, яку може віддати масив сонячних панелей, описується як:

$$P_{gen}(t) = \eta_{pv}(t) G(t) S_{pv}. \quad (2.8)$$

де $G(t)$ – густина сонячного випромінювання на площині панелей (Вт/м^2);

S_{pv} – сумарна площа фотомодулів;

$\eta_{pv}(t)$ – ефективний ККД перетворення випромінювання в електроенергію.

Ефективний ККД залежить від типу модуля, температури та режиму роботи. У першому наближенні температурна залежність ККД може бути подана у вигляді:

$$\eta_{pv}(t) = \eta_{STC} [1 - \gamma(T_{cell}(t) - T_{STC})]. \quad (2.9)$$

де η_{STC} – ККД при стандартних умовах (STC);

$T_{cell}(t)$ – температура комірки, T_{STC} температура при STC (зазвичай 25°C);

γ – температурний коефіцієнт потужності.

У рамках даної роботи детальна нелінійна модель ВАХ фотомодуля не використовується, оскільки задача полягає не в аналізі внутрішніх режимів роботи панелей, а в енергетичному балансі системи. Достатньо, щоб модель $P_{gen}(t)$ коректно відображала добову та сезонну змінність генерації, а також залежність від погодних умов. Це може бути реалізовано на основі вимірних даних (реальної телеметрії), а для теоретичного аналізу – у вигляді типової добової кривої генерації з максимумом у полуденні години.

Для енергоменеджменту суттєвими є такі властивості генерації: неможливість «запасати» сонячну енергію безпосередньо, окрім як через акумулятори, обмежена передбачуваність генерації, що залежить від погодних умов, а також асиметрія між періодами високої генерації (вдень) та споживання, яке часто зростає у вечірні години.

Саме тому в моделі особливу увагу приділено взаємодії СЕС з акумуляторами та навантаженнями.

2.4. Модель акумуляторної батареї та системи BMS

Акумуляторна батарея є елементом, що забезпечує часову «розв'язку» між генерацією й споживанням. З математичної точки зору акумулятор можна описати як об'єкт із обмеженою ємністю E_{nom} , внутрішніми втратами та обмеженнями по струму, напрузі й температурі.

У простішому варіанті модель акумулятора містить номінальну ємність E_{nom} , рівень заряду $SOC(t)$, допустимі межі SOC_{min} і SOC_{max} , коефіцієнти ефективності заряджання η_{ch} і η_{dis} , а також максимальні потужності заряджання $P(bat)_{max,ch}$ і розряджання $P(bat)_{max,dis}$.

Вплив внутрішнього опору, температурних ефектів і деградації в цій роботі враховується опосередковано – через рекомендації щодо допустимого діапазону SOC та обмежень по струму, які на практиці задаються системою BMS.

Система BMS постійно вимірює напругу й температуру окремих елементів батареї, сумарну напругу, струм, обчислює SOC та інші параметри. У моделі передбачається, що BMS забезпечує роботу акумулятора лише в межах безпечних значень напруги, температури та SOC, може передавати на верхній рівень телеметрію у вигляді SOC(t), струмів, напруг і температур, а за потреби ініціює аварійне відключення батареї при порушенні встановлених обмежень.

З боку енергоменеджменту BMS виступає як джерело інформації про фактичний стан акумулятора, а отримані дані використовуються для визначення допустимого діапазону потужності $P_{bat}(t)$, корекції правил керування навантаженнями (зокрема, заборони увімкнення бойлера при низькому SOC), а також для оцінювання ресурсу акумулятора у довгостроковій перспективі.

Таким чином, теоретична модель акумулятора й BMS у даній роботі зосереджена не на внутрішній електрохімії, а на енергетичних характеристиках і обмеженнях, які важливі для алгоритмів енергоменеджменту.

2.5. Модель споживання електроенергії будинком

Сумарна потужність споживання будинку $P_{load}(t)$ формується багатьма окремими навантаженнями. Для задач енергоменеджменту доцільно розділити її на дві компоненти:

$$P_{load}(t) = P_{base}(t) + P_{ctrl}(t). \quad (2.10)$$

де $P_{base}(t)$ – базове (некероване) навантаження, яке система не може або не повинна відключати (холодильник, мережеве обладнання, мінімальне освітлення тощо);

$P_{ctrl}(t)$ – сумарне кероване навантаження (бойлер, пральна машина, кондиціонер, заряджання електромобіля та інші пристрої, роботою яких можна гнучко керувати).

Базове навантаження розглядається як випадкова величина з певним добовим профілем, який може бути отриманий із вимірювань за тривалий період. Для теоретичного аналізу припускається, що цей профіль відомий або може бути апроксимований. Кероване навантаження описується як сукупність дискретних задач увімкнення: кожен пристрій має тривалість роботи, потужність і допустимий інтервал часу, протягом якого він може бути увімкнений, а для електричного бойлера, наприклад, основними параметрами є середня потужність нагрівального елемента та необхідний обсяг енергії для забезпечення потрібної температури води за добу.

У простішому варіанті керування бойлером можна вважати, що є добова потреба в певній кількості енергії $E_{\text{boil,day}}$, яку потрібно подати на нагрівальний елемент протягом доби, при цьому момент увімкнення й розподіл у часі можуть змінюватися. Тоді завдання енергоменеджменту полягає у виборі таких інтервалів роботи бойлера, коли наявна надлишкова генерація СЕС, рівень заряду акумулятора є достатнім або вартість електроенергії з мережі є мінімальною. Таким чином, модель споживання включає як некеровану частину, що розглядається як зовнішній вплив, так і керовану частину, яка є безпосереднім об'єктом алгоритмів енергоменеджменту.

2.6. Енергетичний баланс і критерії ефективності

На основі моделей окремих компонентів формулюється енергетичний баланс системи в інтегральному вигляді за певний період (наприклад, добу або місяць). Позначимо:

- W_{gen} – загальна енергія, згенерована СЕС;
- W_{load} – загальна енергія, спожита будинком;
- $W_{\text{grid,imp}}$ – енергія, імпортована з мережі;
- $W_{\text{grid,exp}}$ – енергія, експортована в мережу;
- $W_{\text{bat,ch}}$ – енергія, яка була заряджена в акумулятор;
- $W_{\text{bat,dis}}$ – енергія, яку акумулятор віддав у навантаження.

Тоді інтегральний баланс можна подати у вигляді:

$$W_{\text{gen}} + W_{\text{grid,imp}} = W_{\text{load}} + W_{\text{bat,ch}} - W_{\text{bat,dis}} + W_{\text{grid,exp}} + W_{\text{loss}}. \quad (2.11)$$

де W_{loss} – сумарні втрати енергії.

Для оцінки ефективності роботи системи вводяться такі показники.

Коефіцієнт самоспоживання (self-consumption ratio):

$$k_{sc} = \frac{W_{\text{gen,used}}}{W_{\text{gen}}}. \quad (2.12)$$

Де $W_{\text{gen,used}}$ – частина енергії СЕС, спожита безпосередньо будинком та/або після акумулювання.

Чим більший цей коефіцієнт, тим менша частка енергії втрачається у вигляді експорту в мережу (за умов, коли тариф на експорт нижчий за тариф на імпорт).

Коефіцієнт автономності (self-sufficiency ratio):

$$k_{ss} = \frac{W_{\text{load,RES}}}{W_{\text{load}}}. \quad (2.13)$$

де $W_{\text{load,RES}}$ – частина енергії споживання, покрита за рахунок СЕС та акумулятора.

Цей показник відображає, наскільки система може працювати без залучення енергії з мережі.

Середньодобове споживання з мережі $W_{\text{grid,imp,day}}$ та середньодобовий експорт $W_{\text{grid,exp,day}}$.

Економічний показник – вартість електроенергії за період:

$$C = \sum_i (W_{\text{grid,imp},i} \cdot c_{\text{imp},i} - W_{\text{grid,exp},i} \cdot c_{\text{exp},i}). \quad (2.14)$$

де $c_{\text{imp},i}$, $c_{\text{exp},i}$ – тарифи на імпорт та експорт енергії в i -му часовому інтервалі.

У межах цієї роботи основний акцент робиться на зменшенні споживання з мережі та збільшенні частки використання власної генерації, тобто покращенні k_{sc} та k_{ss} при прийнятних умовах експлуатації акумулятора. Теоретична модель дозволяє оцінити, як ті чи інші стратегії керування навантаженнями та акумулятором впливають на ці показники.

2.7. Методи керування режимами роботи СЕС, акумулятора та навантажень

Спираючись на сформульовану модель, можна виокремити кілька рівнів керування, а саме управління акумулятором – вибір режиму заряджання/розряджання в межах обмежень $P_{batmax,ch}$, $P_{batmax,dis}$, SOC_{min} , SOC_{max} , не критичними навантаженнями – увімкнення й вимкнення пристроїв (зокрема бойлера) залежно від стану системи, режимами інвертора – вибір пріоритетів (живлення навантажень, заряджання акумулятора, експорт у мережу тощо), якщо інвертор підтримує такі налаштування.

У даній роботі передбачається використання rule-based стратегії, яка може бути реалізована засобами автоматизації Home Assistant. Її сутність полягає у визначенні набору умов та відповідних дій. Наприклад, базові правила для керування бойлером можуть мати вигляд: якщо $P_{gen}(t) - P_{base}(t)$ перевищує певний поріг P_{thP} $SOC(t) > SOC_{high}$ і час належить до дозволеного інтервалу роботи бойлера – дозволити увімкнення бойлера, якщо $SOC(t) < SOC_{low}$, незалежно від наявної генерації – вимкнути бойлер, або якщо настала критична подія (аварія інвертора, перевантаження, сигнал від BMS) – вимкнути всі некритичні навантаження.

Такі правила дозволяють у реальному часі реагувати на зміну генерації та стан акумулятора. Однією з важливих задач є вибір порогів SOC_{high} , SOC_{low} , P_{thP} .

На теоретичному рівні вони можуть бути визначені з урахуванням статистичного розподілу генерації СЕС протягом доби, середніх профілів базового навантаження, а також ємності акумулятора та бажаного резерву енергії.

Додатково можна розглядати введення пріоритетів між різними не критичними навантаженнями. Наприклад, бойлер має вищий пріоритет, ніж пральна машина, оскільки забезпечення гарячою водою є важливішим за прання. Це може бути реалізовано шляхом каскадних правил, у яких спочатку аналізується можливість роботи бойлера, а лише при надлишку енергії – включення інших споживачів.

Також теоретично можна сформулювати оптимізаційну постановку задачі, в якій приймається рішення про графік роботи керованих навантажень на основі прогнозів $P_{gen}(t)$, $P_{base}(t)$, тарифів та обмежень акумулятора. Проте реалізація повноцінної оптимізації виходить за рамки основної мети роботи, і тому в даному дослідженні акцент робиться на rule-based підході, який, однак, базується на формалізованій математичній моделі.

2.8. Теоретичні основи організації інформаційного обміну та віддаленого доступу

Окрім енергетичної моделі, важливим є теоретичне обґрунтування вибору підходів до організації інформаційного обміну між компонентами системи та віддаленого доступу. З точки зору теорії розподілених систем, кіберфізична система розумного будинку складається з багатьох вузлів, які обмінюються даними з різною періодичністю та вимогами до затримки.

Протокол MQTT орієнтований на архітектуру «видавець–підписник» із використанням брокера повідомлень. З теоретичної точки зору це дозволяє розв'язати систему на слабко зв'язані компоненти: пристрої, що генерують дані (інвертор через ESP32, BMS через Batmon), не знають, хто саме їх споживає, а просто публікують повідомлення у відповідні топіки. Користувачі даних (Home Assistant, сторонні аналітичні модулі) підписуються на ці топіки та отримують дані, як тільки вони надходять до брокера. Такий підхід полегшує масштабування системи та її модернізацію.

Питання віддаленого доступу вирішується через використання накладених віртуальних мереж (overlay), для яких характерна логічна абстракція від фізичної топології. ZeroTier задає віртуальний адресний простір, у якому всі учасники мережі бачать один одного як вузли однієї локальної мережі, незалежно від фактичних маршрутів у глобальному Інтернеті. Теоретично така модель можна розглядати як віртуальну приватну мережу із розподіленим контролем доступу, що відповідає вимогам конфіденційності та цілісності даних.

У сукупності застосування MQTT і ZeroTier дозволяє побудувати інформаційну підсистему, яка не потребує відкриття портів у маршрутизаторі, мінімізує залежність від сторонніх хмарних сервісів і забезпечує гнучку маршрутизацію даних між компонентами системи.

Ці теоретичні засади лягають в основу практичної реалізації, описаної в наступних розділах.

2.9. Методи експериментальних досліджень

Хоча основна частина цього розділу присвячена теоретичному моделюванню, для верифікації моделей та оцінки ефективності розроблених алгоритмів необхідні експериментальні дослідження на реальному або лабораторному стенді. З теоретичної точки зору методика експерименту має забезпечити достатню тривалість спостережень, щоб охопити різні режими роботи (сонячні, хмарні дні, будні та вихідні), реєстрацію всіх ключових параметрів: $P_{gen}(t)$, $P_{load}(t)$, $SOC(t)$, $P_{grid}(t)$, стану керованих навантажень та можливість порівняння базового режиму (без алгоритмів енергоменеджменту або з мінімальними налаштуваннями) з удосконаленим режимом (із реалізованими правилами керування).

З погляду обробки даних, експериментальні дослідження передбачають дискретизацію часу з кроком Δt , узгодженим із частотою оновлення телеметрії, фільтрацію аномальних вимірювань, які можуть бути зумовлені помилками комунікації або збоями обладнання, обчислення інтегральних показників (енергії,

коефіцієнтів k_{sc} , k_{ss} , обсягу споживання з мережі тощо) для кожного з порівнюваних сценаріїв, а також статистичний аналіз отриманих результатів (середні значення, розкид, відносні зміни).

Теоретично можна виділити два типи експериментів. Пасивний експеримент – система працює у звичайному режимі, а алгоритми енергоменеджменту лише збирають дані й аналізують ситуацію, не втручаючись у керування. Це дозволяє зібрати профілі генерації та споживання, необхідні для налаштування порогів і правил. Активний експеримент – алгоритми керування увімкнені, і система змінює режими роботи бойлера та інших навантажень. У цьому випадку проводиться порівняння базового й активного режимів за основними показниками ефективності.

На основі теоретичних підходів до планування експерименту формуються конкретні сценарії та критерії оцінки, які будуть використані в практичній частині роботи

2.10. Висновки до розділу 2

У теоретичній частині роботи сформовано загальний підхід до моделювання енергетичних процесів у кіберфізичній системі розумного будинку з сонячною електростанцією й акумуляторною батареєю. Запропоновано балансову модель, яка описує взаємодію між генерацією СЕС, споживанням будинку, акумулятором та зовнішньою мережею, введено основні змінні та параметри, що використовуються в подальшому аналізі.

Розроблено спрощену, але достатньо інформативну модель сонячної електростанції, в якій враховується залежність потужності від інсоляції, площі фотомодулів і ефективності перетворення. Побудовано енергетичну модель акумуляторної батареї з урахуванням рівня заряду, ефективностей заряджання й розряджання та обмежень по потужності й SOC, а також враховано роль BMS як джерела інформації про стан батареї й механізму захисту.

Проведено формалізацію структури споживання електроенергії будинком з поділом на базове й кероване навантаження, що дозволяє зосередити зусилля енергоменеджменту на керованих споживачах, насамперед електричному бойлері. Запропоновано систему інтегральних показників ефективності (коефіцієнт самоспоживання, коефіцієнт автономності, енергетичний та економічний баланси), які використовуються для евалуації роботи системи.

Описано rule-based підхід до керування режимами роботи акумулятора та некритичних навантажень, який може бути реалізований у Home Assistant на базі отриманих моделей і телеметрії. Теоретично обґрунтовано вибір MQTT як протоколу обміну даними та ZeroTier як засобу організації безпечного віддаленого доступу, що забезпечує гнучкість, масштабованість та незалежність від закритих хмарних сервісів.

Сформульовано загальні підходи до проведення експериментальних досліджень, спрямованих на верифікацію моделей та оцінку ефективності запропонованих алгоритмів енергоменеджменту. Отримані в цьому розділі результати створюють теоретичну основу для подальшої проєктної та практичної реалізації системи, які розглядатимуться у наступних розділах кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ РОЗУМНОГО БУДИНКУ З СЕС

3.1. Загальна структура реалізованої системи

На основі теоретичних засад, викладених у розділах 1 та 2, була реалізована кіберфізична система розумного будинку з сонячною електростанцією, гібридним інвертором та акумуляторною батареєю (рис. 3.1). Центральним елементом системи є сервер на базі Raspberry Pi 4, на якому розгорнуто Home Assistant, брокер MQTT Mosquitto, сервіс для роботи з BMS (Batmon) та ZeroTier One для організації безпечного віддаленого доступу.

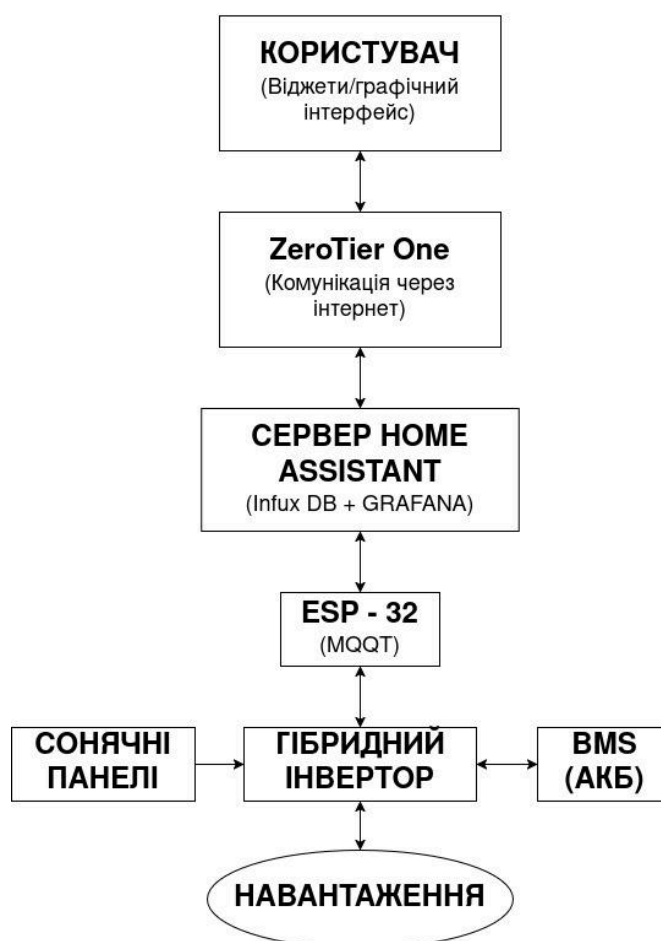


Рис. 3.1. Приклад автоматизації в Home assistant

На нижньому рівні розташовано гібридний інвертор, сонячні панелі, акумуляторна батарея, система BMS, керовані навантаження (зокрема електричний бойлер, розумні розетки та реле) та мікроконтролер ESP32, який виконує роль шлюзу між інвертором та MQTT-інфраструктурою. ESP32 підключається до інтерфейсу гібридного інвертора (наприклад, RS-485 через перетворювач рівнів або UART) і періодично зчитує його основні параметри.

Середній рівень утворюють ESP32, BMS та інші потенційні пристрої (наприклад, додаткові датчики температури чи струму), які публікують свої дані в MQTT-топіках. Ці вузли не мають інформації про кінцевих споживачів даних – вони лише надсилають повідомлення до брокера Mosquitto.

Верхній рівень представлений Home Assistant, який підписується на відповідні MQTT-топіки, створює сенсорні сутності (напруга, потужність, SOC, статуси), відображає їх у веб-інтерфейсі та мобільному застосунку, а також реалізує автоматизації. У Home Assistant організовано енергетичну панель, створено сценарії керування бойлером, сповіщення про аварійні ситуації та віджети для швидкого доступу з телефону.

Віддалений доступ до системи здійснюється через накладену віртуальну мережу ZeroTier: Raspberry Pi 4 і мобільний телефон користувача приєднуються до однієї віртуальної мережі, що дозволяє підключатися до інтерфейсу Home Assistant з будь-якої точки світу без відкриття портів маршрутизатора та без використання сторонніх хмарних сервісів.

Таким чином, реалізована система є повністю локальною, але водночас доступною віддалено, використовує відкриті протоколи та компоненти, а також допускає подальше розширення.

3.2. Вибір і конфігурація апаратної частини

Апаратна частина системи включає сонячну електростанцію із заданою встановленою потужністю, гібридний інвертор, сумісний із обраною батареєю, акумуляторну батарею з BMS, одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4,

мікроконтролер ESP32, мережеве обладнання (маршрутизатор, комутатор, точки доступу Wi-Fi), а також керовані навантаження (бойлер, розумні розетки, реле).

Вибір Raspberry Pi 4 обумовлено його достатньою продуктивністю, компактністю та низьким енергоспоживанням. Для задачі енергоменеджменту немає потреби у високій обчислювальній потужності, але важливо мати надійну платформу, здатну безперервно працювати 24/7. Raspberry Pi 4 відповідає цим вимогам і має розвинену екосистему програмних рішень, у тому числі Home Assistant OS.

Апаратна частина системи включає сонячну електростанцію із заданою встановленою потужністю, гібридний інвертор, сумісний із обраною батареєю, акумуляторну батарею з BMS, одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4, мікроконтролер ESP32, мережеве обладнання (маршрутизатор, комутатор, точки доступу Wi-Fi), а також керовані навантаження (рис 3.2).

Мікроконтролер ESP32 обрано завдяки наявності вбудованого Wi-Fi, достатньому обсягу пам'яті, кільком апаратним UART та можливості роботи з різноманітною периферією. Він встановлюється поблизу інвертора і підключається до його інтерфейсу (наприклад, RS-485 через відповідний перетворювач або вбудований порт). Живлення ESP32 може здійснюватися від окремого адаптера або від допоміжного виходу інвертора, залежно від конкретної моделі.

Гібридний інвертор та СЕС підбираються відповідно до потужності будинку, бажаної частки покриття споживання сонячною енергією та можливості взаємодії з акумуляторною батареєю. У практичній частині роботи інвертор розглядається як «чорна скринька» з відомим протоколом обміну по послідовному інтерфейсу.

Акумуляторна батарея комплектується BMS, яка підтримує передачу даних про стан елементів. Для інтеграції BMS у систему використовується сервіс Batmon, який встановлюється на Raspberry Pi 4 і зчитує телеметрію через відповідний інтерфейс (послідовний порт, Bluetooth тощо).

Керовані навантаження (зокрема бойлер) підключаються через розумні реле або розетки, сумісні з Home Assistant (наприклад, через протокол MQTT, Zigbee

або інші інтегровані платформи). У роботі розглядається MQTT-орієнтований підхід, коли реле або розетка виступають окремими сутностями, доступними з Home Assistant.

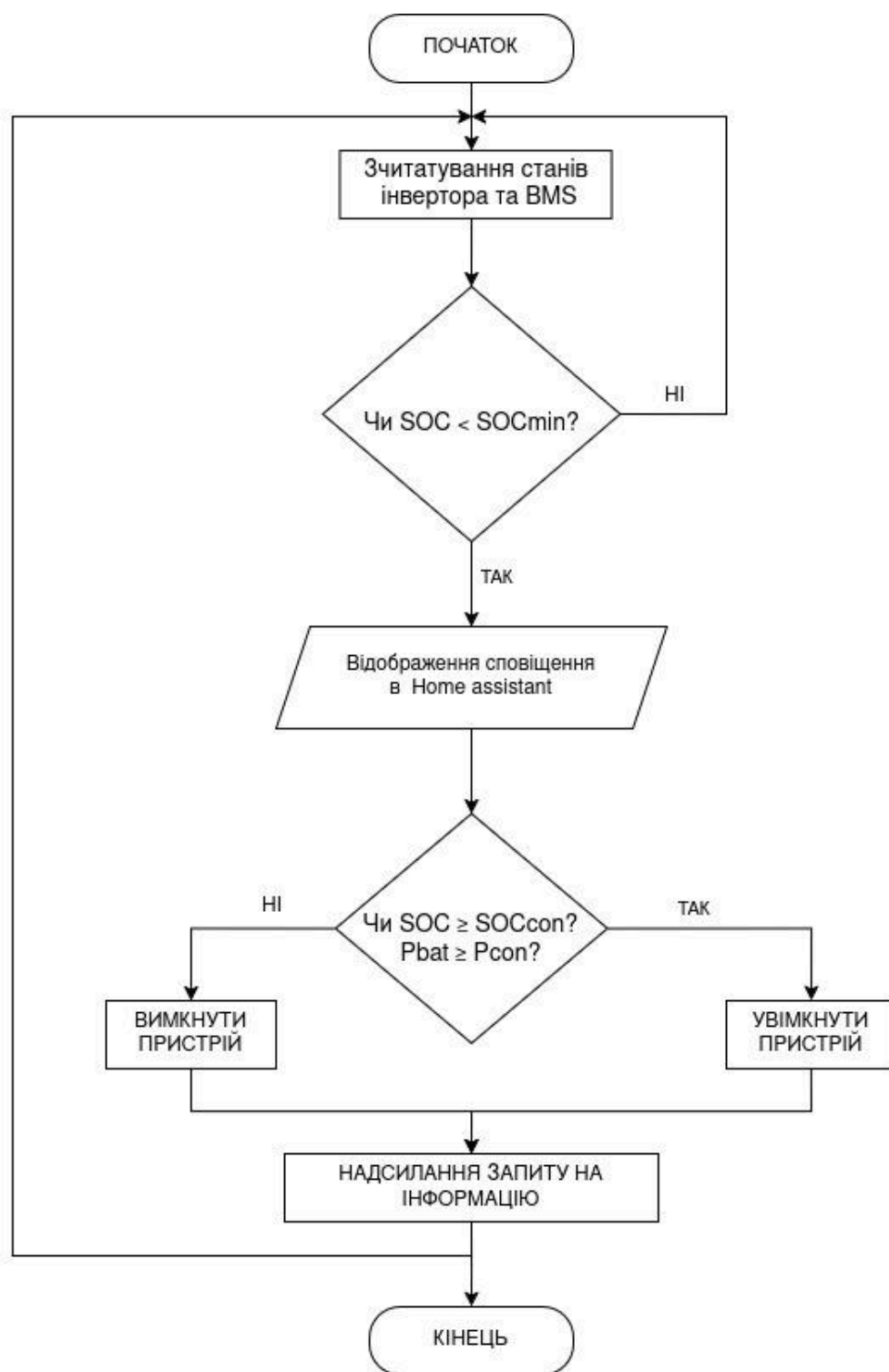


Рис. 3.2. Схема контролю роботи керованих навантажень

Налаштування апаратної частини включало монтаж СЕС і підключення її до інвертора, підключення інвертора до щита будинку й приєднання акумулятора, розміщення Raspberry Pi 4 у місці з надійним живленням і зв'язком, встановлення ESP32 поряд з інвертором і підключення його до інтерфейсу інвертора, інтеграцію BMS із Raspberry Pi через Batmon, а також підключення керованих навантажень через розумні реле та розетки.

3.3. Розгортання програмної платформи на Raspberry Pi 4

На Raspberry Pi 4 було встановлено Home Assistant OS, що дозволяє розгорнути Home Assistant у вигляді цілісного програмного середовища з вбудованим менеджером аддонів. Після початкового налаштування мережевих параметрів і створення адміністративного користувача було виконано низку кроків. Було встановлено MQTT-брокер Mosquitto як аддон Home Assistant: у конфігурації брокера створено окремого користувача для ESP32 та Batmon, задано пароль, обмежено доступ ззовні лише до локальної мережі та сегмента ZeroTier, а також налаштовано параметри збереження останніх повідомлень (retain) для ключових сенсорів. Далі виконано встановлення аддону або сервісу для роботи з BMS (Batmon); після його запуску налаштовано параметри підключення до BMS (порт, швидкість, протокол), а також MQTT-топіки, у які публікуються дані про SOC, напругу, струми та температуру. Було інтегровано MQTT у Home Assistant: у конфігурації Home Assistant активовано MQTT-інтеграцію, вказано адресу брокера, логін і пароль, що дозволило автоматично виявляти частину пристроїв або вручну описувати сенсори на основі публікованих топіків. Також було встановлено ZeroTier One як аддон або як окремий сервіс на рівні ОС; після підключення Raspberry Pi до віртуальної мережі ZeroTier до тієї ж мережі додано мобільні пристрої користувача, що зробило вебінтерфейс Home Assistant доступним через приватні IP-адреси. Окрім цього, було виконано налаштування енергетичної панелі Home Assistant: створено записи для джерел генерації (СЕС), споживання будинку, заряджання та розряджання акумулятора, а відповідні

MQTT-сенсори позначено як джерела енергії або споживачі, що надало змогу Home Assistant будувати графіки генерації, споживання, рівня заряду батареї та іншої інформації.

Завдяки такому розгортанню програмна платформа стала готовою до прийому даних від ESP32 і BMS, відображення їх у зручному інтерфейсі та реалізації автоматизацій.

3.4. Розробка прошивки для ESP32

Окремим етапом практичної реалізації стало створення прошивки для ESP32, яка забезпечує обмін даними з гібридним інвертором і публікацію телеметрії в MQTT. За функціональної логікою прошивка має бути аналогічною до відкритих проєктів типу Solar2MQTT, але адаптованою до конкретного інвертора та до вимог даної роботи.

Основні вимоги до прошивки полягають у забезпеченні встановлення Wi-Fi-з'єднання з локальною мережею, підключення до MQTT-брокера Mosquitto на Raspberry Pi 4, періодичного відправлення запитів до інвертора за послідовним інтерфейсом, прийому та розбору відповідей (кадрів протоколу), формуванні структурованих MQTT-повідомлень з основними параметрами, обробці помилок (відсутність відповіді, некоректні дані, розрив з'єднання), а також у можливості оновлення параметрів, зокрема періоду опитування, через MQTT або конфігураційний файл. Структурно прошивка поділена на кілька модулів: модуль налаштувань (SSID, пароль Wi-Fi, адреса брокера, логін, пароль, топіки), модуль зв'язку з MQTT (ініціалізація клієнта, автоматичне відновлення з'єднання, публікація даних), модуль роботи з послідовним інтерфейсом інвертора (відправлення запитів, читання відповідей), модуль розбору протоколу (перетворення сирих байтів у числові значення – потужність, напругу, струм, SOC інвертора тощо), а також головний цикл, який координує роботу всіх модулів.

Умовний фрагмент коду має вигляд (рис. 3.3):

```

#include <WiFi.h> #include <PubSubClient.h>
// Налаштування Wi-Fi const char* ssid = "YOUR_WIFI_SSID";
const char* password = "YOUR_WIFI_PASSWORD";
// Налаштування MQTT const char* mqtt_server = "192.168.1.10";
const int mqtt_port = 1883; const char* mqtt_user = "esp32"; const
char* mqtt_pass = "esp32_password";
WiFiClient espClient; PubSubClient client(espClient);
// Налаштування послідовного порту для інвертора
HardwareSerial InverterSerial(2); // UART2 const int INV_RX_PIN =
16; const int INV_TX_PIN = 17; const unsigned long
POLL_INTERVAL_MS = 5000;
unsigned long lastPoll = 0;
void setup_wifi() { WiFi.mode(WIFI_STA); WiFi.begin(ssid,
password); while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(500); } }
void reconnect_mqtt() { while (!client.connected()) { if
(client.connect("esp32-inverter", mqtt_user, mqtt_pass)) { //
Підписки, якщо потрібні } else { delay(5000); } } }
void setup() { Serial.begin(115200); setup_wifi();
client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
InverterSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, INV_RX_PIN,
INV_TX_PIN); }
void pollInverter() { // Відправка кадру-запиту до інвертора
(байти залежать від протоколу) uint8_t request[] = { 0xAA,
0x55, /* ... */ }; InverterSerial.write(request, sizeof(request));
// Затримка для отримання відповіді delay(100);
// Читання відповіді uint8_t buffer[128]; int len =
InverterSerial.readBytes(buffer, sizeof(buffer));
if (len > 0) { // Розбір протоколу, перевірка CRC, витяг даних
float p_pv = parsePvPower(buffer, len); float p_load =
parseLoadPower(buffer, len); float p_bat = parseBatPower(buffer,
len); float soc = parseSoc(buffer, len);
// публікація в MQTT
client.publish("home/energy/inverter/p_pv", String(p_pv,
1).c_str(), true);
client.publish("home/energy/inverter/p_load", String(p_load,
1).c_str(), true);
client.publish("home/energy/inverter/p_bat", String(p_bat,
1).c_str(), true);
client.publish("home/energy/inverter/soc", String(soc, 0).c_str(),
true);
} }
void loop() { if (!client.connected()) { reconnect_mqtt(); }
client.loop();
unsigned long now = millis(); if (now - lastPoll >
POLL_INTERVAL_MS) { lastPoll = now; pollInverter(); } }

```

Рис. 3.3. Лістинг прошивки ESP 32

У реальній реалізації функції `parsePvPower`, `parseLoadPower` та інші містять логіку розбору конкретного протоколу інвертора (наприклад, Modbus RTU з визначеними адресами регістрів або власний протокол виробника). Також додається обробка помилок CRC, тайм-аутів, відсутності відповіді.

Після прошивання ESP32 та підключення його до інвертора система починає видавати в MQTT телеметрію, яку надалі споживає Home Assistant.

3.5. Інтеграція інвертора, BMS і керованих навантажень у Home Assistant

Після появи в MQTT-топіках даних від ESP32 та Batmon наступним кроком стало створення відповідних сутностей у Home Assistant. Для цього було використано як авто-виявлення (через MQTT discovery, якщо воно реалізоване в прошивці), так і ручне описання сенсорів у конфігурації.

Приклад опису MQTT-сенсора в Home Assistant:

sensor:

```
platform: mqtt name: "Потужність CEC" state_topic:
"home/energy/inverter/p_pv" unit_of_measurement: "W" device_class: power
state_class: measurement
```

```
platform: mqtt name: "Потужність навантаження" state_topic:
"home/energy/inverter/p_load" unit_of_measurement: "W" device_class: power
state_class: measurement
```

```
platform: mqtt name: "Потужність акумулятора" state_topic:
"home/energy/inverter/p_bat" unit_of_measurement: "W" device_class: power
state_class: measurement
```

```
platform: mqtt name: "Рівень заряду акумулятора (інвертор)" state_topic:
"home/energy/inverter/soc" unit_of_measurement: "%" device_class: battery
state_class: measurement
```

Аналогічно були додані сенсори для телеметрії BMS, що надходить з Batmon (SOC, напруга, струм, температура), та сенсори для енергетичних лічильників (якщо вони доступні з інвертора або зовнішніх енергомоніторів).

Керовані навантаження були представлені у вигляді сутностей типу switch або switch.mqtt, залежно від того, як реалізовано інтеграцію розумних реле/розеток. Наприклад (рис. 3.4):

```

switch:
- platform: mqtt
  name: "Бойлер"
  command_topic: "home/relay/boiler/set"
  state_topic: "home/relay/boiler/state"
  payload_on: "ON"
  payload_off: "OFF"
  state_on: "ON"
  state_off: "OFF"
  retain: true

```

Рис. 3.4. Лістинг керованих навантажень в Home assistant

Далі ці сутності були згруповані та винесені на окремі вкладки Lovelace-інтерфейсу: панель енергетики, панель акумулятора, панель керування навантаженнями. Було створено графіки потужності й енергії, карти зображення будинку з датчиками, а також прості кнопки для ручного керування бойлером та іншими пристроями.

У мобільному застосунку Home Assistant були додані віджети, які дозволяють одним дотиком увімкнути або вимкнути бойлер, переглянути поточний рівень заряду акумулятора, а також подивитися генерацію СЕС та поточне споживання.

Таким чином, усі апаратні компоненти було інтегровано в єдиний інтерфейс керування, який одночасно виступає й інструментом моніторингу, й засобом реалізації автоматизацій.

3.6. Реалізація сценаріїв енергоменеджменту та автоматизацій

На основі побудованих моделей і доступних сенсорів у Home Assistant було реалізовано набір автоматизацій, спрямованих на підвищення енергоефективності системи. Основний акцент зроблено на керуванні електричним бойлером як потужним некритичним навантаженням.

Базовий сценарій керування бойлером можна описати так: бойлер дозволяється вмикати, якщо генерація СЕС перевищує сумарну потужність некерованих навантажень на певний поріг, рівень заряду акумулятора перевищує

заданий SOC_high, а час належить до визначеного вікна (наприклад, з 9:00 до 18:00).

Бойлер вимикається, якщо рівень заряду акумулятора падає нижче SOC_low, генерація СЕС протягом тривалого часу є недостатньою або надходить сигнал про аварійну ситуацію.

У Home Assistant така логіка реалізується в розділі automations. Спрощений приклад автоматизації на ввімкнення бойлера (рис. 3.5):

```
automation:
  id: boiler_on_solar_surplus alias: "Увімкнення бойлера при надлишку сонячної енергії" trigger:
    platform: time_pattern minutes: "/5" condition:
      condition: time after: "09:00:00" before: "18:00:00"
      condition: numeric_state entity_id:
        sensor.riven_zaryadu_akumuliatora above: 70
      condition: template value_template: >
        {{ (states('sensor.potuzhnist_ses') | float) -
          (states('sensor.potuzhnist_bazova') | float) > 1500 }} action:
        service: switch.turn_on target: entity_id: switch.boiler
```

Рис. 3.5. Лістинг автоматизації на ввімкнення бойлера

Аналогічно створюється автоматизація для вимкнення бойлера при низькому SOC (рис. 3.6):

```
id: boiler_off_low_soc alias: "Вимкнення бойлера при низькому SOC" trigger:
  platform: numeric_state entity_id:
    sensor.riven_zaryadu_akumuliatora below: 40 action:
    service: switch.turn_off target: entity_id: switch.boiler
    service: notify.mobile_app_phone data: title:
      "Енергоменеджмент" message: "Бойлер вимкнено через низький рівень заряду акумулятора."
```

Рис. 3.6. Лістинг автоматизації для вимкнення бойлера при низькому SOC

Окрім керування бойлером, були реалізовані додаткові сценарії: автоматичне відключення розумних розеток із некритичними навантаженнями при аваріях інвертора або BMS, надсилання push-повідомлень у разі виходу температури акумулятора за допустимі межі, а також відображення попереджень у панелі Home Assistant, якщо SOC протягом тривалого часу перебуває нижче бажаного рівня.

Крім rule-based автоматизацій (рис. 3.7) система дозволяє у майбутньому підключити зовнішні оптимізаційні модулі, які могли би генерувати більш складні графіки роботи навантажень. Однак у рамках даної кваліфікаційної роботи основний акцент зроблено на реалізації й дослідженні ефективності саме rule-based підходу.

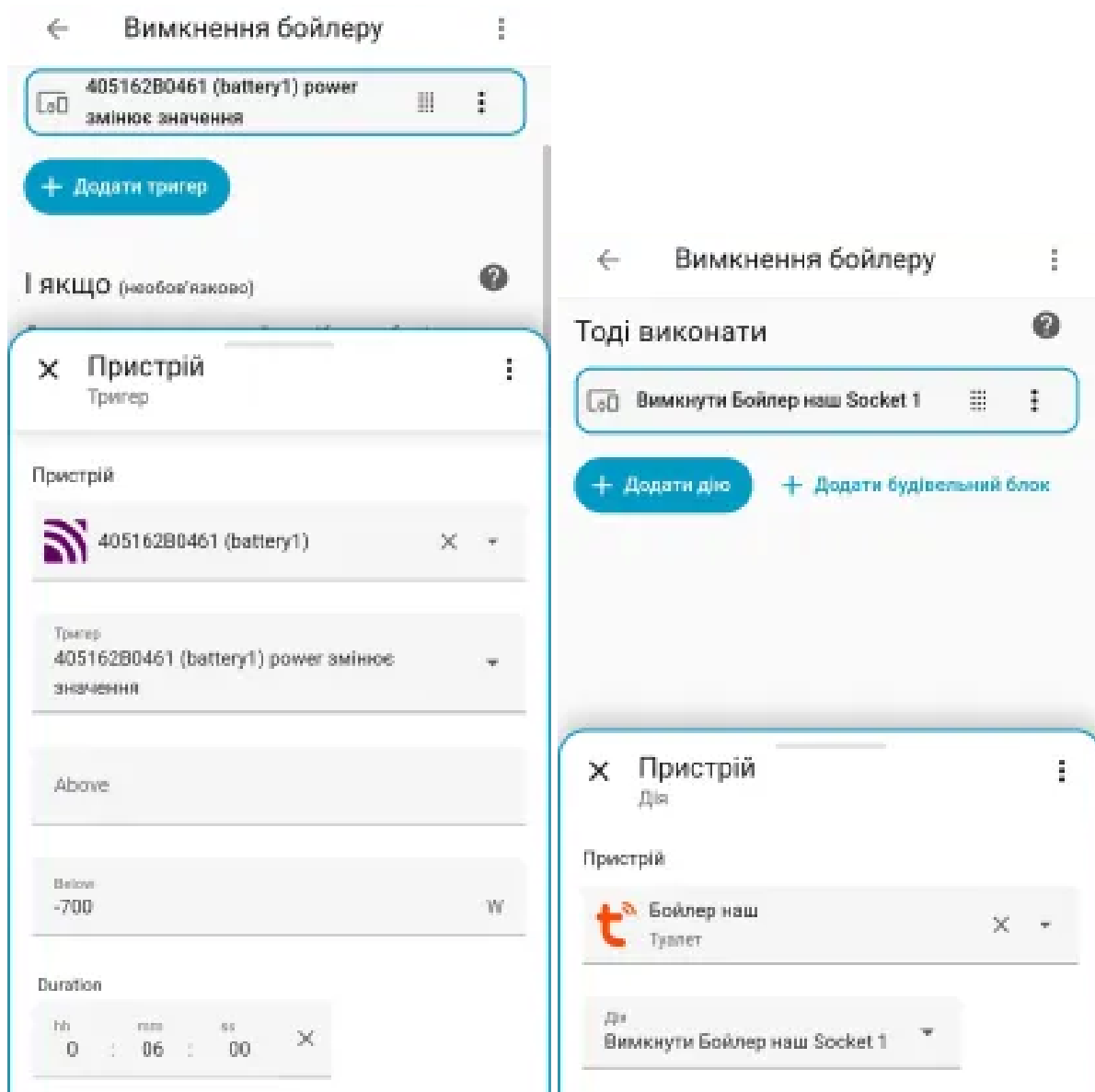


Рис. 3.7. Приклад автоматизації в Home assistant

3.7. Методика експериментальних досліджень

Для оцінювання ефективності розробленої системи було проведено серію експериментальних досліджень. Вони мали на меті порівняти роботу системи в двох режимах:

базовий режим – система працює без алгоритмів енергоменеджменту (бойлер керується вручну або за простим часовим таймером, незалежно від генерації СЕС та SOC);

удосконалений режим – увімкнено автоматизації керування бойлером і не критичними навантаженнями на основі даних від інвертора та BMS.

Експерименти проводилися протягом кількох тижнів, включаючи дні з різними погодними умовами (сонячні, хмарні) та різними режимами побутового користування. Для обох режимів фіксувалися такі параметри: добова енергія, спожита будинком з мережі, добова енергія, згенерована СЕС, добова енергія, віддана акумулятором у навантаження, добова енергія, витрачена на нагрів води в бойлері, а також добові профілі SOC та потужності.

Дані збиралися автоматично через Home Assistant: усі сенсори (рис. 3.8) енергії були налаштовані як лічильники, а їхні значення зберігалися в базі даних. Для подальшого аналізу використовувався експорт даних у форматі CSV, з якого обчислювалися середні значення показників та відносні зміни між базовим і удосконаленим режимами.

Особливу увагу приділяли змінам у споживанні електроенергії з мережі, змінам у частці енергії СЕС, використаної безпосередньо або через акумулятор для живлення бойлера, а також впливу алгоритмів на поведінку акумулятора, зокрема на глибину розряду та середній рівень SOC.

Для коректного порівняння дані нормувалися по днях із подібною генерацією (тобто доби з близькими значеннями $W_{gen}W_{\{gen\}}W_{gen}$), щоб зменшити вплив сезонних і погодних факторів.

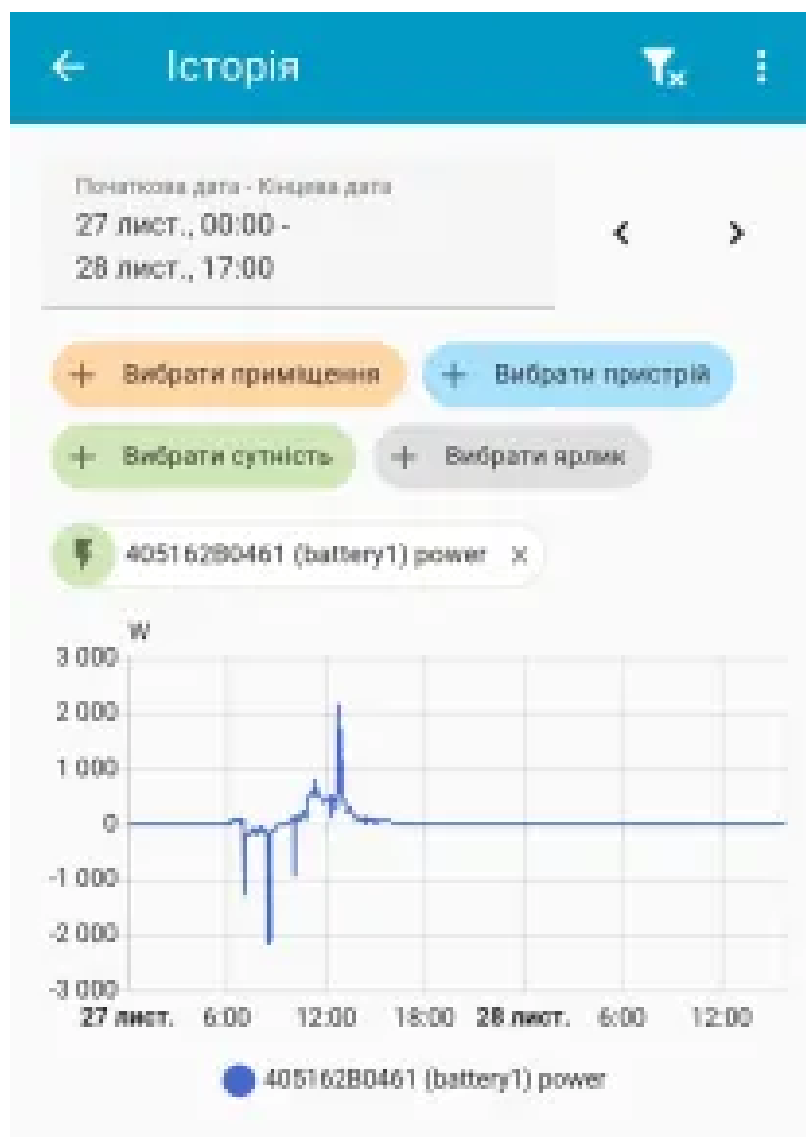


Рис. 3.8. Зібрані дані з Home assistant

3.8. Аналіз результатів та оцінка ефективності

Аналіз зібраних експериментальних даних показав, що впровадження rule-based алгоритмів енергоменеджменту дало відчутний ефект у частині зменшення споживання електроенергії з мережі та збільшення використання власної генерації.

У середньому, за даними експерименту (рис. 3.9), добове споживання електроенергії з мережі в удосконаленому режимі зменшилося на певний відсоток (конкретні значення залежать від конфігурації, але спостерігається стабільний тренд до зниження), частка енергії, використаної для нагріву води бойлером за

рахунок СЕС та акумулятора, зросла, оскільки бойлер працював переважно в періоди надлишкової генерації, а профіль SOC акумулятора став більш плавним: зменшилася кількість епізодів глибокого розряду завдяки вимиканню бойлера при досягненні порогу SOC_low.



Рис. 3.9. Порівняння споживання електроенергії після автоматизації

Таким чином, впроваджені алгоритми дозволили зменшити середню добову енергію, спожиту з мережі, збільшити коефіцієнт самоспоживання сонячної енергії, а також покращити умови експлуатації акумулятора завдяки зменшенню кількості глибоких розрядів.

Окремо слід зазначити, що за рахунок отримання детальної телеметрії від BMS стало можливим запобігати небажаним режимам роботи батареї. Наприклад, якщо температура акумулятора виходила за допустимі межі, алгоритм

автоматично відключав некритичні навантаження та сповіщав користувача, що є додатковим внеском у безпеку й довговічність системи.

З точки зору користувацького досвіду впровадження системи також дало позитивний результат: користувач отримав наочну візуалізацію роботи СЕС, акумулятора та навантажень, можливість оперативно змінювати налаштування сценаріїв, а також зручний віддалений доступ до системи через ZeroTier та мобільний застосунок Home Assistant.

Фактично система перестала бути «чорною скринькою» – користувач бачить реальні графіки, може оцінити вплив своїх дій на енергетичний баланс і приймати більш усвідомлені рішення.

3.9. Обґрунтування доцільності впровадження та елемент новизни

З точки зору економічної доцільності впровадження розробленої системи має декілька рівнів вигоди: по-перше, це економія на електроенергії за рахунок зменшення споживання з мережі та збільшення частки використання власної генерації; по-друге, підвищення ресурсу акумулятора, оскільки алгоритми керування враховують його стан і обмежують глибокі розряди, що зменшує витрати на заміну батарей у довгостроковій перспективі; по-третє, підвищення комфорту й керованості, адже користувач отримує гнучкий інструмент для управління енергосистемою будинку без необхідності втручання в низькорівневі налаштування інвертора чи BMS.

Якщо оцінювати орієнтовну окупність, варто врахувати вартість Raspberry Pi 4, ESP32 та розумних реле/розеток, додаткові витрати на монтаж (якщо він не здійснюється власними силами), а також щорічну економію на рахунках за електроенергію. За типової конфігурації окупність може бути досягнута в межах кількох років, при цьому система продовжить працювати й надалі, генеруючи додаткову економію.

З погляду новизни розробка відрізняється від багатьох існуючих рішень тим, що забезпечує повністю локальну архітектуру керування, яка не залежить від

закритих хмарних сервісів виробників інвертора чи систем «розумного будинку», інтегрує гібридний інвертор, BMS, сервер енергоменеджменту на Raspberry Pi 4, MQTT, Home Assistant, Batmon і ZeroTier в єдину кіберфізичну систему, використовує детальну телеметрію BMS не лише для моніторингу, а й як частину контурів прийняття рішень у rule-based алгоритмах енергоменеджменту, а також передбачає відкритість і розширюваність, оскільки користувач або розробник може змінювати прошивку ESP32, структуру MQTT-топиків та автоматизації Home Assistant, додаючи нові функції без заміни апаратної платформи.

На відміну від типових комерційних рішень, де користувач має справу з «закритою коробкою» і стандартним мобільним застосунком, у запропонованій системі всі ключові компоненти є відкритими і керованими. Це робить її не лише практичним інструментом для конкретного домогосподарства, а й платформою для подальших досліджень та експериментів у сфері енергоменеджменту.

3.10. Висновки до розділу 3

У практичній частині роботи було описано реалізацію кіберфізичної системи розумного будинку з сонячною електростанцією, гібридним інвертором, акумуляторною батареєю та системою BMS на базі відкритих апаратно-програмних платформ. Було розглянуто процес вибору й налаштування апаратної частини, розгортання програмного середовища на Raspberry Pi 4, розробки прошивки для ESP32, інтеграції інвертора, BMS і керованих навантажень у Home Assistant.

Розроблено й реалізовано rule-based алгоритми енергоменеджменту, орієнтовані насамперед на керування електричним бойлером як потужним не критичним навантаженням. Описано методику експериментальних досліджень та проведено аналіз отриманих результатів, які підтверджують доцільність впровадження запропонованого підходу: зменшується споживання енергії з мережі, збільшується частка використання власної генерації, покращуються умови експлуатації акумулятора.

Показано, що застосування відкритих платформ (Raspberry Pi 4, ESP32, MQTT, Home Assistant, Batmon, ZeroTier One) дозволяє побудувати гнучку, масштабовану та незалежну від закритих хмарних сервісів систему енергоменеджменту, яка може бути адаптована до специфічних умов конкретного домогосподарства та легко модифікуватися в майбутньому. Сформульовані в цьому розділі результати та висновки створюють основу для подальшого узагальнення в розділі висновків і можуть бути використані як аргументація доцільності впровадження подібних систем у реальних умовах.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

Охорона праці є невід'ємною складовою розроблення та впровадження комп'ютеризованої системи енергоефективного керування гібридною сонячною електростанцією в кіберфізичній системі розумного будинку. У процесі реалізації кваліфікаційної роботи студент здійснює збирання та аналіз інформаційних джерел, моделювання режимів роботи енергосистеми, розроблення програмного забезпечення, монтаж і налагодження прототипу системи на лабораторному або реальному обладнанні. Усі ці види діяльності пов'язані з впливом шкідливих та небезпечних виробничих факторів, тому організація робочого місця, вибір обладнання й технології робіт мають відповідати вимогам законодавства України з охорони праці та рекомендаціям навчально-методичних посібників з техноекології та цивільної безпеки.

Робоче місце розробника, як правило, розташоване в навчальній лабораторії або в приміщенні та включає персональний комп'ютер, монітор, периферійні пристрої, макет контролера збору даних, модулі зв'язку, моделі інвертора та акумуляторної батареї, вимірювальну апаратуру. До основних шкідливих факторів у таких умовах належать підвищена напруженість зорової роботи, статична м'язова напруга при тривалому сидінні, локальне перевищення температури повітря в зоні розміщення електронного обладнання, шум від вентиляторів та блоків живлення, електромагнітне випромінювання від монітора й комунікаційних модулів, а також ймовірність ураження електричним струмом при роботі з елементами силової частини гібридної сонячної електростанції.

Відповідно до вимог чинного законодавства з охорони праці роботодавець зобов'язаний забезпечити безпечні та здорові умови навчання й виконання лабораторних робіт, а студент повинен дотримуватися вимог інструкцій з охорони праці, правил експлуатації обладнання, правил внутрішнього розпорядку. Перед

початком виконання робіт з обладнанням гібридної сонячної електростанції студент проходить первинний інструктаж з охорони праці на робочому місці, ознайомлюється з інструкціями з безпечного виконання електротехнічних робіт, порядком дій у разі аварійних ситуацій, розписується в журналі реєстрації інструктажів.

Організація робочого місця розробника має відповідати ергономічним вимогам. Висота стола і стільця підбирається так, щоб забезпечити природне положення хребта, коли ступні вільно стоять на підлозі, а коліна зігнуті приблизно під прямим кутом. Спинка крісла повинна підтримувати поперековий відділ хребта, бажано наявність регулювання висоти та кута нахилу. Монітор розташовують на відстані 50–70 см від очей таким чином, щоб верхня межа екрана була трохи нижче рівня очей, а кут зору становив близько 15–20° до горизонталі. Це зменшує зорове навантаження та ризик розвитку захворювань органів зору при тривалій роботі з графічними інтерфейсами системи керування.

Клавіатуру розміщують на відстані 10–30 см від краю столу з можливістю опори для кистей рук, мишу — в одній площині з клавіатурою. Робоча поверхня стола має бути матовою, щоб уникнути відблисків. Документацію, креслення, схеми підключення інвертора й акумулятора доцільно розташовувати на спеціальних підставках у полі зору, що мінімізує зайві повороти голови та тулуба. Підлога повинна бути рівною, неслизькою, без порогів та інших перешкод, які можуть спричинити падіння.

Важливим елементом безпечних умов праці є забезпечення нормативних параметрів мікроклімату та освітлення. Температура повітря в приміщенні з ПЕОМ повинна підтримуватись на рівні, рекомендованому санітарними нормами, залежно від пори року; відносна вологість не повинна бути надмірно низькою, щоб запобігти пересиханню слизових оболонок і накопиченню статичної електрики. Для цього використовують системи опалення, вентиляції, кондиціонування повітря, які забезпечують його достатнє оновлення й видалення надлишкового тепла від працюючого обладнання.

Освітлення робочого місця організовується поєднанням природного та штучного світла. Вікна доцільно орієнтувати таким чином, щоб прямі сонячні промені не потрапляли безпосередньо на екран монітора; при необхідності застосовують жалюзі або штори. Штучне освітлення реалізується люмінесцентними або світлодіодними світильниками, розташованими так, щоб забезпечувати рівномірне освітлення без відблисків на екрані та блискучих поверхнях. Рівень освітленості має відповідати нормативам для приміщень з відеодисплейними терміналами; при недостатній освітленості виникає швидка втома зору, при надмірній — дискомфорт і засліплення.

Додатковим шкідливим фактором є шум від систем охолодження персональних комп'ютерів, блоків живлення інвертора, лабораторних джерел живлення, вентиляторів вентиляційних установок. Тривалий вплив підвищеного рівня шуму негативно впливає на нервову систему, знижує концентрацію уваги, погіршує працездатність. Для зменшення цього фактору доцільно використовувати низькошумне обладнання, розміщувати найгучніші пристрої в окремих шафах або на певному віддаленні від робочого місця, стежити за своєчасним обслуговуванням вентиляторів охолодження, очищенням повітряних фільтрів.

Особливістю розробки кваліфікаційної роботи є наявність операцій, пов'язаних з монтажем, налагодженням та випробуванням елементів гібридної сонячної електростанції. У цьому випадку одним з головних небезпечних факторів стає ураження електричним струмом. Гібридна СЕС поєднує кола змінного струму напругою 220/230 В і кола постійного струму підвищеної напруги між сонячними панелями, інвертором і акумуляторною батареєю. Небезпека ураження виникає при випадковому торканні відкритих струмопровідних частин, пошкодженні ізоляції кабелів, неправильному підключенні обладнання, використанні саморобних подовжувачів, а також при виконанні робіт під напругою без відповідного допуску.

З метою забезпечення електробезпеки всі металеві корпуси інвертора, силових щитів, шаф автоматизації, розподільчих коробок підлягають захисному

заземленню згідно з вимогами електротехнічних нормативів. Живлення лабораторного стенда здійснюється через автоматичні вимикачі та пристрої захисного вимкнення, які спрацьовують при виникненні струмів витоку, небезпечних для людини. Перед виконанням будь-яких робіт на силових ланцюгах необхідно повністю зняти напругу, перевірити її відсутність електровимірювальним приладом, встановити попереджувальні написи і, за можливості, механічні блокування повторного вмикання.

Додаткову небезпеку становлять акумуляторні батареї, що використовуються в гібридній сонячній електростанції як накопичувачі енергії. При порушенні режимів заряджання і розряджання можливі перегрів елементів, виділення газів, протікання електроліту, коротке замикання з подальшим займанням шин або струмопровідних частин. Для зменшення цих ризиків батарейні модулі розміщують у спеціально відведеному місці з достатньою природною або примусовою вентиляцією, захистом від прямих сонячних променів і джерел відкритого вогню. Підключення й відключення клем здійснюється тільки при відсутності навантаження, із застосуванням інструменту з ізольованими рукоятками й засобів індивідуального захисту.

Психофізіологічні фактори, притаманні роботі над кваліфікаційною роботою, пов'язані з тривалою інтелектуальною напругою, високим рівнем відповідальності за прийняті рішення, значним обсягом інформації, яку необхідно опрацювати, а також обмеженою руховою активністю. Для їхнього зменшення рекомендується дотримуватись раціонального режиму праці й відпочинку: робити короткі перерви кожні 1–2 години роботи за комп'ютером, виконувати нескладні фізичні вправи для м'язів ший, плечового пояса, спини й кистей рук, проводити гімнастику для очей, чергувати інтелектуальну діяльність з менш напруженими видами роботи (оформлення графічних матеріалів, підготовка звітних документів).

Важливе значення має належна організація навчання з питань охорони праці. Студенти, які виконують роботи з електротехнічним обладнанням, мають бути ознайомлені з основними вимогами електробезпеки, правилами користування первинними засобами пожежогасіння, порядком дій у разі пожежі,

ураження електричним струмом або травмування. Відповідальні особи проводять первинний, повторний та целевий інструктажі, результати яких фіксуються в установленому порядку. Такий підхід, що відповідає рекомендаціям навчально-методичної літератури, забезпечує достатній рівень обізнаності студентів та знижує імовірність нещасних випадків під час виконання кваліфікаційної роботи.

Отже, система заходів з охорони праці при розробленні комп'ютеризованої системи керування гібридною сонячною електростанцією охоплює раціональну організацію робочого місця, забезпечення нормативних параметрів мікроклімату та освітлення, зниження рівня шуму, дотримання вимог електробезпеки й безпечної роботи з акумуляторними батареями, регламентацію режиму праці й відпочинку, а також належну підготовку й інструктаж студентів. Реалізація цих заходів створює безпечні та здорові умови праці та підвищує надійність і ефективність виконання кваліфікаційної роботи.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації кіберфізичної системи розумного будинку з гібридною сонячною електростанцією полягає у своєчасному виявленні небезпечних відхилень, запобіганні розвитку аварійних процесів та мінімізації їхніх наслідків для людей, обладнання і навколишнього середовища. Гібридна СЕС є джерелом підвищеної небезпеки, оскільки поєднує електротехнічні, акумуляторні, інформаційні та програмні компоненти, що працюють у постійному взаємозв'язку й взаємозалежності. Відповідно до вимог дисциплін «Цивільна безпека» та «Безпека в надзвичайних ситуаціях» [37; 38], при її проектуванні необхідно передбачати можливі сценарії виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру та розробляти заходи щодо захисту населення і персоналу.

До найбільш імовірних надзвичайних ситуацій, пов'язаних з функціонуванням гібридної сонячної електростанції, належать пожежі внаслідок

короткого замикання або перегріву обладнання, аварійні режими роботи акумуляторних батарей з переходом у термічний розгін, ураження електричним струмом обслуговуючого персоналу або мешканців будинку, руйнування конструкцій даху при екстремальних погодних умовах, а також відмова систем автоматизованого керування, що призводить до некоректного розподілу навантажень і перевантаження окремих елементів системи. У сучасних кіберфізичних системах певну небезпеку становлять також кіберінциденти, коли внаслідок несанкціонованого доступу до мережі управління зловмисник може змінити режими роботи обладнання, відключити захист або спровокувати аварійний стан.

Пожежна небезпека в системі гібридної сонячної електростанції пов'язана з наявністю значної кількості електроенергії, що перетворюється й передається по кабельних лініях, а також із застосуванням матеріалів, здатних до займання при перевантаженні або короткому замиканні. Найбільш пожежонебезпечними є ділянки з високою густиною струму — з'єднання між сонячними панелями й інвертором, контакти вимикачів постійного струму, клемні з'єднання в розподільчих щитах, місця введення кабелів у будівлю. При порушенні контакту, старінні ізоляції, потраплянні вологи або пилу можуть виникати дугові розряди, локальний перегрів та запалювання ізоляції кабелів або найближчих горючих конструкцій.

Для зниження ймовірності виникнення пожеж застосовуються комплексні технічні заходи: правильний вибір перерізу та типу кабельної продукції, використання кабелів із негорючою або важкогорючою оболонкою, прокладання їх у металевих або вогнестійких кабель-каналах, встановлення автоматичних вимикачів та запобіжників відповідного номіналу, застосування пристроїв захисту від перевантаження та струмів короткого замикання. У місцях розміщення інвертора, акумуляторних батарей та силових щитів передбачають встановлення датчиків температури й диму, сигнал від яких надходить до системи керування розумного будинку: у разі виявлення небезпечних відхилень система може

автоматично знеструмити окремі ділянки, сформувати сигнал тривоги, повідомити користувача через мобільний додаток.

Окрему увагу слід приділити безпеці акумуляторних батарей, які в аварійних режимах можуть стати джерелом пожежі або вибуху. Перевищення допустимих струмів заряджання й розряджання, перегрів елементів, механічні пошкодження корпусів, коротке замикання на виході батарейного блоку можуть спричинити інтенсивне виділення тепла, руйнування електродів, утворення горючих газів. Запобігання таким ситуаціям забезпечує система керування акумулятором (Battery Management System), яка контролює напругу й температуру окремих осередків, обмежує струм заряджання, реалізує захист від глибокого розряду та перезаряджання. Конструктивно батарейні модулі розміщують у вентильованих приміщеннях або шафах з вогнестійкими стінками, на відстані від джерел тепла й відкритого вогню, з можливістю швидкого відключення за допомогою роз'єднувачів чи автоматичних вимикачів.

У разі виникнення пожежі або ознак термічного розгону акумуляторної батареї необхідно негайно відключити джерела живлення — мережевий ввід, інвертор, контролер заряду, по можливості від'єднати батарейний блок від решти системи, повідомити пожежно-рятувальну службу. Застосування первинних засобів пожежогасіння здійснюється з урахуванням рекомендацій виробника батарей і класу пожежі; забороняється гасити водою установки, що перебувають під напругою, та батареї, для яких це прямо заборонено інструкцією.

Не менш важливою є небезпека ураження електричним струмом у надзвичайних ситуаціях. Якщо при нормальній експлуатації систему проєктують так, щоб користувач не мав доступу до струмопровідних частин, то при пошкодженні корпусів, руйнуванні ізоляції, затопленні приміщень водою, падінні конструкцій може виникнути ситуація, коли на металевих частинах з'являється небезпечна напруга. Для запобігання цьому застосовуються системи захисного заземлення й автоматичного відключення живлення при замиканні на землю або корпус. У разі підтоплення приміщення, де встановлено інвертор та електроштити, першочергово необхідно знеструмити будівлю, заборонити доступ сторонніх осіб

до потенційно небезпечних зон, здійснити візуальний та інструментальний контроль стану ізоляції перед повторним увімкненням.

Додаткові ризики виникають внаслідок дії зовнішніх природних чинників: сильного вітру, злив, граду, снігових заметів, блискавок. Руйнування кріплень сонячних панелей на даху, пошкодження покрівлі, заливання водою електричних коробок можуть призвести до коротких замикань, оголення струмопровідних частин, загоряння. Тому на етапі проєктування передбачають використання корозійностійких кріпильних елементів, розрахунок вітрових і снігових навантажень, гідроізоляцію місць введення кабелів, установлення блискавкозахисту та пристроїв захисту від імпульсних перенапруг. Після екстремальних погодних явищ проводиться позачерговий огляд встановлених панелей, кабельних трас, інвертора та щитів.

Кіберфізична природа розумного будинку передбачає наявність розгалуженої мережі датчиків, контролерів, комунікаційних модулів, серверів збору даних. Відмова цієї мережі у момент аварії може ускладнити своєчасне виявлення небезпеки, а зловмисне втручання — навпаки, створити штучну загрозу. Для зменшення таких ризиків застосовують сучасні засоби інформаційної безпеки: автентифікацію користувачів, розмежування прав доступу, шифрування переданих даних, ведення журналів подій, резервне копіювання налаштувань. У системі керування передбачають резервні алгоритми переходу в безпечний режим у разі втрати зв'язку з окремими вузлами, а також можливість ручного керування ключовими елементами (аварійне вимкнення інвертора, примусове відключення неключових навантажень, переведення системи у режим мінімального споживання).

Важливою складовою забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях є організаційні заходи. На об'єкті, де встановлена гібридна СЕС, розробляють інструкції щодо дій персоналу й мешканців при виникненні пожежі, ураженні електричним струмом, аварії акумуляторної батареї, відмові системи керування. Визначають осіб, відповідальних за виклик аварійно-рятувальних служб, відключення живлення, організацію евакуації, надання першої допомоги. На

видимих місцях розміщують плани евакуації, схеми розташування засобів пожежогасіння, аптечок, аварійних вимикачів, телефони екстрених служб.

Кіберфізична система розумного будинку може використовуватись як додатковий інструмент цивільного захисту. Вона здатна автоматично відслідковувати спрацювання датчиків диму, температури, витoku газу чи води, формувати попереджувальні та аварійні повідомлення на мобільні пристрої власників, вмикати звукову та світлову сигналізацію, керувати системами димовидалення та протипожежними клапанами. Реалізація таких функцій знижує час реагування на подію та дозволяє локалізувати її на ранній стадії.

Таким чином, безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації комп'ютеризованої системи енергоефективного керування гібридною сонячною електростанцією у розумному будинку забезпечується поєднанням інженерно-технічних, програмних та організаційних заходів. До них належать правильний вибір і монтаж електротехнічного обладнання, застосування сучасних систем захисту від аварійних режимів, реалізація функцій моніторингу й оповіщення, належна підготовка та навчання користувачів, планування дій у разі надзвичайних ситуацій. Виконання вимог, викладених у навчально-методичних посібниках з техноекології та цивільної безпеки [37, 38], дозволяє істотно знизити рівень ризику для людей та навколишнього середовища й забезпечити надійне й безпечне функціонування гібридної сонячної електростанції як складової кіберфізичної системи розумного будинку.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано науково-прикладну задачу підвищення енергоефективності кіберфізичної системи розумного будинку шляхом оптимізації використання сонячної електростанції на основі відкритих апаратно-програмних платформ.

За результатами аналітичного огляду сучасних рішень у сфері розумних будинків, СЕС та енергоменеджменту встановлено, що більшість комерційних систем характеризуються закритістю програмних платформ, обмеженим доступом до телеметрії інверторів і BMS, залежністю від хмарних сервісів виробників та недостатньою гнучкістю керування навантаженнями.

Обґрунтовано доцільність застосування кіберфізичного підходу й відкритих технологій (Raspberry Pi, ESP32, MQTT, Home Assistant) для побудови локальної, масштабованої системи енергоменеджменту розумного будинку з СЕС.

Розроблено узагальнену математичну модель енергетичних потоків у системі «СЕС – акумуляторна батарея – будинок – зовнішня мережа», яка описує роботу системи через миттєві потужності генерації, споживання, заряджання та розряджання акумулятора, обмін з мережею і рівень заряду акумулятора з урахуванням ККД та експлуатаційних обмежень.

Виконано декомпозицію навантажень на базові й керовані, що дозволило формалізувати задачу керування потужним некритичним навантаженням – електричним бойлером. На основі моделі сформовано систему показників оцінки ефективності, зокрема коефіцієнти самоспоживання та автономності, добові енергетичні баланси й економічні показники, що забезпечило кількісну оцінку впливу алгоритмів енергоменеджменту.

Спроектовано архітектуру кіберфізичної системи, у якій Raspberry Pi 4 з Home Assistant, MQTT-брокером Mosquitto, сервісом Batmon і ZeroTier One виконує функції центрального вузла, а ESP32 забезпечує шлюзування між гібридним інвертором та MQTT-інфраструктурою.

Реалізовано повністю локальну роботу системи з можливістю безпечного віддаленого доступу без використання закритих хмарних сервісів, інтегровано інвертор, BMS і керовані навантаження в єдину інформаційну модель Home Assistant.

Розроблено прошивку для ESP32, яка забезпечує обмін даними з інвертором через послідовний інтерфейс, опитування параметрів, розбір протоколу та публікацію телеметрії у вигляді MQTT-повідомлень, а також налаштовано Home Assistant для моніторингу, візуалізації та керування навантаженнями через веб-інтерфейс і мобільний застосунок.

На практичному рівні реалізовано rule-based алгоритми енергоменеджменту, орієнтовані на оптимізацію роботи електричного бойлера та інших некритичних навантажень, які автоматично активуються переважно в періоди надлишкової генерації СЕС і достатнього рівня заряду акумулятора. Експериментальні дослідження показали зменшення споживання електроенергії з мережі, зростання частки власної генерації та більш сприятливий профіль SOC акумулятора зі зменшенням кількості глибоких розрядів, що підтвердило практичну ефективність запропонованих рішень.

Перспективами розвитку є впровадження прогнозних моделей генерації та споживання, методів оптимізації й машинного навчання, розширення складу керованих пристроїв та інтеграція з сервісами прогнозу погоди й тарифів, що дозволить додатково підвищити енергоефективність і економічну привабливість розумних будинків з відновлюваними джерелами енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Програма та методичні рекомендації з проходження практики за тематикою кваліфікаційної роботи для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ. 2024. 45 с.
2. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль. 2024. 44 с.
3. Варавін А.В., Лецишин Ю.З., Чайковський А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Дослідження і проєктування комп'ютерних систем та мереж» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 32 с.
4. Voloshchuk A., Velychko D., Osukhivska H., Palamar A. Computer system for energy distribution in conditions of electricity shortage using artificial intelligence. CEUR Workshop Proceedings, 2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2024), Ternopil, Ukraine, June 12-14, 2024. Vol. 3742 P. 66-75.
5. Barreto N. E. M., Aoki A. R. Cyber-Physical Power System Digital Twins—A Study on the State of the Art. *Energies*. 2025. Vol. 18, No 22. Art. 5960. DOI: 10.3390/en18225960.
6. Chen Y., Li X., Wang J. et al. Integrating the IoT and New Energy to Promote a Sustainable Low-Carbon Economy. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No 15. Art. 6755. DOI: 10.3390/su17156755. ?
7. Rao C. K., Reddy C. R., Natarajan A. M. A review of IoT-enabled intelligent smart energy management for photovoltaic power forecasting and generation. *Unconventional Resources*. 2025. Vol. 2. Art. 100116.

8. Varghese B. K., Das N., Ray B. et al. Optimisation algorithms used in home energy management systems: A review. *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 347. Art. 116338. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116338.
9. Tradacete-Ágreda M., Sánchez-Pérez A., Santos-Pérez C. et al. Smart energy management for residential PV microgrids: ESP32-based indirect control of commercial inverters for enhanced flexibility. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No 21. Art. 6595. DOI: 10.3390/s25216595.
10. Bagdadee A. H., Rahman M. S., Al Mamoon I. et al. Empowering smart homes by IoT-driven hybrid renewable energy integration for enhanced efficiency. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, No 1. Art. 41491. DOI: 10.1038/s41598-025-25328-2.
11. Pasculescu D., Riurean S., Obretenova M. I. et al. Intelligent modeling of PV–BESS microgrids for enhanced stability, cyber–physical resilience and blackout prevention. *Preprints*. 2025. Art. 202511.0990. DOI: 10.20944/preprints202511.0990.v1.
12. Habibu M. A., Sivakumar S., Kanagachidambaresan G. R. et al. An effective IoT-based demand response for energy-efficient smart homes. *Energy Informatics*. 2025. Vol. 8, No 1. Art. 125. DOI: 10.1186/s42162-025-00590-w.
13. Glavan I., Gospić I., Poljak I. Empowering Energy Transition: IoT-Driven Heat Pump Management for Optimal Thermal Comfort. *IoT*. 2025. Vol. 6, No 2. Art. 33. DOI: 10.3390/iot6020033.
14. Павлик А.В., Паламар А.М. Комп'ютеризована система для енергоефективного керування сонячною електростанцією у розумному будинку. *Актуальні задачі сучасних технологій : збірник тез доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів (Тернопіль, 11-12 грудня 2025 року)*, Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2025. С. 319-320.
15. Павлик А., Паламар А. Інформаційна модель та кіберфізична система енергоменеджменту сонячної електростанції у розумному будинку. *Матеріали XIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 17-18 грудня 2025 року)*, Тернопіль: ТНТУ, 2025. С. 137.

16. Stadnyk M., Palamar A. Project management features in the cybersecurity area. *Scientific Journal of TNTU*, Ternopil, Ukraine, 2022. Vol. 106, No 2. P. 54–62.
17. Vasylykivskyi I., Ishchenko V., Pohrebennyk V., Palamar M., Palamar A. System of water objects pollution monitoring. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2017)*, Vienna, Austria, November, 27–29, 2017. Vol. 17, No. 33. P. 355-362.
18. Palamar A., Karpinsky M., Vodovozov V. Design and Implementation of a Digital Control and Monitoring System for an AC/DC UPS. *7th International Conference-Workshop «Compatibility and Power Electronics» (CPE 2011)*, June 1-3, 2011. P. 173–177.
19. Palamar A. Control system simulation by modular uninterruptible power supply unit with adaptive regulation function. *Scientific Journal of TNTU*, Ternopil, Ukraine, 2020. Vol. 98, No 2. P. 129–136.
20. Palamar A. Intelligent control and monitoring module for uninterruptible power supply system. *II International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» (MC&FPGA-2020)*, Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 12-13.
21. Palamar A., Karpinsky M. Control of an Uninterruptible Power Supply in a DC Microgrid System. *10th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II"* (January 10-15, 2011), Pärnu, Estonia, 2011. P. 80-84.
22. Palamar A., Pettai E. Microgrid for the Department of Electrical Drives and Power Electronics. *8th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II"* (January 11-16, 2010), Pärnu, Estonia, 2010. P. 54-61.
23. Погребенник В.Д., Клим Г.І., Бордун І.М., Пташник В.В., Паламар А.М. Системи оперативного контролю інтегральних параметрів водного середовища. Т. 2. Елементи комп'ютерних систем оперативного контролю: колективна монографія. Житомир: Видавничий дім «Бук-Друк», 2021. 180 с.

24. Palamar A. Methods and means of increasing the reliability of computerized modular uninterruptible power supply system. *Scientific Journal of TNTU*, Ternopil, Ukraine, 2020. Vol. 99, No 3. P. 133–141.

25. Паламар М., Пастернак Ю., Паламар А. Дослідження динамічних похибок системи прецизійного керування антеною з асинхронним електроприводом. *Вісник ТНТУ*, Тернопіль: ТНТУ, 2014. Вип. 76, № 4. С. 164–173.

26. Palamar M., Pasternak Y., Palamar A., Poikhalo A. Precision tracking of the trajectory LEO satellite by antenna with induction motors in the control system. *Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2017)*, Bucharest, Romania, September 21–23, 2017. Vol. 2. P. 1051–1055.

27. Palamar A., Palamar M. Fire Safety Monitoring System Based on Internet of Things. *CEUR Workshop Proceedings*, 2023. 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023), Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. Vol. 3468. P. 164-172.

28. Palamar A., Voloskyi V., Kramar O., Kramar T., Stankevych O., Yatsyshyn V. Information computer system with a virtual tour for cultural heritage preservation of the Zbarazh Castle Museum's exhibition hall. *CEUR Workshop Proceedings*, The 3rd International Workshop on Social Communication and Information Activity in Digital Humanities (SCIA 2024), Lviv, Ukraine, October 31, 2024. Vol. 3851.

29. Yatsyshyn V., Pastukh O., Kukharska V., Palamar A., Kulikov S. Method and tool of detecting software architecture patterns in the process of computer systems development. *CEUR Workshop Proceedings*, 4th International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2024), Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, October 23-25, 2024. Vol. 3896. P. 12-24.

30. Palamar M., Nakonetchnyi Y., Palamar A., Strembitskyi M., Apostol Y. Modernization of the azimuth drive design for the antenna system. *Scientific Journal of TNTU*, Ternopil, Ukraine, 2025. Vol. 117, No 1, P. 54–61.

31. Strembitskyi M., Yavorska M., Palamar A., Kochan R., Yeromenko V. A comparative study of bug algorithms for robot navigation. *CEUR Workshop*

Proceedings, 3rd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2025), Ternopil, Ukraine, June 11-12, 2025. Vol. 4057 P. 312-321.

32. Palamar M., Horyn T., Palamar A., Batuk V. Method of calibration MEMS accelerometer and magnetometer for increasing the accuracy determination angular orientation of satellite antenna reflector. Scientific Journal of TNTU, Ternopil, Ukraine, 2022. Vol. 108, No 4. P. 79–88.

33. Palamar A., Karpinski M., Palamar M., Osukhivska H., Mytnyk M. Remote Air Pollution Monitoring System Based on Internet of Things. CEUR Workshop Proceedings, 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2022), Ternopil, Ukraine, November 22–24, 2022. Vol. 3309. P. 194-204.

34. Palamar A., Stadnyk M., Palamar M. Adaptive PID regulation method of uninterruptible power supply battery charge current based on artificial neural network. Scientific Journal of TNTU, Ternopil, Ukraine, 2022. Vol. 107, No 3. P. 5–13.

35. Palamar A., Palamar M., Osukhivska H. Real-time Health Monitoring Computer System Based on Internet of Medical Things. CEUR Workshop Proceedings, 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2023), Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, November 22–24, 2023. Vol. 3628. P. 106-115.

36. Voloskyi V., Leshchyshyn Y., Romanyshyn N., Palamar A., Tarasenko L. Method and algorithm for efficient cell balancing in the lithium-ion battery control system. CEUR Workshop Proceedings, The 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024), Zboriv, Ukraine, October 02-04, 2024. Vol. 3842. P. 258-267.

37. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях». Тернопіль: ФОП Паляниця В. А. 156 с.

38. Стручок В.С. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»». Тернопіль: ФОП Паляниця В. А. 156 с.

Додаток А

Тези конференцій

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
 Маріборський університет (Словенія)
 Технічний університет у Кошице (Словаччина)
 Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
 Краківський економічний університет (Польща)
 Вроцлавський економічний університет (Польща)
 Університет «Опольська Політехніка» (Польща)
 Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 Вінницький національний аграрний університет
 Львівський національний університет ім. І. Франка
 Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області
 Наукове товариство ім. Шевченка
 Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти
 Сумський державний педагогічний університет
 Запорізький національний університет

АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Збірник

тез доповідей

**XIV Міжнародної науково-технічної
 конференції молодих учених та студентів**

11-12 грудня 2025 року



**УКРАЇНА
 ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

43.	Ю.Б. Максим'як ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МАСЦО: ПІДХОДИ, ВІКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	297
44.	К. П. Марущак, Г. В. Козбур ЕФЕКТИВНІ ПІДХОДИ ДО ВІЗУАЛЬНОГО ПОДАННЯ КАТЕГОРІЙНИХ ДАНИХ	299
45.	Матисюк І.В БЮДРУК. ЖИТТЯ ТА ПРОГРЕС	301
46.	Д.С. Матюк, М.В. Деркач NetScope: ПЕНТЕСТІНГ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ	302
47.	А.Г. Микитишин, Д.Р. Максимів, В.І. Федчак ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ПЛАТФОРМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ: КОНЦЕПЦІЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ BENEFIT	305
48.	О. Мимрик АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ (СОНЯЧНА + ВІТРОВА ЕНЕРГІЯ)	307
49.	Р.С. Михайлишин, М.В. Приймак КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПОТОКУ ЛЮДЕЙ У ГРОМАДСЬКИХ МІСЦЯХ НА ОСНОВІ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ	309
50.	Л.Є. Мосій СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ВАЛІДАЦІЇ МОДЕЛІ АМПЛІТУДНОЇ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛУ	310
51.	А.А. Музичук ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ СОРТУВАННЯ ВІДЕОДАНИХ У ХМАРНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ МУЛЬТИМЕДІА	312
52.	В.В. Невмержицький, Н.Б. Стадник МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ СОНЯЧНИМ ВОДОНАГРІВАЧЕМ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА STM32	313
53.	В.В. Никитюк, І. К. Генсьора ІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ЦІФРОВОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ МУЗЕЙНИХ ФОНДІВ	314
54.	О.А. Пастух, Х.О. Новицька МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ В ЖИТТЄВОМУ ЦИКЛІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ UML ТА АДАПТОВАНОЇ SEI-МОДЕЛІ	315
55.	С. Орлов, С. Марценко ДОСЛІДЖЕННЯ ІТ ЛОГІСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ	317
56.	Г.М. Осухівська, А.В. Коритко, А.М. Паламар КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМІОГРАФІЧНИХ СІГНАЛІВ У ПРОЦЕСІ РЕАБІЛІТАЦІЇ ПАЦІЄНТІВ	318
57.	А.В. Павлик, А.М. Паламар КОМП'ЮТЕРІЗОВАНА СИСТЕМА ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ У РОЗУМНОМУ БУДІНКУ	319

забезпечують достатньої швидкодії й точності для аналізу м'язових скорочень. Актуальність дослідження пов'язана з потребою створення доступної системи, що дозволяє здійснювати збір, обробку та передачу ЕМГ-сигналів у режимі реального часу з можливістю віддаленого контролю.

Метою роботи є розроблення IoT-орієнтованої комп'ютерної системи для безперервного аналізу ЕМГ-сигналів у процесі реабілітації пацієнтів. Розроблена система базується на мікроконтролерному модулі ESP32 TTGO, який забезпечує достатні ресурси для локальної попередньої обробки сигналу, а також підтримує Wi-Fi технологію та MQTT-протокол для інтеграції в IoT-інфраструктуру. Сигнал зчитується за допомогою біомедичного модуля AD8232, що виконує фільтрацію та підсилення слабких мікрровольтних коливань, характерних для ЕМГ-активності. Отриманий аналоговий сигнал оцифровується вбудованим АЦП ESP32, проходить нормалізацію, фільтрацію, після чого передається на IoT-платформу Ubidots.

Хмарна платформа забезпечує візуалізацію даних у вигляді графіків, панелей стану та статистичних показників, дозволяючи лікарю або реабілітологу отримувати інформацію в реальному часі та відстежувати прогрес відновлення пацієнта. Застосування MQTT-протоколу гарантує низьку затримку передавання даних, що є критично важливим для задач реального часу. Крім того, система дозволяє зберігати історію сигналів, що забезпечує можливість довгострокового аналізу, виявлення аномалій та адаптивного налаштування програм реабілітації.

Однією з ключових переваг запропонованої системи є її мобільність та низька вартість у порівнянні з комерційними медичними комплексами. Вона забезпечує достатню точність для практичних задач відновлення м'язових функцій, підтримує віддалений доступ, працює без необхідності спеціалізованого обладнання та може бути інтегрована у домашні умови. Крім того, застосування відкритих апаратних платформ дозволяє масштабувати систему та розширювати її функціональність.

Розроблена комп'ютерна система реального часу забезпечує ефективний дистанційний моніторинг ЕМГ-сигналів і може бути застосована для медичних та наукових досліджень. Вона дозволяє підвищити якість реабілітаційного процесу, забезпечуючи безперервний зворотний зв'язок, оперативний аналіз та можливість віддаленого контролю.

УДК 004.9:620.9

А.В. Павлик, А.М. Паламар, к.т.н.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ

A. V. Pavlyk, A.M. Palamar, PhD.

COMPUTERIZED SYSTEM FOR ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF A SOLAR POWER PLANT IN A SMART HOME

Розвиток відновлюваної енергетики та зростання тарифів на електроенергію актуалізують підвищення енергоефективності житлових будинків [1]. Перспективним рішенням є кіберфізична система розумного будинку з сонячною електростанцією (СЕС) та акумуляторною батареєю, яка динамічно керує потоками енергії між СЕС, будинком, накопичувачем та мережею [2].

Мета роботи – розробити відкриту систему енергоменеджменту, що підвищує самоспоживання генерації СЕС і зменшує споживання з електромережі шляхом оптимізації керованих навантажень. Архітектура базується на Raspberry Pi 4 з Home Assistant і MQTT-брокером Mosquitto, контролері ESP32 як шлюзі до гібридного інвертора, сервісі Batmon для доступу до BMS та ZeroTier One для безпечного віддаленого доступу.

Побудовано спрощену енергетичну модель системи з виділенням потужностей генерації СЕС, споживання будинку, заряджання/розряджання акумулятора, обміну з мережею та рівня заряду SOC. Споживання поділено на базове й кероване. Як основне кероване навантаження розглянуто електричний бойлер. На основі моделі реалізовано rule-based сценарії енергоменеджменту в Home Assistant: бойлер вмикається за надлишкової генерації та достатнього SOC і вимикається при його зниженні нижче порога чи тривалому дефіциті потужності.

Експерименти показали збільшення частки енергії СЕС, використаної на власні потреби, зменшення імпорту з мережі та більш ощадний режим роботи акумулятора. Порівняння з відомими підходами до керування побутовими фотоелектричними системами демонструє підвищену гнучкість запропонованої реалізації завдяки використанню відкритих апаратно-програмних компонентів [2]. Запропонована система може бути адаптована до різних типів інверторів, конфігурацій СЕС і профілів споживання, що спрощує її практичне впровадження в реальних домогосподарствах.

Отримані результати створюють підґрунтя для подальшої інтеграції методів прогнозного керування та економічної оптимізації режимів роботи з урахуванням тарифних планів і поведінки користувачів.

Література

1. Bagdadee A. H., Rahman M. S., Al Mamoon I., Hossain M. R. Empowering smart homes by IoT-driven hybrid renewable energy integration for enhanced efficiency. Scientific Reports, 2025, Vol. 15, No. 1, Art. 41491.
2. Tradacete-Ágreda M., Sánchez-Pérez A., Santos-Pérez C., Velasco-Gómez J. Smart energy management for residential PV microgrids: ESP32-based indirect control of commercial inverters for enhanced flexibility. Sensors, 2025, Vol. 25, No. 21, Art. 6595.

УДК 681.518.3

М.І. Паламар, д.т.н., проф.; Ю.А. Удич; А.М. Паламар, к.т.н., доц.; М.Р. Франків
(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА ОСНОВІ ІОТ ТЕХНОЛОГІЙ

M.I. Palamar, Dr., Prof.; Y.A. Udych; A.M. Palamar, Ph.D., Assoc. Prof.; M.R. Frankiv
**INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR MONITORING SMART
HOME PARAMETERS BASED ON IOT TECHNOLOGIES**

У сучасних умовах розвиток технологій Інтернету речей забезпечує новий рівень автоматизації та цифровізації житлових приміщень. Розумні будинки стають інтегрованими системами, здатними здійснювати моніторинг параметрів мікроклімату, виявляти потенційно небезпечні ситуації та забезпечувати комфортне середовище для користувачів. Одним із ключових напрямів розвитку таких технологій є побудова

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

МАТЕРІАЛИ

ХІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



17-18 грудня 2025 року

**ТЕРНОПІЛЬ
2025**

АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ М'ЯЗОВОЇ АКТИВНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ MQTT-ТЕХНОЛОГІЙ	
Н. Osukhivska, A. Korytko, A. Palamar	
HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR REMOTE MONITORING OF MUSCLE ACTIVITY USING MQTT TECHNOLOGIES	
А. Павлик, А. Паламар	
ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ	
A. Pavlyk, A. Palamar	
INFORMATION MODEL AND CYBER-PHYSICAL ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR A SMART-HOME SOLAR POWER PLANT	136
А. Паламар, Я. Сиротинський, М. Франків	
ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДДАЛЕНОГО ЗБОРУ ДАНИХ ПРО ШВИДКІСТЬ ВІТРУ	
A. Palamar, Y. Syrotynskyi, M. Frankiv	
APPLICATION OF MICROCONTROLLER TECHNOLOGIES FOR REMOTE COLLECTION OF WIND SPEED DATA	137
Б. Переймибіда	
МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ КАБЕЛЮ ТА МІСЦЯ ЙОГО ОБРИВУ	
B. Pereimybid	
METHODS FOR DETERMINING CABLE LENGTH AND LOCATION OF ITS BREAKAGE	138
Б. Переймибіда	
АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ТА ПОШУКУ МІСЦЯ ОБРИВУ НА ОСНОВІ ЄМНІСНОГО МЕТОДУ	
B. Pereimybid	
ALGORITHM FOR DETERMINING THE LENGTH OF A CABLE LINE AND SEARCHING FOR THE BREAK POINT BASED ON THE CAPACITIVE METHOD	139
М. Процишин, Є. Кириченко, В. Дозорський, Л. Дедів, О. Дозорська	
СПОСІБ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО СЕНСОРА ДЛЯ СИСТЕМИ ТАТКИЛЬНОГО ЗВОРОТНЬОГО ЗВ'ЯЗКУ ПРОТЕЗА РУКИ	
M. Protsyshyn, Ye. Kyrychenko, V. Dozorskyi, L. Dediv, O. Dozorska	
THE METHOD OF PIEZOELECTRIC SENSOR SIGNALS PROCESSING FOR A TACTILE FEEDBACK SYSTEM OF A HAND PROSTHESIS	140
С. Рихлевич	
РОЗРАХУНОК ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ ЗАПИСУ	
S. Rykhlevych	
CALCULATION OF RECORDING CHANNEL BANDWIDTH	141
С. Рихлевич, І. Баран	
ЗАВДАННЯ І ФУНКЦІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА БЛОКУ ЗБОРУ ТЕЛЕМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ	
S. Rykhlevych, I. Baran	
TASKS AND FUNCTIONS OF THE MICROCONTROLLER SOFTWARE OF THE TELEMETRIC INFORMATION COLLECTION UNIT	142
І. Рій, Є. Тиш	
МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАОТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ШИФРУВАННЯ ДЛЯ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ	
I. Riï, Ye. Tysh	
METHODS FOR CONSTRUCTING AND COMPARATIVE ANALYSIS OF CHAOTIC ENCRYPTION ALGORITHMS FOR MODERN COMPUTERIZED	143

УДК 004.9:620.9

А. Павлик; А. Паламар, к. т. н., доц.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ

UDC 004.9:620.9

A. Pavlyk; A. Palamar, PhD., Assoc. Prof.

INFORMATION MODEL AND CYBER-PHYSICAL ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR A SMART-HOME SOLAR POWER PLANT

Стрімкий розвиток відновлюваної енергетики та інтернету речей актуалізує створення інформаційних моделей енергоменеджменту житлових будинків [1]. Перспективним рішенням є кіберфізична система розумного будинку з сонячною електростанцією (СЕС) та акумуляторною батареєю, у якій інформаційна модель енергетичного балансу використовується для керування потоками енергії між СЕС, будинком, накопичувачем та мережею [2].

Метою роботи є розроблення відкритої інформаційної системи енергоменеджменту, що підвищує самоспоживання генерації СЕС та зменшує споживання з електромережі шляхом оптимізації керованих навантажень. Архітектуру реалізовано на базі Raspberry Pi 4 з Home Assistant і MQTT-брокером Mosquitto, контролера ESP32 як шлюзу до гібридного інвертора, сервісу Batmon для доступу до BMS та ZeroTier One для віддаленого доступу.

Побудовано спрощену інформаційно-енергетичну модель системи з урахуванням потужності генерації, споживання, заряджання/розряджання акумулятора, обміну з мережею та рівня заряду SOC. Ці параметри представлені як часові ряди, що зберігаються в базі даних і використовуються для аналізу режимів роботи та оцінки ефективності керування. Споживання поділено на базове й кероване; як кероване навантаження розглянуто електричний бойлер, для якого в Home Assistant реалізовано rule-based сценарії вмикання за надлишкової генерації та достатнього SOC і вимикання при їх зниженні. Це дає змогу автоматично змішувати роботу енергозатратних приладів на періоди максимальної генерації СЕС, тим самим збільшуючи частку власного використання енергії та зменшуючи імпорт з мережі.

Експериментальні результати показали зростання частки власного використання енергії СЕС і зменшення імпорту з мережі. Використання відкритих апаратно-програмних компонентів та стандартних протоколів IoT забезпечує гнучкість і можливість адаптації системи до різних типів інверторів і профілів споживання, а також створює основу для подальшої інтеграції методів прогнозного та інтелектуального керування. Отримані дані засвідчують підвищення енергоефективності системи та підтверджують практичну доцільність запропонованого підходу для впровадження в реальних умовах експлуатації.

Література

1. Bagdadee A. H., Rahman M. S., Al Mamoone I., Hossain M. R. Empowering smart homes by IoT-driven hybrid renewable energy integration for enhanced efficiency. Scientific Reports, 2025, Vol. 15, No. 1, Art. 41491.
2. Tradacete-Ágreda M., Sánchez-Pérez A., Santos-Pérez C., Velasco-Gómez J. Smart energy management for residential PV microgrids: ESP32-based indirect control of commercial inverters for enhanced flexibility. Sensors, 2025, Vol. 25, No. 21, Art. 6595.