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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра приладів і контрольно-вимірювальних систем
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістр
(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями сонячної електростанції в системі розумного дому

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РВм-61
спеціальності 175
«Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Павлик А.В. (прізвище та ініціали)

Керівник (підпис) Яворська М.І (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль (підпис) Апостол Ю.О. (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри (підпис) Паламар М.І. (прізвище та ініціали)

Рецензент (підпис) Яворська Є.Б. (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра приладів і контрольно-вимірювальних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ *Паламар М.І.*
(підпис) (прізвище та ініціали)
«___» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня *магістр*
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю *175 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»*
(шифр і назва спеціальності)

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

1. Тема роботи *Розробка інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями сонячної електростанції в системі розумного дому*

Керівник роботи *Яворська Мирослава Іванівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри ПВ.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « *26* » листопада *2025* року № 4/7-*1036*

2. Термін подання студентом завершеної роботи *22 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 Аналіз методів та засобів контролю параметрів енергетичних установок у системах розумного дому

2 Теоретичні засади побудови інформаційно-вимірювальної системи контролю енергетичних параметрів

3 Експерментальне дослідження та практична реалізація інформаційно-вимірювальної системи

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
Охорона праці	*Зелінський І.М, доц. каф. ПВ*		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	*Стручок В.С, викл. каф. ОХ*		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	*Огляд літературних джерел. Постановка завдання на кваліфікаційну роботу.*	*17.11.2025р. – 23.11.2025р.*	*Викон.*
2.	*Загальні підходи та основні методи дослідження.*	*24.11.2025р. – 02.12.2025р.*	*Викон.*
3.	*Експерментальне дослідження та практична реалізація інформаційно-вимірювальної системи*	*03.12.2025р. – 10.12.2025р.*	*Викон.*
4.	*Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях*	*04.12.2025р. – 10.12.2025р.*	*Викон.*
5.	*Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу*	*11.12.2025р. – 19.12.2025р.*	*Викон.*
6.	*Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра*	*22.12.2025*	*Викон.*
7.	*Захист кваліфікаційної роботи магістра*	*24.12.2025*	*Викон.*

Студент _____ *Павлик А.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ *Яворська М.І*
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Павлик А.В. Розробка інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями сонячної електростанції в системі розумного дому: кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра: спец. «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025.

Ключові слова: метрологія, сонячна електростанція, акумуляторні модулі, інтелектуальна система керування, вимірювальний канал, BMS.

Кваліфікаційна робота присвячена розробленню інтелектуальної вимірювально-керуючої системи для акумуляторних модулів сонячної електростанції в розумному дому. Розглянуто методи метрологічного забезпечення та алгоритми керування на основі вимірювання напруги, струму, температури й оцінювання стану заряду акумулятора.

Розроблено апаратно-програмний комплекс на базі Raspberry Pi 4, ESP32 та BMS з реалізацією інтелектуального керування режимами заряджання, розряджання й некритичними навантаженнями. Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи для моніторингу домашньої сонячної електростанції та в навчальному процесі за спеціальністю «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

ANNOTATION

Pavlyk A.V. Development of an Intelligent Control System for Battery Modules of a Solar Power Plant in a Smart Home System: Master's qualification thesis, specialty Metrology and Information-Measuring Technology. Ternopil: Ivan Puluj Ternopil National Technical University, 2025.

Keywords: metrology, solar power plant, battery modules, intelligent control system, measurement channel, BMS.

The master's thesis is devoted to the development of an intelligent measurement and control system for battery modules of a solar power plant integrated into a smart home. The study considers methods of metrological support and control algorithms based on the measurement of voltage, current, temperature, and estimation of the battery state of charge.

A hardware–software complex based on Raspberry Pi 4, ESP32, and a BMS has been developed, implementing intelligent control of charging and discharging modes as well as non-critical loads. The practical significance of the work lies in the possibility of using the developed system for monitoring a residential solar power plant and in the educational process in the field of metrology and information-measuring technology.e energy efficiency of residential buildings.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 7
ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У СИСТЕМАХ РОЗУМНОГО ДОМУ 10
1.1. Інформаційно-вимірювальні аспекти функціонування систем енергопостачання розумного дому 10
1.2. Метрологічні особливості контролю параметрів сонячних електростанцій та накопичувачів енергії 13
1.3. Аналіз апаратно-програмних засобів побудови інформаційно-вимірювальних систем розумного дому 15
1.4. Методи інтелектуальної обробки вимірювальної інформації та прийняття рішень 17
1.5. Проблеми забезпечення достовірності та захисту вимірювальної інформації 19
1.6. Аналіз існуючих проблем та постановка задачі дослідження 19
1.7. Висновки до розділу 1 23
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ 24
2.1. Математичне моделювання вимірювальних каналів та процесів перетворення інформації 24
2.2. Математичне моделювання енергетичних процесів та характеристик фотоелектричних перетворювачів 27
2.3. Алгоритми непрямого вимірювання та оцінювання параметрів акумуляторних батарей 31
2.4. Аналіз складових похибки вимірювальних каналів та оцінювання невизначеності результатів 36

2.5. Алгоритми цифрової обробки сигналів та часової синхронізації в розподілених вимірювальних системах 39
2.6. Синтез алгоритмів керування на основі нечіткої логіки в умовах метрологічної невизначеності 41
2.7. Математичне моделювання енергетичного балансу розумного дому як об'єкта вимірювання та оптимізації ……..… 43
2.8. Аналіз надійності та ймовірності метрологічної відмови інформаційно-вимірювальної системи …….…… ...… 46
2.9. Висновки до розділу 2 ..…… ...…47
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ 49
3.1. Загальна характеристика інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями ……..… 49
3.2. Вибір і конфігурація апаратних елементів системи……...… 51
3.3. Вибір і конфігурація програмних елементів системи……...…..… ... 54
3.4. Написання прошивки для ESP-32 …… 55
3.5. Інтеграція гібридного інвертора, BMS і навантажень у НА …… 58
3.6. Сценарії енергоменеджменту і автоматизації ……...…..…… 59
3.7. Методичні засади проведення експериментальних досліджень …..… 62
3.8. Оцінка ефективності автоматизованого керування акумуляторними модулями……
3.9 Висновки до розділу 3 ……... 65
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ……...……..… 67
4.1 Охорона праці……...…..…… 67
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях…… ...… 73
ВИСНОВКИ…… .....… 79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..…… 81
Додаток А Тези конференцій

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП — аналого-цифровий перетворювач

BMS (Battery Management System) — система керування акумуляторною батареєю

ESP32 — мікроконтролер з вбудованими модулями Wi-Fi та Bluetooth, призначений для використання у вбудованих вимірювально-керуючих системах

Home Assistant (HA) — програмна платформа з відкритим вихідним кодом для автоматизації та керування системами розумного дому

$LiFePO_4$ — літій-залізо-фосфатний тип акумуляторної батареї

Raspberry Pi — одноплатний мікрокомп’ютер, що використовується для централізованого керування, оброблення та візуалізації даних

SOC (State of Charge) — ступінь зарядженості акумуляторної батареї, що характеризує відношення поточної ємності до номінальної

Акумуляторна батарея (АКБ) — електрохімічне джерело електричної енергії багаторазового використання

Енергоменеджмент — сукупність методів і засобів керування виробництвом, накопиченням та споживанням електричної енергії

Інвертор — силовий електронний пристрій для перетворення постійного струму на змінний

Кіберфізична система (КФС) — система, що поєднує фізичні процеси, програмні алгоритми керування та інформаційно-комунікаційні технології

СЕС — сонячна електростанція

ВСТУП

Актуальність роботи. Активне впровадження сонячних електростанцій у побутовому секторі та зростання ролі акумуляторних накопичувачів зумовлюють підвищені вимоги до якості контролю й керування енергетичними процесами в системах розумного дому. Ефективність, безпечність і довговічність акумуляторних модулів значною мірою визначаються точністю вимірювання напруги, струму, температури та стану заряду, на основі яких формуються алгоритми керування. Недостатнє метрологічне забезпечення вимірювальних каналів призводить до помилкових керуючих рішень, зниження енергоефективності та передчасного зносу акумуляторів.

У зв’язку з цим актуальним є розроблення відкритої інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями сонячної електростанції в розумному дому, яка поєднує сучасні апаратно-програмні платформи з метрологічно обґрунтованими методами вимірювання та оцінювання похибок.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення точності, надійності та ефективності контролю акумуляторних модулів сонячної електростанції в системі розумного дому шляхом розроблення інтелектуальної вимірювально-керуючої системи з метрологічно забезпеченими вимірювальними каналами.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- проаналізувати сучасні засоби вимірювання та системи керування акумуляторними модулями в побутових сонячних електростанціях;
- розробити структурну та функціональну модель вимірювально-керуючої підсистеми акумуляторів;
- побудувати математичні моделі вимірювальних сигналів і похибок напруги, струму, температури та стану заряду;
- дослідити джерела похибок у вимірювальних каналах і запропонувати підхід до їх оцінювання;
- спроєктувати апаратно-програмний комплекс на базі Raspberry Pi, ESP32, BMS, MQTT та Home Assistant;

- експериментально оцінити вплив точності вимірювань на якість керування й енергоефективність системи.

Об’єкт дослідження — кіберфізична система розумного дому з інтегрованою сонячною електростанцією та акумуляторними модулями.

Предмет дослідження — методи метрологічного забезпечення вимірювальних каналів і алгоритми інтелектуального керування акумуляторними модулями на основі результатів вимірювань.

Методи дослідження. У роботі використано методи теорії вимірювань і оцінювання похибок, математичного моделювання енергетичних процесів, елементи математичної статистики, а також експериментальні методи дослідження на стенді розумного дому.

Наукова новизна дослідження:

1. Вперше розроблено відкриту кіберфізичну архітектуру системи енергоменеджменту розумного будинку, яка інтегрує ESP32, Raspberry Pi 4, Home Assistant, MQTT, Batmon і ZeroTier One та функціонує без залучення закритих хмарних сервісів виробників;

2. Вдосконалено алгоритм керування електричним бойлером шляхом урахування надлишкової генерації сонячної електростанції та поточного рівня заряду акумуляторної батареї, що забезпечує підвищення ефективності використання власної генерації.

Практичне значення роботи. Отримані результати можуть бути використані при розробленні та впровадженні систем моніторингу й керування домашніми сонячними електростанціями з акумуляторними накопичувачами, а також як навчально-лабораторна база для підготовки фахівців зі спеціальності «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У СИСТЕМАХ РОЗУМНОГО ДОМУ

1.1. Інформаційно-вимірювальні аспекти функціонування систем енергопостачання розумного дому

Сучасний етап розвитку технологій автоматизації житлових будівель характеризується переходом від розрізнених систем керування до інтегрованих інтелектуальних комплексів, які прийнято називати «розумним будинком». У контексті спеціальності «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» такий об’єкт розглядається насамперед як складна розподілена інформаційно-вимірювальна система, основним завданням якої є отримання, обробка, передача та подання вимірювальної інформації про стан інженерних мереж та параметри мікроклімату. Особливої актуальності набуває питання енергетичного менеджменту в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій, оскільки ефективність їх використання прямо пропорційна якості та достовірності вимірювальної інформації, що використовується в контурах керування.

Енергетична інфраструктура сучасного розумного дому являє собою складний об’єкт контролю, що включає джерела генерації електричної енергії, системи її накопичення та різноманітні споживачі зі стохастичним характером навантаження. Для забезпечення енергоефективності такої системи необхідно реалізувати безперервний моніторинг широкого спектру фізичних величин, серед яких основними є миттєві значення напруги та струму, активна та реактивна потужність, частота змінного струму, температура навколишнього середовища та робочих поверхонь обладнання, а також рівень освітленості фотоелектричних модулів. Точність вимірювання цих параметрів безпосередньо впливає на коректність прийняття рішень системою керування, наприклад, щодо перемикання режимів роботи гібридного інвертора або комутації потужних навантажень.

З точки зору метрологічного забезпечення, системи енергопостачання розумного дому характеризуються ієрархічною структурою організації вимірювань (Рис. 1.1).

Рис. 1.1. Структурна ієрархія інформаційно-вимірювальної системи енергопостачання розумного дому

Нижній рівень цієї ієрархії утворюють первинні вимірювальні перетворювачі та сенсори, які здійснюють перетворення фізичних величин в

електричні сигнали. До цього рівня належать датчики струму на основі ефекту Холла або шунтів, резистивні подільники напруги, терморезистори та напівпровідникові датчики температури, а також спеціалізовані інтегральні схеми вимірювання електроенергії. Важливою проблемою на цьому рівні є забезпечення електромагнітної сумісності та мінімізація впливу завад, що виникають внаслідок роботи силового імпульсного обладнання, такого як інвертори та імпульсні джерела живлення.

Середній рівень ієрархії включає засоби збору та попередньої обробки вимірювальної інформації, функції яких виконують мікроконтролери та вбудовані системи. На цьому етапі відбувається аналого-цифрове перетворення сигналів, їх первинна фільтрація, лінеаризація характеристик сенсорів та масштабування результатів вимірювань. Саме на цьому рівні виникають методичні похибки, пов’язані з дискретизацією сигналів у часі та квантуванням за рівнем, що вимагає ретельного обґрунтування вибору розрядності аналого-цифрових перетворювачів та частоти опитування датчиків.

Верхній рівень системи представлений сервером збору даних або хмарною платформою, де здійснюється накопичення масивів вимірювальної інформації, її статистична обробка, візуалізація та формування керуючих впливів. Метрологічні аспекти функціонування цього рівня пов’язані з питаннями синхронізації вимірювань від розподілених у просторі джерел, забезпеченням цілісності даних при їх передачі каналами зв’язку та реалізацією алгоритмів непрямих вимірювань складних параметрів, таких як ступінь зарядженості акумуляторної батареї або прогнозована генерація сонячної станції.

Аналіз існуючих рішень у сфері домашньої автоматизації показує, що більшість комерційно доступних систем моніторингу орієнтовані на споживача без спеціальних технічних знань і часто нехтують питаннями точності та достовірності вимірювань. Використання недорогих сенсорів з великою похибкою, відсутність можливості калібрування вимірювальних каналів та використання спрощених алгоритмів обробки даних призводять до того, що похибка визначення енергетичних параметрів може досягати значних величин. Це

унеможливлює реалізацію прецизійних алгоритмів керування, необхідних для оптимізації роботи літій-залізо-фосфатних акумуляторних батарей, які мають специфічні зарядно-розрядні характеристики. Тому розробка спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи, здатної забезпечити високу точність контролю параметрів енергоустановки, є актуальним науково-прикладним завданням.

1.2. Метрологічні особливості контролю параметрів сонячних електростанцій та накопичувачів енергії

Специфіка вимірювальних задач у системах з сонячними електростанціями та накопичувачами енергії зумовлена нестаціонарністю процесів генерації та споживання, а також складними електрохімічними процесами, що протікають в акумуляторних батареях. Сонячна генерація має яскраво виражений стохастичний характер, що залежить від погодних умов, пори року та часу доби. Це висуває підвищені вимоги до динамічного діапазону засобів вимірювання струму та потужності, оскільки система повинна з однаковою відносною похибкою реєструвати як малі струми в похмуру погоду, так і номінальні струми в ясний сонячний день.

Окремою складною метрологічною задачею є контроль стану акумуляторних батарей, які є найдорожчим та найбільш вразливим елементом автономної енергосистеми. Ключовим параметром, що визначає стратегію керування енергопотоками, є ступінь зарядженості. Складність його визначення полягає в тому, що SOC не є фізичною величиною, яку можна виміряти безпосередньо. Це параметр стану, який оцінюється опосередковано на основі вимірювання напруги, струму та температури. Для сучасних літій-залізо-фосфатних (LiFePO4) акумуляторів ця задача ускладнюється тим, що їх розрядна крива має дуже пологу форму: в діапазоні від 20% до 80% ємності напруга змінюється вкрай незначно, що робить метод визначення SOC за напругою неефективним і таким, що призводить до великих похибок.

Для точного визначення ступеня зарядженості необхідно застосовувати інтегральні методи, зокрема підрахунок кулонів (кулонометрію), який полягає в чисельному інтегруванні струму заряду та розряду в часі. Однак цей метод має властивість накопичення похибки з часом через неминучі похибки вимірювання струму (дрейф нуля, нелінійність датчика) та помилки дискретизації. Тому в професійних системах керування акумуляторами (Battery Management System, BMS) використовуються комплексні алгоритми, що поєднують кулонометрію з періодичною корекцією за напругою розімкнутого кола (Open Circuit Voltage, OCV) або застосовують адаптивні фільтри, наприклад, розширений фільтр Калмана.

Крім SOC, важливим параметром є ступінь працездатності акумулятора (State of Health, SOH), який характеризує залишкову ємність батареї відносно її номінального значення. Визначення SOH вимагає тривалого моніторингу та аналізу історії циклів заряду-розряду, а також вимірювання внутрішнього опору осередків, зростання якого є індикатором деградації. Більшість побутових гібридних інверторів не мають вбудованих засобів для детального аналізу стану окремих осередків акумуляторної батареї, обмежуючись вимірюванням загальної напруги на клемах. Це створює інформаційний вакуум, коли система керування не «бачить» дисбалансу між осередками, що може призвести до передчасного виходу з ладу всієї батареї.

Іншою проблемою є точність вимірювання температури. Температурний режим критично впливає на ефективність та безпеку роботи літієвих акумуляторів. Похибка вимірювання температури навіть у кілька градусів може призвести до неправильного вибору режимів заряджання, що в умовах низьких температур загрожує незворотним пошкодженням хімічної структури акумулятора (літієвим платінгом), а при високих температурах — ризиком теплового розгону. Тому розташування термодатчиків, їх тепловий контакт з поверхнею акумуляторів та алгоритми компенсації похибок є важливими аспектами при проектуванні системи моніторингу.

Таким чином, ефективне керування енергетичними потоками (Рис. 1.2) в розумному дому неможливе без створення розгалуженої системи збору даних, яка б забезпечувала отримання детальної телеметрії безпосередньо від BMS акумуляторних модулів та інтегрувала її з даними інвертора, забезпечуючи верифікацію та корекцію вимірювань у реальному часі.

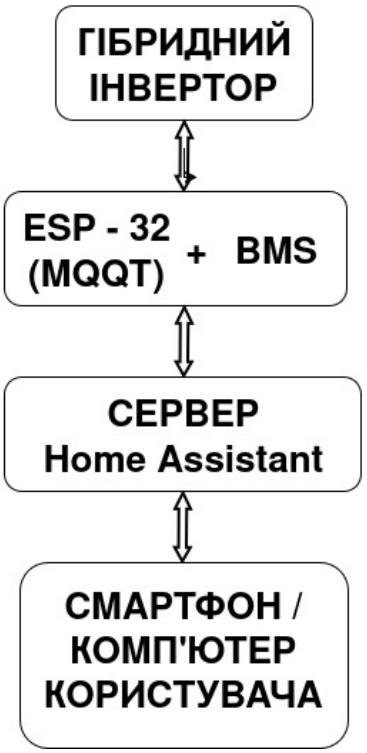

Рис. 1.2. Функціональна схема каналів передачі вимірювальної інформації між інвертором, BMS та сервером

1.3. Аналіз апаратно-програмних засобів побудови інформаційно-вимірювальних систем розумного дому

При розробці інформаційно-вимірювальної системи для керування енергоустановкою важливим етапом є вибір апаратної платформи, яка б задовольняла вимогам щодо точності, швидкодії, надійності та вартості. Сучасний ринок пропонує широкий спектр рішень: від промислових програмованих логічних контролерів (ПЛК) до доступних мікроконтролерних платформ для

Інтернету речей (IoT). У контексті магістерської роботи доцільно розглядати відкриті платформи, які дозволяють реалізовувати власні алгоритми обробки даних та інтегрувати нестандартне обладнання.

Однією з найбільш популярних платформ для побудови периферійних вузлів збору даних є мікроконтролери серії ESP32. З метрологічної точки зору, ці мікросхеми мають вбудовані 12-бітні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що дозволяє теоретично отримати 4096 рівнів квантування. Проте, як показують дослідження, вбудовані АЦП ESP32 мають значну нелінійність характеристики перетворення та високий рівень власних шумів, що обмежує їх використання для прецизійних вимірювань без застосування зовнішніх АЦП або складних процедур програмного калібрування та мультисемплінгу. Тому для відповідальних вимірювань, наприклад, струмів заряду-розряду, доцільно використовувати спеціалізовані зовнішні мікросхеми аналогового інтерфейсу (AFE) або цифрові датчики, які здійснюють первинну обробку сигналу безпосередньо в місці вимірювання та передають результат у цифровому вигляді через інтерфейси I2C, SPI або RS-485.

Використання цифрових інтерфейсів для передачі вимірювальної інформації є кращим рішенням для розподілених систем розумного дому, оскільки цифрові сигнали значно менш чутливі до електромагнітних завад, ніж аналогові слабкострумові сигнали. Протоколи Modbus RTU (на фізичному рівні RS-485) та CAN-bus є стандартами де-факто в промисловій автоматизації та енергетиці, забезпечуючи високу завадостійкість та можливість підключення великої кількості пристроїв на одну шину. Більшість сучасних гібридних інверторів та BMS оснащуються саме цими інтерфейсами, що дозволяє організувати прямий цифровий канал обміну даними між енергетичним обладнанням та центральним контролером системи керування.

В якості центрального вузла обробки даних (верхній рівень ІВС) доцільно використовувати одноплатні комп’ютери типу Raspberry Pi. Вони мають достатню обчислювальну потужність для функціонування повноцінної операційної системи та серверного програмного забезпечення, такого як бази даних часових рядів

(наприклад, InfluxDB) та системи візуалізації (Grafana). Програмна платформа Home Assistant, розгорнута на такому комп'ютері, виконує роль SCADA-системи, забезпечуючи агрегацію даних від усіх підсистем, їх архівування та виконання логічних операцій керування.

Особливу увагу слід приділити програмним протоколам обміну даними. Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) став стандартом для IoT-систем завдяки своїй легкості та архітектурі «видавець-підписник». У вимірювальній системі він дозволяє розв'язати проблему жорсткої зв'язності компонентів: вимірювальний модуль (наприклад, на базі ESP32) просто публікує дані в певний топік, не знаючи, хто і як їх буде використовувати. Це значно спрощує масштабування системи та додавання нових вимірювальних каналів. Однак, при використанні MQTT важливо враховувати питання затримок передачі даних та можливої втрати повідомлень при нестабільному мережевому з'єднанні, що вимагає реалізації механізмів підтвердження доставки (QoS) та контролю актуальності даних.

1.4. Методи інтелектуальної обробки вимірювальної інформації та прийняття рішень

Підвищення точності керування енергетичними процесами в розумному дому неможливе без застосування методів інтелектуальної обробки вимірювальних даних. «Сирі» дані, що надходять від датчиків, часто містять шуми, випадкові викиди та систематичні похибки. Крім того, частота надходження даних може бути нерівномірною. Тому першим етапом обробки є цифрова фільтрація. Для згладжування флуктуацій виміряних значень струму та напруги широко застосовуються методи ковзного середнього, експоненційного згладжування або медіанної фільтрації. Останній метод є особливо ефективним для усунення імпульсних завад, які можуть виникати при комутації потужних навантажень.

Більш складним завданням є відновлення втрачених даних та прогнозування майбутніх значень параметрів. У системах енергоменеджменту критично важливо мати прогноз генерації сонячної електростанції на найближчі години та прогноз профілю споживання. Для цього можуть застосовуватися методи регресійного аналізу, авторегресійні моделі або методи машинного навчання, такі як нейронні мережі. Наявність прогнозу дозволяє перейти від реактивного керування (за фактом зміни параметра) до проактивного (упереджувального). Наприклад, якщо система прогнозує надлишкову генерацію сонячної енергії в середині дня, вона може заздалегідь увімкнути нагрів бойлера, не чекаючи повного заряду акумулятора, тим самим розвантажуючи енергосистему в пікові години.

Інтелектуальна система керування акумуляторними модулями повинна також реалізовувати алгоритми діагностики та прогнозування залишкового ресурсу. Аналізуючи зміну внутрішнього опору акумулятора та динаміку падіння напруги під навантаженням, система може виявити дефектні осередки на ранній стадії. Це дозволяє реалізувати стратегії «м’якої» відмови, коли при погіршенні параметрів одного з модулів система автоматично обмежує струми заряду-розряду для всієї збірки, подовжуючи термін її служби до моменту сервісного обслуговування.

Важливим аспектом інтелектуальної обробки є також верифікація вимірювальних даних. Оскільки в системі часто присутні дублюючі джерела інформації (наприклад, напругу батареї вимірює і вбудований вольтметр інвертора, і BMS), система може порівнювати ці покази в реальному часі. Значне розходження між ними може свідчити про порушення контакту в силових колах, несправність одного з датчиків або дрейф характеристик вимірювальних каналів. Така автоматична діагностика підвищує загальну надійність та метрологічну визначеність системи керування.

1.5. Проблеми забезпечення достовірності та захисту вимірювальної інформації

В умовах широкого використання бездротових каналів зв’язку та підключення системи розумного дому до глобальної мережі Інтернет, питання захисту вимірювальної інформації набувають першочергового значення. Спотворення даних зловмисниками або внаслідок технічних збоїв може призвести не лише до економічних втрат, але й до аварійних ситуацій. Наприклад, підміна даних про напругу акумулятора може змусити систему керування продовжити заряджання вже повністю зарядженої батареї, що загрожує її займанням.

Забезпечення цілісності та автентичності телеметричних даних вимагає використання криптографічних протоколів на всіх етапах передачі інформації. Використання протоколу TLS/SSL для шифрування трафіку між MQTT-брокером та клієнтами є обов’язковою вимогою для сучасних систем. Крім того, доцільно використовувати методи віртуальних приватних мереж (VPN) для організації віддаленого доступу. Технології на кшталт ZeroTier дозволяють об’єднати всі компоненти системи в єдину захищену віртуальну локальну мережу, трафік якої повністю ізольований від публічного Інтернету.

З метрологічної точки зору, важливим є також захист від розсинхронізації вимірювань. У розподіленій системі кожен вимірювальний пристрій має власний генератор тактової частоти, який має певну нестабільність. Це призводить до того, що мітки часу на різних пристроях з часом розходяться. Для коректного співставлення даних, отриманих від різних джерел (наприклад, для розрахунку балансу потужностей), необхідно забезпечити синхронізацію системного часу всіх вузлів мережі. Використання протоколу NTP дозволяє підтримувати розходження часу в межах кількох мілісекунд, що є достатнім для більшості задач енергомоніторингу.

1.6. Аналіз існуючих проблем та постановка задачі дослідження

Відповідно до методичних рекомендацій щодо підготовки магістерських кваліфікаційних робіт, логіка та структура дослідження мають ґрунтуватися на огляді актуального стану наукових досліджень із обраної тематики та визначенні наявних невирішених проблем, що слугують підставою для обґрунтування наукової новизни роботи [4]. У сфері кіберфізичних систем енергоменеджменту розумного будинку, оснащеного сонячною електростанцією та акумуляторною батареєю, особливу увагу привертають дослідження, присвячені цифровим двійникам енергетичних систем, застосуванню IoT-технологій і методам оптимального керування побутовими мікромережами.

У публікації [5] представлено концептуальні засади створення цифрових двійників кіберфізичних енергетичних систем, а також підходи до їх реалізації з метою підвищення рівня спостережуваності, надійності та керованості енергетичної інфраструктури. Запропоновані рішення орієнтовані переважно на електроенергетичні системи та мікромережі, тоді як питання практичного впровадження таких підходів у побутові системи «розумного будинку» висвітлено лише в узагальненому вигляді.

Робота [6] зосереджена на поєднанні IoT-технологій і відновлюваних джерел енергії в межах концепції сталого розвитку розумних міст. Автори демонструють, що інтеграція сенсорних мереж, хмарних платформ і відновлюваної генерації сприяє зниженню викидів вуглецю та підвищенню енергоефективності на міському рівні. Водночас реалізації на рівні окремих домогосподарств переважно подаються як складові ширшої інфраструктури без детального розгляду локальних архітектур, зокрема таких рішень, як Home Assistant, ESP32 або брокер MQTT.

Оглядова публікація [7] узагальнює наявні підходи до інтелектуального енергоменеджменту у фотоелектричних системах із застосуванням IoT-технологій, зокрема методи прогнозування виробітку електроенергії та моделі керування режимами функціонування сонячних електростанцій. При цьому ключовий акцент зроблено на алгоритмах прогнозування й управління на рівні мікромереж та малих

електростанцій, тоді як питання взаємодії з побутовими споживачами електроенергії розглядаються переважно на концептуальному рівні.

У роботі [8] подано поглиблений огляд оптимізаційних методів, що застосовуються в системах домашнього енергоменеджменту. Проаналізовано генетичні алгоритми, алгоритми рою частинок, методи цілочислового програмування та інші підходи, спрямовані на зниження витрат на електроенергію або підвищення рівня самоспоживання власної генерації. Автори наголошують, що ефективне практичне впровадження таких алгоритмів потребує наявності достовірної телеметрії, адаптивних засобів керування навантаженнями та сумісності з реальними апаратними засобами, однак завдання створення відкритої апаратно-програмної платформи, здатної забезпечити комплексну інтеграцію цих компонентів, у дослідженні залишається невирішеним.

Близькою за змістом до тематики даного дослідження є робота [9], у якій запропоновано застосування мікроконтролера ESP32 для реалізації непрямого керування комерційними інверторами в житлових фотоелектричних мікромережах. Продемонстровано, що використання доступного за вартістю контролера дає змогу підвищити гнучкість керування інвертором і пристосувати режими його роботи до індивідуальних потреб користувача. Водночас запропоноване рішення зосереджене переважно на рівні інвертора та мікромережі і не передбачає повноцінної інтеграції з платформами на кшталт Home Assistant, системами керування акумуляторами (BMS) побутових накопичувачів енергії та сценаріями управління окремими побутовими споживачами.

У публікації [10] досліджується інтеграція гібридних відновлюваних джерел енергії в архітектуру розумного будинку із застосуванням IoT-підходу. Авторами запропоновано узагальнену модель взаємодії генерації, накопичувачів енергії та навантажень, а також продемонстровано можливості зменшення споживання електроенергії з мережі та підвищення загальної енергоефективності системи. Разом із тим практична реалізація значною мірою базується на використанні хмарних сервісів, тоді як питання розгортання повністю локальної, відкритої

апаратно-програмної платформи на основі Raspberry Pi, ESP32, брокера MQTT та Home Assistant у роботі не отримало детального висвітлення.

У публікації [11] досліджується інтелектуальне моделювання мікромереж типу PV–BESS (сонячна електростанція – система накопичення енергії) з акцентом на підвищення їхньої стабільності, кіберфізичної надійності та запобігання аварійним відключенням електропостачання. Автори аналізують різні стратегії керування та оцінюють їхній вплив на функціонування мікромережі в позаштатних режимах. Водночас дослідження переважно зосереджене на системному рівні, тоді як прикладні питання керування окремими побутовими споживачами в умовах реального розумного будинку практично не розглядаються.

У роботі [12] запропоновано IoT-орієнтований підхід до реалізації механізмів керування попитом (demand response) в енергоефективних розумних будинках. Показано, що управління гнучкими навантаженнями на основі сигналів від енергосистеми та локальних вимірювань дає змогу суттєво зменшити пікові навантаження і скоротити витрати на електроенергію. Разом із тим конкретні реалізації з використанням відкритих платформ, а також інтеграція з гібридними інверторами й локальними сонячними електростанціями подані здебільшого на концептуальному рівні.

У дослідженні [13] наведено приклад IoT-керування тепловими насосами в контексті енергетичного переходу. Запропонована архітектура забезпечує оптимізацію теплового комфорту та енергоспоживання шляхом адаптивного керування обладнанням на основі даних сенсорів і зовнішніх сервісів. Водночас реалізація орієнтована на конкретний клас обладнання та не передбачає інтеграції із сонячною генерацією й акумуляторними системами зберігання енергії.

Узагальнення результатів аналізу публікацій [5–13] свідчить про те, що на сьогодні ґрунтовно опрацьовані питання моделювання кіберфізичних енергетичних систем, застосування оптимізаційних методів у домашньому енергоменеджменті та впровадження IoT-рішень у мікромережах і розумних будинках. Водночас недостатньо висвітленими залишаються аспекти створення повністю відкритої апаратно-програмної платформи енергоменеджменту на базі

Raspberry Pi 4, ESP32, MQTT, Home Assistant і сервісів взаємодії з BMS, глибокої інтеграції телеметрії від гібридного інвертора та акумуляторної системи в сценарії автоматизованого керування побутовими навантаженнями, реалізації рішень, незалежних від закритих хмарних сервісів виробників і здатних забезпечувати захищений віддалений доступ через віртуальні мережі, зокрема ZeroTier One, а також детального опрацювання практичних прикладів керування конкретними гнучкими навантаженнями (наприклад, електричним бойлером) з урахуванням стану СЕС, акумулятора та профілю споживання будинку.

З урахуванням виявлених обмежень наявних підходів завдання, що розв’язується в даній кваліфікаційній роботі, формулюється як розроблення та дослідження інтегрованої кіберфізичної системи розумного будинку з сонячною електростанцією та акумуляторною батареєю, реалізованої на основі відкритих апаратно-програмних платформ. Така система має забезпечувати збір детальної телеметрії від інвертора та BMS, її передавання через MQTT-брокер Mosquitto до сервера Home Assistant, реалізацію rule-based сценаріїв енергоменеджменту з керуванням некритичними навантаженнями (на прикладі електричного бойлера), а також можливість безпечного віддаленого доступу через ZeroTier One, створюючи підґрунтя для подальшого впровадження прогнозних і оптимізаційних алгоритмів, описаних у працях [4–5, 8–9].

1.7. Висновки до розділу 1

У першому розділі виконано комплексний аналіз проблеми побудови систем контролю параметрів енергетичних установок у складі розумного дому. Показано, що ефективність використання відновлюваних джерел енергії та систем накопичення критично залежить від якості вимірювальної інформації. Визначено, що основною проблемою існуючих рішень є недостатня інтеграція вимірювальних підсистем та обмежена точність визначення ключових параметрів, таких як ступінь зарядженості акумуляторів.

Обґрунтовано доцільність застосування концепції інформаційно-вимірювальних систем з відкритою архітектурою, що дозволяє поєднати переваги спеціалізованих вимірювальних засобів з потужними алгоритмами обробки даних на серверному рівні. Визначено, що використання цифрових інтерфейсів та протоколів Інтернету речей дозволяє мінімізувати похибки передачі даних, але вимагає вирішення питань кібербезпеки та синхронізації. Сформульовані завдання дослідження спрямовані на створення системи, яка усуне виявлені недоліки та забезпечить новий рівень керованості та енергоефективності автономних енергосистем.

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

2.1. Математичне моделювання вимірювальних каналів та процесів перетворення інформації

Проєктування високоефективної інформаційно-вимірювальної системи для керування енергетичними потоками розумного дому вимагає створення строгої математичної моделі, яка б описувала проходження сигналу від первинного фізичного середовища до цифрового коду в пам'яті обчислювального пристрою. У контексті досліджуваної системи, що включає сонячну електростанцію та літій-залізо-фосфатні накопичувачі, вимоги до точності вимірювального каналу є критичними. Це зумовлено тим, що розрядна характеристика LiFePO4 акумуляторів має надзвичайно малий нахил (похибка вимірювання напруги в 10 мВ може призвести до похибки оцінки SOC у 10-15%), тому спрощені моделі перетворення не дозволяють досягти необхідної метрологічної достовірності.

Вимірювальний канал розглядається як послідовне з'єднання ланок: вхідного узгоджувального кола, фільтра, пристрою вибірки-зберігання та власне аналого-цифрового перетворювача. Базова структура вимірювального перетворення може бути описана операторним рівнянням, що пов’язує вхідний вектор фізичних величин X(t) з вихідним вектором цифрових даних Y(n):

$$Y(n) = \Phi_{ADC}\{H(j\omega)[K_{norm}(S_{sens}(X(t)) + \xi_{therm}(t))] + \xi_{int}(t)\} \quad (2.1)$$

де Ssens — функція перетворення первинного сенсора; ξtherm(t) — тепловий шум Джонсона-Найквіста вхідного кола; Knorm — коефіцієнт передачі нормалізуючого кола; H(jω) — частотна характеристика антиаліасингового

фільтра; ΦADC — оператор дискретизації та квантування; ξint(t) — власні шуми перетворювача.

Детального аналізу потребує вхідне коло вимірювання напруги шини постійного струму (DC Bus), яка в системах із гібридними інверторами може сягати 60 В. Оскільки вхідний діапазон АЦП мікроконтролера ESP32 обмежений напругою живлення або внутрішнім опорним джерелом (Vref≈1.1...3.3 В), застосовується резистивний подільник напруги. Класична модель ідеального подільника є недостатньою, оскільки не враховує струмів витоку входу АЦП та паразитної ємності монтажу. Уточнена математична модель статичного режиму вимірювального кола з урахуванням струму витоку Ileak описується виразом:

$$U_{in_adc} = \left(\frac{U_{bus}}{R_1 + R_2} + I_{leak} \right) \cdot (R_2 || R_{in}) \tag{2.2}$$

де R1, R2 — опори плечей подільника, Rin — диференційний вхідний опір АЦП. Вплив температури на точність перетворення моделюється через температурні коефіцієнти опору резисторів α1 та α2. Функція відносної мультиплікативної температурної похибки δT має вигляд:

$$\delta_T(\Delta T) = \frac{K_{div}(T) - K_{div}(T_0)}{K_{div}(T_0)} \approx (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Delta T \tag{2.3}$$

З аналізу формули (2.3) випливає, що для забезпечення точності вимірювання на рівні 0.1% в робочому діапазоні температур необхідно використовувати прецизійні резистори з узгодженими ТКО, або вводити програмну корекцію на основі вимірювання температури плати.

Наступним критичним етапом є динаміка процесу вибірки сигналу. АЦП послідовного наближення (SAR ADC), що інтегровані в ESP32, містять на вході конденсатор вибірки Sample and Hold. Точність вимірювання залежить від того, чи

встигне цей конденсатор зарядитися до вхідної напруги за час вибірки tsample. Напруга на конденсаторі змінюється за експоненційним законом:

$$U_{C_{sh}}(t) = U_{in_adc}\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{in}}\right)\right) \tag{2.4}$$

де τin=(Rsource+Rswitch)Csh — стала часу вхідного кола. Якщо вихідний опір подільника Rsource є занадто високим (для зменшення енергоспоживання), стала часу τin зростає, і при малому часі вибірки виникає динамічна похибка недозаряду. Для зменшення цієї похибки до рівня менше 0.5 LSB (молодшого значущого розряду) необхідно, щоб час вибірки задовольняв умову tsample>τinln(2N+1), де N — розрядність АЦП.

Процес квантування вносить незворотну похибку, яка математично моделюється як адитивний шум квантування. Для ідеального N-бітного АЦП крок квантування становить Δ=Vref/2N. Проте реальна передавальна характеристика АЦП ESP32 має суттєву нелінійність, яка описується параметрами інтегральної та диференційної нелінійності. Повна модель вихідного коду Dout з урахуванням зміщення нуля (Offset Error) Eoff, похибки підсилення Egain та нелінійності виглядає так:

$$D_{out} = \text{round}\left(\frac{U_{in_adc}(1 + E_{gain}) + E_{off} + V_{INL}(U_{in_adc})}{V_{ref}} 2^N\right) \tag{2.5}$$

Функція VINL(U) для ESP32 має складний характер з локальними екстремумами, що вимагає застосування кусково-лінійної апроксимації або поліноміальної корекції на етапі калібрування системи. Без такої корекції похибка може досягати 1-2%, що є неприпустимим для задач енергомоніторингу.

Для підвищення ефективної розрядності та придушення шумів застосовується метод передискретизації. Математичне підґрунтя методу полягає у властивостях статистичного усереднення некорельованого білого шуму. Якщо до

корисного сигналу додається шумовий компонент σnoise, то при усередненні k вибірок стандартне відхилення шуму зменшується в k разів. Ефективна розрядність системи при цьому зростає згідно з формулою:

$$ENOB = N + \frac{1}{2}\log_2(k) - \frac{1}{2}\log_2\left(\frac{\sigma^2_{noise}}{\Delta^2/12}\right) \quad (2.6)$$

Таким чином, використання програмного оверсемплінгу з коефіцієнтом k=256 дозволяє теоретично отримати додаткові 4 біти роздільної здатності, перетворюючи 12-бітний фізичний АЦП у віртуальний 16-бітний вимірювальний канал. Це дозволяє детектувати зміни напруги на рівні мілівольт, що є необхідною умовою для коректної роботи алгоритмів оцінки SOC та SOH. Окрім того, оверсемплінг діє як цифровий фільтр низьких частот, зменшуючи вплив високочастотних електромагнітних завад від ШІМ-модуляції інвертора.

2.2. Математичне моделювання енергетичних процесів та характеристик фотоелектричних перетворювачів

Розробка прецизійної інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу сонячної електростанції неможлива без наявності адекватної математичної моделі об'єкта вимірювання — фотоелектричного модуля. З точки зору теорії електричних кіл та напівпровідникової фізики, сонячна панель являє собою нелінійне джерело струму, внутрішній імпеданс та вихідні характеристики якого стохастично змінюються під впливом зовнішніх збурень: густини потоку сонячного випромінювання (інсоляції), спектрального складу світла та температури p-n переходу. Для реалізації алгоритмів діагностики ефективності генерації та верифікації роботи MPPT-контролера інвертора необхідно використовувати математичну модель, яка б пов'язувала електричні параметри на виході модуля з фізичними умовами навколишнього середовища.

У сучасній науковій літературі для інженерних розрахунків найбільш поширеною є однодіодна модель еквівалентної схеми, яка забезпечує оптимальний компроміс між обчислювальною складністю та точністю апроксимації реальної вольт-амперної характеристики. Еквівалентна схема складається з ідеального джерела фотоструму Iph, увімкненого паралельно до нього діода, що моделює рекомбінаційні процеси в p-n переході, шунтуючого опору Rsh, що характеризує струми витоку по краях кристала та через дефекти структури, а також послідовного опору Rs, який враховує омічний опір напівпровідникового матеріалу, металевих контактів та з'єднувальних провідників. Відповідно до першого закону Кірхгофа, вихідний струм навантаження I визначається як різниця фотоструму, струму через діод Id та струму витоку через шунт Ish:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{2.7}$$

Підставляючи вираз для вольт-амперної характеристики діода Шоклі та закон Ома для шунтуючого опору, отримуємо фундаментальне трансцендентне рівняння, що описує статичну характеристику фотомодуля:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nN_s kT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{2.8}$$

де V — напруга на клемах модуля; I0 — струм зворотного насичення діода (темновий струм); q=1.602 · 10^(−19) Кл — заряд електрона; k=1.381 · 10^(−23) Дж/К — стала Больцмана; T — абсолютна температура p-n переходу в Кельвінах; n — коефіцієнт ідеальності діода (зазвичай 1≤n≤1.5 для кремнієвих елементів); Ns — кількість послідовно з'єднаних сонячних комірок у модулі. Складність застосування цього рівняння в мікроконтролерних системах реального часу полягає в тому, що воно є неявним відносно струму I (змінна I входить як у ліву, так і в праву частину рівняння, причому в правій — під знаками експоненти).

Тому для знаходження робочої точки необхідно застосовувати ітераційні чисельні методи, наприклад, метод Ньютона-Рафсона, або використовувати спрощену явну апроксимацію на основі W-функції Ламберта.

Критично важливим аспектом моделювання є врахування температурних та радіаційних залежностей параметрів моделі. Фотострум Iph вважається прямо пропорційним інтенсивності інсоляції G (Вт/м²), однак він також має незначну позитивну температурну залежність через зменшення ширини забороненої зони напівпровідника при нагріванні:

$$I_{ph}(G,T) = \frac{G}{G_{STC}}\left[I_{sc,STC} + \alpha_{I_{sc}}(T - T_{STC})\right] \tag{2.9}$$

де індекс STC позначає стандартні тестові умови (G=1000 Вт/м², T=25◦C), Isc — струм короткого замикання, αIsc — температурний коефіцієнт струму. На відміну від струму, напруга холостого ходу Voc має яскраво виражену обернену залежність від температури, що пояснюється експоненційним зростанням струму насичення I0 при підвищенні температури. Модель струму насичення має вигляд:

$$I_0(T) = I_{0,STC}\left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{nk}\left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right] \tag{2.10}$$

де Eg — ширина забороненої зони кремнію (1.12 еВ). Ця залежність є ключовою для метрологічного аналізу: ігнорування точного вимірювання температури панелей призводить до похибки моделювання напруги близько −2.2 мВ/°C на комірку, що для високовольтного стрінгу (наприклад, 10 панелей) може дати відхилення у 10-15 В при нагріванні панелей до 60◦C.

Важливим завданням інформаційно-вимірювальної системи є визначення теоретичної точки максимальної потужності для поточних погодних умов. Це еталонне значення необхідне для оцінки ефективності роботи MPPT-трекера

інвертора. Потужність модуля визначається як P=V · I. Умова максимуму функції потужності вимагає рівності нулю її першої похідної по напрузі:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} = 0 \tag{2.11}$$

Диференціюючи базове рівняння (2.8) по напрузі, отримуємо вираз для диференціальної провідності модуля:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{\frac{qI_0}{nN_skT}\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{nN_skT}\right) + \frac{1}{R_{sh}}}{1 + R_s\left[\frac{qI_0}{nN_skT}\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{nN_skT}\right) + \frac{1}{R_{sh}}\right]} \tag{2.12}$$

Підстановка (2.12) у (2.11) дозволяє сформувати систему рівнянь, розв'язок якої дає координати точки максимальної потужності (Vmpp,Impp). Якщо виміряна системою реальна потужність Pmeas відрізняється від розрахункової теоретичної Pmodel більше ніж на величину розширеної невизначеності вимірювань, це свідчить про наявність аномалій. Зокрема, аналіз форми ВАХ дозволяє розрізняти типи несправностей: рівномірне зниження струму у всьому діапазоні напруг вказує на забруднення поверхні, тоді як зниження коефіцієнта заповнення ВАХ є індикатором зростання послідовного опору Rs, що характерно для процесів старіння контактних з'єднань та деградації паяних швів.

Коефіцієнт заповнення є важливим діагностичним параметром, який обчислюється як:

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \tag{2.13}$$

Зниження FF нижче паспортного значення (зазвичай 0.75-0.8 для монокристалічного кремнію) є раннім маркером деградації модуля, навіть якщо загальна потужність ще залишається в межах допуску. Таким чином, розроблена математична модель виступає не лише інструментом для прогнозування генерації, а й метрологічною основою (віртуальним еталоном) для підсистеми технічної діагностики стану сонячної електростанції. Врахування в моделі паразитних опорів Rs та Rsh дозволяє підвищити точність прогнозування енергетичного балансу розумного дому на 5-10% порівняно зі спрощеними моделями, що не враховують внутрішніх втрат.

2.3. Алгоритми непрямого вимірювання та оцінювання параметрів акумуляторних батарей

Однією з ключових проблем метрологічного забезпечення сучасних систем автономного енергопостачання є достовірне визначення параметрів стану хімічних джерел струму. У досліджуваній кіберфізичній системі використовуються літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї, які, володіючи високими показниками питомої енергоємності та ресурсу, створюють значні труднощі для вимірювальних систем. Головна метрологічна проблема полягає в тому, що основний енергетичний параметр — ступінь зарядженості — не є фізичною величиною, яку можна виміряти прямим методом за допомогою безпосереднього порівняння з еталоном. SOC є внутрішньою змінною стану електрохімічної системи, яка відображає відношення доступної кількості рухомих носіїв заряду (іонів літію, інтеркальованих в аноді) до номінальної ємності комірки.

Складність оцінювання SOC для хімії LiFePO4 обумовлена специфічною термодинамікою фазових переходів у катодному матеріалі, що призводить до формування надзвичайно пологої кривої розряду. У діапазоні SOC від 20% до 80% напруга розімкнутого кола змінюється в межах всього 100–150 мВ. Це означає, що навіть незначна інструментальна похибка вольтметра (на рівні 10 мВ) або падіння

напруги на внутрішньому опорі під навантаженням може призвести до похибки оцінки SOC у 10–15%. Тому прості методи, що базуються на однозначній функціональній залежності SOC=f(U), є непридатними для динамічних систем розумного дому.

Для вирішення цієї задачі необхідно застосовувати методи непрямих сукупних вимірювань, що базуються на комплексуванні інформації про струм, напругу та температуру. Базовим методом є ампер-годинне інтегрування (кулонометрія). Математична модель зміни SOC у часі описується інтегральним рівнянням:

$$z(t) = z(t_0) - \frac{1}{C_{bat}} \int_{t_0}^{t} \eta(\tau) \cdot i(\tau) d\tau \tag{2.14}$$

де z(t) — поточне значення SOC (відносні одиниці 0..1); z(t0) — початкове значення; Cbat — повна ємність батареї в Ампер-секундах (А·с); i(τ) — миттєве значення струму (позитивне при розряді); η — кулонівська ефективність, яка враховує втрати на побічні хімічні реакції та тепловиділення. При дискретній реалізації алгоритму на мікроконтролері інтеграл замінюється сумою:

$$z_k = z_{k-1} - \frac{\eta \Delta t}{C_{bat}} i_k \tag{2.15}$$

Метрологічний аналіз цього методу показує його вразливість до систематичних похибок. Якщо датчик струму має некомпенсоване зміщення нуля Δi, то похибка оцінки SOC зростає лінійно з часом, перетворюючись на нестаціонарний випадковий процес типу "випадкового блукання". Дисперсія похибки оцінки σz^2 в момент часу t визначається як:

$$\sigma_z^2(t) = \sigma_{z0}^2 + \left(\frac{\Delta t}{C_{bat}}\right)^2 \sum_{j=1}^{k} \sigma_i^2 + \left(\frac{t \cdot \Delta i}{C_{bat}}\right)^2 \quad (2.16)$$

Для усунення накопичення похибки та забезпечення робастності вимірювань у роботі розроблено алгоритм на основі розширеного фільтра Калмана. Цей метод дозволяє оптимальним чином поєднати (data fusion) неточну модель процесу (рівняння кулонометрії) з шумними вимірюваннями вихідної величини (напруги на клемах), мінімізуючи середньоквадратичну похибку оцінювання.

Для побудови фільтра Калмана необхідно сформувати математичну модель акумулятора у просторі станів. Найбільш адекватною для задач керування в реальному часі є модель еквівалентної електричної схеми другого порядку, яка включає джерело EPC, послідовний активний опір R0 та дві RC-ланки, що моделюють швидкі (перенесення заряду) та повільні (дифузія) перехідні процеси поляризації.

Вектор стану системи визначається як xk=[zk,V1,k,V2,k]T, де V1,k та V2,k — напруги на поляризаційних конденсаторах. Рівняння переходу станів у дискретному часі записується у матричній формі:

$$x_k = A_k x_{k-1} + B_k i_k + w_k \quad (2.17)$$

де wk — вектор шуму процесу з коваріаційною матрицею Qk. Матриці переходу Ak та керування Bk мають вигляд:

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-\frac{\Delta t}{\tau_1}) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-\frac{\Delta t}{\tau_2}) \end{bmatrix}, \quad B_k = \begin{bmatrix} -\frac{\eta \Delta t}{C_{bat}} \\ R_1(1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau_1})) \\ R_2(1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau_2})) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Тут τ1=R1C1 та τ2=R2C2 — сталі часу перехідних процесів. Рівняння вимірювання (Measurement Equation), що пов’язує вектор стану з вимірюваною напругою на клемах Uk, є нелінійним:

$$U_k = V_{OCV}(z_k) - V_{1,k} - V_{2,k} - i_k R_0 + v_k \tag{2.19}$$

де Vocv(zk) — нелінійна функція залежності напруги розімкнутого кола від SOC, яка задається таблично або поліноміальною апроксимацією 6-го порядку; vk — шум вимірювання напруги з дисперсією R.

Алгоритм EKF виконується рекурсивно на кожному кроці дискретизації і складається з двох етапів. Етап 1: Передбачення. Обчислюється апріорна оцінка вектора стану x^k− на основі попереднього стану та виміряного струму, а також апріорна матриця коваріації помилки Pk−:

$$\hat{x}_k^- = A_k \hat{x}_{k-1}^+ + B_k i_k \tag{2.20}$$

$$P_k^- = A_k P_{k-1}^+ A_k^T + Q_k \tag{2.21}$$

У другому етапі відбувається лінеаризація функції вимірювання шляхом обчислення якобіана Hk (матриці частинних похідних) у точці апріорної оцінки:

$$H_k = \frac{\partial h(\hat{x}_k^-, i_k)}{\partial x} = \left[\left. \frac{dV_{OCV}}{dz} \right|_{z=\hat{z}_k^-}, -1, -1 \right] \tag{2.22}$$

Далі обчислюється коефіцієнт підсилення Калмана Kk, який визначає вагу нев’язки (інновації) між виміряною реальною напругою yk та передбаченою моделлю y^k:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R)^{-1} \tag{2.23}$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k(y_k - (V_{OCV}(\hat{z}_k^-) - \hat{V}_{1,k}^- - \hat{V}_{2,k}^- - i_k R_0)) \tag{2.24}$$

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \tag{2.25}$$

Метрологічна сутність роботи фільтра полягає в тому, що на ділянках ВАХ з великою крутизною (dVocv/dz), наприклад, при SOC<10% або SOC>90%, значення елементів матриці Hk зростає, що призводить до збільшення коефіцієнта підсилення Kk. Це означає, що система більше довіряє вольтметру, автоматично коригуючи накопичену похибку кулонометрії. На плато (середній діапазон SOC), де dVocv/dz→0, коефіцієнт k зменшується, і система переважно покладається на інтегрування струму, ігноруючи флуктуації напруги.

Окремим завданням є оцінювання ступеня працездатності, який характеризує поточну максимальну ємність батареї відносно номінальної. SOH є параметром, що змінюється дуже повільно, тому його оцінка виконується не в кожному циклі, а на основі аналізу повних циклів заряду-розряду. Математично SOH визначається методом найменших квадратів на основі відношення накопиченого заряду до зміни SOC:

$$SOH = \frac{\int_{t_1}^{t_2} i(\tau) d\tau}{C_{nom} \cdot (z(t_2) - z(t_1))} \tag{2.26}$$

Для підвищення точності оцінки SOH у системі також реалізовано алгоритм ідентифікації внутрішнього опору R0. Зростання R0 є індикатором деградації електродів та електроліту. Визначення R0 здійснюється в моменти стрибкоподібної зміни струму навантаження за формулою:

$$R_0 = \frac{|\Delta U|}{|\Delta i|} = \frac{|U(t_+) - U(t_-)|}{|i(t_+) - i(t_-)|} \tag{2.27}$$

Таким чином, розроблений комплекс алгоритмів дозволяє трансформувати набір прямих вимірювань (струм, напруга, температура) у достовірні оцінки внутрішніх параметрів стану (SOC, SOH, R0), забезпечуючи метрологічну надійність системи керування.

2.4. Аналіз складових похибки вимірювальних каналів та оцінювання невизначеності результатів

Відповідно до сучасних міжнародних стандартів, зокрема «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement», результат вимірювання не може вважатися повним без кількісної оцінки його якості — невизначеності. У розроблюваній інформаційно-вимірювальній системі керування енергопотоками розумного дому достовірність вимірювальної інформації є критичним фактором. Похибка вимірювання вхідних величин трансформується через математичні моделі контролера у похибку керуючих впливів, що може призвести до неоптимального використання ємності акумуляторів. Тому побудова бюджету невизначеностей є обов’язковим етапом проєктування.

Процес оцінювання точності базується на законі поширення невизначеностей. Для непрямого вимірювання величини Y, яка є функцією багатьох аргументів xi, сумарна стандартна невизначеність uc(y) визначається як геометрична сума внесків невизначеностей вхідних величин з урахуванням коефіцієнтів чутливості. У загальному випадку, коли вхідні величини можуть бути корельованими, вираз для сумарної невизначеності набуває вигляду:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} c_i c_j u(x_i, x_j) \tag{2.28}$$

де ci — коефіцієнти чутливості (частинні похідні функції перетворення); u(xi) — стандартна невизначеність і-го параметра; u(xi,xj) — коваріація між параметрами.

Аналіз каналу вимірювання напруги показує, що сумарна невизначеність формується з двох основних груп: невизначеності за типом А (випадкової) та за типом В (систематичної). Невизначеність за типом А обумовлена власними шумами АЦП та наведеннями в колах. Вона ефективно зменшується шляхом статистичної обробки — усереднення серії вимірювань (оверсемплінгу). Натомість домінуючою є невизначеність за типом В, яка визначається інструментальними властивостями компонентів: допуском резисторів вхідного дільника та, що найважливіше, нестабільністю джерела опорної напруги. Температурний дрейф цих компонентів створює мультиплікативну похибку, яка не може бути усунена простим усередненням і вимагає періодичного калібрування або термокомпенсації.

Для каналу вимірювання струму на базі датчиків Холла критичною є адитивна складова похибки — зміщення нуля. Цей параметр має сильну температурну залежність і, на відміну від похибки коефіцієнта перетворення, вносить значний вклад при вимірюванні малих струмів. Метрологічний аналіз показує, що без алгоритмічної корекції дрейфу нуля відносна похибка вимірювання струму в режимі малого навантаження може досягати неприпустимих значень, що спотворює подальший розрахунок спожитої енергії.

Особливу увагу в роботі приділено оцінці невизначеності непрямого вимірювання потужності $P=U \cdot I$. Важливим метрологічним нюансом даної системи є те, що вимірювання напруги та струму здійснюються одним АЦП зі спільним джерелом опорної напруги. Це створює сильну позитивну кореляцію між результатами. Якщо опорна напруга змінюється, це одночасно впливає на коди обох каналів. Ігнорування цього кореляційного зв'язку ($r \approx 1$) у формулі (2.12) призводить до суттєвого заниження оцінки реальної невизначеності. З

урахуванням кореляції відносна невизначеність вимірювання потужності wP визначається як:

$$w_P = \sqrt{w_U^2 + w_I^2 + 2r(U,I)w_U w_I} \tag{2.29}$$

Цей вираз демонструє, що систематична похибка опорного джерела фактично подвоює свій вплив на результат вимірювання потужності, що обґрунтовує необхідність використання прецизійних зовнішніх джерел VREF.

Також проаналізовано процес накопичення невизначеності при інтегруванні (розрахунок заряду або енергії). Оскільки інтегрування є сумою великої кількості дискретних відліків, характер накопичення похибки залежить від її природи. Випадкова складова (шум) при інтегруванні зростає пропорційно кореню квадратному з часу (t), тоді як систематична складова (зміщення нуля датчика струму) зростає лінійно пропорційно часу (t). Це теоретично пояснює, чому метод кулонометрії без зовнішньої корекції призводить до необмеженого зростання похибки оцінки SOC з часом, перетворюючись на нестаціонарний процес, і підтверджує безальтернативність використання методів комплексування даних, таких як фільтр Калмана, для забезпечення довготривалої метрологічної стабільності системи.

2.5. Алгоритми цифрової обробки сигналів та часової синхронізації в розподілених вимірювальних системах

Функціонування інформаційно-вимірювальної системи в реальних умовах експлуатації неминуче супроводжується впливом електромагнітних завад. Робота силового інвертора, який використовує широтно-імпульсну модуляцію для перетворення енергії, створює потужний спектр гармонік, що наводяться на вхідні кола вимірювальних перетворювачів. У результаті, «сирий» сигнал з виходу АЦП являє собою адитивну суміш корисного низькочастотного сигналу (повільні зміни

струму заряду та напруги батареї) та високочастотного шуму. Пряме використання таких зашумлених даних в алгоритмах керування є неприпустимим, оскільки це призводить до нестабільності роботи регуляторів та хибних спрацювань захисту.

Для виділення інформативної складової сигналу в роботі застосовано методи цифрової фільтрації. Для придушення високочастотних шумів найбільш ефективним з точки зору обчислювальних ресурсів мікроконтролера є рекурсивний фільтр експоненційного згладжування. Його робота описується різницевим рівнянням:

$$y[n] = \alpha x[n] + (1 - \alpha) y[n - 1] \tag{2.30}$$

Фізично цей алгоритм реалізує цифровий аналог RC-фільтра низьких частот. Параметр α визначає частоту зрізу фільтра і обирається як компроміс між якістю згладжування та швидкодією. Мале значення α забезпечує глибоке придушення завад мережі 50 Гц, але вносить фазову затримку (динамічну похибку), що уповільнює реакцію системи на різкі зміни навантаження. Оскільки процеси в акумуляторній батареї є досить інерційними, у даній системі пріоритет віддано якості фільтрації.

Проте лінійні фільтри, такі як EMA, є неефективними проти імпульсних завад (поодиноких викидів), які виникають при комутації потужних індуктивних споживачів. Лінійний фільтр «розмазує» енергію імпульсу в часі, спотворюючи результат вимірювання на тривалий період. Для вирішення цієї проблеми застосовано медіанну фільтрацію. Суть методу полягає у формуванні варіаційного ряду з вікна вибірок та виборі його центрального елемента. Це нелінійна операція, яка дозволяє повністю видалити аномальні викиди, не впливаючи на крутизну фронтів корисного сигналу. У системі реалізовано каскадну схему: спочатку сигнал проходить через медіанний фільтр для очищення від викидів, а потім через EMA-фільтр для згладжування шуму квантування.

Другою фундаментальною проблемою розподілених IoT-систем є часова синхронізація. Вимірювальні вузли (інвертор, BMS, розумні лічильники) працюють незалежно і передають дані асинхронно через бездротову мережу. Це призводить до явища джитера (jitter) — випадкової варіації часу доставки пакетів. Якщо розраховувати баланс потужності, просто підсумовуючи останні отримані значення, то через неузгодженість моментів вимірювання виникатимуть значні миттєві похибки («фантомні» дисбаланси).

Для забезпечення метрологічної коректності застосовано метод ресемплінгу (resampling) на основі лінійної інтерполяції. Сервер системи керування формує єдину віртуальну шкалу часу. Для кожного вимірювального каналу будується безперервна функція часу шляхом інтерполяції між дискретними точками, що надходять з мережі. Це дозволяє розрахувати значення всіх параметрів (генерації, споживання, стану батареї) для одного й того ж моменту часу, формуючи когерентний «зріз» стану системи.

Критично важливим для цього є маркування даних точним часом безпосередньо на стороні сенсора в момент вимірювання, а не в момент отримання даних сервером. Для цього всі мікроконтролери системи синхронізуються за протоколом NTP. Такий підхід робить точність вимірювання інтегральних показників (енергії) інваріантною до затримок у мережі передачі даних, що є необхідною умовою побудови надійної розподіленої інформаційно-вимірювальної системи.

2.6. Синтез алгоритмів керування на основі нечіткої логіки в умовах метрологічної невизначеності

Традиційні підходи до автоматизації енергетичних процесів зазвичай базуються на детермінованих алгоритмах із «жорсткою» логікою. Типовим прикладом є двопозиційне регулювання, яке працює за принципом порогового компаратора: «якщо виміряний параметр перевищує уставку, виконати дію». Наприклад, алгоритм утилізації надлишкової енергії може бути сформульований

так: «якщо SOC > 90%, увімкнути нагрів бойлера». З метрологічної точки зору, такий підхід є вразливим в умовах реальної експлуатації. Оскільки будь-який результат вимірювання містить невизначеність (похибку), то в ситуації, коли реальне значення параметра коливається біля порогового рівня, наявність навіть незначного шуму вимірювання призводить до явища «деренчання» (chattering) — хаотичних багаторазових комутацій виконавчого механізму. Це не лише знижує ресурс електромеханічних реле, але й вносить збурення в електричну мережу.

Для вирішення цієї проблеми та забезпечення робастності (стійкості) системи керування в роботі застосовано апарат нечіткої логіки (Fuzzy Logic). На відміну від булевої логіки, де твердження може бути лише істинним або хибним (0 або 1), нечітка логіка оперує поняттям «ступінь істинності», який може набувати будь-яких значень від 0 до 1. Це дозволяє наблизити алгоритм роботи контролера до логіки людського мислення, оперуючи не сухими цифрами, а лінгвістичними змінними, такими як «Низький заряд», «Висока генерація», «Середнє споживання».

Процес нечіткого керування складається з трьох етапів: фазифікації, логічного виведення та дефазифікації. На етапі фазифікації чіткі значення вхідних вимірюваних величин (напруги, струму, SOC) перетворюються на ступені належності до відповідних нечітких множин. Графічно це описується функціями належності (трикутними, трапецієподібними або гаусовими). З метрологічної точки зору, важливим є те, що ширина функції належності корелює з розширеною невизначеністю вимірювання. Це означає, що система «поглинає» похибки вимірювання: якщо через шум значення SOC зміниться на частку відсотка, це не призведе до різкої зміни стану системи (як у пороговому реле), а лише незначно змінить ступінь упевненості контролера, забезпечуючи плавність реакції.

Ядром системи є база правил, сформульована у вигляді продукцій «ЯКЩО — ТО». Наприклад: «ЯКЩО заряд акумулятора Високий І сонячна генерація Висока, ТО потужність нагріву Максимальна». Така структура дозволяє легко формалізувати експертні знання та створювати складні нелінійні закони керування без необхідності виведення громіздких аналітичних рівнянь. Агрегація виконання

всіх правил дозволяє системі знаходити компромісні рішення в неоднозначних ситуаціях.

Завершальним етапом є дефазифікація — перетворення нечіткого висновку назад у чіткий керуючий сигнал (наприклад, шпаруватість ШІМ-сигналу для керування ТЕН-ом). Найбільш метрологічно обґрунтованим є метод центру тяжіння, який усереднює результати всіх активних правил. Це забезпечує гладку передавальну характеристику регулятора.

Використання нечіткого контролера дозволяє реалізувати адаптивну поверхню керування. У зонах, близьких до аварійних меж (повний розряд або перезаряд), система реагує жорстко, захищаючи обладнання. У робочому діапазоні реакція є м'якою, що дозволяє згладжувати піки споживання та ефективно використовувати буферну ємність батареї. Головною перевагою такого підходу є те, що система стає нечутливою до дрібних похибок вимірювань та шумів, що усуває необхідність введення штучного гістерезису та підвищує загальну надійність енергоменеджменту.

2.7. Математичне моделювання енергетичного балансу розумного дому як об’єкта вимірювання та оптимізації

Розробка ефективних алгоритмів керування вимагає наявності формалізованої моделі енергетичних процесів, що протікають в об'єкті автоматизації. З точки зору системного аналізу, розумний будинок з інтегрованою сонячною електростанцією являє собою складну динамічну систему з декількома потоками потужності, які підлягають безперервному вимірюванню. Фундаментальне рівняння миттєвого енергетичного балансу, яке є законом збереження енергії для даної системи, записується у вигляді:

$$P_{load}(t) = P_{pv}(t) + P_{grid}(t) + P_{bat}(t) \tag{2.31}$$

де Pload(t) — сумарна потужність споживання електроприладів; Ppv(t) — потужність генерації сонячної станції; Pgrid(t) — потужність обміну з зовнішньою мережею (позитивна при імпорті, негативна при експорті); Pbat(t) — потужність акумуляторної батареї (позитивна при розряді, негативна при заряді).

Головна метрологічна складність полягає у стохастичному характері складових цього рівняння. Потужність навантаження Pload(t) є випадковим процесом, що формується внаслідок суперпозиції роботи множини побутових приладів. Математично це можна описати як суму детермінованої складової (базове навантаження Pbase) та випадкової імпульсної складової:

$$P_{load}(t) = P_{base} + \sum_{i=1}^{N} P_{dev,i} \cdot k_i(t, \xi) \tag{2.32}$$

де Pdev,i — номінальна потужність і-го приладу; ki(t,ξ) — випадкова функція перемикання (бінарна змінна 0 або 1), яка залежить від часу доби та ймовірнісної поведінки користувачів ξ.

Завданням інформаційно-вимірювальної системи є не лише фіксація поточних значень, а й мінімізація цільової функції витрат J. У контексті підвищення енергонезалежності (самоспоживання), критерій оптимізації на інтервалі часу t (наприклад, доба) формулюється як мінімізація енергії, спожитої з мережі:

$$J = \int_0^T \max(0, P_{grid}(t))dt \to \min \tag{2.33}$$

При цьому на систему накладаються жорсткі обмеження, що визначаються фізичними параметрами акумулятора, які контролюються вимірювальною підсистемою:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \tag{2.34}$$

$$|P_{bat}(t)| \leq P_{bat,max}(SOC, T^{\circ}) \tag{2.35}$$

Важливим метрологічним аспектом моделювання є те, що контролер оперує не істинними значеннями потужностей P(t), а їх оцінками P~(t), отриманими в результаті вимірювання. Ці оцінки містять похибку вимірювання Δ та затримку в часі τ, обумовлену цифровою фільтрацією та передачею даних:

$$\tilde{P}_{grid}(t) = P_{load}(t-\tau) - P_{pv}(t-\tau) - P_{bat}(t-\tau) + \Delta_{sys} \tag{2.36}$$

Наявність затримки τ у контурі регулювання призводить до того, що система не може миттєво компенсувати різкі зміни навантаження. Це викликає короткочасні перетоки енергії з мережі (або в мережу) навіть за наявності достатнього заряду акумулятора. Енергія неузгодженості Eerr, яка виникає внаслідок недосконалості вимірювального тракту, за час перехідного процесу ttr оцінюється інтегралом:

$$E_{err} = \int_0^{t_{tr}} |P_{load}(t) - P_{load}(t-\tau)| dt \tag{2.37}$$

Мінімізація цієї метрологічної похибки можлива шляхом застосування алгоритмів прогнозування навантаження. Якщо система здатна передбачити ввімкнення потужного споживача (наприклад, за розкладом або патернами поведінки), вона може заздалегідь скоригувати потужність інвертора, компенсуючи затримку τ.

Таким чином, математична модель енергетичного балансу дозволяє перейти від задачі простої стабілізації напруги до задачі оптимального керування потоками потужності. Вона пов'язує фізичні процеси генерації та споживання з

метрологічними характеристиками вимірювальних каналів (точність, швидкодія), дозволяючи кількісно оцінити вплив якості вимірювань на підсумкову енергоефективність системи розумного дому.

2.8. Аналіз надійності та ймовірності метрологічної відмови інформаційно-вимірювальної системи

Важливим аспектом проєктування вимірювальних систем, що функціонують в автономному режимі, є забезпечення їх функціональної надійності. З точки зору метрології, надійність системи характеризується не лише здатністю фізично виконувати функції збору даних, але й зберігати метрологічні характеристики (точність, збіжність) у межах встановлених допусків протягом визначеного часу експлуатації. Втрата цієї здатності класифікується як метрологічна відмова, яка часто настає раніше за повну апаратну відмову, наприклад, через дрейф параметрів компонентів.

Оцінка надійності базується на аналізі інтенсивності відмов критичних вузлів. У розроблюваній системі найбільш вразливими елементами є напівпровідникові сенсори, електролітичні конденсатори в колах живлення та контактні з'єднання, що піддаються термічному циклюванню. Метрологічна відмова найчастіше описується моделлю поступового дрейфу систематичної складової похибки. Цей процес є випадковим і залежить від умов навколишнього середовища (температури, вологості). Розуміння природи цього дрейфу дозволяє науково обґрунтувати міжперевірочний інтервал — час, через який ймовірність виходу похибки за допустимі межі перевищує критичний рівень, що вимагає проведення повторного калібрування.

Для підвищення надійності в системі реалізовано концепцію структурної надлишковості. Оскільки напруга акумулятора є критичним параметром безпеки, її вимірювання здійснюється одночасно двома незалежними каналами: вбудованим вимірювачем інвертора та розробленим зовнішнім модулем. Така дубльована структура дозволяє реалізувати функцію крос-верифікації: система

постійно порівнює покази двох каналів. Якщо розбіжність між ними перевищує розширену невизначеність вимірювань, генерується сигнал про діагностичну несправність, що запобігає прийняттю хибних керуючих рішень (наприклад, перезаряду батареї через "зависання" одного з датчиків).

Окремим аспектом є інформаційна надійність, яка стосується передачі телеметрії бездротовими каналами зв'язку. В умовах житлового дому радіоканал піддається впливу завад та інтерференції, що призводить до втрати пакетів даних. Для забезпечення цілісності історії вимірювань, необхідної для коректного розрахунку енергетичних балансів та оцінки ресурсу акумулятора, застосовується метод буферизації на стороні сенсора. При втраті зв'язку дані накопичуються в локальній пам'яті мікроконтролера і передаються пакетно після відновлення з'єднання. Такий підхід гарантує безперервність часових рядів вимірювань навіть при нестабільній роботі мережевої інфраструктури.

2.9. Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи сформовано цілісний теоретичний фундамент для побудови інформаційно-вимірювальної системи керування енергетичними ресурсами розумного дому. Ключовим результатом теоретичних досліджень стала розробка комплексу математичних моделей, які описують повний шлях перетворення інформації: від фізичних процесів в об'єкті вимірювання до прийняття керуючого рішення в умовах невизначеності.

На основі аналізу вхідних кіл доведено, що класичні моделі вимірювальних перетворювачів є недостатніми для прецизійного контролю літій-залізо-фосфатних акумуляторів через пологість їх розрядної характеристики. Запропоновано уточнені моделі, що враховують вплив дестабілізуючих факторів, зокрема температурного дрейфу компонентів та шумів квантування. Теоретично обґрунтовано необхідність застосування методу передискретизації, який дозволяє програмним шляхом підвищити роздільну здатність вимірювання та досягти необхідної чутливості для детектування малих змін напруги.

Важливим науковим здобутком є розробка алгоритму непрямого вимірювання ступеня зарядженості батареї. Показано, що традиційні методи, такі як кулонометрія, страждають від необмеженого накопичення похибки в часі. Вирішення цієї проблеми знайдено у застосуванні методів оптимального оцінювання, зокрема розширеного фільтра Калмана, який дозволяє динамічно коригувати похибку інтегрування струму за опорними вимірюваннями напруги. Це забезпечує метрологічну стійкість системи протягом тривалого часу експлуатації без необхідності частого обслуговування.

Проведений аналіз бюджету невизначеності виявив критичну роль кореляційного зв'язку між каналами вимірювання напруги та струму, що виникає через використання спільного джерела опорної напруги. Встановлено, що ігнорування цього фактору призводить до заниження оцінки реальної похибки вимірювання потужності. Це дало змогу сформулювати обґрунтовані вимоги до апаратної частини системи щодо стабільності опорних джерел.

Також теоретично вирішено проблему часової синхронізації в розподілених системах. Запропонований метод ресемплінгу на основі інтерполяції дозволяє усунути вплив мережевих затримок на точність зведення енергетичного балансу. Обґрунтування використання нечіткої логіки для контуру керування показало, що такий підхід дозволяє нівелювати вплив залишкової невизначеності вимірювань на стабільність роботи виконавчих механізмів, забезпечуючи робастність та надійність системи в цілому. Отримані теоретичні результати є необхідною базою для практичної реалізації системи, що буде розглянута в наступному розділі.

РОЗДІЛ 3
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Загальна характеристика інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями

Акумуляторні модулі сонячної електростації відіграють ключову роль у забезпеченні стабільної та енергоефективної роботи системи розумного дому. Від точності вимірювання електричних параметрів акумуляторів і коректності алгоритмів керування залежить ефективність накопичення та використання електричної енергії, рівень зношування акумуляторів і надійність функціонування всієї енергетичної системи. У зв’язку з цим розробка інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями повинна базуватися на поєднанні сучасних апаратно-програмних рішень та метрологічно обґрунтованих методів вимірювання.

Розроблювана система керування акумуляторними модулями (рис. 3.1) побудована за принципом кіберфізичної системи, у якій фізичні процеси заряджання та розряджання акумуляторів інтегровані з програмними засобами збору, передавання, оброблення та аналізу вимірювальних даних.

У межах системи здійснюється безперервний моніторинг основних електричних і теплових параметрів акумуляторних модулів, що є необхідною умовою для оцінювання їх поточного стану та прийняття керувальних рішень. Вимірювальна інформація надходить від вбудованих засобів контролю та використовується для формування команд керування режимами роботи акумуляторів з урахуванням поточного енергетичного балансу сонячної електростанції та споживання електроенергії в дому.

З метрологічної точки зору особливу увагу приділено забезпеченню достовірності вимірювань і зменшенню впливу похибок на результати оцінювання стану акумуляторних модулів. Накопичення та аналіз часових рядів вимірюваних

параметрів дають змогу виявляти відхилення від нормальних режимів роботи, оцінювати стабільність процесів заряджання та розряджання, а також підвищувати надійність роботи системи в цілому.

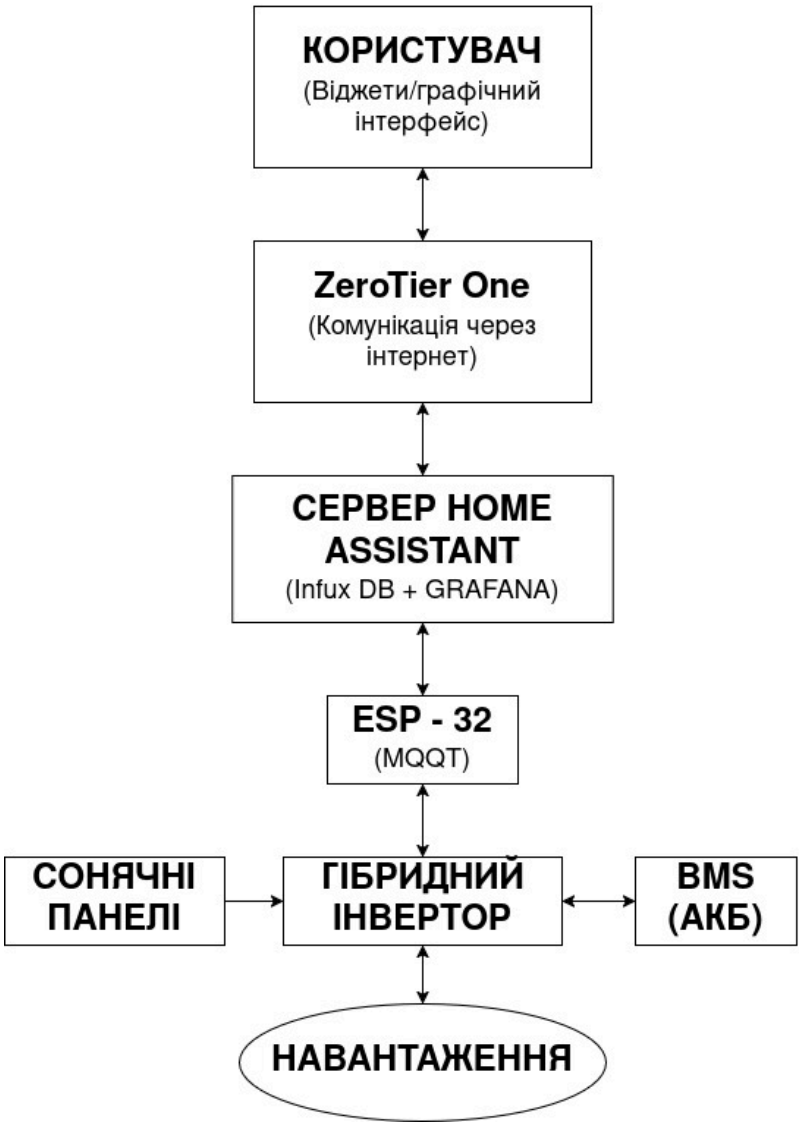

Рис. 3.1. Система керування акумуляторними модулями

Інтелектуальні алгоритми керування акумуляторними модулями формуються на основі поточних і попередніх вимірювальних даних та реалізують логіку вибору оптимальних режимів роботи з урахуванням обмежень, заданих виробником акумуляторів і вимогами енергоефективності. Такий підхід дозволяє забезпечити раціональне використання накопиченої енергії, зменшити

навантаження на електричну мережу та підвищити загальний рівень енергоефективності системи розумного дому.

3.2. Вибір і конфігурація апаратних елементів системи

Акумуляторна підсистема реалізована на основі модульної літієвої батареї, оснащеної вбудованою системою керування BMS, яка виконує функції вимірювання напруг окремих комірок, сумарної напруги батарейного блоку, струмів заряджання та розряджання, температурних параметрів, а також обчислення рівня заряду SOC. З метрологічної точки зору BMS виступає первинним вимірювальним перетворювачем, що формує цифрові значення фізичних величин, які надалі використовуються в алгоритмах інтелектуального керування. Важливим є те, що вимірювання здійснюються з фіксованою періодичністю та в заданих діапазонах, що дозволяє розглядати BMS як елемент вимірювальної підсистеми з визначеними характеристиками точності та повторюваності.

Гібридний інвертор у структурі системи виконує подвійну функцію: з одного боку, він є силовим перетворювачем енергії між СЕС, акумуляторними модулями, навантаженнями та електричною мережею, а з іншого – джерелом вимірювальної інформації про миттєві значення потужностей, напруг і струмів на своїх входах і виходах. Дані, що надаються інвертором через цифрові інтерфейси, розглядаються як результати непрямих вимірювань, оскільки формуються на основі внутрішніх датчиків і алгоритмів обробки виробника. У межах даної роботи ці дані використовуються для побудови енергетичного балансу та прийняття керуючих рішень, тому важливим є узгодження їхніх часових міток та одиниць вимірювання з даними, що надходять від BMS.

Для організації збору та уніфікації вимірювальної інформації використано мікроконтролер ESP32, який виконує роль проміжного вимірювально-інформаційного вузла. ESP32 здійснює опитування інвертора за допомогою відповідного протоколу обміну, приймає значення електричних

параметрів, виконує їхню первинну обробку та передає у вигляді структурованих повідомлень до центральної платформи керування. З метрологічної точки зору ESP32 не змінює фізичний зміст вимірювань, проте відповідає за коректну дискретизацію сигналів у часі, синхронізацію потоків даних та мінімізацію втрат інформації під час передавання.

Центральним вузлом апаратно-програмної архітектури є одноплатний комп’ютер Raspberry Pi 4, який у даній системі розглядається як обчислювальний засіб верхнього рівня. На ньому реалізовано програмну платформу, що акумулює вимірювальні дані від акумуляторних модулів, інвертора та інших елементів системи розумного дому. Raspberry Pi 4 не виконує первинних вимірювань, проте забезпечує вторинну обробку даних, їхню агрегацію, зберігання та візуалізацію. Саме на цьому рівні формується інформаційна модель стану акумуляторної системи, що є основою для інтелектуальних алгоритмів керування.

Особливу увагу в апаратній частині приділено узгодженню метрологічних характеристик різних джерел даних. Оскільки вимірювання напруг, струмів і потужностей здійснюються різними пристроями, важливо забезпечити єдині підходи до інтерпретації результатів, уніфікацію одиниць вимірювання та коректне врахування похибок. У межах системи прийнято, що дані BMS мають пріоритет при оцінюванні стану акумуляторних модулів, тоді як дані інвертора використовуються переважно для оцінки енергетичних потоків у системі загалом. Такий підхід дозволяє підвищити надійність рішень щодо режимів заряджання та розряджання акумулятора.

Таким чином, вибір і конфігурація апаратної частини інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями СЕС ґрунтуються на поєднанні силових елементів, вимірювальних засобів і обчислювальних вузлів, що разом утворюють цілісну метрологічно обґрунтовану структуру. Наявність кількох рівнів вимірювання та обробки даних (рис. 3.2), створює передумови для реалізації надійного та адаптивного керування акумуляторною підсистемою в складі кіберфізичної системи розумного дому.

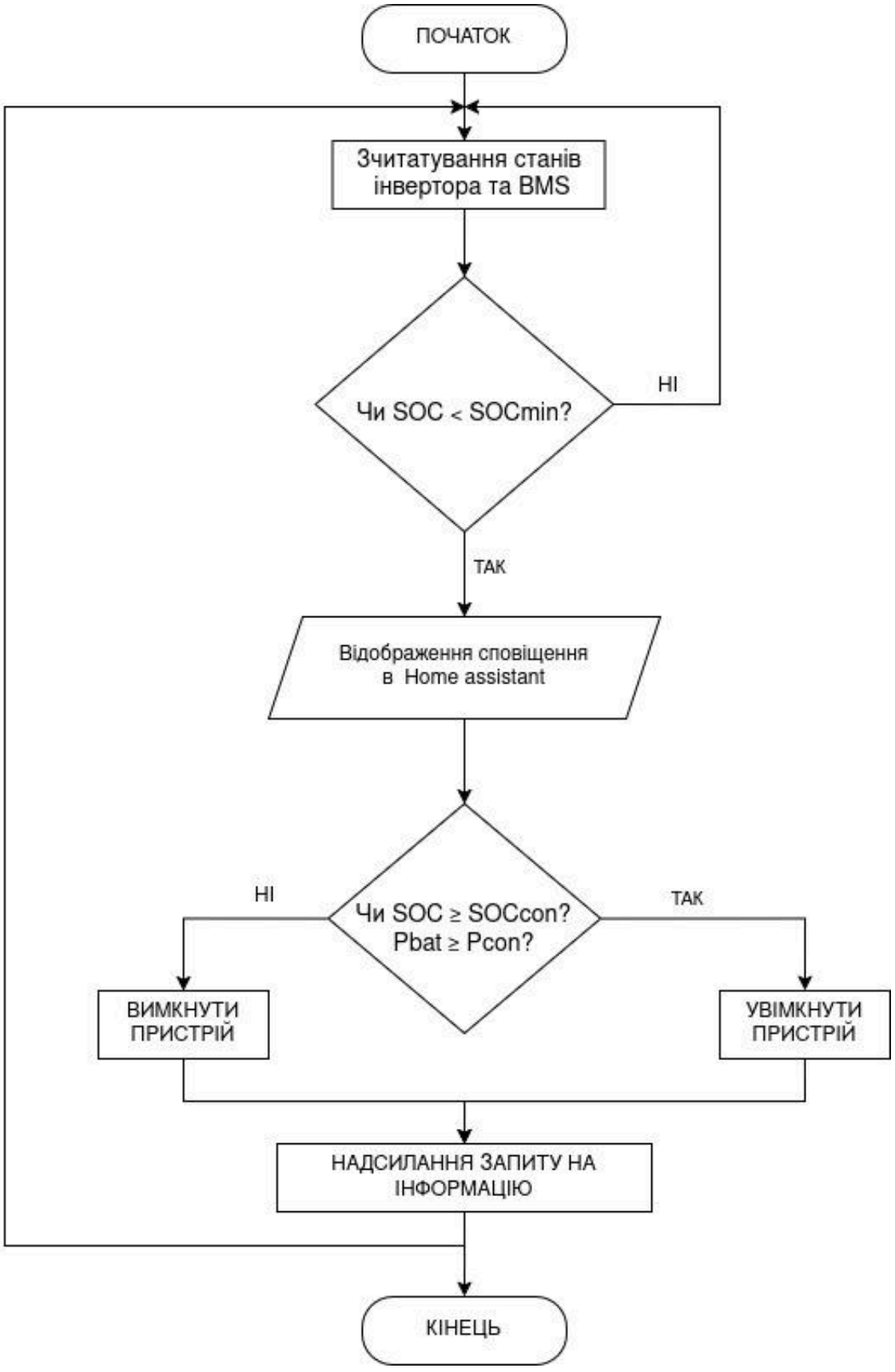

Рис. 3.2. Багаторівнева схема керування навантаженнями

3.3. Вибір і конфігурація програмних елементів системи

Як базову операційну систему використано спеціалізований дистрибутив Linux, оптимізований для роботи з Home Assistant. Такий вибір зумовлений необхідністю забезпечення безперервної роботи системи, детермінованої обробки потоків вимірювальної інформації та мінімального впливу програмних затримок на часову узгодженість даних. З метрологічної точки зору стабільність програмної платформи є критичною, оскільки некоректна робота операційної системи або фонових процесів може призводити до втрати вимірювальних відліків, порушення рівномірності дискретизації або спотворення часових міток.

Після інсталяції операційної системи виконано розгортання програмної платформи Home Assistant, яка у даній системі виступає засобом вторинної обробки та інтерпретації вимірювальних даних. Home Assistant приймає телеметрію від інвертора та системи BMS у вигляді цифрових повідомлень, перетворює їх у логічні сенсори та забезпечує подальше використання цих даних у сценаріях керування. При цьому значення фізичних величин, таких як напруга, струм, потужність і рівень заряду акумулятора, зберігаються в системі з фіксованою періодичністю, що дозволяє формувати часові ряди для подальшого аналізу та оцінювання характеристик роботи акумуляторних модулів.

Для організації обміну вимірювальною інформацією між польовими пристроями та центральним вузлом використано MQTT-брокер Mosquitto, розгорнутий безпосередньо на Raspberry Pi 4. Використання брокера повідомлень дозволяє реалізувати асинхронну передачу даних з чітким розмежуванням джерел і споживачів інформації. З позицій метрології це спрощує контроль цілісності даних, оскільки кожне повідомлення містить окреме значення виміряної величини з часовою прив’язкою, а також дає змогу оцінювати втрати пакетів або затримки в каналі передавання.

З метою забезпечення простежуваності вимірювань у програмній платформі налаштовано механізми збереження історичних даних у базі даних Home Assistant. Це дозволяє аналізувати зміну параметрів акумуляторних модулів у часі,

зіставляти показники, отримані від різних джерел, та виявляти можливі систематичні відхилення. Такий підхід є важливим для оцінювання адекватності даних, що надходять від BMS та інвертора, і формує основу для подальшого вдосконалення алгоритмів інтелектуального керування.

Окрему увагу приділено налаштуванню часової синхронізації Raspberry Pi 4 з використанням мережевих протоколів синхронізації часу. Коректна синхронізація системного часу є необхідною умовою для правильного поєднання вимірювань, отриманих від різних пристроїв, та для формування достовірних енергетичних балансів. Порушення часової узгодженості може призводити до помилок у розрахунках потужностей і енергій, що безпосередньо впливає на якість керуючих рішень.

У результаті розгортання програмної платформи на Raspberry Pi 4 сформовано централізоване програмне середовище, яке забезпечує приймання, зберігання та обробку вимірювальних даних від акумуляторних модулів сонячної електростанції, а також реалізацію інтелектуальних алгоритмів керування в системі розумного дому. Така архітектура створює необхідні передумови для метрологічно обґрунтованого аналізу стану акумуляторної підсистеми та підвищення ефективності її роботи в складі кіберфізичної системи.

3.4. Написання прошивки для ESP-32

Прошивка ESP32 (рис. 3.3) реалізована з урахуванням вимог до стабільності роботи, повторюваності циклів опитування та часової узгодженості даних. Мікроконтролер працює в режимі безперервного циклічного збору інформації, у межах якого здійснюється опитування інвертора за визначеним протоколом обміну. Отримані значення напруг, струмів, потужностей та інших параметрів проходять первинну програмну обробку, яка включає перевірку коректності даних, приведення їх до узгоджених одиниць вимірювання та формування структурованих змінних для подальшої передачі.

З метрологічної точки зору важливим є те, що прошивка забезпечує фіксовану періодичність опитування, яка визначає інтервал дискретизації вимірювальних сигналів. Такий підхід дозволяє розглядати сформовані дані як часові ряди з відомим кроком, що є необхідною умовою для подальших розрахунків енергетичних показників і реалізації алгоритмів інтелектуального керування. Крім того, у прошивці передбачено механізми фільтрації явно помилкових значень, які можуть виникати внаслідок короткочасних збоїв зв’язку або нестабільної роботи інтерфейсів.

Для передавання вимірювальної інформації використовується протокол MQTT, що дозволяє організувати асинхронний обмін даними між ESP32 та центральним сервером. Прошивка формує окремі повідомлення для кожного вимірюваного параметра або логічно пов’язаних груп параметрів і публікує їх у відповідних MQTT-топіках. Така організація обміну спрощує інтеграцію даних у Home Assistant та підвищує прозорість структури вимірювальної інформації. З позицій метрології це також дає змогу відстежувати повноту даних і аналізувати можливі втрати повідомлень.

```
#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

Окремо слід відзначити, що прошивка ESP32 розроблена з можливістю подальшого розширення. За потреби до неї можуть бути додані додаткові вимірювальні канали, алгоритми локальної обробки даних або елементи попереднього аналізу стану акумуляторних модулів. Така гнучкість є важливою для дослідницьких задач, оскільки дозволяє адаптувати вимірювальну підсистему до нових вимог без зміни базової архітектури.

Таким чином, розробка прошивки для ESP32 забезпечує реалізацію нижнього рівня інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями СЕС, формуючи надійний канал збору та передавання метрологічно значущих даних.

3.5. Інтеграція гібридного інвертора, BMS і навантажень у HA

Дані від гібридного інвертора надходять до Home Assistant через MQTT-брокер у вигляді структурованих повідомлень, сформованих мікроконтролером ESP32. У програмному середовищі ці дані відображаються як сенсори, що відповідають основним електричним параметрам системи, зокрема потужності генерації сонячної електростанції, споживання дому, потоків енергії між акумулятором і мережею, а також режимів роботи інвертора. Кожен сенсор має чітко визначені одиниці вимірювання та період оновлення, що забезпечує коректну інтерпретацію вимірювальної інформації та можливість її використання в алгоритмах керування.

Інтеграція системи BMS акумуляторних модулів дозволяє отримувати достовірні дані про внутрішній стан накопичувача енергії, насамперед рівень заряду SOC, напругу батарейного блоку, струми заряджання і розряджання та температурні параметри. Усі ці величини представлені в Home Assistant у вигляді окремих сенсорів, що забезпечує безперервний моніторинг стану акумулятора та створює основу для метрологічно обґрунтованих рішень щодо режимів його експлуатації. Узгоджене використання даних інвертора та BMS підвищує надійність оцінювання енергетичного стану системи.

Керовані навантаження інтегруються в Home Assistant як керуючі сутності (рис. 3.4) типу switch або switch.mqtt, що дозволяє централізовано змінювати їхній стан у межах сценаріїв автоматизації.

```
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 навантажень в HA

Такий підхід забезпечує можливість гнучкого керування некритичними споживачами з урахуванням поточного стану сонячної електростанції та акумуляторних модулів, а також реалізацію пріоритетів між окремими навантаженнями.

3.6. Сценарії енергоменеджменту і автоматизації

Алгоритми керування базуються на аналізі поточних значень вимірюваних параметрів, до яких належать потужність генерації сонячної електростанції, потужність споживання дому, рівень заряду акумуляторних модулів SOC, а також напрям і величина потоків енергії між інвертором, акумулятором і електричною мережею. Усі ці дані надходять до системи керування у вигляді сенсорів з визначеною періодичністю оновлення, що дозволяє розглядати їх як узгоджені часові ряди та використовувати для прийняття керуючих рішень у режимі, близькому до реального часу.

З метрологічної точки зору важливим аспектом є використання порогових значень та гістерезису в алгоритмах керування. Рішення про перехід між режимами заряджання, розряджання або очікування приймаються не за одиничними відліками, а на основі стабілізованих значень параметрів, що зменшує вплив випадкових похибок вимірювання та короткочасних коливань. Такий підхід підвищує стійкість роботи системи та запобігає частим

перемиканням режимів, які можуть негативно впливати на ресурс акумуляторних модулів.

У межах реалізованої логіки керування пріоритет надається використанню енергії, згенерованої сонячною електростанцією, для живлення поточних навантажень дому. За наявності надлишкової генерації енергія спрямовується на заряджання акумуляторів до досягнення заданого рівня SOC. У разі недостатньої генерації та достатнього рівня заряду акумулятора система переходить у режим розряджання, компенсуючи дефіцит потужності та зменшуючи споживання електроенергії з мережі. Якщо ж рівень SOC знижується до мінімально допустимого значення, розряджання блокується, а навантаження автоматично переводяться на живлення від мережі.

Реалізація алгоритмів інтелектуального керування виконана у вигляді автоматизацій і сценаріїв Home Assistant, які використовують логічні умови (рис. 3.5), порівняння вимірюваних величин і часові затримки. Такий спосіб реалізації забезпечує наочність логіки керування та можливість її подальшого коригування без втручання в низькорівневу прошивку пристроїв. Крім того, це дозволяє легко адаптувати алгоритми до змін у конфігурації системи або до інших характеристик акумуляторних модулів.

Окрім автоматизацій, побудованих на основі заданих правил (рис. 3.6), архітектура системи передбачає можливість подальшого підключення зовнішніх оптимізаційних модулів, здатних формувати більш складні та адаптивні графіки роботи електричних навантажень. Водночас у межах цієї кваліфікаційної роботи основну увагу зосереджено на впровадженні та аналізі ефективності саме rule-based підходу до керування.

```
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


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. 3.5. Лістинг автоматизації на ввімкнення та вимкнення навантаження

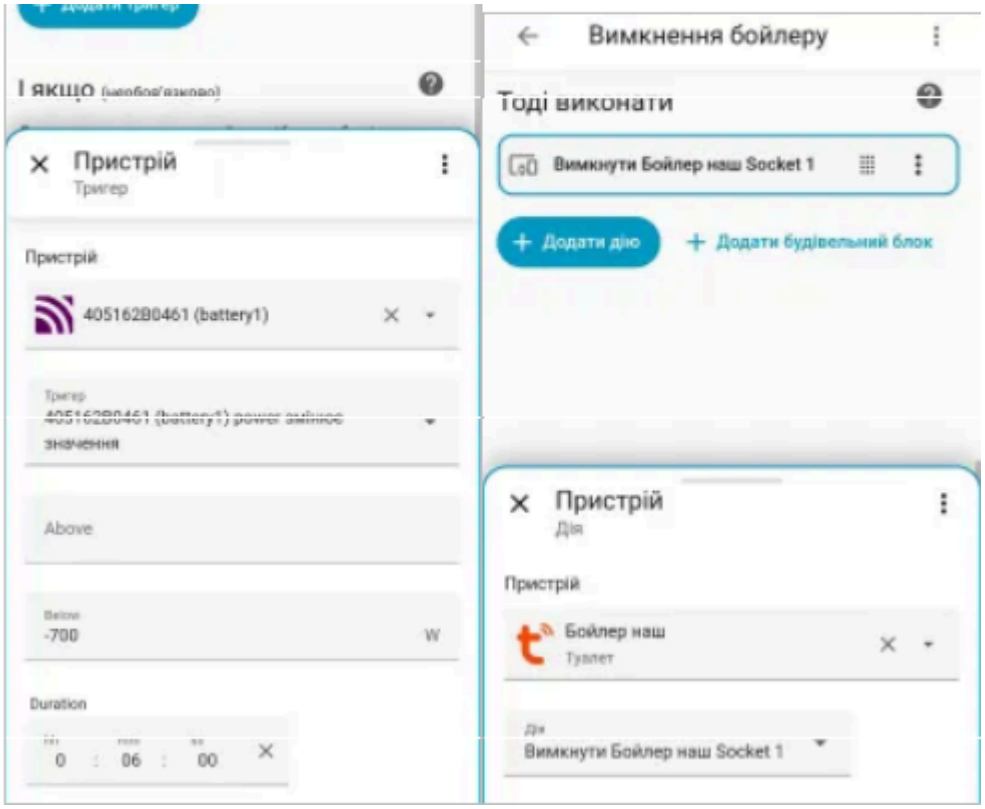

Рис. 3.6. Практичне застосування автоматизацій в HA

3.7. Методичні засади проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися в умовах реальної експлуатації сонячної електростанції, підключеної до акумуляторних модулів та побутових навантажень дому. Перед початком експериментів було виконано перевірку коректності роботи вимірювальної підсистеми, зокрема узгодженість показників, отриманих від інвертора та системи BMS, а також стабільність обміну даними між польовими пристроями та центральною програмною платформою. Особливу увагу приділено контролю часової синхронізації, що є необхідною умовою для коректного аналізу енергетичних потоків.

Методика досліджень передбачала безперервний збір вимірювальних даних протягом заданих часових інтервалів, що охоплювали різні режими роботи системи, зокрема періоди активної генерації сонячної електростанції, часткової або повної відсутності генерації, а також різні рівні споживання електроенергії будинком. У процесі експериментів фіксувалися значення потужності генерації, споживання, заряджання та розряджання акумуляторних модулів, рівень заряду SOC і обсяг електроенергії, що надходила з мережі або віддавалася в неї.

Для оцінювання ефективності інтелектуального керування застосовувався порівняльний підхід. Аналізувалася робота системи в режимі з активованими rule-based алгоритмами керування та у базовому режимі без оптимізації використання акумулятора. Основними показниками для порівняння були частка власного споживання енергії сонячної електростанції, зменшення обсягу електроенергії, спожитої з мережі, та характер зміни рівня заряду акумуляторних модулів протягом доби.

З метрологічної точки зору методика досліджень передбачала усереднення вимірювальних даних за визначеними часовими інтервалами з метою зменшення впливу випадкових похибок і короткочасних флуктуацій. Отримані часові ряди (рис. 3.7) аналізувалися з використанням вбудованих засобів візуалізації Home Assistant, що дозволило наочно оцінити динаміку основних параметрів та виявити характерні закономірності роботи системи.

Таким чином, запропонована методика експериментальних досліджень забезпечує комплексний підхід до оцінювання розробленої інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями сонячної електростанції. Вона дозволяє перевірити як технічну реалізацію вимірювально-інформаційної підсистеми, так і практичну ефективність алгоритмів керування в умовах реальної експлуатації розумного дому.

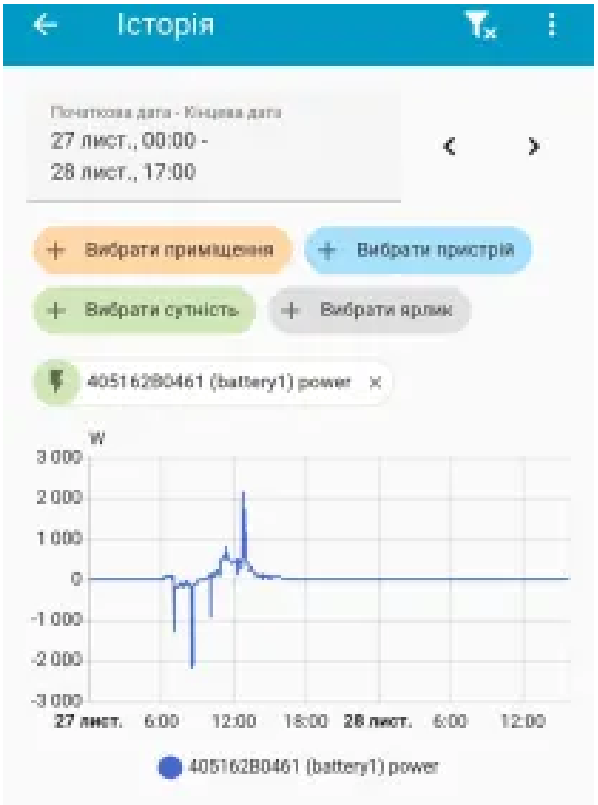

Рис. 3.7. Дані зібрані з HA

3.8 Оцінка ефективності автоматизованого керування акумуляторними модулями

Оцінка ефективності автоматизованого керування акумуляторними модулями здійснювалася шляхом порівняння показників споживання електроенергії до та після впровадження інтелектуальних алгоритмів керування в системі розумного дому. Для цього використовувалися інтегральні значення споживаної електроенергії за однакові часові інтервали експлуатації системи.

Згідно даних (рис. 3.8), використання інтелектуальної системи дозволило зменшити пікові навантаження на електричну мережу та підвищити частку електроенергії, спожитої безпосередньо від сонячної електростанції.

Зниження споживання електроенергії з мережі досягається завдяки більш раціональному використанню накопиченої енергії та своєчасному залученню акумуляторних модулів у періоди підвищеного навантаження. Отримані результати підтверджують, що автоматизація керування акумуляторами не лише підвищує енергоефективність системи, але й сприяє зменшенню навантаження на вимірювальні та керуючі канали за рахунок стабілізації режимів роботи.

Рис. 3.8. Оцінка впливу автоматизації на споживання електроенергії

3.9 Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано розроблення та практичну реалізацію інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями сонячної електростанції в системі розумного дому з урахуванням вимог до точності та достовірності вимірювань електричних параметрів. Розглянуто архітектуру вимірювально-керуючого комплексу, організацію збору даних та принципи оброблення вимірювальної інформації, що використовується для формування керувальних впливів.

У ході експериментальних досліджень підтверджено стабільність роботи системи в умовах змінної генерації сонячної електростанції та нерівномірного споживання електроенергії. Проведений аналіз показав, що використані засоби

вимірювання забезпечують необхідну повторюваність результатів, а застосування програмних методів фільтрації та усереднення дозволяє зменшити вплив випадкових складових похибки на результати оцінювання енергетичних параметрів акумуляторних модулів.

Оцінка ефективності автоматизованого керування свідчить про зменшення споживання електроенергії з електричної мережі та підвищення частки використання енергії, накопиченої в акумуляторних модулях. Це досягається завдяки узгодженій роботі вимірювальних і керуючих підсистем, що дозволяє своєчасно залучати акумуляторні модулі до енергетичного балансу системи розумного дому.

Отримані результати підтверджують доцільність впровадження розробленої інтелектуальної системи керування акумуляторними модулями з позицій енергоефективності та надійності експлуатації. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані як основа для подальшого розвитку систем енергоменеджменту з розширеними функціями прогнозування та оптимізації, а також для проведення подальших досліджень у галузі кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем.

РОЗДІЛ 4
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

Охорона праці є важливим елементом процесу розроблення й упровадження комп’ютеризованої системи енергоефективного керування гібридною сонячною електростанцією в межах кіберфізичної системи розумного дому. Під час виконання кваліфікаційної роботи здобувач здійснює аналіз науково-технічних джерел, моделювання режимів функціонування енергосистеми, розроблення програмних компонентів, а також монтаж і налагодження прототипу системи на лабораторному або реальному обладнанні. Зазначені види діяльності супроводжуються впливом потенційно небезпечних і шкідливих факторів, що зумовлює необхідність дотримання вимог щодо організації робочого місця, вибору технічних засобів і технології виконання робіт відповідно до чинного законодавства України з охорони праці та положень навчально-методичних матеріалів з техноекології та цивільної безпеки.

Робоче місце розробника зазвичай організовується в навчальній лабораторії або в приміщенні кафедри комп’ютерних систем і мереж та оснащується персональним комп’ютером із монітором, периферійними пристроями, макетами контролера збору даних, модулями зв’язку, моделями інвертора й акумуляторної батареї, а також вимірювальними приладами. В умовах такої діяльності на працівника можуть впливати низка шкідливих факторів, зокрема підвищене зорове навантаження, статичне м’язове напруження під час тривалої роботи в сидячому положенні, локальне підвищення температури повітря поблизу

електронного обладнання, шум, що створюється вентиляторами та блоками живлення, електромагнітні поля від засобів відображення інформації та комунікаційних модулів, а також ризик ураження електричним струмом під час роботи з елементами силової частини гібридної сонячної електростанції.

Згідно з вимогами чинного законодавства України у сфері охорони праці навчальний заклад зобов’язаний створити безпечні та здорові умови для навчального процесу й виконання лабораторних робіт, а здобувач освіти — виконувати вимоги інструкцій з охорони праці, правил користування обладнанням і внутрішнього розпорядку. Перед початком робіт з обладнанням гібридної сонячної електростанції студент проходить первинний інструктаж безпосередньо на робочому місці, ознайомлюється з правилами безпечного виконання електротехнічних робіт і порядком дій у разі виникнення аварійних ситуацій, після чого робить відповідний запис у журналі реєстрації інструктажів.

Організація робочого місця розробника повинна здійснюватися з урахуванням ергономічних вимог. Висота робочого стола та крісла має забезпечувати фізіологічно правильне положення тіла, за якого стопи вільно розміщуються на підлозі, а кут згину в колінних суглобах наближається до прямого. Конструкція крісла повинна забезпечувати підтримку поперекового відділу хребта, при цьому бажаною є можливість регулювання висоти та кута нахилу спинки. Засіб відображення інформації розміщують на відстані 50–70 см від очей користувача таким чином, щоб верхня частина екрана знаходилася дещо нижче рівня очей, а кут огляду становив приблизно 15–20° від горизонтальної лінії. Така організація робочого місця сприяє зниженню зорового навантаження та мінімізує ризик виникнення професійних порушень зору під час тривалої роботи з програмними 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.

Суттєвою складовою безпечної організації праці є дотримання встановлених норм мікроклімату та освітлення. Температурний режим у приміщенні з ПЕОМ має відповідати санітарним вимогам і підтримуватися з урахуванням сезонних умов, а відносна вологість — залишатися на оптимальному рівні для запобігання пересиханню слизових оболонок та виникненню статичної електрики. З цією метою застосовують системи опалення, вентиляції й кондиціювання, які забезпечують необхідний повітрообмін і відведення надлишкового тепла, що виділяється обладнанням.

Освітлення робочої зони забезпечується за рахунок раціонального поєднання природного й штучного світла. Віконні прорізи бажано розташовувати так, щоб пряме сонячне випромінювання не спрямовувалося безпосередньо на екран монітора; за потреби використовують жалюзі чи штори для його регулювання. Штучне освітлення виконують із застосуванням люмінесцентних або світлодіодних світильників, розміщених таким чином, щоб досягти рівномірної освітленості робочої поверхні без утворення відблисків на екрані та блискучих елементах обладнання. Рівень освітленості повинен відповідати чинним нормам для приміщень із відеодисплейними терміналами, оскільки

недостатнє освітлення спричиняє швидку втому зору, а надмірне — викликає засліплення та відчуття дискомфорту.

Окремим шкідливим чинником є шум, що створюється системами охолодження персональних комп’ютерів, блоками живлення інвертора, лабораторними джерелами живлення та вентиляційними установками. Тривалий вплив підвищеного шумового навантаження негативно позначається на нервовій системі, зменшує зосередженість і знижує ефективність роботи. З метою його зменшення рекомендується застосовувати малошумне обладнання, розміщувати найбільш гучні пристрої в окремих шафах або на віддаленні від робочого місця, а також регулярно проводити технічне обслуговування вентиляторів і очищення повітряних фільтрів.

Специфікою виконання кваліфікаційної роботи є проведення операцій з монтажу, налаштування та випробування складових гібридної сонячної електростанції. За таких умов одним із найсуттєвіших небезпечних чинників є ризик ураження електричним струмом. Гібридна СЕС містить як кола змінного струму з напругою 220/230 В, так і кола постійного струму підвищеної напруги, що з’єднують сонячні модулі, інвертор та акумуляторну батарею. Небезпека виникає у разі випадкового контакту з відкритими струмопровідними елементами, пошкодження ізоляції кабелів, помилок під час підключення обладнання, використання несертифікованих або саморобних подовжувачів, а також виконання робіт під напругою без належного допуску.

Для забезпечення електробезпеки всі металеві корпуси інвертора, силових щитів, шаф автоматизації та розподільчих коробок повинні бути під’єднані до системи захисного заземлення відповідно до вимог чинних електротехнічних норм. Живлення лабораторного стенда здійснюється через автоматичні вимикачі

та пристрої захисного вимкнення, які спрацьовують у разі появи струмів витоку, небезпечних для людини. Перед початком будь-яких робіт на силових ланцюгах необхідно повністю знеструмити установку, переконатися у відсутності напруги за допомогою вимірювального приладу, розмістити попереджувальні знаки та, за можливості, застосувати механічні блокування для унеможливлення повторного ввімкнення.

Додатковим джерелом підвищеної небезпеки є акумуляторні батареї, які в гібридній сонячній електростанції виконують функцію накопичення енергії. Порушення встановлених режимів заряджання або розряджання може призвести до перегріву елементів, виділення газоподібних продуктів, витоку електроліту, виникнення короткого замикання та подальшого займання шин чи струмопровідних частин. З метою мінімізації цих ризиків батарейні модулі розміщують у спеціально обладнаних зонах з достатньою природною або примусовою вентиляцією, захистом від прямого сонячного випромінювання та джерел відкритого полум’я. Під’єднання і від’єднання клем допускається лише за відсутності навантаження, із використанням інструментів з ізольованими рукоятками та відповідних засобів індивідуального захисту.

Психофізіологічні чинники, характерні для виконання кваліфікаційної роботи, зумовлені тривалою розумовою напругою, підвищеною відповідальністю за прийняті рішення, значним обсягом інформації для опрацювання, а також обмеженою руховою активністю. Для зниження їхнього негативного впливу доцільно дотримуватися раціонального режиму праці та відпочинку: робити короткі перерви через кожні 1–2 години роботи за комп’ютером, виконувати прості фізичні вправи для м’язів шиї, плечового пояса, спини та кистей рук, проводити гімнастику для очей, а також чергувати інтелектуально напружені

завдання з менш навантажувальними видами діяльності, зокрема оформленням графічних матеріалів і підготовкою звітної документації.

Вагому роль відіграє належна організація навчання з питань охорони праці. Студенти, залучені до робіт з електротехнічним обладнанням, повинні бути поінформовані про основні вимоги електробезпеки, правила використання первинних засобів пожежогасіння, а також алгоритм дій у разі виникнення пожежі, ураження електричним струмом чи отримання травм. Уповноважені особи здійснюють первинний, повторний і цільовий інструктажі, результати яких оформлюються та реєструються у встановленому порядку. Такий підхід, що узгоджується з рекомендаціями навчально-методичних джерел, забезпечує належний рівень поінформованості студентів і зменшує ризик виникнення нещасних випадків під час виконання кваліфікаційної роботи.

Отже, комплекс заходів з охорони праці під час розроблення комп’ютеризованої системи керування гібридною сонячною електростанцією включає раціональну організацію робочого місця, дотримання нормативних параметрів мікроклімату й освітлення, обмеження шумового впливу, виконання вимог електробезпеки та безпечної експлуатації акумуляторних батарей, регулювання режимів праці та відпочинку, а також належну підготовку й інструктаж студентів. Впровадження зазначених заходів забезпечує безпечні та сприятливі умови праці, підвищуючи надійність і результативність виконання кваліфікаційної роботи.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в надзвичайних ситуаціях під час експлуатації кіберфізичної системи розумного дому з гібридною сонячною електростанцією передбачає своєчасне виявлення небезпечних відхилень у роботі, запобігання розвитку аварійних режимів та зменшення їхніх можливих наслідків для людей, технічних засобів і довкілля. Гібридна СЕС належить до об’єктів підвищеної небезпеки, оскільки інтегрує електротехнічні, акумуляторні, інформаційні та програмні складові, які функціонують у тісному взаємозв’язку та взаємній залежності. Відповідно до вимог навчальних дисциплін «Цивільна безпека» та «Безпека в надзвичайних ситуаціях» [14; 15], на етапі проєктування необхідно враховувати можливі сценарії виникнення надзвичайних ситуацій техногенного й природного походження та передбачати комплекс заходів щодо захисту населення і обслуговуючого персоналу.

До найбільш імовірних надзвичайних ситуацій, пов’язаних із функціонуванням гібридної сонячної електростанції, належать пожежі, спричинені короткими замиканнями або перегрівом обладнання, аварійні режими роботи акумуляторних батарей із переходом у стан термічного розгону, ураження електричним струмом персоналу чи мешканців дому, пошкодження або руйнування конструкцій даху за умов екстремальних погодних впливів, а також відмови систем автоматизованого керування, що можуть призвести до некоректного розподілу навантажень і перевантаження окремих елементів. У сучасних кіберфізичних системах додаткову загрозу становлять кіберінциденти, за яких унаслідок несанкціонованого доступу до мережі керування можливе

втручання в режими роботи обладнання, відключення захисних функцій або штучне створення аварійних ситуацій.

Пожежна небезпека в гібридній сонячній електростанції зумовлена наявністю значних потоків електричної енергії, що перетворюються та передаються кабельними лініями, а також використанням матеріалів, здатних до займання у разі перевантажень або коротких замикань. Найвищий рівень ризику характерний для ділянок із підвищеною густиною струму, зокрема з’єднань між сонячними модулями та інвертором, контактів вимикачів постійного струму, клемних з’єднань у розподільчих щитах і місць введення кабелів у будівлю. За умов погіршення контактів, старіння ізоляції, проникнення вологи чи накопичення пилу можливе виникнення дугових розрядів, локального перегріву та займання ізоляції кабелів або прилеглих горючих конструкцій.

З метою зменшення ймовірності пожеж застосовується комплекс технічних заходів, що включає обґрунтований вибір перерізу й типу кабельної продукції, використання кабелів із негорючою або важкогорючою ізоляцією, їх прокладання в металевих чи вогнестійких кабель-каналах, встановлення автоматичних вимикачів і запобіжників відповідного номіналу, а також застосування пристроїв захисту від перевантажень і струмів короткого замикання. У зонах розміщення інвертора, акумуляторних батарей і силових щитів доцільно передбачати встановлення датчиків температури та диму, сигнали з яких передаються до системи керування розумного дому. У разі фіксації небезпечних відхилень система здатна автоматично знеструмлювати окремі ділянки, формувати сигнал тривоги та інформувати користувача через мобільний застосунок.

Окремого розгляду потребує безпека акумуляторних батарей, які за аварійних режимів експлуатації можуть перетворюватися на джерело пожежі або

вибуху. Перевищення допустимих струмів заряджання чи розряджання, перегрів елементів, механічні ушкодження корпусів, а також короткі замикання на виході батарейного блока здатні спричинити інтенсивне тепловиділення, руйнування електродів і утворення горючих газів. Запобігання таким небезпечним процесам забезпечується системою керування акумулятором (Battery Management System), яка здійснює контроль напруги та температури окремих осередків, обмежує зарядні струми, а також реалізує захист від глибокого розряду й перезаряджання. З конструктивної точки зору батарейні модулі розміщують у приміщеннях або шафах із достатньою вентиляцією та вогнестійкими огородженнями, на безпечній відстані від джерел тепла й відкритого полум’я, із передбаченою можливістю оперативного відключення за допомогою роз’єднувачів або автоматичних вимикачів.

У разі виникнення пожежі або появи ознак термічного розгону акумуляторної батареї необхідно негайно знеструмити систему, відключивши мережевий ввід, інвертор і контролер заряду, а за можливості — від’єднати батарейний блок від інших елементів установки, після чого повідомити пожежно-рятувальну службу. Використання первинних засобів пожежогасіння здійснюється з урахуванням рекомендацій виробника акумуляторів і класу пожежі; при цьому забороняється застосовувати воду для гасіння установок, що перебувають під напругою, а також батарей, для яких такий спосіб прямо заборонений експлуатаційною документацією.

Не менш суттєвою в умовах надзвичайних ситуацій є небезпека ураження електричним струмом. Якщо за штатних режимів експлуатації система проєктується таким чином, щоб виключити доступ користувачів до струмопровідних елементів, то у разі пошкодження корпусів, руйнування ізоляції,

затоплення приміщень або обвалення конструкцій можливе виникнення небезпечної напруги на металевих частинах обладнання. Для запобігання таким явищам застосовують системи захисного заземлення та автоматичного вимкнення живлення у разі замикання на землю чи корпус. У випадку підтоплення приміщень, де розміщені інвертор і електричні щити, першочерговими заходами є повне знеструмлення будівлі, обмеження доступу сторонніх осіб до потенційно небезпечних зон, а також проведення візуального й інструментального контролю стану ізоляції перед повторним увімкненням обладнання.

Додаткові загрози можуть виникати під впливом природних чинників, таких як сильний вітер, зливи, град, снігові заметілі та блискавкові розряди. Пошкодження кріплень сонячних панелей на покрівлі, руйнування даху чи потрапляння води в електричні коробки здатні призвести до коротких замикань, оголення струмопровідних частин і виникнення пожежі. З огляду на це на етапі проєктування передбачають застосування корозійностійких кріпильних елементів, розрахунок вітрових і снігових навантажень, надійну гідроізоляцію місць введення кабелів, встановлення систем блискавкозахисту та пристроїв захисту від імпульсних перенапруг. Після екстремальних погодних явищ обов’язково проводять позачерговий огляд сонячних модулів, кабельних трас, інвертора та розподільчих щитів.

Кіберфізична сутність системи «розумний будинок» полягає у функціонуванні складної інфраструктури, що охоплює численні датчики, контролери, засоби зв’язку та сервери для збору й обробки інформації. Порушення роботи цієї інфраструктури під час аварійної ситуації може призвести до запізнілого виявлення небезпеки, тоді як несанкціонований доступ або цілеспрямовані атаки здатні спровокувати штучні загрози. З метою мінімізації

таких ризиків застосовують комплекс сучасних засобів інформаційної безпеки, зокрема ідентифікацію та автентифікацію користувачів, розподіл рівнів доступу, криптографічний захист передаваних даних, журналювання подій і резервне збереження конфігурацій. У системах керування також закладають аварійні сценарії переходу в безпечний режим при втраті зв’язку з окремими елементами, а також передбачають можливість прямого ручного впливу на критично важливі компоненти, такі як аварійне відключення інвертора, примусове знеструмлення другорядних навантажень або переведення комплексу в режим зниженого споживання.

Не менш значущу роль у забезпеченні безпеки під час надзвичайних подій відіграють організаційні заходи. На об’єктах, оснащених гібридною сонячною електростанцією, розробляються регламентні інструкції щодо дій персоналу та мешканців у разі пожежі, ураження електричним струмом, несправностей акумуляторних батарей чи відмови системи керування. Чітко визначаються відповідальні особи за оповіщення аварійно-рятувальних служб, знеструмлення обладнання, організацію евакуації та надання домедичної допомоги. У доступних і добре помітних місцях розміщують плани евакуації, схеми розташування вогнегасників, аптечок і аварійних вимикачів, а також контакти екстрених служб.

Кіберфізична платформа «розумного дому» може також виконувати функції допоміжного засобу цивільного захисту. Вона забезпечує автоматичний контроль сигналів від датчиків диму, температури, витоку газу або води, формує попереджувальні та аварійні сповіщення для власників на мобільні пристрої, активує світлову й звукову сигналізацію та здійснює керування системами димовидалення й протипожежної автоматики. Запровадження таких можливостей

скорочує час реагування на небезпечні події та підвищує ефективність їх локалізації на початкових етапах.

Отже, безпечна експлуатація комп’ютеризованої системи енергоефективного керування гібридною сонячною електростанцією в умовах розумного дому досягається завдяки комплексному застосуванню інженерно-технічних, програмних і організаційних рішень. Такий підхід передбачає обґрунтований добір та коректне встановлення електротехнічного обладнання, використання сучасних засобів захисту від аварійних режимів роботи, впровадження систем моніторингу й автоматичного оповіщення, а також належну підготовку та навчання користувачів і завчасне опрацювання алгоритмів дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій. Дотримання положень, наведених у навчально-методичних матеріалах з техноекології та цивільної безпеки [1; 2], дає змогу суттєво зменшити ризики для персоналу, мешканців і довкілля та забезпечити стабільну й безпечну роботу гібридної сонячної електростанції як елемента кіберфізичної системи розумного дому.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто задачу створення інтелектуальної вимірювально-керуючої системи для акумуляторних модулів гібридної сонячної електростанції, інтегрованої в кіберфізичну систему розумного дому. Актуальність дослідження зумовлена зростанням ролі відновлюваних джерел енергії, ускладненням енергетичних систем та підвищенням вимог до точності, надійності й безпеки керування енергоспоживанням.

Проведено аналіз сучасних систем енергоменеджменту розумного дому, який показав, що більшість існуючих рішень не забезпечує достатньої метрологічної достовірності вимірювань, необхідної для ефективного керування акумуляторними батареями. Визначено ключові параметри, що впливають на роботу системи, а саме точність вимірювання напруги, струму, температури та коректність оцінювання ступеня зарядженості акумуляторів.

Обґрунтовано вибір відкритої апаратно-програмної архітектури на базі мікроконтролерів ESP32, одноплатного комп’ютера Raspberry Pi та програмної платформи Home Assistant, що дозволяє інтегрувати дані від інвертора, BMS і вимірювальних модулів у єдину систему керування. Розроблено моделі вимірювальних каналів з урахуванням основних джерел похибок та запропоновано програмні методи їх зменшення шляхом калібрування, цифрової фільтрації та передискретизації.

Особливу увагу приділено задачі оцінювання ступеня зарядженості акумуляторних батарей. Показано, що для літій-залізо-фосфатних акумуляторів методи визначення SOC лише за напругою є недостатньо точними. Запропоновано

алгоритм, що поєднує кулонометричний метод з корекцією за напругою та забезпечує підвищення достовірності оцінки стану акумуляторів.

Реалізовано апаратно-програмний комплекс інтелектуального керування, який забезпечує оптимізацію режимів заряджання та розряджання акумуляторів, а також керування некритичними навантаженнями. Результати досліджень підтвердили, що підвищення точності вимірювальної інформації сприяє зростанню енергоефективності системи та подовженню ресурсу акумуляторних батарей.

У межах розділу з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях проаналізовано ризики експлуатації гібридної сонячної електростанції в розумному дому та обґрунтовано необхідність комплексного поєднання інженерно-технічних, програмних і організаційних заходів безпеки. Застосування запропонованих рішень дозволяє підвищити надійність і безпечність функціонування системи.

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні й удосконаленні систем енергоменеджменту розумного дому, а також у навчальному процесі за напрямом «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яворська М. І., Наконечний Ю. І., Апостол Ю. О. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів денної та заочної форм навчання спеціальності 175 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. 58 с.

2. Автоматизація виробничих процесів : навч. посіб. / Проць Я. І., Савків В. Б., Шкодзінський О. К., Ляшук О. Л. Тернопіль : ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 344с.

3. Букетов А. В., Стухляк П. Д., Кальба Є. М. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів. Тернопіль: Збруч, 2005. 182 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. Diahovchenko I., Kolcun M., Čonka Z., Savkiv V., Mykhailyshyn R. Progress and challenges in smart grids: Distributed generation, smart metering, energy storage and smart loads. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2020. Vol. 44. P. 1319-1333. https://doi.org/10.1007/S40998-020-00322-8.

16. Palamar A., Pettai E., Beldjajev V. Control System for a Diesel Generator and UPS Based Microgrid. Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering. 2010. Vol. 27. P. 47-52.

17. Vasylkivskyi 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. Wieclaw L.; Pasichnyk V.; Kunanets N.; Duda O.; Matsiuk O.; Falat P. Cloud computing technologies in “smart city” projects. In Proceedings of the 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). Bucharest: Romania, 21–23 September 2017. pp. 339–342.

19. Yaskiv V. Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies. Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC’04), Aachen, 2004. P. 1658–1662.

20. Драґан Я.П., Яворський Б. І., Яворська Є. Б.Концепції і принципи побудови моделей для означення метрологічних характеристик ритміки кардіосигналів. Вісник нац. унів. “Львівська політехніка”: зб. наук. пр. Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2002. № 443. С. 200-205.

21. Коваль В. П., Івасечко Р. Р., Козак К. М. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2015. № 3. С. 2-10.

22. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.

23. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.

24. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.

25. Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп’ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.

26. Стухляк П.Д., Букетов А.В. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням. Тернопіль: Збруч, 2009. 237 с.

27. Ткачук Р., Яворський Б. Метод побудови біотехнічної системи для оцінювання електроретинограм з підвищеною вірогідністю та ефективністю. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2009. №3. С. 102-110.

28. Яворський Б. І. Математичні основи радіоелектроніки. Частина І. Тернопіль: ТПІ імені Івана Пулюя. 1996. 184 с.

29. Юзьків А. В., Яворський Б. І. Математичне моделювання електроретинографічних сигналів. Вісник ТДТУ. Тернопіль, 1997. № 2. С. 40-45.

30. 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.

31. 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.

32. 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
Маріборский 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, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ		297
44.	**К. П. Марущак, Г. В. Козбур** ЕФЕКТИВНІ ПІДХОДИ ДО ВІЗУАЛЬНОГО ПОДАННЯ КАТЕГОРІЙНИХ ДАНИХ		299
45.	**Матисюк І.В** БІОДРУК. 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 МОНІТОРІНГУ ПОТОКУ ЛЮДЕЙ У ГРОМАДСЬКИХ МІСЦЯХ НА ОСНОВІ IOT-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 ЦИФРОВОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ МУЗЕЙНИХ ФОНДІВ		314
54.	**О.А. Пастух, Х.О. Новицька** МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМІ 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 СИГНАЛІВ У ПРОЦЕСІ РЕАБІЛІТАЦІЇ ПАЦІЄНТІВ		318
57.	**А.В. Павлик, А.М. Паламар** КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ		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 мікровольтних 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 IOT 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

М А Т Е Р І А Л И

XIII 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
H. 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. Pereimybida
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. Pereimybida
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. Rii, Ie. 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 зміщувати 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 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.